



## SÉANCE SUPPLÉMENTAIRE DU 7 JUIN 1949.

*Présidence de M. M.-E. DENAEYER, président.*

La séance a été spécialement consacrée à la projection du beau film en couleurs de M. H. TAZIEFF sur l'éruption volcanique de 1948 au Nord du lac Kivu, éruption dont l'auteur avait décrit les premières manifestations dans sa communication à la séance du 4 mai 1948.

Toutefois, avant la projection du film qu'il a accompagnée de commentaires puisés dans le vif du sujet, M. TAZIEFF a introduit celui-ci en développant sur le volcanisme des idées personnelles dont il voit une application dans les éruptions du Kivu. Nous lui avons demandé de reproduire ici dans leurs grandes lignes les vues qu'il nous a exposées, persuadés que leur ampleur et leur originalité ne manqueront pas d'intéresser une grande partie de nos collègues.

### **Quelques considérations sur les causes du volcanisme, à propos de l'éruption du Kituro (Kivu 1948) (\*),**

par H. TAZIEFF.

S'il n'existe pas encore d'explication définitive des phénomènes volcaniques, de nombreuses théories, généralement en liaison avec celles de la tectogénèse, tentent cependant d'en définir les causes.

Nous sommes évidemment loin aujourd'hui de l'idée que les volcans constitueraient des « soupapes de sûreté » à une sphère de magma en fusion recouverte par la carapace terrestre. Mais les idées sont multiples qui cherchent à découvrir les raisons du volcanisme : ascension du magma par la force des gaz nés de sa propre différenciation; pressions énormes de la vapeur engendrée par l'irruption en profondeur des eaux océaniques; fusion des roches par déséquilibre physico-chimique consécutif à un effondrement profond (graben, rifts); fusion des roches

---

(\*) Manuscrit reçu au Secrétariat le 10 septembre 1949.

(asthénolithes) par suite d'un accroissement local de chaleur ou d'une variation de pression; effets calorifiques de la radioactivité...

En ce qui concerne la tectogénèse, les hypothèses sont également nombreuses : effets du refroidissement (hypothétique) de la croûte terrestre; effets de la pesanteur (Haarman), du métamorphisme (Perrin), de la dérive des continents (Wegener); effets de tensions causées par refroidissement différentiel des aires continentales et océaniques (Ross Gunn); action des courants de convection profonds (Vening-Meinesz, Holmes, Griggs)...

Volcanisme et tectogénèse sont étroitement en corrélation, et les théories expliquant l'éruption de matière volcanique doivent s'accorder à celles qui rendent compte de la naissance des chaînes plissées.

Il est d'ailleurs fort probable qu'un dosage des diverses hypothèses émises soit nécessaire pour englober dans une explication commune tous les faits observés, et, si des plissements naissent sous l'action de courants de convection magmatiques, d'autres peuvent résulter de la dérive continentale, elle-même née de courants profonds, de glissements gravitatifs sur un plan incliné ou de soulèvements dus à l'expansion asthénolithique.

Il semble que la plus harmonieuse et la plus compréhensive de ces théories, celle aussi qui est basée sur un maximum de faits et de calculs et non de simples suppositions, soit celle des courants de convection. Faut-il dire qu'elle respecte pleinement le *sine qua non* qu'Argand formulait en 1921, lorsqu'il déclarait qu'il n'est pas de synthèse tectonique sans vision d'un continu à trois dimensions en train de se former ?

Un aperçu succinct de cette théorie, basée sur le principe de l'isostasie, l'étude de la gravité terrestre et de la répartition géographique et géologique des principaux traits de l'écorce, nous permettra d'avoir une idée des causes probables (ou possibles) du volcanisme.

C'est à la suite des observations faites au cours des croisières gravimétriques du grand géophysicien hollandais Vening-Meinesz dans les îles de la Sonde, confirmées par la suite par les mesures gravimétriques faites au Japon et aux Antilles, que fut émise par lui-même, et reprise par A. Holmes et par D. Griggs notamment, l'hypothèse que des courants de convection profonds affectent le « manteau » basique qui, recouvrant le noyau terrestre, sert de substratum à la carapace.

Si, venant du large, on fait une coupe passant par un arc insulaire tel que celui de la Sonde ou celui des Antilles, on rencontre d'abord les grands fonds océaniques, d'une profondeur moyenne de 4.000 à 6.000 m, caractérisés par des anomalies positives de la gravité. Puis, successivement, lorsqu'on passe à l'aplomb d'une fosse extrêmement profonde atteignant de 7.000 à 10.500 m, l'anomalie gravimétrique atteint un maximum pour descendre brusquement sur le flanc raide de la fosse, arriver à un minimum de  $-100$  à  $-200$  mgal, et remonter ensuite tout aussi brusquement à un nouveau maximum positif dès que la fosse est dépassée.

Vues en plan, les anomalies négatives forment des bandes larges d'une centaine de kilomètres et longues de plusieurs milliers de kilomètres. Dans leur profondeur elles contiennent le lieu des hypocentres séismiques. Elles devraient leur caractère négatif surprenant à une accumulation de sédiments meubles, dont la densité moyenne est voisine de 2 alors que celle des fonds océaniques voisins approche de 3. Elles correspondraient à des géosynclinaux en voie d'écrasement, à des montagnes en gestation. L'amorce de géosynclinaux de l'espèce, leur approfondissement, la compression des sédiments qui s'y accumulent trouveraient leur origine dans la dépression de la croûte que provoquent les courants de convection descendants du sima profond.

Dans le sima, de tels courants doivent exister, bien que la viscosité soit énorme et atteigne des valeurs qui varient de l'ordre de  $10^{29}$  à la partie supérieure du manteau à  $10^{19}$  au bord du noyau central (1).

---

(1) Le sima profond, dont la géophysique nous révèle peu à peu les propriétés, est un liquide au sens moléculaire du terme. Le verre, la cire et la poix, dont l'aspect est solide, sont également des liquides quant à leur comportement. Le sima vitreux peut fluer, ses molécules étant mobiles l'une par rapport à l'autre, et l'on peut, l'on doit, à son propos, parler de viscosité.

Ces propriétés, qui sont celles des corps liquides, n'empêchent cependant pas qu'il puisse se produire au sein du sima vitreux, des réactions apparentées à celles des corps solides, et notamment qu'il y existe des plans de fracture qui nous sont révélés par les séismes profonds. L'idée classique que les failles vont en s'amortissant dans l'intérieur de la Terre doit être abandonnée et remplacée plutôt par la conception opposée suivant laquelle des failles qui prennent naissance à 500, 600 ou 700 km de profondeur tendent à s'atténuer en se rapprochant de la surface.

Malgré cette viscosité extraordinaire, Pekeris, Vening-Meinesz et Griggs ont calculé que la vitesse des courants de convection doit approcher de 0<sup>m</sup>50 à 1 m par an. Sans même que cette intervention dynamique des courants entre en jeu, la force d'isostasie à elle seule soulève la Scandinavie à raison de 1 mm par an. Ce soulèvement se poursuit, en s'atténuant, depuis la fusion de la dernière calotte glaciaire au Quaternaire.

Cette fluidité du substratum est cependant une fluidité à l'échelle terrestre, c'est-à-dire qu'à l'échelle humaine elle semble nulle, et la matière solide. Celle-ci manifeste d'ailleurs des propriétés de corps solide par ses réactions aux efforts brusques ou aux excès de tension, réactions qui se traduisent par les séismes, résultats de fractures profondes, et par des ondes dont la vitesse permet de mesurer l'élasticité du milieu.

Mais, par contre, le sima profond réagit de façon plastique s'il est sollicité par des forces suffisantes et d'application prolongée. Il commence alors à fluer et il se déplace malgré son énorme viscosité. Dans ce sima vitreux et relativement mobile, des courants peuvent naître, notamment sous l'effet du déséquilibre thermique réalisé à la base de la croûte terrestre superficielle; les continents sialitiques, en effet, riches en minéraux radioactifs, dégagent une quantité de chaleur fort supérieure à celle qui est émise par les fonds basaltiques des océans, à la fois minces et pauvres en éléments radioactifs. On a calculé qu'une différence de 200° C pouvait exister à la zone de contact entre le sima profond et la base des continents, d'une part, et celle des océans, de l'autre. Une telle différence de température est plus que suffisante pour déterminer la naissance de courants de convection tendant à rétablir l'équilibre thermique. Calculs et expériences diverses (D. Griggs) montrent que ces courants se répartissent en « cellules » de courants subverticaux descendants de matière relativement froide, se raccordant par des courants subhorizontaux à des courants ascendants de matière plus chaude.

Ces courants, qui entraînent à une vitesse relativement rapide une matière extraordinairement visqueuse, déterminent dans la base solide des continents et des océans des tensions énormes. Alors que les sédiments meubles d'un géosynclinal né entre les branches descendantes de deux cellules voisines se plissent avec facilité, les roches encaissantes depuis longtemps consolidées ne peuvent céder autrement qu'en se fracturant. Et, si des frac-

tures importantes se produisent à l'aplomb d'une zone où le sima est relativement proche de la surface, les conditions se trouvent réalisées pour la génération de volcans. La figure n° 1 illustre ce phénomène.

L'anomalie négative est due à l'accumulation de matière légère sédimentaire ainsi qu'à un bourrelet de sialsima provoqué par l'aspiration convectionnelle. Par contre, un amincissement et une incurvation vers le haut de cette pellicule de sial-

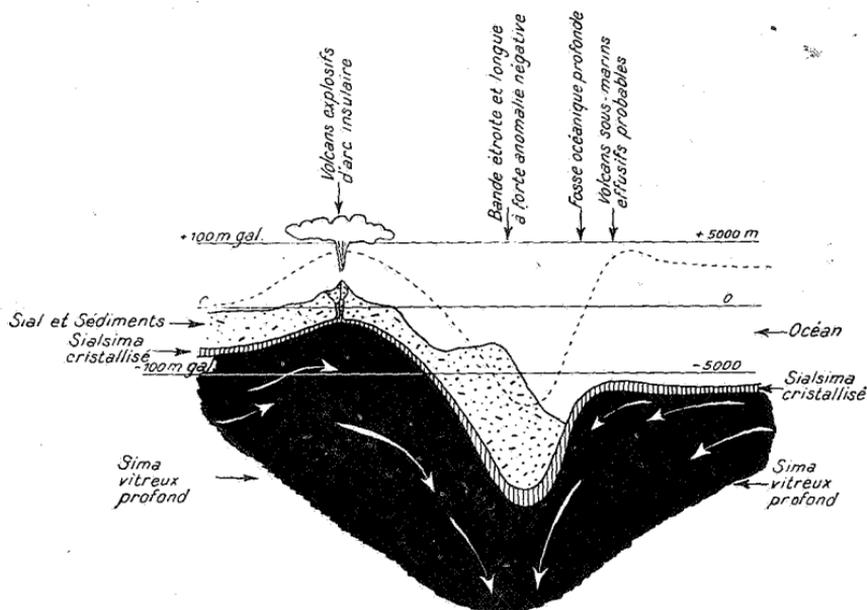


FIG. 1.

sima et, de ce fait, l'arrivée à faible profondeur du sima dense déterminent, de part et d'autre du géosynclinal, les zones à forte anomalie positive.

Le volcanisme est engendré par les fractures du sialsima et du sial étirés et amincis, et il est probable que des éruptions sous-marines se localisent sur le bord opposé de la profonde fosse océanique. La carte du relief sous-marin, au large de Java, par exemple, est démonstrative à cet égard : des hauteurs à base circulaire dominant de plus de 2.000 m les grands fonds océaniques subhorizontaux qui sont aux environs de 6.000 m de profondeur; ces hauteurs coniques, à très fortes anomalies posi-

tives de la gravité, sont certainement des volcans, symétriquement situés par rapport à ceux de Java, de part et d'autre de la fosse profonde.

Lorsque le cycle de la convection se termine, par rétablissement de l'équilibre thermique dans le secteur, l'isostasie fera peu à peu remonter des profondeurs la nouvelle chaîne plissée, et le volcanisme décroîtra progressivement. On a calculé qu'un cycle de convection, fondé sur la montée de la matière depuis la base du manteau (2.900 km) jusqu'à son sommet (60 km de profondeur) se répartirait en quatre phases successives :

	Années
1. Accélération progressive des courants ... ..	25 × 10 <sup>6</sup>
2. Courants rapides . ... ..	10 × 10 <sup>6</sup>
3. Ralentissement des courants ... ..	25 × 10 <sup>6</sup>
4. Arrêt, surrection des chaînes . ... ..	500 × 10 <sup>6</sup>

La théorie de la convection explique donc harmonieusement l'orogénèse des chaînes nouvelles, ses relations étroites avec les séismes de grande et de moyenne profondeur, *et avec la génération de volcans.*

Si l'on examine la carte, on remarquera immédiatement que tout autour de l'océan Pacifique, au bord Nord-Est de l'océan Indien, aux Antilles et en Méditerranée, se retrouve cette conjonction caractéristique : fosse étroite et profonde à anomalies positives sur ses deux lèvres, mais à fortes anomalies négatives en son centre, et chaîne volcanique à anomalie positive. En relation directe avec ces régions, on rencontre toujours une forte sismicité. Nous appellerons « volcans de cordillère » les volcans de ces régions; ce sont ceux des Andes, de l'Amérique centrale, des Rocheuses, des Aléoutiennes, du Kamtchatka, des Kouriles, du Japon, des Philippines, des Mariannes, des Nouvelles-Hébrides, des Tonga, de l'Insulinde, des Antilles et de la zone méditerranéenne.

Il existe cependant nombre de volcans situés en dehors de ces régions orogéniquement vivantes : chaîne hawaïenne au centre du Pacifique; volcans s'étendant du Nord au Sud dans l'océan Atlantique (Jan Mayen, Islande, Canaries, Cap-Vert, Sainte-Hélène, etc.); volcans jalonnant la mer Rouge; volcans de l'océan Indien, entre Madagascar, l'Inde et l'Australie; entre l'Antarctique et l'océan Indien (volcans Bouvet, Crozet, Kerguelen) et enfin, les seuls volcans existant au milieu d'une masse continentale, les volcans des rifts et graben africains.

Si l'on examine la position géographique de ces volcans, on remarque tout d'abord qu'ils se disposent, non plus suivant des arcs incurvés à proximité de profondes tranchées, mais en lignes relativement droites, entourées de part et d'autre par des zones à relief équivalent. En effet :

1° les volcans de l'Est africain et ceux de la mer Rouge, tout le long de la zone relativement rectiligne des grandes fractures, et où l'altitude du socle ancien, de part et d'autre des tranchées volcaniques, est sensiblement la même;

2° la chaîne des Hawaï s'étirant au milieu du Pacifique, sur une ligne droite de près de 2.000 km de long, de direction W.-N.-W., de part et d'autre de laquelle la profondeur est de 5.000 m environ sur d'immenses étendues;

3° dans le Sud de l'océan Pacifique, on observe plusieurs groupes, à axe rectiligne, d'îles volcaniques qui dominent de grands fonds subhorizontaux très étendus; citons l'axe : îles Samoa, îles de l'Union, îles Phoenix, plus ou moins N.-S., sur environ 1.800 km; l'axe de l'archipel des Tuamotu à volcanisme ancien, N.-W. sur environ 3.000 km, et, parallèlement à lui, ceux des îles de la Société (Tahiti), 5.000 km; de Cook, 3.000 km, et des îles Australes, 1.500 km;

4° entre le continent antarctique et les continents septentrionaux, s'étirant de l'Ouest à l'Est, une crête sous-marine est jalonnée par une série d'îles volcaniques : Bouvet, Prince Édouard, Crozet, Kerguelen, Nouvelle-Amsterdam, Saint-Paul, Macquarie, Royal Company...;

5° dans l'océan Indien, des volcans émergent des étendues marines qui séparent l'Afrique de Madagascar et Madagascar de l'Australie. Ici, comme plus haut, les profondeurs océaniques, de part et d'autre des volcans, sont du même ordre de grandeur;

6° l'océan Atlantique, enfin, est jalonné par des volcans situés sur une série de lignes droites subparallèles; du Nord au Sud, Jan Mayen-Islande-Madère s'étirant sur 3.800 km; Canaries—Cap-Vert—Bissagos, sur 2.400 km; Ascension-Tristan da Cunha-Diego Alvarez, sur 4.200 km; et, plus près de la côte africaine, la ligne Cameroun, Principe, Annobon, San Thomé et Sainte-Hélène s'étirant sur 3.000 km sur une crête légèrement marquée de direction S.-S.-W.

Il est, d'autre part, extrêmement probable que de très nombreux volcans sous-marins sont jusqu'à présent indétectés, tant dans les régions depuis longtemps consolidées que dans les zones tectoniquement jeunes et actives.

S'opposant aux volcans de cordillère liés à la tectogénèse, au plissement de sédiments en chaînes de montagnes nouvelles, les volcans que nous considérons maintenant se trouvent tous au milieu de cratogènes, si par ce terme nous entendons des masses rocheuses consolidées : le continent africano-arabe, le fond pré-archéen de l'océan Pacifique, le fond de l'Atlantique et celui de l'océan Indien.

Ces cratogènes, depuis longtemps rigides, soumis à des forces dont l'origine peut être discutée, une fois dépassées leurs limites d'élasticité, cèdent en se fracturant suivant des cassures relativement rectilignes, au contraire des géosynclinaux plastiques qui, comme dit Argand, fonçant entre deux butoirs, deux môles rigides, s'incurvent en arcs plus ou moins accentués. Si l'on admet les idées mobilistes de Wegener, d'Argand et de Du Toit, la naissance des volcans cratogéniques de l'Atlantique, de l'océan Indien et des mers Australes s'explique par la disjonction même des blocs continentaux initiaux, Gondwanie, d'une part, Laurasie, de l'autre.

Les volcans africains résultent de la fracturation du vieux continent sous les efforts opposés qui tendent à l'entraîner, les uns vers l'Ouest, les autres vers l'Est, et il en est de même de ceux de la mer Rouge et de l'Arabie. Sur les bords des blocs continentaux séparés par la dérive, des volcans surgissent çà et là : mont Cameroon en Afrique occidentale, volcans de la rive atlantique canadienne, volcans de la rive antarctique, dont deux au moins sont notoirement actifs : l'Erebus et le Terror.

Quant aux volcans cratogéniques du vieux Pacifique, ils pourraient fort bien résulter des efforts cisailants dus à des courants de convection profonds selon, par exemple, la carte schématique de R. Schwinner.

L'isostasie doit être acceptée comme un fait, prouvé notamment par le relèvement du bouclier scandinave à la suite de sa déglaciation. D'autre part, la variation de longitudes, géodésiquement mesurées entre l'Europe et l'Amérique, montre que les continents peuvent se déplacer horizontalement, ne serait-ce que de quelques mètres. Si le substratum est suffisamment

plastique pour permettre de tels rajustements, *directement mesurables*, il n'y a aucune raison pour qu'il ne permette pas également le déplacement des masses continentales sur de grandes distances.

Que les courants de convection soient le facteur déterminant de la formation des fosses géosynclinales, de leur compression en chaînes plissées, embryons de montagnes que l'isostasie repoussera vers le haut, et du volcanisme de cordillère qui les accompagne; que ces mêmes courants se trouvent aussi à l'origine des déplacements continentaux, des réseaux de grandes fractures de compression et de torsion, des graben, rifts et horsts continentaux et sous-marins, et finalement du volcanisme de cratogènes, voici qui satisfait singulièrement l'esprit humain avide de synthèse harmonieuse et logique.

Les chaînes plissées cénozoïques de la Thétys sont jalonnées de volcans, éteints lorsqu'ils sont en rapport avec les plissements les plus anciens, en activité s'ils bordent les cordillères récentes qui sont encore, en fait, en voie de plissement profond et de surrection marquée.

Les Antilles sont célèbres par la montagne Pelée, dont l'éruption de 1902 tua les 30.000 habitants de Saint-Pierre de la Martinique, et par la Soufrière de Saint-Vincent.

Tout le monde connaît la réputation des volcans méditerranéens, à l'intérieur de l'arc des Appennins; la plus récente des chaînes alpines : Vésuve, Stromboli, Etna, Vulcano. Le Santorin, dans la mer Égée, dans l'alignement de la Thétys ancienne, sert de relais entre les volcans italiens et ceux de la chaîne caucasienne, Ararat, Demavend, Elbrouz. Au delà, à l'endroit où le plissement alpin a atteint son maximum d'intensité, l'Himalaya et les montagnes connexes ne possèdent aucun volcan actif en liaison avec elles. Par contre, la séismicité à l'aplomb de ces chaînes est considérable, ainsi qu'elle l'est, nous l'avons vu, dans les géosynclinaux en voie de formation près des profondes fosses océaniques. Ceci tend à prouver que la séismicité est en rapport direct avec le plissement, mais que le volcanisme, qui d'habitude lui est lié, ne peut se produire que si le sima du manteau profond est à même de se frayer un passage jusqu'à la surface grâce au réseau de fractures de la pellicule superficielle distendue.

Il est évident qu'avant que ne s'achevât l'écrasement du gigantesque géosynclinal, et que l'Inde ne se fût accolée au continent

asiatique, de part et d'autre des cordillères en formation devait régner un volcanisme intense. Mais l'écrasement ultérieur de la chaîne, amené à son paroxysme par la continuation des poussées convergentes de l'Inde et de l'Asie, a dû provoquer, à la base même de la croûte terrestre, là où son amincissement avait déterminé les phénomènes volcaniques, une sorte de « colmatage » par charriage des socles anciens sur ou sous les plis de la chaîne nouvelle, qui a dès lors interrompu tout accès de la lave à la surface. Seuls les séismes violents et nombreux témoignent encore de la jeunesse de la plus puissante chaîne montagneuse du globe.

On remarquera, par contre, que les volcans de cratogènes se trouvent dans des régions moins séismiques. Que des tremblements de terre s'y produisent, c'est logique, soit que, les forces déterminant la dérive étant éteintes en tel ou tel endroit, des rajustements d'équilibre se fassent, accompagnés de ruptures brusques consécutives à l'accumulation excessive de tensions diverses, soit que l'étirement du sial sous les efforts puissants des courants de convection provoque des fracturations brutales du socle. Mais ces tremblements de terre sont beaucoup moins violents et beaucoup plus rares que ceux des régions où l'orogénèse nouvelle s'accompagne des volcans de cordillère.

Volcans et séismes ont donc une origine commune, mais entre eux n'existe pas de relation de cause à effet.

Nos volcans du Kivu ont cette particularité unique d'être les seuls volcans du monde (à moins que n'en contienne le continent antarctique) à être actuellement en activité constante, ininterrompue, au cœur même d'un continent. De ce fait, leur étude, qui serait relativement très aisée, serait d'un intérêt immense, non seulement pour la vulcanologie proprement dite, mais pour la géologie en général, la géophysique et la connaissance profonde du globe. Par l'étude détaillée des roches sialitiques encaissantes, de la nature des laves et surtout de leurs variations chimiques *dans le temps*, par l'étude surtout des phénomènes géophysiques, gravité et magnétisme, et enfin par des mesures géodésiques précises, on pourrait, dans cette région, augmenter de façon substantielle les connaissances que l'on a de la Terre.

A. Holmes (*Physical Geol.*, 1945, p. 441) écrit : « Les rift-valleys d'Afrique, l'un des traits majeurs de la tectonique du monde, fournissent un champ magnifique pour l'exploration et la recherche futures ».

Les Britanniques, sur la surface qui leur appartient dans les champs de laves des Virunga, malheureusement dénuée de volcans actifs, ont déjà fait un travail magnifique : levés géologiques détaillés du substratum archéen (A. C. Combe), étude pétrographique et chimique très approfondie des dites laves (A. Holmes et H. F. Harwood) et mesures des anomalies de la pesanteur (E. C. Bullard).

A l'instar des autres nations qui possèdent sur leur territoire des volcans en activité, la Belgique se doit de créer un centre permanent d'observations et d'études. Ce que les États-Unis, la Hollande, l'Italie, l'Union Soviétique et le Japon ont réalisé depuis des années est l'exemple de ce que nous aurions également dû faire depuis longtemps. Malheureusement, en dehors de deux missions temporaires d'observation (éruptions violentes de 1938 et 1948), missions peu ou mal préparées et très mal équipées et secondées, rien encore n'a été fait. Les vulcanologues étrangers (britanniques, hollandais, américains) qui ont visité nos splendides « richesses volcaniques » se sont, à juste titre, étonnés de cette carence.

---