

NOTICES SCIENTIFIQUES

CONCEPTIONS NOUVELLES SUR L'INTERPRÉTATION
DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

R. PERRIN

Membre de l'Académie des Sciences (Paris)

RAISONS DE MON INCURSION EN GÉODÉSIE

L'application, fréquemment faite en géologie, de la théorie du rétablissement automatique de l'équilibre isostatique m'a incité à me pencher sur le problème des anomalies de la pesanteur. Je ne pouvais, en effet, admettre l'hypothèse d'Airy de blocs de Si-Al solide, immergés plus ou moins profondément selon leur hauteur dans du Sima liquide, pas plus que la dérive des icebergs de Si-Al de Wegener dans un Sima liquide, même visqueux.

Je suis étonné du cloisonnement des différentes disciplines scientifiques, étonné de constater en particulier que les théories très en vogue dans certains domaines sont en contradiction absolue avec les données d'autres domaines. L'expérience constante des métallurgistes, et les nombreux diagrammes de silicates étudiés, y compris par le grand théoricien magmatiste N. L. BOWEN, montrent que tous les silicates sont miscibles à l'état liquide; en outre, lors de la solidification d'un mélange silicaté complexe comprenant à la fois Mg, Fe, K, Na, les premiers cristaux solides qui se déposent sont ferromagnésiens, que ce soit péridots $\text{SiO}_2\text{-2 (Mg-Fe)O}$, ou pyroxènes $\text{SiO}_2 \text{ (Fe-Mg)O}$, ainsi solides en présence d'un Sial liquide. La conception: Sial solide plongeant gentiment et très profondément dans Sima liquide continue néanmoins à inspirer nombre d'auteurs. Autant faire plonger sans dommages un morceau de sucre dans l'eau.

Cette impossibilité à admettre les théories d'Airy me fait penser, depuis longtemps déjà, qu'il faut s'adresser à d'autres raisons pour expliquer les anomalies de la pesanteur.

J'ai énoncé en 1934 une théorie du métamorphisme par diffusions dans le solide cristallin et osé dire en 1935¹ que les granites résultaient eux-mêmes de pareilles diffusions et étaient donc issus de remplacement de roches anciennes *in situ* dans le solide et non pas d'intrusions de magma liquide; M. ROUBAULT et moi avons approfondi par la suite, au prix de nombreuses observations sur le terrain et sous le microscope, ces conceptions maintenant admises au moins pour un nombre important de massifs granitiques par la quasi unanimité des pétrographes; il était donc naturel que je cherche à me rendre compte si ces mêmes théories n'étaient pas susceptibles de donner une explication des dites anomalies.

J'ai eu, pour ce faire, à m'initier à des questions de géodésie, nouvelles pour moi, et je m'excuse, par avance, vis-à-vis des savants spécialistes, des

NOTICES SCIENTIFIQUES

omissions ou inexactitudes qu'ils pourraient relever dans mon exposé. N'ayant point, hélas, suffisamment de temps à consacrer à ces problèmes passionnants, je ne puis qu'énoncer certaines idées nouvelles, susceptibles de suggérer des réflexions aux hommes de l'art. J'hésitais à le faire, mais j'ai été encouragé par le R. P. LEJAY et P. TARDI, qui ont bien voulu trouver ces idées intéressantes, ce qui explique mon audace.

CONCEPTIONS SUR L'ÉVOLUTION DE LA TERRE ET DE LA LITHOSPHERE

Avant de procéder à l'application aux anomalies, il m'apparaît indispensable, pour être bien compris des lecteurs, de faire un court résumé de mes théories sur la transformation de la lithosphère, compte tenu de leurs récents développements. J'essaierai d'être clair, malgré la brièveté obligatoire d'un exposé qui exigerait un livre entier. J'indiquerai, en préambule, que les principes qui m'ont toujours guidé peuvent être résumés ainsi :

(1°) L'évolution terrestre est, comme tout autre, régie par les lois thermodynamiques, qui impliquent en particulier la tendance vers le niveau le plus bas d'énergie libre, compte tenu—si l'on veut être complet—de l'énergie reçue et de l'énergie rayonnée;

(2°) Partir de l'observation : procéder du connu à l'inconnu, en s'aidant des connaissances scientifiques acquises et du raisonnement, tout en donnant la primauté à l'observation sur des objections suggérées par des expériences très fragmentaires sur des phénomènes encore insuffisamment connus;

(3°) S'abstenir d'évoquer des états mystérieux de la matière, en particulier sous très fortes pressions, ce qui ne fait que reculer sans intérêt, sinon pour l'imagination, le problème, si les faits observables peuvent être interprétés à l'aide de faits scientifiques connus;

(4°) Les hypothèses les plus vraisemblables à un instant donné, sont celles qui expliquent le maximum de faits connus sans contre indication formelle. Peut-être seront-elles infirmées par la suite; le meilleur sort qui puisse leur échoir, est d'être modifiées ou complétées, mais à l'instant t il est normal qu'elles soient considérées comme les plus probables. Ceci n'empêche d'ailleurs nullement l'intérêt qui s'attache à ce que, surtout en matière telle que celle de la terre, d'autres hypothèses soient énoncées. Du heurt des idées jaillit la lumière.

FORMATION DE LA TERRE

Ces considérations m'incitent à faire une parenthèse sur l'hypothèse de Wiechert sur le noyau central de Ni-Fe, entouré de l'écorce oxydée, hypothèse presque condamnée à l'heure actuelle et remplacée en particulier par celle de W. H. RAMSEY.

Mes expériences métallurgiques m'ont entraîné² à assimiler la formation de la terre à un gigantesque équilibre laitier-métal-atmosphère. J'ai formulé ainsi la théorie que la répartition des éléments entre noyau et lithosphère avait été conditionnée par l'affinité pour l'O et non pas par un classement dû à la densité, selon la loi de mon ancien et grand maître de LAUNAY. De tels équilibres sont très étudiés et assez bien connus. Si l'on envisage comme WIECHERT un noyau central Ni-Fe, semblable à

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

celui des météorites, une telle hypothèse explique à la lueur des enseignements expérimentaux un certain nombre de faits qui semblent les uns certains, les autres très probables: la prépondérance de la silice dans la lithosphère, la teneur prévisible dans l'écorce initiale étant d'un ordre de grandeur de 45 à 50%;

—la grande rareté du nickel, de même que des métaux à faible affinité pour l'Oxygène: Cu, Pb, argent ou platine, etc. . . . même s'ils sont abondants dans le noyau;

—la grande abondance au contraire du fer et des métaux à grande affinité pour l'oxygène: Al, Ca, Mg, K, Na;

—la concentration dans la lithosphère de l'uranium, le seul métal à la fois très lourd et à grande affinité pour l'oxygène;

—la petite quantité dans la lithosphère de soufre et phosphore, relativement abondants dans les météorites métalliques;

—la présence des océans;

—l'existence d'une atmosphère contenant de l'oxygène, alors que les planètes de faible densité n'en ont point (ce qui n'exclut pas la théorie de l'évasion des éléments légers);

—la concentration du carbone dans la biosphère, etc. . . .

Ainsi, la composition de la lithosphère et de l'atmosphère correspondent à ce que l'expérience journalière des équilibres laitiers silicatés et fers ou ferronickels fait prévoir.

Peut-on penser qu'il y a là une pure coïncidence? Je ne l'ai point cru et ai essayé³ de tirer de cette théorie quelques conclusions sur la constitution possible de la terre. Je ne crois pas que l'hypothèse de RAMSEY donne une explication réelle des différents faits que j'ai énumérés, y compris la concentration de l'uranium, élément très lourd, dans la partie périphérique.

On a objecté à la conception: noyau métallique, lithosphère, l'impossibilité de la séparation par couches, ce que je comprends d'ailleurs mal, et à la mienne, verbalement, le fait qu'un tel équilibre gigantesque aurait demandé des milliards d'années. Je ne sais sur quels raisonnements on a fondé ces impossibilités. Je crois que les objectants, en tout cas, ne se sont pas rendu compte que les données physicochimiques montrent que la formation d'une première lithosphère a dû précéder celle du noyau, des silicates étant liquides aux températures où fer et nickel sont entièrement gazeux, et qu'il faut donc penser que le métal s'est condensé progressivement, et s'est rassemblé au centre en traversant une lithosphère extrêmement chaude et fluide, conditions éminemment favorables à l'établissement d'un équilibre initial.

Ce qui est moins certain, c'est que, une fois cette condensation effectuée, l'équilibre qui est variable en fonction de la température se soit adapté complètement à l'abaissement de cette température, étant donné les masses en cause, mais ceci ne saurait changer en aucune manière la validité des conceptions exposées.

J'ai même écrit que ce faux équilibre était nécessaire, sinon notre oxygène actuel serait vite absorbé par le noyau central (et sans doute aussi l'O de l'eau des mers).

En résumé, je crois que ce que l'on connaît de la constitution de la terre, y compris la discontinuité à 2900 km, peut parfaitement s'interpréter

NOTICES SCIENTIFIQUES

uniquement à partir de données scientifiques connues, tout en expliquant un maximum de faits.

Il n'est pas impossible, d'ailleurs, que des études semblables puissent apporter des lumières intéressantes dans la cosmogenèse en général, à condition d'extrapoler les données connues à des températures beaucoup plus élevées, ce qui n'apparaît pas nécessaire pour la terre. Les données thermodynamiques actuelles doivent permettre de procéder, par calculs, à de telles extrapolations.

RÉSUMÉ DES CONCEPTIONS GÉOLOGIQUES

(1°) Des observations sur revêtements métallurgiques mettant en évidence nette des diffusions et réactions dans le solide, m'ont amené aux conceptions suivantes sur l'origine du métamorphisme, en réaction contre les idées antérieures, mettant en cause l'ascension de vapeurs, colonnes filtrantes de P. TERMIER, ou la circulation de solutions juvéniles apportant différents corps, alcalins spécialement, de l'intérieur de la terre :

La partie supérieure de la lithosphère était à l'origine en équilibre, mais le classement des terrains par érosion, la dissolution de certains corps, la vie également, ont conduit au dépôt sur cette lithosphère ancienne de terrains sédimentaires qui ne sont plus en équilibre physicochimique avec elle, ni entre eux. Si, pour une raison ou une autre, en particulier enfouissement en profondeur (géosynclinaux), la température monte suffisamment, des réactions entre cristaux et terrains s'amorcent, elles-mêmes exothermiques, et il y a métamorphisme, en une tendance au rétablissement de l'équilibre. H. RAMBERG a baptisé par la suite ce processus un ' équilibrépetal process '. Il peut même y avoir formation de roches grenues, dites plutoniques; cet équilibre entre solides suppose simplement que les énergies libres partielles des différents corps élémentaires soient les mêmes dans les divers cristaux, aux températures en cause. Ainsi un granite peut être en équilibre avec une roche basique, si les compositions des cristaux constitutifs sont adaptées.

Parallèlement ces diffusions peuvent s'accompagner de la concentration de certains corps disséminés auparavant à l'état de traces infimes et conduire à la formation de gîtes métallifères, tels que sulfures, minerais d'étain, etc. . . .

Une telle genèse de certains gîtes métalliques est maintenant en faveur, à la suite des travaux récents de SULLIVAN, LINDGREEN, DE VORE, etc. . . . Les analyses spectrographiques montrent que les cristaux naturels contiennent des p.p.m. (parties pour millions) de nombreux corps et qu'il suffit de la concentration sous l'influence du métamorphisme d'une faible partie de ces traces, étant donné les grands volumes intéressés, pour donner naissance aux gîtes connus.

(2°) En 1935, à la suite d'observations de granites sur le terrain, et spécialement des phénomènes de feldspathisation, et de digestion de filons, je conclus :

(a) que les granites eux-mêmes étaient issus de remplacement dans le solide et non de magmas;

(b) que, normalement le métamorphisme s'accompagnait de changements de volume, comme les réactions entre solide en général, et était

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

donc un facteur de plissement, ce qui donnait une explication de la liaison bien connue entre géosynclinaux, orogénèse, métamorphisme et granitisation. C'est là en tous cas, à mon avis, le seul facteur certain actuellement connu d'orogénèse.

A partir de 1936, avec M. ROUBAULT, nous avons multiplié observations et raisonnements en faveur du granite issu de remplacement dans le solide. La fréquence extrême des phénomènes de formation dans les roches encaissantes et dans les enclaves certainement restées solides du granite de cristaux de feldspaths identiques jusque dans leurs plus petites particularités: couleur, inclusions, etc., à ceux du granite, permettait de raisonner de la sorte.

'La probabilité pour que des cristaux de feldspaths identiques en tous points aient pu naître et se développer à quelques centimètres de distance dans des conditions aussi radicalement différentes que celles de cristallisation dans un magma fondu acide d'une part, et de cristallisation dans un milieu solide de composition différente, allant jusqu'à des roches mésocrates d'autre part, est pratiquement nulle.'

La force du raisonnement s'accroît quand ce sont des plages entières de granite identique à celui du massif dont on constate l'existence, complètement isolées, à l'intérieur des roches encaissantes ou enclaves, cas également fréquent.

La grande objection 'anthropomorphique' était, et est encore pour certains esprits, l'allure éruptive de granites, apophyses ou filons à bords parallèles recoupant les strates des roches encaissantes, et évoquant l'impression d'injections de liquide. Mais nous avons prouvé formellement, et nombre d'autres auteurs J. C. GOODSPEED, B. C. KING, H. RAMBERG, R. HIGAZY, etc., avec nous, sur de nombreux exemples, que des filons de cette sorte, y compris les filons à bords parallèles d'aplite ou pegmatite ont été formés, si extraordinaire que cela puisse paraître, par remplacement in situ. J'ai accumulé encore récemment de telles preuves. J'ai tenté une explication scientifique possible de ce fait: accentuation de la réactivité des réseaux cristallins due aux déformations ou tensions accompagnant le métamorphisme et la granitisation.

Les pétrographes acceptent tous la granitisation in situ maintenant, mais nombre d'entre eux pensent encore qu'il y a deux sortes de granites, les uns issus de remplacement, les autres magmatiques. Pour moi, je raisonne ainsi: 'la cristallisation des granites est si singulière, en particulier quartz cristallisé en dernier, inclusions diverses, etc., etc., que la probabilité pour que de telles structures soient produites, les unes par remplacement dans le solide, les autres par cristallisation d'un liquide, phénomènes tout à fait différents, est extrêmement faible. J'attends donc des preuves formelles non encore données et non des impressions, pour certains massifs granitiques de cristallisation directe d'un magma, tout en admettant, bien entendu, la possibilité de granitisation de laves, rhyolites en particulier.'

Ce ne sont pas les belles études expérimentales sur les diagrammes de feldspathisation des grands magmatistes N. L. BOWEN et O. F. TUTTLE, qui me feront changer d'avis, puisqu'ils ont été conduits, pour mettre d'accord leurs théories et leurs expériences, à envisager des recristallisations dans le solide pour le granite.

Nous avons été attaqués, surtout ROUBAULT et moi, ce qui est normal, sur le point jugé faible de nos théories—en affectant de les limiter à ce point—c'est à dire sur l'impossibilité des diffusions à longue distance que nous envisageons, du fait de l'extrême lenteur des diffusions dans le solide constatée expérimentalement, et ce, malgré les énormes durées géologiques.

J'ai déjà répondu, selon d'autres expériences,⁵ montré aussi que la loi de FLICK invoquée est en défaut dans certains cas.⁶ Je pourrais aussi dire que l'on a constaté que la présence de traces d'impuretés peut augmenter considérablement les vitesses de diffusions dans les cristaux. Mais il me suffira d'ajouter que, quoique l'observation micrographique géologique me paraisse plutôt en faveur des diffusions intracristallines, c'est à dire à travers les réseaux, j'admets parfaitement la possibilité des diffusions intercristallines, c'est à dire le long des joints et que RAMBERG a montré que les vitesses correspondantes expérimentalement constatées étaient largement suffisantes pour expliquer les faits de granitisation. RAMBERG écrit d'ailleurs: 'One is forced to accept long distance diffusion through rocks as an important petrogenetic process.'

Je m'excuse de ce qui pourrait apparaître comme un plaidoyer pour nos théories de granitisation, mais il m'a semblé utile, avant d'en tirer des déductions relatives aux anomalies, de montrer aux géophysiciens qu'elles reposent sur des bases sérieuses et que les conceptions des pétrographes ont très sérieusement évolué depuis 20 ans.

Il est plus nécessaire encore de résumer brièvement les autres conceptions d'ensemble, que la poursuite de ces idées toujours basées sur l'observation m'ont conduit à développer.

(1°) L'observation des stades successifs de granitisation, qu'il s'agisse de roches encaissantes ou des enclaves, montre que celle-ci est due à ce que ROUBAULT et moi avons appelé⁷ les 'diffusions à double sens'; il y a apport de certains ions, et départ parallèle d'autres ions, c'est à dire un échange de cations, fait actuellement reconnu par tous. On peut dire que le fait largement prépondérant est l'apport de Si, K, Na, et le départ parallèle de Fe, Mg, Al; je dis prépondérant, car dans certains cas comme la granitisation de quartzites, les faits sont légèrement différents, mais ce qui importe au point de vue géophysique, c'est le phénomène d'ensemble, qui se traduit, d'ailleurs, déjà avec une intensité différente dans le métamorphisme en général, et surtout dans la migmatitisation.

(2°) Ce qui importe ensuite au point de vue géophysique est de savoir si les ions expulsés par les événements venant de la profondeur, et particulièrement l'élément lourd, le fer, sont charriés vers l'extérieur, ou au contraire migrent vers les couches profondes.

C'est là, en outre, une pierre de touche, pour le choix entre les théories du métamorphisme et de la granitisation. Les conceptions basées sur la convection: circulation de gaz ou de solutions venant de la profondeur, les 'pore solutions' de HARKER conduisent obligatoirement à une expulsion de Fe, Mg, Al, vers l'extérieur. Si l'observation montre qu'il n'en est pas ainsi et que ces éléments migrent vers la profondeur, on doit obligatoirement avoir recours à des diffusions dans un milieu stationnaire. Savoir si cette diffusion a lieu à travers les réseaux cristallins ou le long des joints, si elle se produit dans un milieu cristallin sans eau, ou à l'aide de traces d'eau,

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

n'a qu'un intérêt spéculatif, la question dominante est: circulations ou diffusions dans un milieu stationnaire.

Seule l'observation permet de répondre. Certains 'métamorphistes', WEGMANN et D. L. REYNOLDS, ayant pensé observer, dans quelques cas, en avant du front de granitisation, une certaine accumulation de minéraux ferro-magnésiens, ont lancé la conception de ce qu'ils ont appelé les 'fronts basiques'; mais l'observation généralisée montre qu'il ne peut s'agir que de cas isolés et que l'on ne constate nullement au-dessus des massifs granitiques, les gigantesques accumulations de minéraux ferro-magnésiens, qui seraient nécessaires pour admettre l'expulsion vers la surface de Fe et Mg. Force est donc d'admettre que ceux-ci ont migré vers la profondeur.

J'ai tenté⁶ une explication thermodynamique basée sur des données de Ramberg, qui montrent que dans les équilibres entre cristaux, les alcalins K, Na, ont tendance à se concentrer dans les tectosilicates: les feldspaths (dont le développement caractérise la migmatisation et la granitisation) tandis que Fe, Mg, tendent à se concentrer dans les métasilicates (pyroxènes—amphiboles) et plus encore les orthosilicates: péridots.

Quelle que soit l'explication théorique, on est ainsi amené à concevoir le processus suivant: l'érosion de la croûte initiale et ultérieurement des roches qui l'ont remplacée, et sans doute l'influence de la vie (par exemple selon les séduisantes théories d'ERHART⁸ sur la biostase et la rheostase) procèdent à un premier classement que l'on peut qualifier de sédimentaire; ce classement s'accompagne de concentrations d'éléments lourds tels que les oxydes de fer, cf. les gigantesques gisements des vieilles plateformes, d'où une diminution relative de densité des couches sédimentaires, accentuée encore par le fait qu'elles emprisonnent de l'eau, élément très léger.

Ces couches sont hors d'équilibre physicochimique avec le substratum; quand la température le permet il se produit une tendance vers le rétablissement de cet équilibre, et le phénomène de métamorphisme et granitisation conduit à une véritable différenciation à grande échelle, dont le résultat d'ensemble est une montée des alcalins et une descente de Mg, Fe. Au total, il y a donc une augmentation de densité en profondeur, une diminution en surface.

Parallèlement au métamorphisme et à la granitisation, et peut-être à cause d'eux, il y a orogénèse. Naturellement les échanges d'ions ne se produisent pas simplement selon des verticales et intéressent les terrains profonds, selon les directions latérales: les roches profondes, perdant Si et alcalins, diminuent elles mêmes de volume et se creusent, et l'on arrive, selon ces simples déductions logiques à partir de l'observation, à la notion de batholites sialiques, à racines assez profondes, en cuvette, selon un schéma qui évoque curieusement celui de Vening Meinesz avec ses plis racines, à cette seule différence que les mystérieux courants de convection (dans un milieu de quelle nature?) sont remplacés par des courants d'ions diffusant en sens inverse, fait qui n'est pas une hypothèse, puisque l'on peut dire qu'il est inscrit sur le terrain.

(3°) Il ne peut s'agir que d'une tendance vers l'équilibre: normalement l'établissement d'un nouvel équilibre dans le solide doit s'accompagner de changements de volume. Selon le principe de Le Châtelier, tout ce qui

NOTICES SCIENTIFIQUES

s'oppose aux augmentations de volume, en particulier la difficulté de déformation de terrains susjacentes contrarie cet équilibre et limite les réactions: les faits résultent d'un compromis entre l'action physicochimique et la réaction mécanique.^{8, 9} En particulier, il est possible, ce qui est d'ailleurs confirmé par des observations, que les massifs granitiques soient relativement superficiels: résistance faible des superstructures, et qu'il y ait au-dessous d'eux, des terrains métamorphiques, moins complètement transformés, donc relativement plus denses: gneiss, etc., comme on l'observe dans les vieilles plateformes très arasées.

Si la résistance des terrains sus-jacents est très grande, l'exothermie des réactions entraîne échauffement et tensions, mais les seules déformations possibles sont des cisaillements; si ceux-ci se traduisent par des failles ouvertes, il y a décompression brusque et fusion, épanchement de laves jusqu'à ce que le trop plein en volume soit évacué.

J'ai tenté ainsi l'explication du volcanisme anté et post orogénique^{5, 10} ainsi que de la parenté d'analyses des laves et des roches plutoniques, parenté ainsi naturelle, puisque leur origine commune serait la tendance au rétablissement de l'équilibre physicochimique. Les volcans seraient de véritables abcès hypodermiques sans racines. La prépondérance des laves basiques tendrait à montrer que la zone de leur formation est proche de celle où sera produit l'amorçage des échanges chimiques, ceci, bien entendu, dans l'ensemble.

(4°) Les échanges d'ions ne peuvent pas se limiter à une perte d'alcalins et de Si des couches situées sous le Sial, mais doivent a priori intéresser ces mêmes couches et celles qui sont situées en dessous par tendance au rétablissement de l'équilibre entre elles; selon le principe fondamental que les énergies libres partielles des différents corps: Si, Al, Fe, Mg, K, Na, etc. . . . dans les divers cristaux tendent à s'égaliser.

Dans la conception de cette égalisation, il y a toutefois lieu de tenir compte des différences de température, du fait de la variation des diverses entropies en fonction de cette température.

On ne peut prévoir, a priori, jusqu'à quelles distances se produisent les échanges. Peut-être y-a-t-il là une explication possible des séismes profonds. Ainsi peut se dessiner, sans faire appel à des états ou changements d'état mystérieux de la matière, en fonction de la pression, une interprétation des faits connus, le tout dans une lithosphère entièrement supposée constituée de solides cristallins jusqu'à une grande profondeur, hypothèse qui m'apparaît assez bien correspondre aux données de la séismologie, ou tout au moins ne pas être en contradiction avec elle.

APPLICATION A L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

Le fait dominant à expliquer est la grande généralité des anomalies négatives, corrections de Bouguer faites, sur les continents et positives sur les Océans.

Ceci me paraît dû à la superposition de deux facteurs:

- (a) le classement par érosion et biosphère;
- (b) la 'différenciation' due au métamorphisme et la granitisation.

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

Classement par érosion et biosphère

Le double fait que les sédiments se sont appauvris en fer par la concentration en grands gisements, sous l'influence de l'érosion et sans doute de la vie végétale⁹ et que dans le métamorphisme et la granitisation, le Fe a migré en profondeur, donne à penser que la croûte initiale était plus riche en fer que les terrains continentaux visibles: sa composition devait être sans doute voisine de la composition basaltique que l'on admet être celle du substratum des océans. Le classement a donné lieu, en particulier, aux immenses gisements de minerai de fer des terrains antécambriens, dont il ne subsiste que des lambeaux, le reste ayant été enlevé par l'érosion; si par exemple on reconstitue en pensée les gisements de la SOKOMAN—formation du Labrador—visibles sur 1000 km de longueur avec une puissance moyenne de 200 m, on se rend compte que ce sont des milliers de milliards de tonnes qui ont été ainsi soustraits et concentrés dans les temps très anciens. Lorsque l'action de l'atmosphère et de la vie a porté, par la suite, sur des continents déjà nettement appauvris en fer par le jeu du classement par sédimentation et du métamorphisme, elle n'a plus pu donner lieu qu'à des concentrations beaucoup plus modestes. Il me semble plausible d'attribuer à une telle cause l'énorme prépondérance des vieilles plateformes en matière de gîtes minéraux riches en fer. Lorsque, par la suite, la concentration a porté sur des roches encore relativement riches en fer, des gîtes importants ont encore pu naître: exemple gisement de KONAKRY dû à la latérisation de syénites, sinon il y a eu plutôt prépondérance d'alumine: bauxites latéritiques, etc., en particulier.

Ces concentrations de l'élément lourd: fer, ont comme conséquence des anomalies locales, mais si l'on considère un grand ensemble de terrains sédimentaires, dont la densité a été ainsi diminuée, il est certain qu'une anomalie négative en est résultée obligatoirement par comparaison avec la croûte initiale inaltérée plus riche en fer.

L'attraction d'une couche sphérique d'épaisseur h et de densité d , limitée à un grand cercle d'un rayon de 167 km autour de la station, est approximativement égale à $2\pi Kdh$. Elle est de 0,1118 mgal environ pour une épaisseur de 1m et une densité de 2,67. Une diminution de densité de 0,1 d'une telle couche diminue g de $0,1118 \times 0,1/2,67$ mgal = environ 0,0042 mgal. La substitution d'une couche de sédiments de 5 km à une couche de croûte initiale correspond donc à une anomalie négative de $5 \cdot 10^3 \times 4,2 \cdot 10^{-3} = 21$ mgal pour la très faible diminution de densité 0,1, de 42 mgal pour 0,2, etc. . . .—Certes, les sédiments ont été très souvent accumulés par des transports par voie chimique (dissolution dans l'eau) ou entraînements mécaniques: érosion, et ils se sont superposés à d'autres terrains, mais n'oublions pas que sur les continents l'on effectue la correction de plateau, et que l'on élimine, par là même, l'influence des superpositions.

Dans tous les cas, l'observation montre que la totalité des terrains visibles sur les continents, laves mises à part, résulte de la transformation d'anciens sédiments et qu'il en est encore ainsi très probablement loin au-dessous de la cote 0, ce qui veut dire que la cause que j'ai évoquée ci-dessus a effectivement joué.

De plus en plus l'observation océanographique montre, en outre, qu'il en est encore ainsi à des distances non négligeables des côtes.

NOTICES SCIENTIFIQUES

Métamorphisme et granitisation

A cette cause s'est superposée la véritable différenciation, entraînée par Métamorphisme et Granitisation, conduisant au départ d'éléments lourds, Fe spécialement, vers la profondeur, et à l'apport d'éléments légers Na, K. Elle a joué inégalement d'un point à un autre des continents suivant l'intensité du phénomène; simple métamorphisme, migmatisation ou granitisation, d'où des variations très normales dans les anomalies.

Je ne puis avoir comme ambition que d'essayer de montrer qu'un tel phénomène est susceptible d'expliquer des anomalies d'un ordre de grandeur comparable à celles que l'on constate effectivement, et pour ce faire, d'effectuer un calcul dans une hypothèse extrêmement simplificatrice, qui se prête aisément au calcul.

Je suppose une demi sphère de rayon r , évalué en mètres, autour de la station S , initialement composée d'une roche homogène de densité 2,9; je suppose, en outre, que, du fait de la migration d'ions lourds vers la profondeur et d'ions légers vers la surface, s'est substituée à cette demi sphère une calotte sphérique de densité 3,2 et épaisseur x et une demi sphère de centre S et rayon $r-x$.

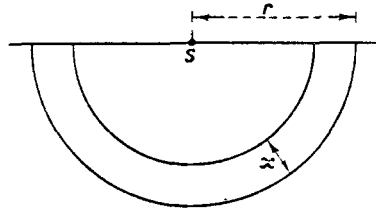


Fig. 1

A l'égalité des masses correspond l'équation:

$$2,9 r^3 = 2,6 x^3 + 3,2 (r^3 - x^3)$$

d'où l'on déduit $0,3 r^3 = 0,6 x^3$ et $x = r\sqrt[3]{\frac{1}{2}}$, soit sensiblement $0,8 r$.

L'attraction d'une 1/2 calotte sphérique de densité d et d'épaisseur h est égale à $\pi k d h$. L'attraction de la 1/2 sphère légère est donc: $\pi k \times 2,6 \times 0,8 r$, celle de la 1/2 calotte lourde: $\pi k \times 3,2 \times 0,2 r$. —Le total de l'attraction des deux est ainsi $\pi k \times 2,72 r$, alors que l'attraction de la 1/2 sphère initiale était de $\pi k \times 2,9 r$ et la différence, soit l'anomalie créée par la différenciation: $\pi k \times 0,18 r = 3,78 \times 10^{-3} r$ mgal. Ainsi pour $r = 10$ km, soit 10^4 m, l'anomalie correspondante est de 37 mgal 8, et de 75,6 pour $r = 20$ km.

On trouve bien, pour des hypothèses de dimension de batholites qui n'ont rien d'anormal, des ordres de grandeur d'anomalies tout à fait comparables à ce qui est observé en pratique.

J'ajouterai que j'ai supposé qu'il n'y avait aucun gonflement, aucun foisonnement de la demi sphère initiale; si l'on admet, au contraire, ce gonflement, d'ailleurs conforme à l'observation et à la conception de l'orogénèse par métamorphisme, il faudrait encore en tenir compte, puisque du fait de la correction de plateaux, on supprime l'attraction des terrains au-dessus de la cote O. Un calcul simple montre que, pour une

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

variation de volume de 2%, l'anomalie négative serait de 12,2 mgal environ pour une demi sphère de 10 kilomètres de rayon.

Il m'a été fait, à la suite de ma communication à l'Académie des Sciences,¹¹ deux objections.

La première est que l'attraction d'une couche plane infinie, composée elle-même de couches planes de densités différentes, est indépendante de la répartition de ces couches en profondeur. Le calcul montre qu'il en est bien ainsi pour des couches planes supposées d'ailleurs indéfinies, dont l'attraction est $2\pi kdh$, h étant l'épaisseur, mais une différenciation telle que celle que j'expose, effectuée sur des couches planes donne des couches dont l'épaisseur est inversement proportionnelle à la densité, si bien que dh est constant, d'où l'indifférence à la profondeur. Mais, dans le cas de la demi sphère, du fait de l'intervention au cube du rayon dans les volumes, il n'en est nullement ainsi et la différenciation change considérablement les dh , si bien que, quoique comme dans le cas du plan dh seul intervienne, l'attraction totale dépend nettement de la répartition des masses.

Je répète que la demi sphère n'est qu'un exemple et que les formes probables sont autres, mais elles ne sont pas planes; les massifs ont des racines, comme le montre la séismologie.

La deuxième objection, tout en reconnaissant que mes conceptions apportent peut-être une explication des anomalies négatives correspondant aux aires granitiques, ne croit pas que l'on puisse expliquer de la sorte les anomalies continentales de grande dimension; elle fait remarquer justement que si l'on étale en largeur la différenciation, on se rapproche de plus en plus du cas de la couche plane et l'effet décroît (*Fig. 2*).



Fig. 2

Je dirai :

(1°) que c'est prendre quelque peu à la lettre le cas schématique de la demi sphère que j'ai choisi pour la commodité du calcul. Les massifs granitiques ne sont pas continus; rien ne garantit qu'ils se rejoignent tous en profondeur, ils sont séparés par des zones métamorphiques, avec parfois intercalation de roches plus lourdes, gneiss, amphiboliques, ou amphibolites, telles que celles qui donnent naissance, en Bretagne, aux anomalies positives signalées par S. CORON.¹² En réalité, on doit normalement envisager une extrême complication avec des surfaces de séparation des différentes roches très sinueuses, sans grand rapport avec des séparations par plans horizontaux parallèles.

(2°) Comme je l'ai dit plus haut, il est vraisemblable que les échanges d'ions ont intéressé en réalité jusqu'à des zones très profondes, et sans doute très variables, si bien que la répartition des masses doit être très diverse, selon les régions, en fonction de l'intensité des phénomènes de métamorphisme et granitisation.

NOTICES SCIENTIFIQUES

Mon schéma de différenciation, pris à seul titre d'exemple, est certainement inexact, les diffusions d'ions ont dû se poursuivre, avec toujours enrichissement en Fe, Mg, et perte en Si, Al, K, bien au-delà de la couche externe que j'ai figurée.

Il est d'ailleurs loin d'être exclu qu'elles aient intéressé certaines aires océaniques. Dans les idées générales que j'ai exposées en préambule, le volcanisme, y compris le volcanisme sous-marin, suppose de telles diffusions, mais d'ampleur limitée. Cette ampleur au contraire a dû être beaucoup plus grande, et sans doute se continuer encore dans les régions de chaînes de montagnes encore en formation, comme les îles de la Sonde et les Antilles.

(3°) Il ne faut pas oublier que l'essentiel des aires continentales correspond à d'anciennes chaînes de montagnes, les plus anciennes devenues pénéplaines, les autres en cours d'érosion. Si l'on n'admet pas le réajustement automatique par équilibre hydrostatique d'icebergs flottant dans un magma, il y a eu, dans l'ensemble, du fait de l'érosion des anciens boursofflements, diminution de la quantité de matière initiale existant au-dessous des aires continentales actuelles. D'ailleurs là où subsistent des témoins de ces excroissances, la correction de plateau les supprime dans les calculs, si bien que le résultat final est le même. N'oublions pas que la correction correspondant à une hauteur de chaînes de montagnes de 8000 m, atteint l'énorme chiffre de 800 mgal environ.

(4°) N'oublions pas, non plus, que les continents actuels sont issus d'anciens terrains sédimentaires, plus ou moins métamorphisés ou granitisés, et que la localisation en amas d'éléments lourds dans cette sédimentation, s'accompagne de perte de densité correspondante et qu'il y a donc là une raison d'anomalies négatives pour toutes les régions dont le substratum résulte de métamorphisme ou granitisation d'anciens terrains sédimentaires; il en serait ainsi même si ce substratum était constitué de couches planes de densités différentes.

Pour toutes ces raisons, je ne pense pas que les conceptions que j'ai exposées soient impuissantes à expliquer la généralité des anomalies négatives des continents.

Elles me paraissent par contre faire comprendre pourquoi:

(1) les anomalies de Bouguer, modifiées selon l'hypothèse d'Airy, calculées en fonction de l'altitude, donnent des points qui ne s'alignent que de façon plus qu'approximative sur une droite;

(2) la pente de la droite moyenne n'est nullement de 1,1 mgal par 10 cm de dénivellation, comme le voudrait l'hypothèse, et est, en général, nettement inférieure;

(3) cette pente varie considérablement d'une région à l'autre, en particulier dans les diverses chaînes de montagnes, 0,4 à 0,9, selon S. CORON¹² (p. 49 et suivantes).

Il est normal, selon mes conceptions, que, compte tenu de la correction de plateau, l'anomalie soit dans l'ensemble (je dis bien dans l'ensemble, car l'existence de roches basiques sous-jacentes peut la modifier fortement*),

* cf: les observations d'anomalies positives en Bretagne au-dessus de bancs d'amphibolites (S. CORON), observations qui prouvent que ces bancs se prolongent en profondeur sur des distances importantes.

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

accentuée par l'altitude, mais normal aussi qu'elle varie d'un point à un autre et que la pente de la droite moyenne soit différente d'une chaîne à l'autre. Ces théories font intervenir un nombre tel de variables qu'elles offrent ce que d'aucuns pourront considérer comme une facilité trop commode, la possibilité de s'adapter à un nombre considérable de faits.

P. TARDI m'a posé la question: pouvez-vous proposer un système de correction que vous estimeriez plus rationnel que les actuelles corrections d'isostasie?

Je serais heureux de pouvoir répondre oui, mais ne me sens nullement en droit de le faire, d'abord du fait de mes connaissances très imparfaites que je ne suis pas en possibilité d'améliorer efficacement en géodésie, ensuite parce que l'histoire de la lithosphère, telle qu'on peut la concevoir, apparaît très complexe.

Certes, mes idées évoquent le schéma de PRATT, mais en infiniment moins simple.

Une première question se pose: peut-il y avoir ou non, sans Sima liquide, un certain réajustement d'équilibre hydrostatique dans le solide. Les fort intéressantes idées de MAILLET et PAVANS de CECCATY, basées sur l'application des lois de similitude, qui permettent d'expliquer les plis des roches, ont conduit les tectoniciens aux théories d'écoulement par gravité, que certains d'entre eux me paraissent d'ailleurs pousser à un point très extrême. L'existence, par exemple, du Grand Canòn du Colorado, et plus encore celle des grandes failles, des séismes profonds, semble montrer qu'il ne faut pas exagérer l'assimilation des roches à des liquides, même visqueux, mais autant je crois que l'on n'est pas en droit de parler d'un réajustement automatique de l'équilibre isostatique, autant je ne me sens pas scientifiquement en droit de nier totalement une tendance vers ce réajustement dans le solide. Je suis le premier à envisager des déformations de la croûte, c'est à dire en particulier de l'orogénèse sous l'influence du moteur thermodynamique: recherche du niveau d'énergie libre le plus bas; il m'est donc difficile de refuser à un moteur d'origine gravité toute possibilité. Je dirai simplement que la puissance des deux moteurs ne m'apparaît pas du même ordre de grandeur et que le premier semble donc avoir été, a priori, plus efficace.

Si l'on niait la possibilité d'un tel ajustement, on pourrait alors partir de l'idée que la croûte initiale était en équilibre hydrostatique, en faisant l'hypothèse que les contractions dues au refroidissement et la condensation des mers ont respecté celui-ci, ce qui n'est, d'ailleurs, pas absolument évident.

Ceci étant admis, on pourrait essayer de déterminer les règles de calcul, si les déplacements de matières ou d'ions s'étaient toujours produits dans un sens vertical, sans déplacements latéraux, ce qui reviendrait à un PRATT plus perfectionné, mais il n'en a certainement pas été ainsi et de très loin.

Si je suis le processus de destruction de l'équilibre physicochimique par l'atmosphère et la biosphère, et la tendance à son rétablissement par métamorphisme, on peut résumer ainsi ses conséquences:

(1) Altération atmosphérique ou biochimique, dissolution de certains éléments, érosion, etc. . . . entraînant des concentrations locales d'éléments lourds, et des transports latéraux importants de matières;

NOTICES SCIENTIFIQUES

(2) Le métamorphisme et la granitisation entraînent des déplacements d'ions en sens inverse, tendant à alléger la surface, à alourdir la profondeur, mais ces déplacements d'ions intéressent des volumes de formes irrégulières, de telle sorte qu'ils ne se produisent pas, loin de là, uniquement à la verticale;

(3) L'orogénèse parallèle au métamorphisme, qui en est peut-être la cause essentielle, ne se traduit pas que par des mouvements verticaux, mais dans nombre de cas par des déplacements obliques, des extravasions de terrains situés entre des zones en gonflement: nappes de charriage, etc. . . . d'où d'importants mouvements latéraux modifiant la répartition des masses;

(4) Le volcanisme anté ou postorogénique conduit à la venue au jour de terrains situés auparavant à une certaine profondeur et parfois à de larges étalements latéraux, d'où nouvelles modifications de la répartition des masses.

(5) Les nouvelles érosions conduisent à de nouveaux sédiments et éventuellement à un nouveau cycle métamorphique, etc. . . . Ajoutons à cela que, comme je l'ai indiqué ci-dessus, il est fort possible que les transformations profondes, donnant naissance à une homogénéisation, au moins approximative telle que la granitisation, n'aient pu se produire intensément que dans des zones relativement superficielles, et que dans les zones autrefois sédimentaires plus profondes, où les changements de volume étaient moins aisés, du fait de la surcharge d'une forte épaisseur de terrains, l'homogénéisation accompagnée d'allègements par remplacement de ferromagnésiens par alcalins en particulier, a pu être nettement moins complète.

Nous nous rendons compte ainsi de l'extrême complexité du problème. Nous ne nous étonnerons pas si dans la conclusion de sa très belle étude, qui m'a fourni des renseignements extrêmement précieux, S. CORON indique:

(1°) que ' les variations locales du champ de la pesanteur dans les régions anciennes de France sont en relation étroite avec la nature superficielle des terrains ';

(2°) ' que les champs étendus d'anomalies positives ou négatives sont aussi, dans l'ensemble, en relation avec les données géologiques.'

Peut-on aller plus loin que la constatation de ce parallélisme?

Après réflexion, je me demande, avec la prudence que m'impose mon inexpérience en matière géodésique, s'il ne serait pas possible de procéder par approximations successives, en allant du simple au complexe, c'est à dire:

(1°) en partant des anomalies locales explicables uniquement par causes locales, imaginer, en s'aidant des conceptions géologiques, un certain schéma possible de la structure sous-jacente jusqu'à des profondeurs de quelques kilomètres;

(2°) procéder de la sorte pour des zones jointives, se rendre compte ainsi si les variations d'anomalies entre ces zones nécessitent l'intervention d'une répartition différente d'une zone à l'autre de masses plus profondes, répartition compatible avec les conceptions géologiques;

(3°) reprendre les calculs à partir de ces nouvelles données pour vérifier si l'on serre ainsi de plus près la réalité;

L'INTERPRÉTATION DES ANOMALIES DE LA PESANTEUR

(4°) augmenter progressivement l'étendue des zones étudiées, etc. . . . Les masses compensatrices que S. CORON a été amenée à envisager pour l'interprétation des anomalies du Massif Central ne représentent-elles pas, à plus grande échelle, une certaine tentative dans une telle voie?

Si j'ai l'audace d'esquisser une telle orientation de recherches, c'est qu'elle présenterait, à mon avis, un intérêt immense pour les géologues. Je reconnais bien volontiers que pour les géodésiens purs, le but est autre, mais n'est-ce pas précisément parce que pour atteindre ce but, ils ont été amenés à procéder à des corrections isostatiques, basées sur des hypothèses inadmissibles, à mon sens, que les patientes et belles études auxquelles ils procèdent n'apportent pas à la géologie les enseignements de premier ordre qu'elles devraient normalement être susceptibles de lui apporter.

Les travaux de S. CORON, effectués sur des régions bien délimitées, ont constitué pour moi la révélation du parti qui pouvait être en réalité tiré de la gravimétrie pour la connaissance de la constitution de la partie externe de la lithosphère, connaissance qui ne saurait se limiter à des problèmes géométriques.

Mais, pour atteindre un tel but, je crois fermement qu'il faut, comme je l'ai déjà fait en pétrographie, se refuser à considérer comme des dogmes des théories qui ne sont devenues, en réalité, dogme que du fait qu'elles sont enseignées depuis longtemps. Les dogmes du Sial solide sur Sima liquide et du rétablissement automatique de l'équilibre isostatique ont tellement pénétré les esprits que de grands auteurs, comme Vening Meinesz, et autres, ont été conduits à faire intervenir de fortes tensions pour tenter d'expliquer des faits contraires d'importance majeure.

Je livre aux géophysiciens les réflexions auxquelles j'ai été conduit logiquement, je le crois, tout au moins, pour l'application de mes conceptions pétrogénétiques. Je n'ai pas la prétention de penser qu'elles expliquent toutes les anomalies; il me semble seulement qu'elles doivent permettre d'interpréter, au moins, une part non négligeable. J'ai d'autant moins cette prétention qu'il ne m'apparaît pas évident qu'avant toute érosion importante, la croûte initiale était totalement en équilibre hydrostatique et que des anomalies n'aient pas déjà existé sans que l'équilibre soit rétabli par la suite: on joue sur des milligals.

L'intérêt qui m'a été manifesté, après ma première communication, par d'éminents spécialistes, m'a encouragé à publier le présent article. Je ne sais le sort qui sera réservé par la suite à cette tentative d'interprétation des anomalies; peut-être, en tous cas, n'était-il pas inutile de montrer que celles-ci étaient susceptibles d'explications autres que celles qui sont encore très généralement adoptées, et ce en partant de faits connus, de par l'observation géologique.

Il appartient aux hommes de l'art de réfléchir et de se rendre compte s'il y a à tirer un parti de ces conceptions. Je m'excuse en terminant vis-à-vis d'eux, car je me rends compte que ce que j'ai essayé de leur apporter n'est point fait pour simplifier leur tâche déjà si complexe.

NOTICES SCIENTIFIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- ¹ PERRIN, R. Le Métamorphisme générateur de plissement. *Annal. des Mines* Oct. (1935) 5.
- ² PERRIN, R. Réflexions sur la formation de la terre. *C.R. Acad. Sci., Paris* (1934) 105-107.
- ³ PERRIN, R. Application à l'interprétation de faits géologiques des études sur le métamorphisme par diffusions d'ions dans le solide. *C.R. Acad. Sci., Paris* **227** (1948) 1043; Quelques remarques à propos du noyau terrestre, de la lithosphère et des théories géologiques. *Bull. Soc. géol. France* **18** (1948) 199.
- ⁴ PERRIN, R. Extrapolation à la géologie de données métallurgiques. *Annal. des Mines* Sept. (1934) 5.
- ⁵ PERRIN, R. Long range solid Diffusions in Geology, XIXème Congrès Geol. International d'Alger, C.R. Fasc. 6, p. 43; Hypothèse nouvelle sur les moteurs du métamorphisme, de la granitisation et du volcanisme. *C.R. Acad. Sci., Paris* **236** (1953) 1063.
- ⁶ PERRIN, R. Granitization, Metamorphism and Volcanism, *Amer. J. sci.* **252**, n° 8, (loi de Flick).
- ⁷ PERRIN, R. et ROUBAULT, M. Le granite et les réactions à l'état solide, *Bull. Serv. carte géol. Algérie, Pétrographie* n° 4.
- ⁸ ERHART, H. *La genèse des sols en tant que phénomènes géologiques*. Masson & Cie, Paris (1956).
- ⁹ PERRIN, R. et ROUBAULT, M. Les réactions à l'état solide et la géologie, *Bull. Serv. carte géol. Algérie, Pétrographie* n° 1.
- ¹⁰ PERRIN, R. Métamorphisme, Granitisation et volcanisme, *C.R. Acad. Sci., Paris* **236** (1953) 948.
- ¹¹ PERRIN, R. Explication possible des anomalies de la pesanteur, sans recours à l'isostasie, *C.R. Acad. Sci., Paris* **243** (1956) 997-1001.
- ¹² CORON, S. Contribution à l'étude du champ de la pesanteur en France. *Sci. de la Terre* **2**, n° 4 (1954).