

## COMPTES RENDUS

ARTHUR HOLMES. — *Principles of Physical Geology*, in-8°, couverture toile, 509 pages, 95 planches photographiques et 262 illustrations dans le texte, Edimbourg, Thos. Nelson et Sons, 1944, 2<sup>e</sup> éd., 1945. Prix : 30 shillings.

Quand on parle de géologie physique, on doit entendre sous ce nom l'étude des forces qui ont concouru à donner à l'édifice terrestre ses traits caractéristiques et pour lesquelles le présent n'est qu'un épisode à certains égards incomplet. La géologie physique comprend la géographie physique mais elle en étend les applications, voire les lois, dans le passé. Elle interroge l'ensemble de la croûte terrestre pour retrouver la trace et déterminer le rôle des influences qui se sont exercées sur elle dans un effort incessant et souvent contradictoire. Pour nous permettre de nous orienter dans ce domaine énorme et touffu, le Prof<sup>r</sup> Holmes y a tracé des chemins faciles, au long desquels il nous conduit avec une complaisance parfaite.

La première partie de son ouvrage consiste en une enquête préliminaire portant sur des faits de base dont toutes les considérations qui suivent devront bien tenir compte. Il y est question de la forme du globe et de son relief superficiel, du dénombrement des forces qui s'exercent à les modifier, des matériaux mis en œuvre. Après avoir exposé largement ces données dont beaucoup ressortissent à la géologie générale, l'auteur s'attache à montrer l'importance primordiale du facteur temps et nous initie aux méthodes qui ont permis de le sonder.

La deuxième partie traite des influences externes et de leurs effets sur la morphologie terrestre. Une série de chapitres particulièrement fouillés est consacrée à l'action des agents atmosphériques sur les sols, aux eaux souterraines, au travail des cours d'eau, au développement des vallées engendrant les formes du terrain, aux glaciers et aux glaciations, à l'érosion éolienne et aux aspects désertiques, à l'érosion marine déterminant le tracé des côtes. Nous citerons comme particulièrement attachantes les pages où l'auteur analyse le phénomène glaciaire, le mécanisme de la formation des vagues et les grandes lignes du paysage côtier.

Après une revue des informations les plus récentes sur la constitution des roches d'origine organique, leur assujettissement aux conditions climatiques et leur apport dans les séries de tout âge, l'auteur aborde la troisième partie de son livre, celle qui a trait aux influences venues de la profondeur. Il y range les tremblements de terre, l'orogénèse, les manifestations épirogéniques accompagnées ou non de grands effondrements, et l'activité volcanique, chacun de ces chapitres donnant lieu à de nombreux commentaires. L'ouvrage se termine par un exposé des dernières théories en faveur sur la répartition des masses continentales, une attention particulière étant apportée à l'hypothèse wegenérienne examinée à la lumière des courants internes de convection.

Nous nous rendons compte que la table des matières pure et simple à laquelle, faute de place, nous avons bien dû nous limiter, ne donne aucune idée du caractère original du livre d'Arthur Holmes, de sa substance aussi variée que solide basée sur une étonnante richesse d'information. Le mérite d'un auteur, quand il est condamné à reprendre, à peine de paraître incomplet, ce qu'ont déjà dit ses devanciers, est de ne le faire qu'avec un sens critique averti, de manière à ne laisser subsister que l'essentiel. S'il dispose en outre d'observations personnelles qu'il intercale à bon escient, si les dernières découvertes lui permettent une mise au point irréprochable, s'il sait présenter son sujet d'une façon alerte et vivante, il gagnera l'estime et emportera l'admiration de ses lecteurs. Nous avons l'impression que, considérés avec ces critères, les « Principles of Physical Geology » sont une réussite d'autant plus certaine que l'illustration, particulièrement abondante, vient appuyer le texte pour ainsi dire de page en page.

Nous n'avons rien dit jusqu'ici de la personnalité de l'auteur. Il serait presque superflu de signaler qu'Arthur Holmes, professeur de géologie à l'Université d'Edimbourg, est surtout connu par ses recherches et ses publications sur la pétrographie, l'âge de la Terre et l'évolution constitutionnelle des roches dans la profondeur. A l'heure actuelle, il est un des leaders de la théorie de la cristallisation fractionnée par différenciation d'un magma unique, théorie qui rompt nettement avec les conceptions généralement admises jusqu'ici en matière de métamorphisme. Ces idées ont été fortement exprimées dans un article récent, dont, avec l'autorisation de l'auteur et sous sa propre responsabilité, nous donnons ci-dessous la traduction.

### Histoire naturelle du granite,

par le Prof<sup>r</sup> ARTHUR HOLMES, F. R. S.

Pendant un siècle et demi l'origine du granite (y compris les granodiorites) est restée un des problèmes les plus difficiles et les plus controversés que les géologues aient tenté de résoudre. L'opinion émise par Fouqué et Lévy en 1882, que « ce problème provoque les plus vives discussions », reste aussi vraie aujourd'hui qu'elle l'a jamais été et, dans plusieurs pays, elle pourrait même être considérée comme un faible tableau des passions que peuvent soulever à la fois une apparente contradiction dans les faits et une contradiction dans les opinions qui n'est que trop réelle.

Hutton a clairement établi le statut du granite en le définissant comme une roche plutonienne, mais tout aussi bien les géologues français que Lyell et ses disciples eurent tôt fait de reconnaître que tous les granites ne sont pas nécessairement d'origine ignée. Plusieurs cas se présentèrent où aucun contact net n'apparaissait avec l'auréole de roches métamorphiques environnantes. La transition se faisant d'une façon insensible au travers d'une zone de gneiss et de schistes feldspathisés, il devenait impossible de trouver un point où l'on pût dire que la roche cessait d'être métamorphique pour devenir ignée. En conséquence on en vint à considérer les granites de ce type, non comme la cause du métamorphisme, mais comme le résultat ultime de son action.

La discussion en arriva ainsi à se concentrer sur le point de savoir si une masse donnée de granite cristallise en partant d'un magma intrusif qui a déplacé mécaniquement la roche préexistante, ou bien si le granite est lui-même issu de cette roche préexistante par quelque procédé ultramétamorphique dont la phase culminante, au dire de certains, se traduirait au moins en quelques points par une véritable fusion.

Les magmatistes extrémistes en sont depuis venus à admettre que le magma peut réagir sur les roches envahies et en assimiler les produits; tandis que les tenants du métamorphisme se sont rendu compte que des échanges chimiques sont essentiels pour la formation du granite et que par conséquent les terrains préexistants doivent avoir été imprégnés par le magma granitique ou ses dérivés (y compris l'*ichor* de Sederholm et les solutions hydrothermales chères aux Américains), ou encore par des matières migrantes plus ténues d'origine non spécifiée, qualifiées d'agents minéralisateurs ou d'émanations.

Entre ces limites d'interprétation, bien des degrés d'opinion se sont exprimés, spécialement en ce qui concerne l'origine du magma granitique. Ceux qui insistent sur l'origine ignée de tous les granites acceptent l'intervention d'un magma granitique, soit qu'il se soit constitué spontanément, soit qu'on le considère, comme on l'a fait récemment, comme un simple résidu dérivé par cristallisation fractionnée d'un magma basaltique antérieur. Ceux qui regardent les granites comme constitués avec un large apport des roches préexistantes reconnaissent qu'ils ont dû passer par un stade où une partie du matériel était mobile ou fluide. Cette mixture partiellement fluide a été désignée par Reinhard sous le nom de *migma*, pour la distinguer d'une autre consistant en un magma incomplètement cristallisé. Par ailleurs, le *migma* peut évoluer en magma, soit par fluidification complète, soit, et quel que soit le stade atteint, par l'expulsion de la partie fluide sous l'effet de la pression.

Malheureusement, peu de gens se rendent compte que la bataille entre les camps rivaux s'est répétée plusieurs fois avec des fortunes diverses suivant les époques et suivant les pays. Beaucoup de vieux pétrographes de langue anglaise de l'heure actuelle ont été comme moi-même élevés dans la croyance que le granite, étant par définition une roche ignée, doit avoir cristallisé à partir d'un magma; et beaucoup d'entre eux ont eu à redécouvrir par eux-mêmes que les caractères plutoniens du granite ne sont pas à eux seuls la garantie d'une origine ignée. C'est là un fait longtemps négligé sur lequel, dès 1847, Scherer avait déjà spécialement attiré l'attention.

Ce qui est plus regrettable encore c'est que nous ayons été laissés dans l'ignorance des idées stimulantes défendues par l'École française, ou que nous ayons eu l'impression qu'il s'agissait là de vieilles théories, peu dignes d'une sérieuse considération. Lorsqu'on regarde en arrière, il paraît évident qu'une introduction historique bien écrite et bien balancée eût dispersé le brouillard de dogmes et de préjugés dans lequel nous étions inconsciemment occupés à tâtonner. Mais il ne se trouva personne pour entreprendre la tâche ardue de préparer une telle enquête et, en son absence, le réveil fut lent à venir et il dépendit largement de la chance de découvertes personnelles sur le terrain.

Iddings, il est vrai, avait publié en 1892 une revision historique de l'origine des roches ignées, mais elle concerne avant tout les roches volcaniques et leurs magmas. Ni les problèmes

relatifs au granite, ni les travaux de l'École française n'y sont même mentionnés. Il a fallu attendre l'époque actuelle, c'est-à-dire un demi-siècle, pour qu'une pleine réparation fût accordée aux maîtres du passé dans deux lumineuses adresses présidentielles lues par le prof<sup>r</sup> H. H. Read devant la Geologist's Association, avec une citation liminaire qui est de Hutton lui-même : « Je suis particulièrement anxieux pour ce qui touche au granite ! (1). »

Notre historien a heureusement derrière lui une expérience du terrain qui lui garantit la sympathie de tout juge compétent. Il est inévitable qu'il tourne le miroir de son côté aussi bien que du côté des autres, mais à tout prendre il se révèle uniquement un juge bienveillant qui n'admet ou n'affirme aucun axiome et que l'évidence apportée par le terrain arrive seule à impressionner.

Une des grandes « illuminations » de son récit est la revue des grandes contributions apportées par les Français, contributions qui anticipent de la façon la plus remarquable sur les développements de détail des années récentes. En 1824, nous trouvons Ami Boué (2) décrivant ce qu'on appellerait maintenant « granitisation » et suggérant que le passage au travers des schistes cristallins de la chaleur et des exsudations gazeuses venant de l'intérieur de la terre est la cause réelle de la formation des veines et de la dissémination des cristaux et, éventuellement, d'une sorte de « liquéfaction ignée ». En 1837-1838, Fournet distingue les roches métamorphiques dues à une simple cristallisation, de celles dans lesquelles une fusion partielle s'est produite, combinée occasionnellement avec une migration interne ou externe des matériaux. En 1841, Deville introduit l'idée d'agents minéralisants-gaz qui transportent de la matière minérale et se rendent ainsi aptes à transformer chimiquement (suivant l'expression actuelle, par métasomatisme) la substance des roches au travers desquelles ils diffusent. En 1844, Villet d'Aoust utilise le terme *imbibition* pour exprimer l'idée que des matières ignées ont filtré dans les roches sédimentaires métamorphisées et les ont transformées en granite. Peu de temps après, en 1847, il parle de ce processus comme d'une *granitification*. La même année, Fournet note

(1) READ, H. H., *Meditations on granite* [Part. I, *Proc. Geol. Assoc.*, 54, 64 (1943); Part. 2, *ibid.*, 55, 45 (1944)].

(2) Né à Hambourg en 1794 de parents suisses mais de vieille souche française.

que, dans certains sédiments métamorphisés, il s'est développé bien plus de feldspath qu'on pourrait en attendre d'une simple recristallisation et il apporte ainsi la preuve évidente qu'une nouvelle introduction de matière s'est produite. En 1869, Delesse avance l'hypothèse que les roches plutoniennes granitisées peuvent devenir assez mobiles pour chercher une issue vers la surface et s'y consolider comme des granites intrusifs à des étages élevés de la croûte terrestre après avoir perdu tous les caractères permettant de déterminer leur véritable origine.

Avant de considérer un des principaux tournants, vers lequel nous approchons maintenant, dans l'histoire de la pétrogénèse, il n'est pas sans intérêt de regarder où en étaient les choses dans les Iles Britanniques pendant l'ascension de l'École française. A la suite de la suggestion émise par Lyell, les granites « métamorphiques » avaient joui d'une large vogue en Écosse et en Irlande, mais on avait accordé plus d'attention à la chaleur et à la fusion, partielle ou complète, qu'au changement de composition et à la succession des phases amenée par l'introduction de nouveaux matériaux. En 1862, Scott et Haughton plaidèrent une double origine pour les roches granitiques de Donegal, dans lesquelles ils reconnaissaient à la fois des variétés métamorphiques et des variétés intrusives. En 1871, Green décrivit les vestiges de stratification qui subsistaient visiblement dans le granite du district d'Errigal et il suggérait qu'à certains endroits ces structures fantomatiques avaient subi l'action de la fusion et que les matériaux fondus, en vertu de leur mobilité plus grande, avaient pu jouer un rôle intrusif. L'objection que, pour convertir des roches sédimentaires en granite, certains éléments manquant primitivement doivent se trouver ailleurs ne paraît pas alors s'être présentée à l'esprit. C'est seulement quelques années plus tard que cette difficulté fut affrontée par Clifton Ward. Il tira de lui-même des arguments qu'une connaissance suffisante des travaux français lui aurait dû déjà rendre familiers. Discutant l'origine des granites du District des Lacs, il écrit : « Quoiqu'une simple fusion sur place soit incapable par elle-même de produire un granite, cependant un ramollissement obtenu sous l'influence de vapeurs chaudes porteuses de substances élémentaires venant de la profondeur pourrait donner lieu à une grande transformation. » Cette suggestion de Ward resta cependant mort-née et les vieilles idées continuèrent à régner en Irlande jusqu'à ce que le criticisme adverse de Calleyway et de Bonney, qui sympathisaient avec Rosenbusch, eut finalement banni le granite

« métamorphique » des pages des mémoires publiés par l'Irish Survey.

L'année critique paraît avoir été 1877. C'est le moment où Rosenbusch publie son ouvrage classique sur le métamorphisme de contact des phyllades qui entourent le massif de Barr-Andlau (Vosges) et démontre par une série d'analyses chimiques qu'il ne se produit aucun changement de composition dans les roches altérées si on les suit en marge du granite. Puisqu'il n'avait trouvé dans cet exemple aucune évidence du transfert des matériaux dans les roches indigènes, Rosenbusch, dans la suite, en vint à dénier la possibilité même d'une pénétration de ce genre et à proclamer que les gneiss et les schistes feldspathisés, bien qu'ailleurs ils postulent l'introduction des substances mères du granite, ne sont eux-mêmes que de simples granites ayant subi les effets du métamorphisme dynamique au cours des mouvements orogéniques.

De même que pour Werner, l'enseignement de Rosenbusch attira un grand nombre d'étudiants étrangers qui dans la suite parvinrent à la notoriété. Son autorité était si grande en dehors de la France, que, pendant deux générations, ce furent ses doctrines qui dominèrent l'opinion en pétrographie.

Les Français, cependant, ne faillirent pas à leur cause. Barrois (Rostrenen, 1884), Michel-Lévy (Flammanville, 1893) et Lacroix (Pyrénées, 1898-1903) trouvèrent des cristaux d'orthoclase volumineux et bien formés, absolument identiques à ceux du granite porphyritique avoisinant, non seulement dans les schistes sédimentaires, mais aussi dans des enclaves ayant la même origine et enrobées dans le granite. Ni les feldspaths, ni les granites n'offrent pourtant le moindre signe de dynamométamorphisme et les structures diffèrent entièrement de celles, par exemple, du granite du Mont Blanc, qui a ostensiblement été charrié.

La nature cruciale de l'évidence apportée par les gros feldspaths a depuis longtemps frappé les esprits, car personne ne peut douter sérieusement qu'ils participent tous de la même origine. Ou ils ont grandi dans la roche consolidée, ou ils ont cristallisé à partir d'un magma. On ne peut prétendre que des feldspaths identiques aient été engendrés dans des milieux physico-chimiques entièrement différents. Pourtant ceux qui croyaient encore à la cristallisation directe dans un magma recoururent à divers expédients pour éviter le témoignage désagréable apporté par leur présence dans les zones de contact et dans les enclaves. Rosenbusch, à l'étonnement justifié de

Lacroix, s'entêta dans ses idées anciennes. En réalité la possibilité du transfert des matériaux générateurs des silicates donna toujours lieu à des réserves jusqu'au moment où Goldschmidt apporta (1924) la preuve formelle qu'un influx de silice et de soude a accompagné le métamorphisme de contact des roches pélitiques de la région de Stavanger.

Avant cette démonstration convaincante, et même encore après, Cole (1915) et Thomas et Campbell Smith (1932), entre autres, cherchèrent une échappatoire en recourant à une hypothèse inacceptable. Selon eux, les gros feldspaths, issus d'une source magmatique, se seraient en quelque sorte introduits tout formés au sein des roches métamorphisées.

Mais il est une objection fatale à cette étrange opinion. On trouve en effet les cristaux de feldspath dans des roches de contact et des enclaves, évidemment d'origine sédimentaire, parmi lesquelles se trouvent, suivant la remarque de Read, des exemples typiques où « la succession des lits délicatement déposés suivant les trois dimensions n'est pas troublée le moins du monde ».

Au reste, d'innombrables découvertes montrent que les cristaux ne peuvent pas avoir été introduits mécaniquement. Cependant, Harker ignore ou minimise l'évidence et beaucoup d'autres pétrographes préfèrent garder le silence sur cette matière, probablement parce qu'ils ne trouvent rien à dire sur ce qu'ils n'arrivent pas à comprendre.

Quoi qu'il en soit, on peut tirer une conclusion définitive et qui ouvre de larges horizons chaque fois que l'on constate, et c'est généralement le cas, que les feldspaths n'ont pas pris naissance comme des cristaux « porphyritiques » de formation postgranitique. Pour citer Read : « Là où les xénolithes (enclaves) contenant des feldspaths sont sédimentaires, la roche englobant les xénolithes et contenant les mêmes feldspaths l'est également. Les granites porphyritiques sont issus des sédiments par une simple intensification du processus de feldspathisation. » Et il ajoute pertinemment que personne ne se trouve en mesure de *démontrer* l'origine magmatique du granite porphyritique qui renferme les « xénolithes ».

Dans l'entretemps, à la suite de plusieurs études comparatives de feldspathisation et de granitisation, les géologues français étaient arrivés à la conviction que ces phénomènes gagnent en intensité dans la profondeur jusqu'au point où les zones de contact des niveaux supérieurs de la croûte atteignent à des

régions dans lesquelles les roches se sont tranquillement transformées en granite sans troubler d'une façon appréciable la stratification préexistante. Michel Lévy, aussi bien que Lacroix, considère qu'il s'agit là d'un magma granitique en action, mais Lacroix précise que ce magma doit avoir été très différent chimiquement et physiquement d'un simple granite fondu, puisqu'il incorpore, au moment où il prend naissance, les schistes qui se trouvaient auparavant au même endroit. Termier (1904 et 1910) a développé cette conception jusqu'à sa conclusion logique lorsqu'il a fait remarquer que le magma actif de Lacroix pouvait être envisagé comme le produit de la roche préexistante et d'émanations hautement actives. Il parle de ces dernières comme de *colonnes filtrantes* qui surgissent de la profondeur et passent au travers des couches remplissant les géosynclinaux, apportant avec elles, au fur et à mesure qu'elles montent et se répandent, la force nécessaire aux échanges élémentaires. Là où leur intensité est la plus grande, les roches se granitisent en formant des magmas locaux, expulsant certains éléments qui accompagnent dès lors les autres matières migrantes pour former une vague de métamorphisme qui progresse en déclinant lentement. Une partie du magma formé en profondeur peut envahir la superstructure, donnant alors des intrusions granitiques offrant des types divers de contact, y compris celui étudié par Rosenbusch à Barr-Andlau.

Pour Termier, le métamorphisme régional et les intrusions (à tous les niveaux) « ne sont que deux effets d'une seule et même cause ». Bien que son impressionnante synthèse soit trop imaginative pour commander une sérieuse attention, elle n'en préfigure pas moins une bonne part des progrès accomplis depuis dans ce champ complexe de la recherche. En particulier nous y trouvons une résurrection des idées de Fournet sur le phénomène récemment étudié et désigné sous l'expression « avance du front migmatite ».

Le terme *migmatite* a été proposé par Sederholm pour désigner des roches dont l'apparence suggère qu'elles doivent leur origine « à un mélange de roches anciennes et d'un magma granitique d'arrivée tardive ». Le long des rivages méridionaux de la Finlande et dans ses archipels bordiers, la surface des roches balayée par les vagues offre des exemples spectaculaires de tous les phénomènes associés avec la granitisation. Par une série de mémoires abondamment illustrés (1907-1934), aussi bien qu'en conduisant diverses excursions internationales, Seder-

holm rendit ces « démonstrations par le fait » si familières à tous les géologues, que la pernicieuse influence de l'École de Rosenbusch se trouva finalement bloquée de façon décisive.

Sederholm n'a pas maintenu sa première conviction, d'après laquelle ce serait un magma primaire qui aurait envahi et traversé les roches anciennes, mais il ne semble jamais s'être départi entièrement de l'idée, malgré des hésitations passagères, qu'un tel magma doit être la source primordiale des matériaux envahisseurs. Il envisage un processus ultra-métamorphique qu'il qualifie d'*anatexis*, comprenant injection, solution, refusion, assimilation et différenciation comme autant d'étapes successives aboutissant au nouveau magma. Ce nouveau magma, issu à la fois du magma granitique originel et de la roche indigène, devient capable à son tour de provoquer une migmatisation secondaire. Dans la suite, il a attribué moins d'importance au magma granitique primaire ou secondaire et davantage à ce qu'il appelle *ichor*, c'est-à-dire une solution magmatique dérivée, hautement chargée d'eau et autres principes volatils et par conséquent douée d'un grand pouvoir pénétrant. Le magma granitique primaire devient ainsi un grand-parent dont l'ichor représente la seconde génération.

La faiblesse de cette conception réside en ce qu'elle implique que des quantités relativement petites d'ichor provenant de la différenciation magmatique possèdent néanmoins assez d'énergie et d'activité chimique pour déclancher l'*anatexis* et pour arriver à produire, en combinaison avec de nouvelles masses de roches indigènes, des quantités croissantes de magma et d'ichor. A toute évidence, si les matières migrantes sont capables d'engendrer la granitisation et l'*anatexis* sur une telle échelle, c'est qu'elles doivent différer profondément en propriétés et en origine des exsudations appartenant à la dernière phase de la constitution d'un magma granitique telles qu'on se les représente généralement. C'est pour cette raison que le terme neutre *émanations*, qui est dépourvu de toute implication génétique, gagne de plus en plus en faveur.

Wegmann, qui est maintenant le successeur d'Argand à Neuchâtel, a grandement clarifié les idées à la suite de ses études longues et détaillées sur le terrain en Finlande (1931 en collaboration avec Kranck) et au Groenland (1935 et 1938). Wegmann s'intéresse spécialement au mécanisme du *stoffwanderung*, c'est-à-dire de la migration des atomes, qui est impliquée dans la migmatisation et la granitisation, et il a rendu

familier le concept d'un front migmatique en marche. Il fait aussi œuvre de pionnier dans l'essai tenté pour débrouiller les relations complexes existant entre les mouvements orogéniques et les migrations atomiques. Il y dresse un schéma dans lequel il distingue :

a) Migration des éléments à travers un massif constitué de roche indigène qui reste stationnaire et maintient ainsi sa structure primitive malgré l'échange intense de matière et la recristallisation éventuelle.

b) Migration à travers un massif disloqué par des mouvements survenus pendant ou après la migration; dans ce cas le mouvement relatif qui se produit entre les parties migmatisées plus mobiles et les parties plus rigides appartenant au massif entraîné conduit inévitablement à des contacts intrusifs; et quand, comme il doit être arrivé souvent, la cristallisation finale se prolonge au delà de la période où les masses sont entraînées, il arrive que la structure primitive, à l'exception de quelques schlieren et enclaves, s'oblitére complètement pour faire place à un granite plus ou moins massif.

Le protagoniste de ces idées en Suède est Backlund, dont les vues personnelles se sont développées suivant une ligne à peu près semblable. Ce savant a particulièrement discuté les transformations de roches telles que calcaires, quartzites et metabasites, et il a montré comment le métasomatisme sélectif et progressif arrive à résoudre les difficultés chimiques qui paraissaient insurmontables à Callaway et à Binney et, plus récemment, à Harker et à Niggli; en particulier, les matières granitiques qui sont retenues et fixées dans le magma varient, d'après lui, avec la composition même des roches sur lesquelles elles doivent agir. Il a également insisté sur ce fait important que la granitisation a été l'accompagnement normal de l'orogénèse tout au long des temps géologiques. Read donne un admirable aperçu de ces récents développements finno-scandiens, aperçu où figure un résumé du courageux débat intervenu entre Backlund et Von Eckermann à propos de la genèse des granites de Rapakivi.

Les relations géochimiques comprises dans la granitisation peuvent être brièvement résumées dans la formule : granite = roche préexistante *plus* matériel ajouté (A) introduit par des émanations  $A+x$  auxquelles il est soustrait, *moins* matériel déplacé (B) chassé avec les émanations  $(B+x)$  qui se dégagent du magma. Quand les stades successifs de la transformation de

la roche préexistante en granite peuvent se reconnaître sur le terrain, on arrive (pourvu qu'aucun changement significatif de volume ne se soit produit) à déterminer A et B.

L'œuvre la plus notable accomplie suivant ces directives est celle de Doris L. Reynolds. Au cours de ses investigations sur le complexe de Newry, elle a prouvé, par l'analyse chimique de spécimens soigneusement choisis en corrélation les uns avec les autres, que le minimum exigé en introduction (A) pour les roches du pays consiste en sodium, calcium et silice; tandis que, après plusieurs échanges intermédiaires retracés en détail, le flux migrateur peut éventuellement entraîner aluminium, fer, magnésium, potassium, hydrogène, titane, phosphore et manganèse. Ce dernier élément, joint au résidu de sodium, calcium et silice non fixés, se dépose dans des bandes voisines de hornfels, qui se trouvent ainsi basifiées et transformées en roches chimiquement équivalentes à certaines variétés de quartz-diorite. D'après ces résultats et en faisant en outre appel à d'autres témoignages recueillis sur le même sujet, le Dr Reynolds conclut :

a) que le matériel introduit ( $A + x$ ) ne peut pas avoir été un magma ordinaire, puisque  $x$  n'a laissé aucune trace reconnaissable dans la roche;

b) que le matériel basique émigrant d'une région de granitisation, outre qu'il a enrichi l'auréole environnante en biotite et autres minéraux, est probablement aussi responsable des roches basiques et ultrabasiques « à apparence ignée » qui recouvrent les roches granitiques de nombreux complexes plutoniens;

c) qu'avant qu'une masse donnée de roches indigènes soit véritablement granitisée, elle doit passer par un stade préliminaire de basification.

Pour l'instant il n'y a que peu de chose à dire sur la source profonde des émanations qui ont participé à la formation du granite. Les zones de contact granophyriques et les veines rhéomorphiques localement associées avec les sills et les dykes de dolérite dans des régions non orogéniques indiquent qu'au moins quelques magmas basaltiques ont pu apporter une contribution limitée. En profondeur, le magma basaltique peut être une source d'importance considérable. Cependant, dans les régions orogéniques, les tentatives qu'on peut faire pour rattacher les émanations aux magmas présumés formés de roches basiques associées sont handicapées par la possibilité,

confirmée en certains cas, de voir ces roches elles-mêmes dériver comme sous-produits d'une opération de granitisation antérieure.

On peut concevoir les principaux flux d'émanations comme libérés par les magmas abyssaux, ou comme chassés par les pressions intenses qui doivent se produire dans le tréfonds au moment de la surrection des chaînes de montagne, ou encore comme provenant d'une autre source jusqu'ici tout à fait insoupçonnée. Mais l'ignorance dans laquelle nous sommes de la véritable source des émanations orogéniques ne milite aucunement contre la réalité de leur passage au travers des roches.

L'origine du magma basaltique reste également incertaine, malgré certaines affirmations contraires dont l'optimisme ne doit faire illusion à personne. Read cite, en les approuvant, les deux expressions contrastées suivantes de l'activité magmatique :

a) Associations *volcaniques* dérivées d'un magma basaltique générateur qui doit son origine à la refusion de l'assise basaltique terrestre;

b) Associations *plutoniques* dérivées d'un magma granodioritique générateur qui trouve son origine là où l'accroissement tectonique de la croûte fait passer l'assise « granitique » dans les limites de la zone de fusion; l'ascension d'un tel magma est précédée d'une vague de granitisation et de migmatitisation.

Depuis 1938, des estimations plus précises ont été faites sur la chaleur engendrée dans les roches par la radioactivité et sur la quantité de chaleur qui s'échappe à la surface de la croûte terrestre en Grande-Bretagne, en Afrique du Sud et dans la partie orientale de l'Amérique du Nord. Les résultats obtenus supposent que dans ces régions volcaniques les assises granitique et basaltique normales n'atteignent pas aux températures requises pour la formation du magma à plusieurs centaines de degrés près. En tenant compte de ce qu'on a pu constater jusqu'ici, on ne peut qu'émettre des suppositions sur la façon dont le magma basaltique prend naissance. Là où l'assise granitique est fort épaissie par les racines des chaînes de montagnes, la température à sa base peut éventuellement monter jusqu'au point nécessaire pour provoquer une fusion sélective, mais il faudrait pour cela de nombreux millions d'années, et encore il y aurait défaut de chaleur latente. On se rend compte ainsi

qu'une théorie de l'espèce n'arrive pas à satisfaire au fait bien observé que le granite commence à se former (à des niveaux parfaitement compris dans les limites de la dénudation subséquente) *dans le moment même* où les mouvements orogéniques sont en pleine action.

Ainsi le problème de la génération du magma subsiste tout entier avec son aspect déconcertant, sauf en ce qui concerne les possibilités attachées à l'hypothèse des émanations.

Il reste à considérer la très importante question spatiale : Comment des masses considérables (batholithes) de roche granitique ont-elles pu occuper leur emplacement présent, et qu'est-il advenu des roches qui se trouvaient auparavant au même endroit ? L'intrusion en masse d'un volume gigantesque de magma paraît avoir été mécaniquement impossible, et, comme le déclare Read : « la seule solution qu'on puisse suggérer est qu'en fait, ces larges masses de magma granitique n'ont jamais existé du tout. Là où l'on trouve de grandes accumulations de granite, elles résultent simplement d'un remplacement sur place opéré par la granitisation. Sans doute beaucoup de petites ont-elles aussi une origine identique, quoique quelques-unes d'entre elles puissent résulter de la consolidation du magma et quelques autres de celle du magma. Ainsi, bien qu'il puisse y avoir granites et granites, la plupart d'entre eux sont d'une seule espèce, mais tous doivent probablement se trouver en liaison originelle ».

Voilà une conclusion sur laquelle je me déclare tout à fait d'accord.

(Extr. de *Nature*, vol. 155, p. 412, 7 avril 1945; trad. R. Cambier.)

---