Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 31 (1951)

Heft: 2

Artikel: Les idées nouvelles en pétrographie et l'étude du métamorphisme alpin

Autor: Perrin, René / Roubault, Marcel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-25156

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.12.2025

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

Les idées nouvelles en pétrographie et l'étude du métamorphisme alpin

par *René Perrin*[1]) et *Marcel Roubault*[2])

Introduction

D. L. Reynolds remarquait en 1947 que certains auteurs, opposés à ses conceptions „métamorphistes" de la genèse du granite, lui avaient prêté des affirmations qui n'étaient pas les siennes, et les avaient ainsi critiquées plus aisément.

Le fait n'est point surprenant, d'autant plus que des hommes habitués à certaines conceptions ont peine à saisir clairement la pensée des auteurs de théories non orthodoxes.

Aussi, nous, métamorphistes de la première heure, ne nous étonnons-nous nullement que pareille mésaventure nous soit arrivée à diverses reprises, tant à propos de nos conceptions sur la genèse des roches éruptives grenues, que de celles qui ont trait au métamorphisme dans les Alpes.

Nous sommes ainsi attaqués sur des points particuliers, mais nous avons par contre la consolation de constater le chemin parcouru dans notre sens, depuis 16 ans, date à laquelle nous avons commencé. Il semble qu'il n'y ait plus de pétrographes qui n'admettent, en particulier, que certains granites se sont formés dans le solide par métamorphisme sans fusion. Et ce n'est pas là la seule „convergence", car nous avons la satisfaction de retrouver en nombre d'autres points, dans des articles d'auteurs éminents, des conceptions qui, au moment où nous les avons exposées, avaient heurté bien des esprits. Il nous arrive ainsi d'être cités uniquement pour être traités d'extrémistes ou d'„enthusiastic", comme le dit avec son humour habituel H. H. Read pourtant „metamorphist"; n'a-t-il pas, cependant, en 1942, exposé comme argument fondamental en faveur de la granitisation le phénomène de „feldspathisation", argument qui a été à la base de nos conceptions originelles, et que nous avons développé en 1939 dans une brochure, restée sans doute inconnue de lui?

---

[1]) Administrateur-Directeur Général de la Société d'Electrochimie, d'Electrométallurgie et des Aciéries Electriques d'Ugine (Savoie).

[2]) Professeur à l'Université de Nancy, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière et Directeur des Recherches et Exploitations Minières au Commissariat à l'Energie Atomique.

Aussi sommes-nous heureux de l'occasion qui nous est donnée de résumer nos idées et leur „pourquoi" spécialement pour les pétrographes et géologues de la grande école suisse.

Nous dirons tout d'abord que nous sommes entièrement d'accord avec P. NIGGLI sur l'importance première des connaissances physicochimiques pour l'interprétation des phénomènes géologiques, mais sous la réserve formelle que l'observation des faits doit prendre le pas sur des connaissances théoriques encore très imparfaites et fragmentaires à l'heure actuelle.

La progression de ces connaissances est constante et apporte de précieux enseignements: nous en verrons un exemple à propos des études de N. L. BOWEN et O. F. TUTTLE sur les diagrammes de feldspaths, mais la science des réactions à l'état solide en particulier est très jeune encore, et il est imprudent, comme cela a été fait à différentes reprises, d'affirmer ou de nier certaines possibilités; nous le montrerons par la suite.

La théorie magmatiste a, en elle-même, pour base, des faits d'observation: la conception de magmas granitiques liquides est tout entière issue de l'allure éruptive de massifs granitiques mise en lumière par James Hutton. Tout ce qui fut édifié par la suite en matière de théories magmatiques n'a, en soi, aucune valeur de démonstration, et les belles et méritoires théories de N. L. BOWEN et de P. NIGGLI n'ont eu pour but que de tenter l'élaboration d'une explication rationnelle de l'existence des magmas granitiques et de faits les concernant.

Nous avons résumé succinctement dans un autre article (1949[1]) les nombreuses hypothèses sur lesquelles reposent ces théories, ainsi que les contradictions qu'elles présentent avec les faits. Nous avons indiqué qu'elles ne nous paraissaient même pas conformes avec les données physicochimiques actuelles sur les diagrammes de solidification. Il est, par exemple, plus qu'anormal de concevoir que lors de la solidification d'un magma granitique 1⁰) se déposent d'abord de très faibles quantités de cristaux de zircon et de rutile, alors que l'expérience quotidienne prouve la parfaite miscibilité de ces corps avec les silicates liquides; 2⁰) la potasse et surtout l'eau soient parties intégrantes des premiers minéraux formés, tels que la biotite ou la hornblende, et ne reparaissent ensuite — après dépôt de cristaux n'en contenant pas — que dans l'orthose pour la potasse et, plus tard encore pour l'eau, dans les liquides résiduaires hypothétiques.

Des spécialistes éminents en matière de diagrammes auxquels nous avons exposé la question, ont partagé notre étonnement et le grand magmatiste, S. J. SHAND, a eu parfaitement conscience, lui aussi, de cette anomalie en ce qui concerne l'eau.

Remarques préliminaires

A. Sur la cristallisation

Nous tenons à dégager quelques remarques touchant la cristallisation, à propos de questions abordées par P. NIGGLI dans son récent article (1950).

1⁰ Nous l'approuvons sans réserve, quand il indique qu'il n'y a pas de minéraux caractéristiques du métamorphisme par dislocation. Nous exposions d'ailleurs des conceptions semblables en 1946 (Tré-la-Tête).

2⁰ P. NIGGLI écrit „Aber zu schliessen, dass gleichartige Feldspäte nur magmatisch oder nur pneumatolytisch oder nur durch Umkristallisation im Festkörperaggregat entstehen können, ist so absurd wie die Behauptung, ein aus einer Metallschmelze entstandener Metallkristall müsse unbedingt verschieden sein von einem durch Temperung und Rekristallisation entstandenen Metallkristall eines zunächst kalt bearbeiteten Werkstoffes".

Nous sommes d'accord avec la première partie de la phrase concernant les feldspaths, sous la réserve des formes haute température et basse température (exemple: cas de l'albite); aussi n'avons-nous jamais raisonné sur du „gleichartig" et ne voudrions pas que le lecteur pût croire que nous avons fait cette énorme faute de raisonnement. Nous reviendrons sur ce point fondamental tout à l'heure.

3⁰ Mais nous ne sommes pas d'accord sur la seconde partie de la phrase qui concerne les métaux. P. NIGGLI raisonne sans doute sur les cristaux qui forment le grain visible des métaux: mais cette cristallisation-là s'est formée „dans le solide" aussi bien pour les métaux coulés où elle est secondaire que dans les recristallisations après transformation. La forme primaire des cristaux métalliques coulés est ce que l'on appelle les „dendrites", cristaux allongés, parfois de grandes dimensions, forme que l'on ne reproduit nullement par transformation dans le solide, pas plus que par frittage à haute température de poudres de métaux solides. Il n'est pas absurde de prétendre le „unbedingt verschieden", car cela est. La forme primaire dendritique est caractéristique de cristallisation à partir d'un liquide.

Bien plus, malgré la cristallisation secondaire qui se substitue dans le solide à la cristallisation dendritique primaire, il subsiste une „mémoire" de celle-ci du fait des hétérogénéités primaires, de ce que l'on appelle la „ségrégation dendritique", mémoire que les moyens d'investigation modernes permettent parfaitement de mettre en évidence et grâce à laquelle, par exemple, on peut distinguer un métal coulé recristallisé d'un métal fritté.

P. NIGGLI ne paraît pas avoir choisi, pour appuyer sa thèse, un bon exemple: celui-ci est caractéristique, au contraire, de l'influence sur la forme des cristaux, des conditions de milieu et, en particulier, des résistances passives opposés par celui-ci à l'accroîssement des cristaux. Même dans le liquide, les formes dépendent considérablement des conditions de refroidissement: exemple des surfusions ou des sursaturations. P. NIGGLI dit que la consistance du milieu joue un petit rôle sur la statique, ce qui nous apparaît contestable, ne fût-ce que pour toutes les hétérogénéités du cristal, mais reconnaît lui-même qu'elles influencent la „cinétique" de la formation des cristaux: nul ne peut nier l'influence de la tension superficielle et de la viscosité. Mais cette cinétique joue un rôle primordial pour les formes: exemple des dendrites. Aussi ne pouvons-nous être d'accord avec ses conclusions.

Les belles photos données par A. PORTEVIN (1928) illustrent le fait dans le cas de silicates: les basaltes. La comparaison des longues aiguilles d'olivine obtenues par refroidissement lent du basalte fondu avec les sphérolites de la même olivine dérivant du recuit dans le solide d'un basalte vitreux, issu d'un refroidissement rapide, est plus éloquente que tout raisonnement théorique sur l'influence des conditions de milieu.

B. Sur le rôle de la „soudure"

Qu'il nous soit permis encore de faire une remarque d'ordre général, qui s'applique d'ailleurs non seulement aux granites, mais à nombre d'autres faits pétrographiques et aux conclusions géologiques corrélatives: il nous paraît absolument contraire à la méthode scientifique d'envisager des modes de genèse différents pour des portions de terrains contigües là où l'observation précise ne montre que du continu et plus encore de l'identique[3]). On n'a le droit d'établir une pareille coupure que si des faits patents l'exigent, par exemple la soudure que cite P. NIGGLI. Le fait qu'il y a des diffusions de part et d'autre de la soudure n'empèche pas l'existence de celle-ci, mais envisager par exemple un mode de genèse différent pour la bordure d'un massif granitique et pour son intérieur — si l'observation montre la continuité totale ou l'identité — ne nous paraît pas scientifiquement admissible, à moins que l'on n'apporte la preuve formelle de l'existence de cette coupure, de la „soudure", preuve qui serait exigée en toute autre discipline scientifique.

C. Sur les états mystérieux de la matière

Dans le débat liquide ou solide, certains auteurs envisagent des états intermédiaires mystérieux, tel l'état oligophasé évoqué par L. GLANGEAUD.

Une part des conclusions sur la genèse du granite étant déduite du comportement de celui-ci par rapport aux terrains encaissants, une autre remarque s'impose: les schistes, quartzites, micaschistes, gneiss, calcaires, diorites à grain très fin, diabase, etc. ... qui constituent ces roches encaissantes, sont très souvent, soit au contact même, soit tout près de celui-ci, absolument identiques à des roches observables à la surface du sol, en de nombreux points de notre planète, loin de contacts granitiques: mêmes cristaux, mêmes structures. Ces roches-là ont sans doute été portées à des températures relativement élevées, mais ce fait n'a en rien altéré leur structure ou leur texture; nous devons donc scientifiquement considérer qu'au moment de la formation des granites, ces roches n'étaient pas dans un état spécial et énigmatique, de quelque nom que l'on baptise cet état, elles étaient dans le même état cristallin, mais simplement soumises à des températures et pressions plus élevées: il n'y a aucun mystère à évoquer et nous avons le droit le plus absolu de raisonner sur ces roches en l'état où nous les observons actuellement.

Le problème du granite

1° Rappel de quelques données fondamentales

Ce problème, réduit à sa plus simple expression, s'énonce ainsi à notre sens:
Les granites sont-ils issus ou

[3]) Nous écrivions déjà en 1939, dans l'exposé du problème du granite: „S'il est démontré par WEGMANN et KRANCK que des roches, où l'on ne retrouve plus qu'à l'état de traces infimes les vestiges des schistes originels, ne proviennent pas des silicates fondus, en vertu de quoi faut-il qu'il en soit ainsi, quand ces dernières traces ont disparu, ou tout au moins ne sont plus perceptibles à l'œil des observateurs les plus exercés"?

a) de la cristallisation d'un magma liquide, celui-ci pouvant résulter soit d'une intrusion, soit de la refusion de terrains préexistants modifiés par exomorphisme, c'est-à-dire diffusion de substances; ou
b) du remplacement de roches solides, généralement cristallines, sans passage par l'état liquide; ou enfin
c) y a-t-il granites et granites, les uns issus d'un processus, les autres de l'autre?

Nous n'avons pas l'intention de reprendre ici l'ensemble des observations qui nous ont conduits à la genèse du granite par remplacement sans fusion. Nous nous attacherons spécialement, soit aux faits nouveaux, soit à des points ayant fait l'objet de remarques d'autres auteurs. C'est dans cet esprit que nous rappellerons des faits fondamentaux: développement dans les roches encaissantes ainsi que dans les enclaves de ces roches dans les granites, de cristaux de feldspaths identiques, dans leurs moindres détails, avec ceux du granite, certains même étant à cheval sur la limite des deux roches — développement dans des conditions analogues de plages granitiques entières complètement isolées.

Ainsi l'on voit naître, complètement isolés dans des roches encaissantes restées cristallines, donc solides, des feldspaths identiques aux feldspaths du granite lui même jusque dans leurs plus petites particularités: de forme, de taille, de coloration, de présence d'inclusions d'autres cristaux; biotite ou hornblende, quartz par exemple, de zonages extraordinaires (rapakivi), existence de microperthites, etc. . . . etc.

Il ne s'agit point de feldspaths „gleichartig", et ces feldspaths du granite et de la roche encaissante sont à quelques centimètres de distance; et le granite est lui-même identique au granite du gros du massif. Bien plus, dans certains cas l'existence de grands cristaux de feldspaths à cheval sur la limite des deux roches ne laisse place à aucun doute possible sur l'identité de genèse. Etablir une coupure entre les modes de genèse, comme semblent vouloir le faire F. F. Grout, S. J. Shand et P. Niggli, nous paraît impensable: c'est également l'avis absolu de nombreux physicochimistes saisis par nous de la question. Les feldspaths à cheval sur les limites donnent d'ailleurs la preuve formelle.

Les feldspaths développés dans les roches encaissantes ont pris naissance dans le solide. La probabilité pour que des cristaux de feldspaths identiques dans leurs plus petites particularités aient pu naître à quelques centimètres de distance et se développer dans des conditions aussi radicalement différentes que la cristallisation, à partir d'un magma liquide d'une part, et la cristallisation dans un milieu solide de tout autre composition, d'autre part, est pratiquement nulle. Donc les cristaux de feldspaths du granite ont pris naissance dans le solide.

Nous paraphraserions volontiers la phrase de H. H. Read citant le duc de Wellington (1943/44) „Si l'on croit que ces deux séries de feldspaths ont des origines différentes, on peut tout croire".

De plus, ce n'est pas un feldspath de granite que l'on voit souvent se former dans les roches encaissantes, mais bien plusieurs et même des plages granitiques entières, identiques au granite et entièrement encaissées dans la roche étrangère. Elles nous démontrent la formation du granite par remplace-

ment dans le solide, aucune hypothèse à base de liquide n'étant susceptible de donner l'explication de tels phénomènes. On observe d'ailleurs toute la continuité dans la formation, dans les roches encaissantes ou enclaves, de feldspaths isolés, orthose par exemple, ou de plages contenant déjà, à côté de celui-ci, du quartz et un plagioclase, ou des plages de granite complètes, ce qui exclut toute hypothèse d',,Ausblutungen" correspondant théoriquement à un liquide de point de fusion minimum: les examens en lames minces montrent en outre les phénomènes de ,,corrosion entre cristaux". Feldspaths ou plages de granite ont pris la place de portions antérieures de la roche: il s'agit de remplacement dans le solide.

Nous ne répéterons pas les autres arguments ou preuves en faveur de la genèse dans le solide, tels que les digestions de filons, etc. etc. Nous répondrons seulement aux objections de F. F. Grout et P. Niggli en particulier, qui reprochent de tirer des conclusions sur la genèse d'un massif de seules observations de bordures: ,,um das Entstehen der Hauptmassen auseinander als bewiesen anzunehmen". D'où ces auteurs pensent-ils que l'on peut déduire le mécanisme de genèse, sinon par priorité du comportement du granite vis-à-vis des autres roches? N'est-ce pas là l'origine fondamentale de la théorie de Hutton et de la conception magmatiste: l'aspect éruptif en bordure? F. F. Grout et P. Niggli ne reprochent cependant pas à Hutton, voire à eux-mêmes, ces conclusions qu'ils semblent bien conserver comme argument essentiel.

Si l'étude de ces faits de bordure effectuée en abstraction de toute impression subjective, sensorielle, ,,anthropomorphique", prouve précisément que ces zones de granite à aspect éruptif sont issues de remplacements dans le solide de terrains préexistants, quel argument dirimant reste-t-il pour prouver que la ,,Hauptmasse" est issue d'un magma? En vertu du principe de continuité, où placer la coupure de genèse dans un massif là où il n'y a aucune coupure dans les observations? Au meeting d'Ottawa (1947) nombre de pétrographes ont regretté de ne point connaître de critères permettant de distinguer les granites issus de métamorphisme de ceux qui seraient issus de magmas, ceci d'un granite à l'autre; que dire alors dans un même massif?

Nous n'acceptons pas, d'ailleurs, qu'il soit prétendu que nous tirons nos conclusions simplement de bordures: nous avons passé des mois à observer des massifs granitiques entiers en France ou en Afrique du Nord. Nous avons retrouvé des zones d'enclaves et le phénomène de feldspathisation en plein cœur des massifs, ainsi que des faits de digestion par le granite de filons à bords rectilignes et parallèles, et de ,,corrosion entre cristaux". Nous ne sommes pas les seuls: Erdmannsdörffer, Drescher-Kaden, entre autres ont fait des observations analogues.

Faut-il concevoir qu'il y a, en dehors des bordures, dans le cœur des massifs, d'autres zones issues, elles aussi, de remplacement dans le solide, avec nouvelles coupures de genèse entre des parties internes des massifs?

Nos nombreux voyages à l'étranger nous ont aussi permis de constater sur bien des dalles de granite provenant de carrières, qui ne sont généralement pas ouvertes dans les bordures, l'extrême généralité du phénomène de feldspathisation. Ce dernier a été constaté par de très nombreux auteurs depuis Auguste Michel-Lévy et Ch. Barrois; on peut, à ce propos se reporter aux citations faites par H. H. Read (1943/44).

Alors, au nom de quel principe scientifique peut-on concevoir deux modes de genèse, l'un métamorphiste, l'autre magmatiste, pour bordure et centre, sinon par un attachement passionné aux anciennes conceptions? Mais attachement n'est ni raisonnement, ni preuve. Nous attendons des preuves de coupure données à l'intérieur d'un même massif.

Quant aux granites en général, nous avons écrit que leur structure si particulière laissait pour nous peu de place à une hypothèse de convergence d'aspect de cristallisation d'ensemble, l'une dans le solide, l'autre par cristallisation directe à partir d'un magma fondu, et que cette structure nous paraissait caractéristique de cristallisation dans le solide, ceci sans exclure la simple recristallisation dans le solide, de certaines laves épanchées[4]).

Récemment, N. L. Bowen et O. F. Tuttle (1950[1]) ont étudié expérimentalement les diagrammes du système orthose et albite. Ils ont montré que ces feldspaths forment des solutions solides complètes à haute température et tracé approximativement la courbe des lacunes de miscibilité dans le solide, séparant la zone à un feldspath de la zone à deux feldspaths. Ils concluent en parlant de syénites et granites pour expliquer les faits d'observations, qu'ils „may be expected to have early feldspars that are no longer stable at the temperature approaching final crystallization and are consequently recristallized by the late residuals in the manner described". Nous avons analysé et discuté leurs essais et théories dans un article en cours d'impression à la Société géologique de France.

Le progrès, expérimental en l'occurrence, des connaissances physico-chimiques, conduit ainsi, dans l'hypothèse magmatiste, à envisager la nécessité d'une recristallisation des granites dans le solide, nouvelle et énorme hypothèse. Mais que deviennent alors les séquences de cristallisation et les théories édifiées pour les expliquer? Notons, néanmoins, en passant, cette convergence, en esprit celle-là.

Signalons en passant que d'autres belles expériences de N. L. Bowen et O. F. Tuttle (1950[2]) sur l'albite des formes „haute température" et „basse température", les obligent à envisager une recristallisation à basse température des albites des roches plutoniennes éruptives; ils croient cependant que les nouveaux cristaux ont dû garder la mémoire („memory") de leur ancienne forme. Ils sont conduits à cette hypothèse pour expliquer que l'albite, aussi bien des roches éruptives que des pegmatites, aplites et roches métamorphiques, est de la forme basse température, la forme haute température obtenue expérimentalement par solidification (ou par synthèse pneumatolytique dans le solide même à basse température) ne se rencontrant que dans des laves.

Aussi, là encore, l'observation des faits place la coupure entre les roches métamorphiques, plutoniques, filoniennes, d'une part, et les laves d'autre part; mais l'attachement aux conceptions magmatistes veut que l'on essaye de mettre la coupure ailleurs, là où il y a continuité, à l'aide d'une hypothèse aussi gratuite que considérable.

Si N. L. Bowen et O. F. Tuttle font preuve d'une parfaite objectivité

---

[4]) Nous croyons qu'une étude chimique et minéralogique complète et précise de passages granites-microgranites-rhyolites, serait particulièrement intéressante à cet égard.

dans l'exposé des résultats expérimentaux, nous n'avons pas l'impression, de notre côté, de mériter spécialement le reproche de ne pas nous laisser guider dans l'édification des théories par les connaissances physicochimiques.

La grande objection à la formation des granites par remplacement a résidé et réside encore pour certains dans l'allure éruptive à l'emporte-pièce et l'existence d'apophyses ou de filons dans les terrains encaissants. Cette objection a conduit certains grands auteurs métamorphistes, comme C. E. Wegmann, D. L. Reynolds, H. G. Backlund, à admettre des mouvements postérieurs à la granitisation, une „mobilisation", un „rhéomorphisme".

Dès l'origine, à la suite d'observations personnelles, en particulier celles de pseudofilons de feldspaths en cristaux isolés, sur le fond des roches encaissantes, nous avons conçu que la granitisation dans le solide pouvait donner naissance à de telles apparences et que l'impression d'injection de liquide n'était qu'une impression subjective, anthropomorphique. Depuis, les observations se sont multipliées et l'impression subjective est, à notre sens, totalement à rejeter comme preuve. Citons simplement la magnifique observation de P. Bearth dans le Mont Rose: les lits de grenats d'un gneiss se poursuivent sans interruption à travers les apophyses d'un granite intrusif dans ces gneiss. P. Bearth conclut à la formation de ces apophyses par remplacement: toute injection de liquide est effectivement exclue.

Mais il y a mieux encore: nous avions envisagé la possibilité de formation de certains filons d'aplite et pegmatite par remplacement dans le solide. Depuis, de nombreuses observations personnelles nous ont conduits à conclure formellement dans ce sens, tandis que G. C. Goodspeed (1940), H. G. Backlund (1943), B. C. King (1948), R. H. Higazy (1949), à la suite de constatations précises, en faisaient autant.

Nous avons exposé (1949) des critères géométriques simples qui permettent souvent de distinguer, en cas de réseaux de filons à bords parallèles, si les filons sont dûs à des injections de liquides dans des fentes ou à un remplacement dans le solide, et cité des exemples particulièrement frappants observés à Saint-Jean du Doigt (Finistère). Au reproche qui nous a été adressé de faire de la géométrie plane, alors qu'il s'agissait de problème de l'espace et de négliger des mouvements relatifs possibles de blocs, nous répondrons en demandant que l'on nous décrive les mouvements relatifs de ces blocs qui auraient conduit aux figures précises observées que nous avons données. Là encore, si on peut croire cela, on peut tout croire.

Remarquons que P. Niggli a écrit de son côté „das Einspritzen ist oft nur ein Wandern und ein Sammeln". Cette formation par remplacement de filons à bords parallèles, d'aplite ou pegmatite, qui évoquent cependant — et à quel point — l'injection de liquide dans des fissures entr'ouvertes, ruine définitivement à nos yeux, l'objection fondamentale de l'allure éruptive, sans parler de ses répercussions sur les conceptions de séquences pegmatitiques, pneumatolytiques, etc. . . . ; elle fait également comprendre l'existence des taches, schlieren, traînées diffuses d'aplite et pegmatite.

Certes, il est surprenant que le remplacement puisse donner naissance à de telles apparences, mais les faits sont là.

Nous avons esquissé antérieurement une hypothèse d'interprétation scientifique (1949[3]).

Remarquons qu'il est des apparences au moins aussi étranges dont l'interprétation par remplacement dans le solide s'impose; dans le cas des granites orbiculaires de Buffalo Hump-Idaho, G. C. GOODSPEED a observé la formation progressive des orbicules dans des micaschistes, donc dans le solide.

2° Mécanisme de la granitisation

Nous avons exposé dans nos divers articles les nombreux arguments en faveur de la genèse des granites par remplacement dans le solide. Il reste à déterminer le mécanisme de ce remplacement. Est-il dû à l'action de gaz, ou de solutions circulant à travers des orifices capillaires, ou à des films intergranulaires, ou à des diffusions d'ions à travers les réseaux cristallins, etc....? P. NIGGLI parle souvent de „phase moléculaire dispersée". Mais, cette expression, comme celle d'ichor, n'évoque pour nous, aucun phénomène physico-chimique précis.

La granitisation ayant été limitée dans l'espace, permet souvent d'observer des roches à divers degrés de transformation: évolution des enclaves dans une zone d'eruptive breccia jusqu'à des roches très proches du granite. Il est ainsi possible de reconstituer une véritable cinétique du phénomène qui a été, pour ainsi dire, fossilisé pour notre profit. Le granite lui-même, n'est souvent pas totalement „achevé", ses cristaux conservent des „relics" d'anciens cristaux. C'est l'observation raisonnée de ces faits qui doit apporter la clé.

a) Apports et Diffusions à double sens

Il n'y a pas eu simple apport de substances, alcalines par exemple, comme on l'a pensé jadis pour le métamorphisme. Toutes les observations de granitisation montrent qu'il y a apport de certains éléments, le plus fréquemment K, Na, Si, mais, en contre partie, départ d'autres éléments, comme Al, Fe, Mg. Or ce ne sont pas toujours les mêmes éléments qui arrivent et les mêmes qui partent; ainsi pour le Ca, tantôt il y a apport, tantôt il y a départ. Dans le cas de quartzites contenus dans le granite du Bushveld complex, suivant DALY (1928), il y a apport d'Al parallèlement à K et Na, et départ de Si.

Pour les inclusions de quartzites de gabbros du lac Huron décrites par JONES, il y a apport de Na et Ca, mais aussi de Al, Mg, Fe, et départ de Si, etc. Ce fait de diffusions fractionnées à double sens, comme nous les avons qualifiées, est très général et non limité à la granitisation.

J. JUNG (1928) l'a décrit dans les marbres à galets de gneiss de St-Philippe: il s'est produit de telles diffusions entre le calcaire et les gneiss solides: Ca vers le gneiss, Fe, Ti, Al, Na, Mg, Si vers le calcaire.

Les galets ou débris de dykes de granites inclus dans les marbres du Natal (DU TOIT, 1919) sont entourés de couches successives de silicates magnésiens; au delà il n'y a que de la calcite pure, puis la dolomie. Le magnésium de celle-ci a traversé des bancs de calcite pour se réunir à la silice et à l'alumine des galets. Les diffusions entre corps indubitablement solides, cristallins, sont pour ainsi dire, dans ces cas, écrites sur le terrain.

Nous avons décrit ces diffusions à double sens dans un cas dit de dynamométamorphisme pur à Tré-la-Tête (1946); elles sont écrites dans la séricitisation des plagioclases et la chloritisation de la biotite, phénomènes considérés

comme de basse température. A. HOLMES et D. L. REYNOLDS (1947) les ont observées dans des transformations de quartzites ou micaschistes, ou dans l'albitisation de schistes, MIKKOLA (1947) dans la réaction entre dolomies et schistes phylliteux, TILLEY (1947) à un contact gabbros calcaires, etc. Ces échanges se produisent entre roches voisines et avec la profondeur: il semble que même dans des cas de métamorphisme léger, il y a déjà des migrations à grande échelle: enrichissement en soude du mésozoïque pyrénéen (MICHEL LONGCHAMBON, 1912), apport de soude et départ de Fe, Mg, Ca dans la Vanoise (ELLENBERGER), etc.

Au fur et à mesure que l'intensité du métamorphisme croît, l'intensité des échanges avec la profondeur croît parallèlement et devient prépondérante dans la granitisation: même dans ce cas la nature des roches antérieures se manifeste par une plus ou moins grande résistance à la granitisation: fait bien connu des quartzites et des calcaires, ceux-ci donnant lieu spécialement à des phénomènes d'endomorphisme. Mais il ne paraît guère possible d'établir une coupure quelconque, mise à part l'échelle dans les processus de transformation qui vont du métamorphisme le plus léger à la granitisation. Partout on observe des apports de corps compensés par des départs de corps; les observations sur le terrain donnent les mêmes résultats que la méthode statistique de LAPADU-HARGUES (1945).

Répétons-le, ce ne sont pas toujours les mêmes éléments qui partent et les mêmes qui arrivent: toutes les combinaisons existent. Si le mouvement général d'ensemble semble bien être l'apport d'alcalins et le départ de ferromagnésiens, tous les cas sont observables dans le détail. Il n'y a ainsi dans les faits aucun phénomène qui paraisse en relation ou avec les volatilités, ou avec les solubilités dans l'eau, au-dessous ou au-dessus de la température critique. Nous rendons hommage aux belles expériences de VAN NYEUVENBOURG, de J. WYART (1947) et de T. E. GILLINGHAM (1948). Elles montrent que l'eau à l'état supercritique a un pouvoir de dissolution notable pour certains corps, mais aussi que ce pouvoir diffère beaucoup d'un corps à l'autre, exemple: selon GILLINGHAM, notable pour $CO_3 K_2$, nul pour CO_3Na_2, etc.

Or, l'observation géologique prouve que tous les corps diffusent et se remplacent, la nature des échanges étant conditionnée par les compositions des roches, et qu'il n'y a pas un corps qui soit apporté sans qu'une quantité correspondante d'un ou plusieurs corps ne soit expulsée, exemple: apport de K, départ simultané de Al, Mg, Fe. Il apparaît clairement que ces échanges sont conditionnés par des phénomènes chimiques, de remplacement de certains corps par d'autres, et non par des phénomènes physiques comme la volatilité ou la circulation de solutions transportant des quantités très inégales des corps, selon leurs solubilités, comme c'est le fait pour les eaux souterraines. Les conceptions par fumerolles ou solutions paraissaient plus adéquates au temps où l'on n'envisageait qu'un apport, spécialement d'alcalins; ceux-ci en effet sont relativement volatils et leurs sels sont solubles, mais la constatation des échanges et des départs parallèles d'Al, Mg, Fe, Ca, par exemple en quantités équivalentes, change du tout au tout le problème.

Ainsi l'observation nous paraît contraire à l'hypothèse des mécanismes par circulation de solutions, ou de gaz, ou fumerolles. Par contre, tous ces faits sont conformes à des faits expérimentaux de réactions entre solides.

Quant au rôle effectif de l'eau et des gaz, nous admettons parfaitement leur action catalysante, d'ailleurs établie expérimentalement dans des réactions entre solides (FORESTIER et HEDWALL); il faut d'ailleurs de l'eau ou tout au moins de l'hydrogène pour faire du granite, du fait des micas et de la hornblende. Mais nous ne pouvons croire pour la granitisation au mécanisme par solution et la présence de bulles à libelle mobile ne peut nous en convaincre, surtout après les belles observations de O. F. TUTTLE (1949) sur la Washington Area que nous avons commentées dans un article en cours d'impression à la Société Française de Minéralogie.

b) Evolution de la cristallisation

Mais les diffusions d'ions dans les cristaux sont, en outre, et surtout, inscrites dans l'évolution de la cristallisation: nous revenons ainsi sur ce fait si fréquent de cristaux se développant au détriment d'autres cristaux, les dévorant, si nous osons nous exprimer ainsi, et en englobant des restes. Nous donnons tout d'abord quelques-unes des microphotographies que nous avons déjà publiées en 1939. La figure 1 semble montrer la cinétique du développement d'un cristal d'orthose aux dépens d'un cristal de quartz: l'avancée du feldspath crée sur ce cristal dans un cas un golfe arrondi, puis tend à isoler une goutte encore reliée au quartz par une presqu'île, enfin englobe complètement une autre goutte. Nous nous refusons à envisager la cristallisation d'une orthose autour d'un cristal de quartz, comportant côte à côte un lobe, puis un lobe relié par un pédoncule coupé par la plaque mince, enfin un lobe relié par un autre pédoncule passant au-dessus ou au-dessous de la plaque.

La fig. 2 montre un pédoncule mince, et même interrompu sur la coupe, d'une enclave de quartz dans l'orthose, Les fig. 3 et 4 montrent des relics de plagioclases isolées dans le quartz: l'appartenance au même cristal est certaine, car les macles sont en prolongement.

On objectera encore que la liaison des cristaux peut se faire en dessous ou au-dessus de la plaque; d'accord; l'extraordinaire forme de corrosion de plagioclase de la fig. 5 prouve qu'il peut en être ainsi. Mais la fig. 3 de cette planche montrent un état de „digestion" plus poussé, où il ne reste par endroit que de véritables ombres de plagioclases dans du quartz.

B. C. KING (1947) a fait des observations entièrement parallèles: „Sometimes shadows of replaced portions of plagioclases plates may be seen in the potash feldspar". Il donne en même temps une belle série de croquis où l'on observe la digestion de quartz par des cristaux de séricite, muscovite et feldspaths alcalins; les „relics" isolées de quartz se groupent en plages de même orientation optique, et présentent les mêmes extinctions roulantes (identiques à celles des quartz des quartzites encaissantes), ceci à l'intérieur de feldspaths ne présentant aucune trace d'écrasement.

Il rappelle aussi les observations d'ANDERSON, au Cassia Batholith où l'on assiste, pour ainsi dire, à la formation progressive de grands cristaux de feldspaths, ayant d'abord une allure de fantôme, puis se complétant avec des formes cristallines nettes.

Pour qui examine ces documents, il ne peut pas être question que les cristaux de quartz, plagioclases, biotite ou hornblende, se soient formés tels

quels avec leurs formes vraiment ahurissantes. Si on peut croire celà, on peut tout croire.

Il est certain aussi que restent à l'intérieur de cristaux des résidus absolument isolés ayant appartenu auparavant à un seul et même cristal. B. C. King fait remarquer qu'il ne peut être question de cristaux de quartz et feldspaths présentant des pédoncules enchevêtrés dans les cas observés par lui, car les inclusions de quartz dans le feldspath sont innombrables et la réciproque n'existe pas. Donc les „relics" de quartz sont isolées.

Si l'on reconstitue la cinétique, grâce aux nombreuses coupes, montrant des états d'avancement différents, il apparaît que des cristaux se substituent à d'autres ou à des groupes d'autres cristaux, les pénètrent, en isolent certaines portions et continuent à se développer au détriment de celles-ci jusqu'à ce qu'il ne reste que des traces, des ombres, ou rien, ce qui explique le terme de corrosion entre cristaux que nous avons choisi. Pour que cette substitution se produise et que cette digestion de portions isolées se poursuive, il faut que des diffusions d'ions s'effectuent à travers le réseau cristallin des nouveaux cristaux qui se forment. Ainsi dans le cas du quartz et des feldspaths calcosodiques, il est obligatoire que des ions Na, Ca, Al, aient diffusé à travers le réseau du quartz pour aller se combiner ailleurs.

Aussi nous pensons être en droit d'affirmer: les diffusions d'ions dans le réseau cristallin ont joué un rôle certain et très important puisqu'il est inscrit dans la cristallisation de très nombreuses roches des origines les plus diverses, de toutes contrées, sans parler des innombrables observations semblables plus ou moins précises d'autres auteurs. Elles sont souvent plus fréquentes et plus spectaculaires dans les zones à granitisation inachevée, bordures, enclaves, etc. (L'évolution des enclaves du granite de Lanildut en Bretagne nous a fourni encore de très beaux exemples). Elles sont particulièrement démonstratives dans ces zones où l'on saisit le granite en cours d'élaboration. Mais elles ne se limitent pas à elles; nous en avons trouvé en pleins massifs granitiques et d'autres avec nous, maintenant que l'attention est attirée et qu'on sait les observer. Aug. Michel-Lévy et Ch. Barrois ont signalé depuis longtemps la fréquence des gouttes de quartz dans les orthoses de granites. Enfin, les fameuses inclusions de biotite (ou hornblende) dans ces orthoses, base de la théorie des séquences de cristallisation, ne sont-elles pas aussi témoignage direct de ces digestions inachevées, ce qui est montré par le fait que les orthoses développées dans les terrains encaissants et les enclaves contiennent ces mêmes inclusions de biotite ou hornblende de la roche originelle?

c) La diffusion à l'échelle ionique est-elle suffisante?

Le jeu de la diffusion d'ions dans les réseaux cristallins étant établi, est-il nécessaire de superposer d'autres mécanismes hypothétiques: intervention de solutions ou autres? Rien ne nous incite à admettre cette nécessité, jusqu'à nouvel ordre.

H. Ramberg écrit que la „lattice diffusion" ne lui paraît avoir joué qu'un rôle restreint et que „large scale migration trough solid rocks take place with the help of ‚gazeous' atoms and molecules adhered to the mineral surface or the mosaic fissures". Ceci reste à démontrer, mais il ne s'agit plus que de

discussions de détail. Que la diffusion se fasse en utilisant les imperfections mosaïques des réseaux, ce qui a toujours paru une hypothèse possible dans les diffusions dans le solide, celà ne change rien au principe d'ensemble qui seul nous intéresse.

Certains auteurs et spécialement N. L. BOWEN et I. ROSENQVIST se basant sur certaines vitesses de diffusions mesurées et très faibles, affirment qu'elles n'ont pu jouer aucun rôle appréciable, à longue distance, même au cours des durées extrêmement longues de la formation des massifs granitiques et de l'orogénèse. Les calculs de I. ROSENQVIST en particulier reposent sur l'hypothèse de base suivante: les vitesses de diffusion sont essentiellement conditionnées par l'écart de concentration en les corps diffusants entre les deux extrémités de la chaîne de diffusion, hypothèse, certes, très admise. Si, dès lors, on envisage une longueur de la chaîne de diffusion de 10 kilomètres (batholithe) et une concentration faible en K par exemple à l'extrémité située en profondeur, les calculs donnent naturellement des vitesses de diffusion extrêmement faibles et des durées énormes pour le transport des matières (sans qu'il nous paraisse démontré que ces durées soient prohibitives). Ces calculs reposent sur l'hypothèse qu'il n'y a pas de moteur possible des diffusions autre que l'écart des concentrations. Il est déjà hasardeux d'énoncer une telle affirmation, en présence des données encore très sommaires acquises sur les diffusions dans le solide. Mais et surtout, des faits d'expériences nets, et en particulier une belle observation expérimentale d'ALBERT MICHEL-LÉVY et WYART (1947) sur un cylindre de laiton, prouvent le contraire dans des cas précis.

Ils ont observé, en présence de silice et eau sous forte pression, le dézingage partiel d'un tube de laiton avec formation de willémite, silicate de Zn, au contact de la couche de cuivre pur, issue de ce dézingage; si l'on suit, en pensée, la progression de ce phénomène expérimental, on est forcé d'aboutir à la conclusion que des ions de Zn ont traversé les cristaux de cuivre pur pour aller accroître sur la paroi la couche de willémite. L'analogie avec les marbres du Natal de DU TOÎT est frappante.

Il est aisé de démontrer que la loi de diffusion classique sur laquelle s'est appuyé I. ROSENQVIST est totalement en défaut dans ce cas expérimental; ainsi même si les calculs étaient justes, leur base est démontrée fausse dans certains cas. Alors? De même, quand N. L. BOWEN nous oppose l'existence de cristaux zonés, non homogénéisés par les diffusions, il assimile les vitesses de diffusions correspondant à l'homogénéisation de certaines solutions solides à celles qui conduisent à la formation de nouveaux corps, ce qui est tout différent, comme l'observation métallurgique le montre, en particulier[5]).

Les vitesses d'homogénéisation de cristaux mixtes sont elles-mêmes d'un ordre de grandeur très différent d'un cas à l'autre; la démonstration en est donnée par les expériences de E. SPENCER (1933) sur les microperthites, faites à des températures relativement basses en des temps courts; elles mettent en

---

[5]) Nous sommes beaucoup plus frappés par l'existence dans des diorites, parties endomorphes de granite (A. LACROIX — Pyrénées) de feldspaths calco-sodiques à zonage purement inverse, partie sodique au centre, calcique à la périphérie, ce qui est incompatible avec la genèse par refroidissement d'un liquide, comme le diagramme expérimental anorthite-albite de N. L. BOWEN le démontre.

évidence des diffusions rapides d'ions K et Na, paraissant exclure l'intervention de structures mosaïques, puisqu'il y a concentration, en plages d'albite, au-dessous de 350°, du Na, réparti à plus haute température dans toute la masse. Là encore, la loi classique sur laquelle s'est basée I. ROSENQVIST, est en défaut.

Ce remplacement de cristaux par d'autres cristaux n'est point spécial aux granites, il est fréquent dans les pegmatites et aplites. S. J. SHAND l'a décrit dans des gabbros. Il est très répandu dans des terrains métamorphiques, y compris des terrains épimétamorphiques ainsi que l'ont montré P. TERMIER (1891), E. RITTER (1897), et dans les gneiss dits para ou ortho, C. EXNER (1948), CASASOPRA (1939), HASLER (1950), entre bien d'autres.

Ainsi des terrains épimétamorphiques jusqu'aux granites à allure éruptive (Singo Batholith, B. C. KING, 1947 — Kabylie de Collo, M. ROUBAULT, 1935) apparaît une nouvelle continuité dans le mécanisme, continuité que nous ont déjà montrée les diffusions à double sens.

Une telle continuité apparaît dans les textures également pour les gneiss, gneiss granitoïdes, granites, granites gneissiques, migmatites, tels que le granite de Hangö (C. E. WEGMANN et KRANCK) où l'alignement des micas n'apparaît plus que comme de vagues fantômes observables seulement à échelle assez grande.

La seule coupure est une coupure d'apparence sur le terrain dans certains cas, coupure que l'on traduit par l'expression „aspect éruptif", et cependant WEGMANN, DEMAY et RAGUIN et d'autres, ont signalé des granites éruptifs sur un bord mais à passage continu sur un autre.

Mais l'aspect éruptif ne nous trouble plus puisqu'il est démontré que des apophyses et filons de granites, des filons d'aplite et pegmatite résultent de remplacements. Nous savons seulement que, dans nombre de cas, la granitisation se propage selon un front irrégulier.

Il semble que la granitisation, comme la migmatisation, correspond à une accentuation de la vitesse et de l'intensité des échanges chimiques qui accompagnent le métamorphisme en général et des échanges avec les couches profondes. Ceci peut être dû à la plus grande perméabilité aux ions des cristaux de feldspath dont la concentration en oxygène est particulièrement faible et le vide laissé par les atomes d'oxygène parallèlement particulièrement grand, selon les remarques de BRAJNIKOV.

4° Granitisation et changement de volume

L'un de nous (RENÉ PERRIN, 1950) a exposé comment, en utilisant des travaux de BRAJNIKOV et de T. W. BARTH, et des données précises analytiques de GROUT et d'ANDERSON, on peut montrer, dans des cas précis, que la granitisation s'est accompagnée de changements de volume, très faibles dans certains cas, appréciables dans d'autres. Des calculs très simples montrent qu'il n'est point besoin de réactions chimiques intenses pour développer des efforts très importants, en présence des grandes quantités d'énergie que libèrent ces réactions.

Nous avons dit (1949[2]) que, selon les principes de la loi de LE CHÂTELIER, la difficulté de déformation des terrains, des „bâtis", doit s'opposer à l'existence

de réactions entraînant des augmentations de volume trop fortes et jouer un rôle important dans la propagation des réactions. Nous avons tenté d'expliquer de la sorte le fait que les associations minéralogiques des roches plutoniques ne sont pas quelconques et que, selon l'intéressante remarque de BRAJNIKOV, leurs concentrations en Oxygène, c'est-à-dire le nombre d'atomes d'O par unité de volume varie relativement peu d'une roche plutonique à l'autre. Nous avons tenté aussi l'interprétation dans de telles conceptions de certains faits pétrographiques, mais nous renvoyons le lecteur à cet article.

Conclusions et essai de synthèse

Il ne nous apparaît pas possible, même dans le désir amical d'être conciliants, ou le désir moins honorable d'éviter des critiques, de ne pas dire que nous ne voyons aucune coupure, aucune différence de nature entre le dynamométamorphisme, le métamorphisme dit sans apport, le métamorphisme avec apport, la migmatisation et la granitisation. La généralité des diffusions à double sens constatées même dans un cas typique théorique de dynamométamorphisme pur à Tré-la-Tête, et des corrosions entre cristaux ne nous permet pas, honnêtement, de penser autrement, au risque d'être accusés de vouloir édifier une „Universal Theorie", méconnaissant la diversité des faits.

Plus peut être que quiconque, à la suite d'observations de grand détail, nous reconnaissons la diversité extrême et saisissante et même déconcertante des faits (R. PERRIN et M. ROUBAULT, 1947). Mais autant nous pensons que celle-ci est due aux conditions locales (en particulier déformations ou capacité de résistance à la déformation, nature des terrains en cause, etc.), autant la constatation des mêmes phénomènes généraux nous donne à penser que le mécanisme de base est le même.

Peut-être cédons-nous à ce désir de logique, de clarté et de détermination des lois générales, qui est si français. Est-ce un travers, peut-être: peut-être nous entraîne-t-il à commettre quelques erreurs; il nous empêche certainement de pouvoir dire que nous sommes d'accord avec tout le monde, ce qui serait plus aisé. Nous restons prêts, en présence de faits précis, à faire des pas dans le sens d'autres, de même que d'autres ont fait et font de plus en plus de grands pas dans notre sens.

Il semble bien, en particulier, qu'il y ait une notion de première importance, à nos yeux, qui tende à se répandre; l'absence de coupure, de discontinuité entre le dynamométamorphisme et le métamorphisme dit régional (1946). Dès 1935, nous écrivions que la déformation, en diminuant la rigidité des réseaux cristallins, facilite les échanges et le métamorphisme. A cette époque, le dynamométamorphisme pur était considéré comme exclusif de tous échanges chimiques entre terrains, ceux-ci étant réservés au métamorphisme dit régional „avec apport". Maintenant, CASASOPRA, P. BEARTH, etc. parlent d'un métamorphisme de dislocation accompagné de migration importante de matières dans les nappes pennines, et P. NIGGLI d'un métamorphisme combiné de dislocation et de contact pneumatolytique, hydrothermal ou magmatique: ce terme de „contact" n'ayant plus du tout sous sa plume le sens de l'ancien

Kontaktmetamorphism restreint aux bordures de roches plutoniques, mais embrassant des diffusions lointaines et réagissant très différemment sur les roches enveloppantes, selon leur comportement tectonique et chimique.

Si l'on analyse ce qui se cache sous les mots, il semble que les seules divergences profondes de conception, qui subsistent entre lui et nous, sont:

1° Que pour P. NIGGLI, ce métamorphisme de contact est dû à l'action lointaine de masses magmatiques fondues, visibles ou non, tandis que pour nous, les roches éruptives grenues sont issues elles-mêmes d'échanges chimiques, comme les roches métamorphiques, en particulier au cours d'un stade ultérieur de ce métamorphisme, la progression de la granitisation s'étant effectuée soit sous forme de front „granites éruptifs", soit sous forme continue: zone de migmatites, granites migmatiques, etc.

2° Pour P. NIGGLI ce métamorphisme de contact a pu aboutir jusqu'à un ultramétamorphisme, avec fusion partielle ou même totale.

Il reste vrai que, pour les conceptions tectoniques, la différence est d'importance.

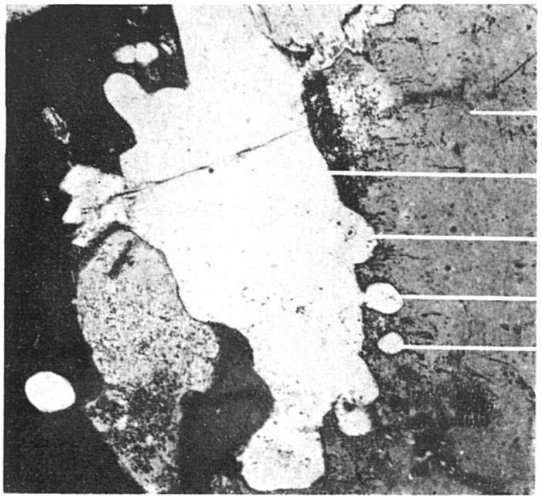
Notre pensée se résume très brièvement ainsi: succession d'épisodes au cours d'un même cycle métamorphique; échanges, d'abord restreints, à l'intérieur d'une même roche ou entre roches voisines, très inégalement selon la nature des terrains, d'où la „tache d'huile de TERMIER", puis échanges naissants avec la profondeur, s'accentuant avec la montée de la température, avec une certaine tendance à l'homogénéisation, les limites stratigraphiques des différentes strates restant encore nettement visibles. Ces limites peuvent rester visibles même dans des cas d'échanges profonds déjà nettement accentués: bandes alternées de gneiss, dits ortho, banded gabbros, lherzolites veinées etc. Plus tard, tendance à l'effacement des limites, zone de migmatite ou des agmatites, ou nébulites de SEDERHOLM et WEGMANN, enfin granitisation qui tend à homogénéiser tout en gardant souvent encore la trace de terrains plus ou moins transformés en enclaves, ou zones dites endomorphes — puis, la température baissant, possibilité de continuation des déformations et de métamorphisme régressif.

Ce schéma d'ensemble n'est qu'une esquisse de description d'un cas fréquent; il en est d'autres; des stades intermédiaires peuvent manquer totalement: c'est le cas de nombreux massifs de granites éruptifs, exemple: la Kabylie de Collo (Algérie) où un granite alpin envahit un éocène à peine métamorphisé (séricite et un peu d'andalousite) sur une faible épaisseur. Ces différences de comportement sont vraisemblablement dues à des conditions locales, en particulier nature des terrains, déformabilité des bâtis, etc.

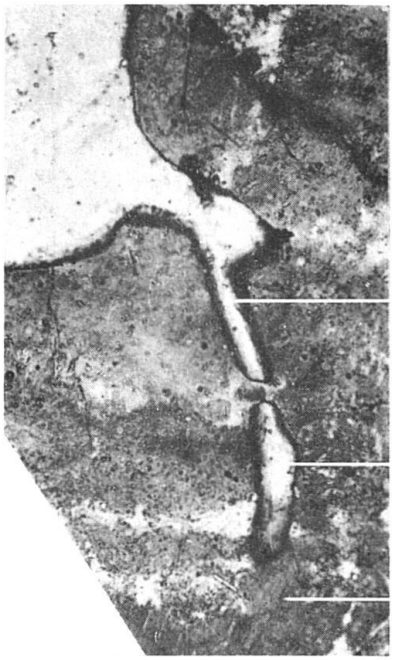
Un même terrain peut subir des transformations successives, un „polymétamorphisme" au cours d'un même cycle. Il n'est souvent pas simple de déterminer si la constatation d'un polymétamorphisme autorise à affirmer qu'il y a eu des métamorphismes distincts séparés par de très grandes durées.

A titre d'exemple, l'existence d'une albitisation intéressant des terrains métamorphiques ou des granites, ou l'ensemble des deux, ne permet pas de conclure que cette albitisation appartient à un autre cycle d'ensemble que celui qui a été la cause du métamorphisme et de la granitisation: il peut ne s'agir que d'épisodes successifs au même titre que la formation de micaschistes et une granitisation partielle ultérieure. Ceci n'est point fait pour simplifier la

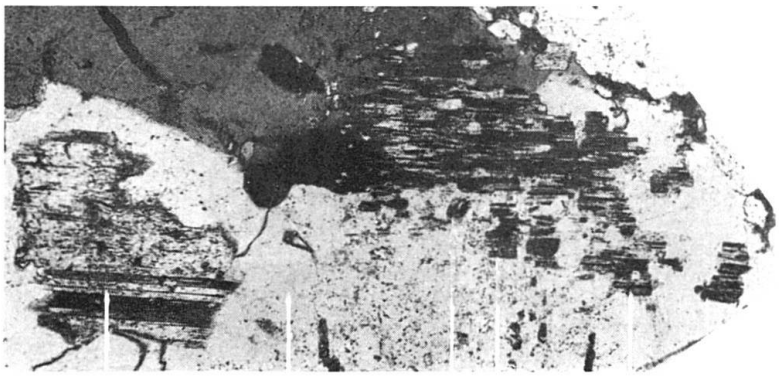
Planche I



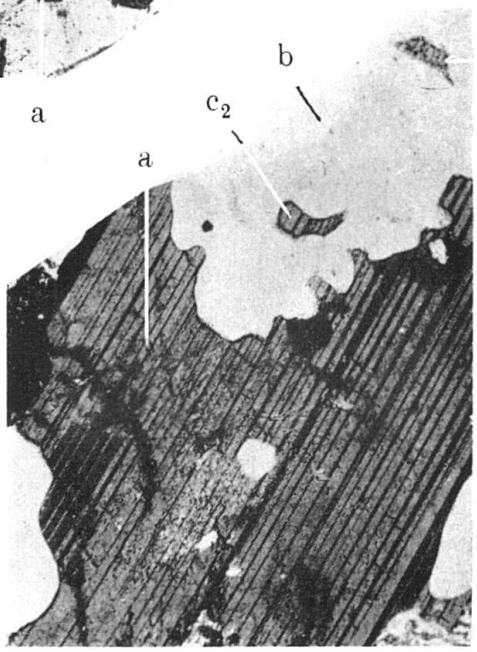
1



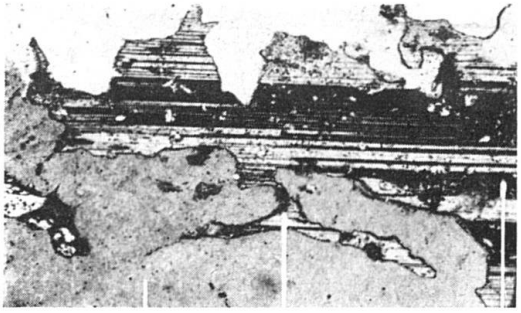
2



4



3



5

Légende au verso

Légende

Phot. 1. Quartz lobé (a) présentant à sa bordure et au contact de l'orthose (b) des avancées arrondies (c_1), avec parfois allure de presqu'ile (c_2), et même disparition du pédoncule (c_3); même orientation optique pour C_1 C_2 C_3 — Granite des Cévennes (Le Roux-Fontaudière, W d'Aubenas) LP × 75.

Phot. 2. Enclave pédonculée de quartz (a) dans l'orthose (b); la photographie montre que le pédoncule de quartz (a) est interrompu et que les deux fragments ont rigoureusement la même orientation cristalline. — Aplite du Massif de Néouvielle (Htes Pyrénées). LP × 320.

Phot. 3. Plagioclase (a) avec bordure dentelée au contact de quartz (b); dans le quartz, enclaves de plagioclases (c_1, c_2), ayant les lignes de macles de l'albite rigoureusement en prolongation. — Granite des Cévennes (Le Roux-Fontaudière, W d'Aubenas). LP × 50.

Phot. 4. Multiples sections de plagioclases de même orientation cristallines avec macles en parfaite prolongation (a) au milieu de quartz (b). — Oued Tifrit près Saïda (Algérie). LP × 55.

Phot. 5. Plagioclase de forme ramifiée (a) enrobé dans le quartz (b). — Bou-Lateb, Kabylie de Collo (Algérie). LP × 55.

tâche jointe des pétrographes et des tectoniciens, si justement recommandée par P. NIGGLI.

Ajoutons que le métamorphisme par diffusion dans le solide conduit à la notion de la possibilité d'arrêts brusques du métamorphisme et de l'existence de véritables fronts. Le plus bel exemple est le front de granitisation, mais il en est d'autres et „il n'est point anormal de constater la présence", par exemple, de bancs de schistes carburés presque encore totalement détritiques intercalés dans des grandes séries gneissiques.

Cette continuité dans le métamorphisme, telle qu'elle nous apparaît, veut que nous nous abstenions de tenter une classification du métamorphisme. Nous craignons au surplus que l'emploi de termes nouveaux, ou l'usage de termes anciens dans un autre sens, ne crée des confusions dans les esprits et des difficultés d'interprétation entre auteurs[6]).

Métamorphisme dans les Alpes

Abordons maintenant les répercussions de ces idées ainsi que de quelques observations sur les conceptions que l'on peut avoir du métamorphisme dans les Alpes. Certains de nos exposés ont choqué, voire provoqué de vives réactions, comme celle de M. LUGEON „A propos du prétendu métamorphisme du Trias". Personne ne nous semble actuellement contester une existence de métamorphisme de trias et même de lias en certaines zones des massifs centraux suisse, métamorphisme que P. NIGGLI indique comme pouvant être mésozonal, avec formation de gneiss sur la bordure sud du Gothard[7]). Tout le problème est dans son origine: si l'on admet qu'il n'est guère de dynamométamorphisme pur, sans échanges chimiques et qu'il n'est pas de coupure entre celui-ci et le métamorphisme régional, mais seulement des questions de degrés dans l'intensité des échanges, il paraît difficile d'affirmer péremptoirement que, dans ces massifs, le cristallin ancien sous-jacent à ce mésozoïque métamorphique est resté lui-même partout inaltéré et à l'abri de ces échanges. Est-on même en droit de n'attribuer à ceux-ci qu'une transformation épi, et en certains points méso, d'un cristallin (E. NIGGLI et autres), resté à part celà, tel quel depuis l'hercynien? Les considérations que nous avons émises sur les stades successifs au cours d'un même cycle métamorphique ne nous semblent pas permettre de l'affirmer par la seule inspection du cristallin, mises à part les études de „Gefügeregelungen"; les rapports avec les terrains sus-jacents, les bordures une fois de plus peuvent donner des indications précieuses.

---

[6]) Cette dernière raison fait que nous nous effrayons aussi de la création continuelle de termes nouveaux: nous craignons que la pétrographie ne devienne une tour de Babel où chaque auteur (ou les auteurs de chaque nation) ne comprendront plus que leur langage propre: les uns parleront chorismite, kyriosome, etc....., d'autres Metatekt, d'autres embrechites, diadysites, etc.... et ce encore avec des interprétations diverses d'un auteur à l'autre, comme P. NIGGLI l'a si bien montré pour le terme: migmatite. Nous ne pensons pas que le progrès d'ensemble, qui est fait du travail de tous, ait à y gagner.

[7]) Ce métamorphisme est non moins incontestable dans les Pyrénées.

Nous ne nions pas, encore une fois, qu'aient existé des terrains cristallins antérieurs au permien et même au carbonifère, sans doute en quantité importante, dans les zones qui sont devenues les Massifs Centraux. Toute la question est de savoir a) si ce cristallin ou une partie de ce cristallin n'ont pas eux-mêmes été affectés profondément au temps alpin et si la cristallisation visible actuelle est bien, dans l'ensemble, antémésozoïque; b) si localement des terrains sédimentaires non cristallins et le mésozoïque lui-même n'ont pu prendre, du fait d'échanges plus importants, un aspect „vieux cristallin".

Sans discuter en détail, nous dirons simplement que les indications que peuvent donner les bordures sont, selon nous, à étudier, avec un triple concept:

1° La possibilité de discontinuités, d'arrêts brusques dans le métamorphisme. Celui-ci peut, en particulier, intéresser fortement une couche d'âge déterminée en certains points, tandis qu'en d'autres elle est restée purement détritique. A titre d'exemple, M. Lugeon nous a reproché d'envisager un métamorphisme du trias, au lac de la Girotte, alors qu'existent près de ce lac des schistes carbonifères détritiques et à empreintes de plantes. C'est exact, mais il est non moins exact que tout près de là, le carbonifère devient métamorphique et que, dans la même chaîne, des observations de l'un de nos confrères (non encore publiées) montrent l'impossibilité de faire en certains points une coupure entre les „vieux schistes cristallins" épi et le carbonifère, ce même carbonifère dont E. Ritter a observé près de là la discordance sur ces mêmes vieux schistes.

2° Ne pas vouloir, à toutes forces, pour respecter les idées anciennes, établir des coupures là où l'observation ne montre que du continu.

3° Même si un métamorphisme, ou une granitisation n'atteint pas certains terrains, on ne peut affirmer qu'ils soient antérieurs à leur dépôt, surtout s'ils affectent des couches sur lesquelles les dits terrains sont en concordance stratigraphique. La liaison, de plus en plus admise, par P. Niggli en particulier, entre plissements orogéniques et métamorphisme, quelque explication qu'on en donne, rend hautement improbable que des couches métamorphisées au cours d'un cycle antérieur n'aient subi par la suite aucune érosion, de telle sorte qu'elles aient pu être postérieurement recouvertes en concordance par des sédiments.

Ceci étant, constatons:

1° Que P. Niggli admet des échanges de matières dans le solide dans le cristallin des massifs centraux par l'action de sa „phase moléculaire dispersée"[8]). La question est de savoir l'importance des échanges.

---

[8]) Il discerne également des circulations de solutions, en particulier pour la constitution de son „chymogène" ou de son akyrosome. Nous ne nions pas qu'il ait pu circuler des solutions dans des fentes des roches alpines et qu'elles aient pu déposer des minéraux, mais nous ne sommes pas convaincus que les exemples d'akyrosomes, dont il publie des photos, impliquent des solutions. Nous avons observé, par exemple, dans le synclinal mésozoïque d'Ailefroide du Pelvoux, entre des bancs calcaires intacts, de très beaux exemples, dans un autre calcaire, de véritables „akyrosomes" de phyllites tout à fait semblables d'aspect à la photo que donne P. Niggli, et qu'il nous semble difficile d'interprêter par des circulations de solutions qui auraient respecté intégralement les couches encaissantes. Encore une fois, pour nous, aspect éruptif n'est nullement preuve d'intervention de liquide.

2⁰ Que H. F. HUTTENLOCHER a mis en évidence un apport important de Na au temps alpin dans le bord sud de l'Aar, au même titre que dans les nappes pennines voisines; de même ZBINDEN dans le permocarbonifère de cette zone.

3⁰ Que le même HUTTENLOCHER parlant du conglomérat de la Chapelle de Z'matt dit „Die Gesteine gehören zur permischen Geröllzone von Fiesch. Sie hatten also keine Grundgebirge, sondern nur die alpine Metamorphose durchgemacht; sie wurden infolge ihres kristallinen Aussehens bisher zum Altkristallin gezählt" confirmant ainsi pleinement la possibilité que nous avions envisagée de sédiments posthercyniens transformés au temps alpin jusqu'à prendre un aspect vieux cristallin[9]). H. F. HUTTENLOCHER écrit: „Allein schon die alpine Metamorphose allein vermochte sie zu kristallinen Gesteinen zu formen, die gegenüber dem Altkristallin nur geringe Unterschiede aufweisen" et dit que, sans la présence de galets, parfois rares, on le considérait comme un granite gneissifié. Il y a même ainsi véritable granitisation ou gneissification. Au temps alpin! dans les massifs centraux, et il s'agit de ce même Verrucano que LUGEON indique, avec raison, être sur le bord nord de l'Aar discordant sur les gneiss; n'y a-t-il pas là matière à réflexion? Au nom de quoi est-il désormais interdit d'envisager qu'en certains points le trias des massifs autochtones, concordant sur le permien, a pu faire l'objet d'un métamorphisme accompagné d'échanges chimiques? Mais, au nom de quoi aussi H. F. HUTTENLOCHER établit-il encore une coupure là où il n'a observé que du continu et déclare-t-il que, malgré „ihrer granitischen Aufmetamorphosierung", ces roches ne sont en aucune dépendance génétique avec le cristallin voisin? S'il veut dire par là „terrains d'origine différente", d'accord, mais il nous semble vraiment difficile de séparer la granitisation des unes de celle des autres. Force est donc d'admettre une granitisation au moins locale dans un massif autochtone au temps alpin.

Il nous semble que tout cet ensemble montre déjà un assez grand chemin parcouru dans notre sens, à la suite de l'observation précise des faits, et que nos idées ne peuvent plus être taxées d'hérésie, tout au moins de façon totale.

Il nous semble aussi que l'étude mérite d'être poursuivie sans aucune idée préconçue, en se laissant simplement guider par les faits, puisque toutes les possibilités sont ouvertes. De telles études ne peuvent être effectuées que par les géologues suisses, avec leur parfaite connaissance du terrain.

Qu'il nous soit permis simplement d'attirer l'attention sur un point, entre autres, qui nous paraît spécialement important: celui de l'âge de la cristallisation actuelle des gneiss, en certains points du contact nord de l'Aar, et dans la zone des coins mésozoïques. BALTZER d'abord, puis ALBERT HEIM et K. ROHR, ont été conduits par l'évidence des faits à conclure qu'en certains points la schistosité est d'âge alpin. Ainsi en est-il à la Schwarze Naht dans la région où la Rötidolomit s'écaille en tuiles de toît. ROHR écrit que la schistosité des

---

[9]) Cette possibilité est confirmée par le fait qui le mésozoïque du bord sud du Gothard contient des „Hornblendegarbenschiefer" tout à fait semblables à ceux qui existent dans la Tremola-Serie classée actuellement dans le vieux cristallin. Encore une convergence. Nous nous demandons comment l'on distingue en la circonstance, le métamorphisme alpin et le métamorphisme hercynien de ces schistes de la Tremola-Serie.

gneiss, comme celle de même orientation de l'arkose, sont dues à l'orogenèse tertiaire. ARBENZ était déjà arrivé à la même conclusion. De même, là où la schistosité due aux micas des gneiss est prolongée par la schistosité des micas développés dans le mésozoïque, il paraît vraiment difficile, comme le pensent d'ailleurs ces auteurs, d'échapper à la conclusion que la schistosité du cristallin est alpine[10]). Mais que devient alors, entre parenthèses, la preuve de discordance sur schistosité?

En outre, comme le dit ROHR, la „Druckschieferung" est pour le massif étonnamment régulière, à peu près constamment dans la direction alpine correspondant à la poussée tangentielle. Alors! Puisqu'il apparaît certain qu'en certains points il y a eu une recristallisation alpine complète, et qu'ailleurs la schistosité est considérée comme hercynienne, n'y a-t-il pas lieu de chercher, sans parti pris, où se situe la coupure et s'il y a coupure?

De même il apparaitrait intéressant de reprendre l'étude précise des échanges chimiques signalés par BALTZER entre mésozoïque et cristallin en certains points, échanges qui nous rappellent étrangement les constatations que nous avons faites au coin calcaire de Tré-la-Tête, dans le Massif du Mont Blanc.

Ne serait-il pas également intéressant de faire une étude approfondie du problème des marbres hautement métamorphiques, enclavés dans le gneiss du bord Nord de l'Aar, marbres qui se trouvent toujours à proximité ou dans le prolongement des couches de Trias, mais qui ne sont considérés comme „anciens" et séparés du mésozoïque que parce qu'ils contiennent des minéraux dits de métamorphisme de contact (ancien sens du terme), en une coupure entre les sortes de métamorphisme qui ne nous paraît plus justifiée[11]). C'est en particulier la raison qu'invoque W. SCABELL pour les enclaves calcaires situées sur la route Gleckstein-Lauteraarsattel, qui se trouvent dans l'alignement du Wetterhornkeil.

SCABELL émet l'hypothèse que la présence de ces lentilles de marbres, en ce lieu et ailleurs, le long des chevauchements, est due à ce que le cristallin a été précisément rompu dans les parties affaiblies par des enclaves de calcaires anciens. Nos amis suisses estiment-ils que cette hypothèse est définitive, et ne croient-ils pas à l'intérêt de l'étude dont nous parlons? Les conséquences sont de première importance pour la conception des Alpes et il ne nous semble pas que scientifiquement on ait le droit de raisonner toujours sur des coïncidences fortuites supposées, telles que celle-ci, ou la coïncidence de la schistosité hercynienne et de la schistosité alpine et autres.

Enfin, il est inutile de dire l'intérêt majeur qui s'attache aux études de Gefügeregelung en cours. Les résultats en seraient particulièrement instructifs pour les roches que les granites des Massifs Centraux recoupent avec de belles apparences éruptives (eruptive breccia), non déformées par l'orogenèse alpine.

---

[10]) A moins d'admettre que par une coïncidence étrange l'orientation des micas qui traversent les „coins" mésozoïques, s'est alignée rigoureusement sur la schistosité hercynienne. Si on peut croire celà ...

[11]) Remarquons encore que HUGI a ramassé dans les éboulis du contact gneiss-malm du Gstellihorn des blocs calcaires contenant phlogopite, muscovite et forstérite.

Quelques mots rapides enfin sur les autres régions des Alpes.

Nous avions dit, en 1935, que des aspects pétrographiques semblables constatés en des points différents de la chaîne ne donnaient pas le droit d'établir sans autre preuve une continuité corrélative de nappes, et nous avions particulièrement insisté sur la „fenêtre" des Hohe Tauern, le métamorphisme de son mésozoïque n'autorisant pas à affirmer que les Hohe Tauern se relient sans discontinuité aux nappes pennines par dessous les austro alpines: il pouvait simplement s'agir d'un métamorphisme local. Il nous a semblé que P. NIGGLI est d'avis, lui aussi, que la constatation de „Metamorphe Gesteine mit gleichartiger Paragenesis" n'entraîne pas automatiquement à paralléliser les nappes.

Nous avons également prononcé, ce qui était à l'époque une hérésie, notre croyance en l'âge alpin de gneiss de noyaux pennins.

Il nous paraît superflu d'insister sur l'évolution considérable qui s'est produite depuis lors. La question ne paraît même plus discutée pour les Hohe Tauern, à la suite des beaux travaux de CORNELIUS et d'EXNER; rappelons aussi les belles études de WENK, à la suite desquelles P. NIGGLI conclut „die Tessinergneise sind, wie auch WENK (1948) formuliert hat, alpine Gneise".

Nous savons bien que P. BEARTH a fini par se rétracter pour ses conclusions sur l'âge alpin du granite du Mont Rose. Nous ne pouvons dire que cette rétractaction nous semble convaincante; l'auteur paraît d'ailleurs hésiter lui-même. Nous avons cru comprendre que son argument principal est l'absence dans le mésozoïque, d'éléments typiquement „katazonals"[12]). L'observation, en d'autres lieux, de grandes séries métamorphiques, n'a-t-elle pas montré qu'il est normal de ne rencontrer du métamorphisme kata — avec intensité variable d'ailleurs — que dans les couches inférieures, sans que nul ne songe à affirmer que le métamorphisme de ces couches ait été séparé de celui des couches supérieures par des millions d'années d'intervalle! BEARTH ajoute cependant qu'une partie considérable des roches de noyau a été complètement transformée à la période alpine, sans qu'aucun indice trahisse l'origine antéalpine et que certaines ne peuvent absolument pas être distinguées de roches mésozoïques à l'origine: les migrations de matières liées au métamorphisme, en partie à une échelle régionale, conduisent, selon BEARTH, à des phénomènes de convergence (encore!) qui rendent tout à fait illusoire une distinction non seulement entre vieille et jeune roche, mais aussi entre ortho et pararoche, au moins en ce qui concerne les séries qui ont été métamorphisées à l'époque alpine. Il finit par une considération mélancolique sur la difficulté de la stratigraphie des roches correspondantes.

Nous continuons à penser que ce problème serait plus simple si l'on ne voulait pas, à toutes forces, admettre des convergences et ne sommes pas convaincus par les arguments de la rétractation. Nous serions davantage con-

---

[12]) C'est un argument du même ordre, la différence de cristallinité entre synclinaux et noyaux, qui conduit HASLER à admettre que les noyaux du Sambuco-Massari-Gebirgsgruppe étaient déjà cristallins entièrement avant le temps alpin, alors que ses belles descriptions précises mettent en évidence une continuité et un parallélisme frappant entre mésozoïque et noyaux, ainsi qu'un grand rôle de la „Stoffwanderungen" au temps alpin.

vaincus si des Gefügeregelungen montraient que les roches dans lesquelles les dits granites sont intrusifs, ont une orientation nettement différente de l'orientation alpine.

Tout le monde admet maintenant, au temps alpin dans les nappes pennines de vastes diffusions englobées dans la Dislokationsmetamorphose nouveau style. P. Niggli écrit: „Wanderungs-Differentiation während der alpinen Metamorphose ist vorhanden". Les discussions semblent porter, pour autant que nous les saisissions clairement, sur les points suivants: Importance à attribuer à cette Wanderungs-Differentiation. — A-t-il pu se faire, sans qu'il y ait homogénéisation, des échanges importants avec la profondeur? — Y a-t-il eu ou non migmatisation et intervention d'un magma profond, c'est-à-dire Kontaktmetamorphism au sens nouveau dans la région frontale et dans celle des racines?

Nous ne pouvons intervenir utilement dans un tel débat, car la première condition est de parler le même langage. Le débat est dominé par les conceptions sur le métamorphisme et la granitisation, ce qui montre du même coup leur importance fondamentale pour la tectonique.

Les conceptions sont toutes différentes selon que l'on croit qu'un orthogneiss provient obligatoirement d'une recristallisation d'une roche éruptive et que des analyses ou des diagrammes permettent de discerner si un gneiss est ortho ou para, ou si l'on pense, comme nous, qu'un orthogneiss peut être un produit direct de métamorphisme et que les différences d'analyse proviennent simplement des compositions initiales distinctes et du plus ou moins grand apport d'éléments tels que K et Na, compensés par des départs d'autres éléments.

Les conceptions sont différentes aussi si l'on croit que, contrairement à ce que montrent, à notre sens, les séries métamorphiques d'autres régions, il n'y a pas eu d'échanges de matières importants, lorsque l'on distingue encore des séries de strates séparées et de composition chimique différente — selon également que l'on pense ou non que la granitisation peut être un épisode tardif du même cycle métamorphique que celui qui a atteint les séries supérieures.

Nous ne nions pas, pour les régions pennines aussi, qu'il y ait eu avant la formation des Alpes des roches cristallines, ce que montre la Lebedun-Decke, mais le problème n'est point là pour nous: il est de savoir si les noyaux comme les synclinaux mésozoïques ne sont pas, en leur état actuel, essentiellement de genèse alpine et si, localement même, du mésozoïque n'a pas pu être transformé jusqu'à prendre l'aspect de „vieux cristallin" ici comme dans le Gothard (Hornblendegarbenschiefer du mésozoïque et de la Tremola-Serie). Les constatations de Bearth ne sont pas propres à nous faire abandonner cette hypothèse.

Nous attacherions, en tous cas, une grande importance à l'existence dans les noyaux et surtout à leur limite, au contact du mésozoïque, de strates alternées de composition minéralogique différente parallèles aux strates du mésozoïque, comme Casasopra, en particulier, en a donné des exemples. Répétons-le, nous ne pouvons croire que des terrains cristallins hercyniens soient restés sans subir d'érosion jusqu'au dépôt du mésozoïque, et nous ne concevons, en présence d'un tel parallélisme, qu'un métamorphisme de même âge de strates sédimentaires superposées.

Un autre problème d'importance pour les nappes pennines est celui de la genèse des ophiolites. Relatons brièvement des constatations récentes, ayant trait aux serpentines: l'un d'entre nous (M. ROUBAULT) a observé en Kabylie de Collo (1951) un passage continu de serpentine à un calcaire magnésien et, dans le Queyras (Htes-Alpes), l'existence d'enclaves de calcaire et dolomie dans une zone de serpentine incluse dans les schistes lustrés; R. PERRIN, de son côté, a observé dans la vallée de la Cerveyrette (Htes-Alpes) que les calcaires du Bourget contiennent de minces lits serpentineux discontinus, comme déjà signalé par Pussenot, et que la serpentine du Bois des Bancs renferme par places de minces lits calcaires eux-mêmes en partie serpentinisés. Tout ceci nous confirme dans la possibilité de formation de serpentine par métamorphisme simple de roches sédimentaires et donc de leur formation alpine dans le mésozoïque.

En terminant ce chapitre relatif aux Alpes, nous avons donc vraiment l'impression que tout n'a pas été dit encore et de fort loin, ce qui rend le problème plus attrayant.

Il semble qu'apparaît périmée la conception purement mécanique de la chaîne où tous les terrains n'avaient le droit que d'avoir été transformés sur place par dynamométamorphisme sans changement de composition chimique, à l'exception du granite de Bergell, incident isolé.

Bien d'autres foyers, si nous osons nous exprimer ainsi (quoique n'étant pas magmatistes, mais pour nous foyer signifie simplement lieu soumis à des échanges de matières plus ou moins intenses), se sont révélés depuis cette époque, comme nous l'avions prévu en 1935, et nous nous rallions, sans réserves, à la phrase de CH. EXNER „Aber in anderen Zonen der Alpen dürften noch manche Überraschungen in Hinsicht auf alpidische ichoretische Stoffumsätze bevorstehen"[13]).

Bibliographie

1943 — H. G. BACKLUND, Einblicke in das geologische Geschehen des Präkambrium. Geol. Rundschau, Vol.34, Nos. 2—6.

1880 — BALTZER, Der mechanische Kontakt von Gneiss und Kalk im Berner Oberland. Beitr. Geol. Karte der Schweiz, Lief. 20.

1945 — P. BEARTH, Über spätalpine granitische Intrusionen in der Monte Rosa-Bernhard-Decke. Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 25.

1950[1] — N. L. BOWEN et O. F. TUTTLE, The System Na Al Si_3 O_8, K $AlSi_3$ O_8, H_2O. Journal of Geology, Chicago, Vol. 58, No. 5, pp. 489—511.

1950[2] — N. L. BOWEN et O. F. TUTTLE, Hightemperature Albite and contiguous feldspars, Ibid, pp. 572—583.

1928 — R. A. DALY, Bushveld Igneous Complex of the Transvaal. Shaler Mem. Series. Bull. Geol. Soc. Amer. Vol. 39, pp. 703—768.

1919 — A. L. DU TOIT, The Geology of the Marble Delta, Natal. Quart. Journ. Geol. Soc. London, t. 75, pp. 119—136.

---

[13]) Dans l'esprit d'EXNER: anderen signifie autres que les nappes pennines.

1948 — Ch. Exner, Tektonik, Feldspatausbildungen und deren gegenseitige Beziehungen in den östlichen Hohen Tauern. Tsch. Min. Petr. Mitt., Bd. 1, Heft 3, pp. 198—284.

1949 — Ch. Exner, Die Feldspatholoblasten des alpinischen Granitisationshofes im Radhausberg-Unterbaustollen. Österr. Ak. Wissenschaft, No. 13, pp. 267—280.

1948 — T. E. Gillingham, Solubility of silice and other volatiles in steam. Econ. Geol., t. XLIII, p. 241.

1940 — G. C. Goodspeed, Dilation and replacement dikes. Journal of Geology, t. 48, No. 2, pp. 175—195.

1949 — P. Hasler, Geologie der Sanbuco-Massari Gebirgsgruppe zwischen der oberen Valle Leventina und Valle Maggia im nördlichen Tessin. Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 29, p. 50.

1949 — R. H. Higazy, Petrogenesis of Perthite Pegmatites in the Black Hills, South Dakota. Journal of Geol., Vol. 57, No. 6, pp. 555—581.

1947 — A. Holmes and D. L. Reynolds, A front of Metasomatic Metamorphism in the Dalradian of Co Donegal. Bull. Com. Geol. Finlande, Pentti Eskola Vol., No. 140, pp. 25—66.

1947 — H. F. Huttenlocher, Über Verschiedenheiten im Verlaufe magmatischer und metamorpher Prozesse, erläutert an Beispielen aus dem Aarmassiv. Mitt. Natf. Ges. Bern, neue Folge, Bd. 4.

1928 — J. Jung, Contribution à la Géologie des Vosges hercyniennes d'Alsace. Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, No. 2, 1 Vol., 480 p.

1947 — B. C. King, The structural features and invaded rocks of the Singo Batholith of Uganda and their petrogenetic significance. Quart. Journ. Geol. Soc. London, Vol. 103, Part. 1, p. 37.

1948 — B. C. King, The form and structural features of aplite and pegmatites dikes and veins in the Osi Area of the Northern of Nigeria and the criteria that indicate a non dilational mode of emplacement. Journal of Geology, Vol. 56, No. 5, pp. 459—475.

1945 — P. Lapadu-Hargues, Sur l'existence et la nature de l'apport chimique dans certaines séries cristallophylliennes. Bull. Soc. Géol. Fr., t. 15, 5e série, pp. 255—310.

1912 — M. Longchambon, Contribution à l'étude du métamorphisme des terrains secondaires dans les Pyrénées Orientales et Ariégeoises. Bull. Serv. Carte Géol. Fr., No. 131, t. XXI, 68 p.

1947 — A. Michel-Levy et J. Wyart, Reproduction artificielle de Minéraux silicatés à haute pression. Métamorphisme artificiel des roches. Mém. Soc. Géol. Fr., Nlle série, t. XXVI, fasc. 3, Mém. 55.

1947 — A. Mikkola, The Vähäjoki Iron Ore in Tervola, Northern Finland. Bull. Com. Géol. Finl., Pentti Eskola Vol., No. 140, pp. 261—280.

1942 — P. Niggli, Das Problem der Granitbildung. Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 22, pp. 1—84.

1950 — P. Niggli, Probleme der alpinen Gesteinsmetamorphose. Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. 30, pp. 500—538.

1948 — Origin of Granite. The Geol. Soc. of America, Memoir 28 (Meeting held in Ottawa, Canada, December 30, 1947).

1935 — R. Perrin, Le métamorphisme générateur de plissements. Annales des Mines, pp. 149—200.

1950 — R. Perrin, L'oxygène en les calculs pétrographiques: une discussion. Journ. of Geol., Vol. 58, No. 2, p. 163.

1939 — R. Perrin et M. Roubault, Les Réactions à l'Etat solide et la Géologie. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 5e série, No. 4, pp. 1—168, 6 pl.

1946 — R. Perrin et M. Roubault, Y a-t-il coupure ou continuité entre le dynamométamorphisme et le métamorphisme régional? A propos d'observations près du Glacier de Tré-la-Tête. Bull. Soc. Géol. Fr., 5e série, t. XVI, pp. 541—562.
1947 — R. Perrin et M. Roubault, Relation des Granites, Granulites et roches amphiboliques de la côte de Bénodet (Finistère). Bull. Soc. Géol. Fr., 5e série, t. XVII, pp. 233—248.
1949[1] — R. Perrin et M. Roubault, On the granite Problem. Journal of Geol., Vol. 57, No. 4, pp. 357—379.
1949[2] — R. Perrin et M. Roubault, Application d'études récentes sur les diffusions d'ions et la constitution des minéraux à l'interprétation des faits géologiques. Bull. Soc. Géol. Fr., 5e série, t. XIX, pp. 3—14.
1949[3] — R. Perrin et M. Roubault, De critères permettant de déterminer le mode de formation des filons à bords parallèles: injection ou remplacement. Bull. Soc. Géol. Fr., 5e série, t. XIX, pp. 641—656.
1928 — A. Portevin, Le basalte fondu. Mém. Soc. Ing. Civils Fr.
1948 — H. Ramberg, Radial Diffusion and chemical stability in the gravitational field. Journ. of Geol., Vol. 56, No. 5, pp. 448—458.
1943—1944 — H. H. Read, Meditations on granite. Geol. Assoc. London Proc., Vol. 54, pt. 2, pp. 64—85; vol. 55, pt. 1, pp. 45—98.
1948 — H. H. Read, A commentary on place in Plutonism. Quart. Journ. Geol. Soc., vol. CIV, pp. 155—206.
1897 — E. Ritter, La Bordure Sud-Ouest du Mont-Blanc. Les plis couchés du Mont Joly et de ses attaches. Bull. Serv. Carte Géol. Fr., No. 60, t. IX.
1926 — K. Rohr, Tektonische Untersuchung der Zwischenbildungen am Nordrand des Aarmassivs. Beitr. Geol. Karte der Schweiz, Lief. 57, Abt. I.
1949 — I. Th. Rosenqvist, The Distribution of Oxygen in the Lithosphere and Oxygen in rocks: A basis for petrographic calculations (A discussion). Journal of Geology, Vol. 57, No. 4, pp. 420—422.
1935 — M. Roubault, La Kabylie de Collo, Etude Géologique. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 2e série, No. 10, 270 p., 56 pl., 1 carte.
1951 — M. Roubault, Sur la nature métamorphique des serpentines de la Kabylie de Collo (Algérie). C. R. Acad. Sciences, t. 232, p. 2032—2033.
1926 — W. Scabell, Beiträge zur Geologie der Wetterhorn-Schreckhorn-Gruppe. Beitr. Geol. Karte der Schweiz, Lief. 57, Abt. III.
1933 — E. Spencer, The potash-soda feldspars. Min. Mag., t. XXII, p. 453.
1891 — P. Termier, Etude sur la constitution géologique du Massif de la Vanoise (Alpes de Savoie). Bull. Serv. Carte Géol. Fr., t. II, No. 20.
1947 — C. E. Tilley, The Gabbro-Limestone Contact Zone of Camas Mor, Muck, Inverness-Shire. Bull. Com. Geol. Finl., Pentti Eskola Volume, No. 140, pp. 97—106.
1949 — O. F. Tuttle, Structural petrology of planes of liquid inclusions. Journ. of Geol., Vol. 57, No. 4, pp. 331—355.
1947 — J. Wyart, Solubilité de la potasse dans la vapeur d'eau et cristallisation de la silice amorphe. Bull. Soc. Fr. Min., t. LXX, 1947, p. 325.

Reçu: octobre 1951

Bemerkungen zur Arbeit von R. Perrin und M. Roubault: Les idées nouvelles en pétrographie et l'étude du métamorphisme alpin

Die Arbeiten von ROUBAULT und PERRIN sind, dessen dürfen die Autoren versichert sein, sehr eingehend studiert worden. Ihre zahlreichen, durchwegs gleichartigen und in der Wiederholung einprägsamen Darstellungen über die „idées nouvelles" haben es sehr erleichtert, wirklich herauszufinden, auf was für Argumente und Überlegungen sich die Forscher stützen. Deshalb darf man es in wissenschaftlichen Zeitschriften den Lesern überlassen, Stellung zu nehmen. So liegt, ohne dass dies eine Missachtung bedeutet, keine Veranlassung vor, auf die gegen meine Ausführungen gerichteten, umfangreichen polemischen Arbeiten im „Journal of Geology" und jetzt in dieser Zeitschrift in gleicher Ausführlichkeit zu erwidern. Gelegentliche Äusserungen darüber in Arbeiten, welche die Themen Metamorphose oder Magmengeschichte betrafen, bezwecken lediglich darzutun, dass diese Artikel dem aufmerksamen Beobachter nicht entgangen sind, dass es ihm jedoch, bei aller Dankbarkeit für die Erweiterung der Diskussionsgrundlagen, bis heute leider unmöglich ist, auch nur eines der ins Feld geführten Argumente als Beweis der Universaltheorie von ROUBAULT und PERRIN anzuerkennen.

Über Metamorphose von Festkörpern, über Feldspatisation, Granitisierung, Studium von Einschlüssen in Graniten und Ophiolithen, metasomatische Prozesse und Gesteinsbildungen ist lange vor dem Beginn der Arbeiten von ROUBAULT und PERRIN sehr viel beobachtet und geschrieben worden. Aus dieser „Vorzeit" stammt z.B. auch die „Gesteinsmetamorphose" von U. GRUBENMANN und P. NIGGLI, in der sich viele Ausführungen und Daten finden, die lediglich neue Interpretationen erfahren haben oder als Neubefunde deklariert wurden.

Zum vorstehenden Artikel, der sich vorzugsweise gegen meine Ausführungen über die Metamorphose in den Schweizeralpen wendet, nur ganz wenige Bemerkungen. Das Vorkommen von Obsidianen etc. ist für die Frage, ob es Granitmagmen gibt, von ebenso grosser Bedeutung wie Deduktionen, die sich aus den Verbandsverhältnissen der Granite mit ihren Nebengesteinen ergeben. Übrigens haben neue Untersuchungen über Apophysen und Gänge die geometrisch unvollständigen Ableitungen von ROUBAULT und PERRIN bezüglich der Frage: „Metasomatose oder echte Gangfüllung" in vielen beobachtbaren Fällen einwandfrei widerlegt. Über den Mechanismus der Stoffwanderung, über die Begriffe „molekular disperse Phase" und „Diffusion von Einzelpartikelchen" existieren ausgedehnte theoretische und experimentelle Untersuchungen, z.B. aus der Schule von HEDVALL und in der Festschrift für HEDVALL. Jeder Experimentator und Metallurg weiss, dass die Kristallisationsfolge aus Schmelzen von den Löslichkeitsverhältnissen abhängig ist, so dass unter Umständen auch kleine Stoffmengen früh auskristallisieren können, und dass die Struktur in Abhängigkeit von Viskosität und Abkühlungsgeschwindigkeit sehr variieren kann, derart, dass dendritische Bildungen (die so häufig bei Sublimationen und bei Stoffwanderung im Festkörper entstehen) auch bei Schmelzerstarrungen nur einen Sonderfall darstellen.

Über die Gültigkeit der neuen Hypothesen über Tektonik und Metamorphismus in den Alpen sei das Urteil denjenigen überlassen, die im Alpengebiet bis in Einzelheiten kartographisch, geologisch-tektonisch, petrochemisch und mikroskopisch gearbeitet haben. Sie werden auch beurteilen können, ob das Studium der alpinen Ophiolithe und Serpentine „die Möglichkeit bestätigt", diese seien nichts anderes als metamorphe Sedimente.

Paul Niggli.