

Le métamorphisme des roches dans ses rapports avec les mouvements tectoniques

Autor(en): **Oulianoff, Nicolas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **67 (1958-1961)**

Heft 297

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-275075>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le métamorphisme des roches dans ses rapports avec les mouvements tectoniques

PAR

NICOLAS OULIANOFF

(Lausanne)

I. *Introduction.* — Plus de cent ans ont passé depuis que B. STUDER (1851, p. 160) s'exprimait ainsi : « Die Entstehung der krystallinischen Schiefer aus neptunisch abgelagerten Massen durch Metamorphose, und die Erklärung dieses Prozesses nach Grundsätzen, die nicht mit den Lehren der Chemie und Physik im Widerspruch stehen, die alte Frage, ob die Entstehung jener Gesteine durch Wasser oder durch Feuer oder durch beide zugleich bewirkt worden sei, steht wie vor fünfzig Jahren im Vordergrund des dem Geologen zugewiesenen Arbeitsfeldes... eine befriedigende Lösung aber wird von der nächsten Zukunft kaum zu erwarten sein. »

A cette même époque, DELESSE (1858) s'occupait aussi très activement du métamorphisme des roches.

Aujourd'hui encore, on a le droit de dire que ce problème est au premier plan des préoccupations des géologues. Je dis « problème ». C'est en réalité d'un complexe de problèmes qu'il s'agit. Les considérations qui s'y rapportent cherchent à exprimer l'effet final des divers facteurs : le changement de la nature chimique, minéralogique et structurale de la roche initiale, ce que précisément on désigne sous le terme de *métamorphisme*, introduit dans la littérature par LYELL, en 1833 (voir notre définition sous III).

Consacré par l'usage, pendant un siècle et quart, ce terme, il faut l'avouer, n'est pas bien choisi. Métamorphose signifie, exactement, changement de forme (métamorphoses des insectes, par exemple). Appliqué aux roches, il perd son sens. Des dictionnaires largement connus parlent de modification dans la texture que les pétrographes examinent par les méthodes habituelles : à l'œil nu ou au microscope.

Mais A. HARKER (1952, p. 1) cherche à introduire du modernisme par la définition suivante : « The term metamorphism, i. e. change of form, is understood in geology as having reference to atomic and molecular configuration, as well as to visible shapes and relations. »

Je ne crois pas qu'il soit heureux de vouloir « moderniser » ainsi la définition d'un terme créé longtemps avant 1912, date mémorable pour la minéralogie.

Il y a lieu de remarquer encore que le métamorphisme des roches est un type de changement parmi beaucoup d'autres qui affectent les masses rocheuses. En grandes lignes, tous ces changements peuvent être groupés en deux catégories : les uns augmentent l'hétérogénéité des formations ; les autres, au contraire, ont tendance à homogénéiser le matériel ou sa géométrie. A la première catégorie appartiennent les phénomènes d'érosion et de sédimentation ; le métamorphisme fait nettement partie de la seconde.

Me proposant d'examiner ce sujet, je limite ma tâche à un seul groupe de roches métamorphiques, du reste le plus vaste, aux schistes cristallins. Le problème se resserre encore si j'ajoute que, pour moi, les schistes cristallins sont presque tous d'origine sédimentaire, à l'exception près pourtant du faciès d'écrasement, des mylonites. Nous touchons ici un problème aussi important que discutable, celui de la meilleure classification.

II. *Les classifications* des phénomènes de la nature sont nécessaires pour que nous puissions tirer des conclusions de nos observations et formuler des lois qui facilitent l'avancement de nos recherches. Elles le sont également pour que les hommes qui s'intéressent aux mêmes phénomènes puissent se comprendre rapidement dans les discussions. Malheureusement, les cas ne sont pas rares où les auteurs, animés de la louable intention de mettre plus d'ordre dans la science, ne font que compliquer à outrance les classifications, ce qui fait perdre la notion de l'échelle relative des phénomènes (P. FALLOT, 1957).

Pour mon exposé, j'ai particulièrement besoin de tenir compte de *l'échelle des phénomènes* (WEGMANN, 1955). Je me propose de rester dans le domaine des phénomènes les plus répandus, les plus fréquents. Et voici un exemple pour illustrer cette idée. Par définition, les schistes cristallins ont une structure avec disposition des minéraux constitutifs en plans parallèles. Laissant de côté la *schistosité secondaire* (souvent oblique) qui provient de l'intervention de la pression tectonique, nous considérons que la structure des schistes cristallins résulte de la *stratification initiale* des roches sédimentaires. C'est le cas des *micaschistes* et des *gneiss*, c'est-à-dire des *roches métamorphiques les plus répandues*. D'aucuns demanderont sans doute : « Et les orthogneiss ? ». Je ne me propose pas d'en discuter ici. Mais on peut admettre que, dans certaines conditions, les roches ignées dont la structure, en vertu de la définition classique, est isotrope, peuvent avoir une tendance à la disposition parallèle de

leurs éléments minéralogiques ; mais ce sont là des cas relativement rares.

Pour la clarté de la suite, il faut s'entendre sur la définition du « métamorphisme ». « S'entendre » — c'est trop demander, peut-être. Mais il faut que le lecteur tienne compte de ma rédaction de cette définition.

III. *Le métamorphisme des roches, c'est l'adaptation d'une masse rocheuse donnée aux nouvelles conditions physiques et chimiques.* Disons d'emblée que la part du dernier facteur (changement des conditions chimiques) est relativement limitée. L'hypothèse des colonnes filtrantes (PIERRE TERMIER) n'est actuellement guère soutenable¹. Par contre nous connaissons de fort nombreux et fort jolis exemples où les émanations provenant de foyers, que nous continuerons d'appeler magmatiques, s'infiltrent, profitant des cassures et des failles, et produisent, bien entendu, l'effet du *métamorphisme de contact*. Mais les cas de cette sorte de métamorphisme sont volumétriquement et planimétriquement bien limités sur la surface de la Terre. Ils attirent facilement l'attention de l'observateur par leurs manifestations frappantes : les filons sectionnent capricieusement la masse rocheuse donnée, tandis que leur matériel tranche sur la roche encaissante par sa couleur, par sa structure, par la grosseur de grain. Mais *le métamorphisme général ou régional*, qui se manifeste dans de très grandes masses de schistes cristallins, ne dépend que d'une façon secondaire de l'activité des émanations provenant des foyers magmatiques. Dans le résumé de son travail (1948), E. WEGMANN dit : « Dass die Regionalmetamorphose nicht mit granitischen Intrusionen zusammenhängt, wurde seit hundert Jahren an zahlreichen Beispielen nachgewiesen. »

D'autre part, on lit, chez HARKER (1932), une définition tout à fait étonnante : « The joint action and interaction of the two factors, thermal and dynamic, is conveniently styled regional metamorphism » L'adjectif « régional » suggère déjà la première idée, qui est celle d'une extension considérable des masses rocheuses atteintes par cette sorte de métamorphisme. Nous verrons dans la suite que les deux facteurs qu'indique HARKER peuvent jouer leur rôle, mais qu'un autre facteur encore détermine la formation des grandes masses de schistes cristallins.

Notons que le métamorphisme régional ou général se distingue géométriquement du dynamométamorphisme (mylonitisation) et du métamorphisme de contact par l'absence, en gros, de limites nettes,

¹ Voici l'opinion catégorique de H. RAMBERG (1952, p. 182) : « The widespread idea of metamorphic rocks as capable of conveying streaming hydrous solution appears to be inconsistent with our present knowledge of crystalline rocks. »

tranchées, entre les masses rocheuses atteintes par les différents stades de métamorphisme.

IV. *Les facteurs du métamorphisme* ne sont pas nombreux; mais on est encore loin de l'unanimité sur le rôle et l'importance qu'il convient d'attribuer à chacun d'eux.

La manière de voir la plus répandue est exprimée par A. HOLMES (1920). Le métamorphisme est désigné comme « the sum of the thermodynamic processes of endogenetic origin which cause the transformation of a rock into a well characterised new type by more or less thorough recrystallisation, and change of texture and structure, with or without the introduction of new material. »

On considère donc deux facteurs du métamorphisme : la température et la pression. De là, la classification en métamorphisme 1) thermal, 2) dynamique et 3) régional (voir plus haut).

VAN HISE (1904) comprend dans le terme de métamorphisme « not only development of schistose and crystalline rocks but also all changes involved in rock weathering and cementation. » (C.-K. LEITH and W.-J. MEAD, 1915, p. XVII. Voir aussi DÉVERIN, 1924).

La logique est, sans aucun doute, du côté de VAN HISE, mais l'habitude s'est largement établie, dans la littérature pétrographique, de séparer les problèmes de la diagenèse des sédiments et de l'altération, de tous les autres cas de modification de la nature des roches.

V. *L'intervention des facteurs du métamorphisme* mentionnés plus haut s'exprime, au sein des roches, en partie par un écrasement plus ou moins avancé (mylonitisation), tandis que les effets moins brutaux de la pression facilitent l'amorçage de réactions chimiques qui aboutissent à la formation de nouveaux minéraux.

La variabilité de la vitesse des réactions dépend partiellement du changement de la température. Si dans les conditions données (température, pression, etc.) nous enregistrons la vitesse d'une réaction, nous pouvons la ralentir ou l'accélérer en changeant les conditions physiques initiales (CHRISTOPHE-MICHEL-LÉVY, 1957). La chaleur, dans la plupart des cas, est le facteur le plus important (Loi de VAN T'HOFF). Mais la courbe de variation de la vitesse d'une réaction donnée est asymptotique. Certaines réactions sont tellement lentes que leurs vitesses peuvent paraître pratiquement nulles, à l'échelle humaine. Cependant, les temps géologiques, mesurés en millions d'années, ont toute la latitude voulue pour que se réalisent les réactions les plus lentes.

On attribue toujours une grande importance à l'influence de la température. Ainsi nous lisons dans « La science des roches » (RINNE, BERTRAND et ORCEL, 1949, p. 567) : « Le terme du métamorphisme régional est applicable aux schistes cristallins, avec la signification qu'il s'agit de transformations attribuables à la pression élevée et à

la température croissante ainsi qu'à l'action de l'eau surchauffée dans la profondeur.» Toutefois, on omet de relever qu'en ce qui concerne la nature, il ne s'agit pas des réactions que l'on réalise dans les conditions des laboratoires et des usines, où le facteur temps joue un si grand rôle. C'est dire que notre notion de l'influence directe de la température appartient, dans la plupart des cas à la catégorie des spéculations, qui nous sont chères au point de vue logique, mais qui ne tiennent pas compte des conditions réelles des phénomènes dans la nature.

Ce n'est pas tant l'augmentation de la vitesse des réactions chimiques qui importe, que *la création des conditions qui en permettent l'amorçage* et qui *favorisent l'augmentation des surfaces de contact entre les substances susceptibles d'entrer en réaction*. Cette dernière condition n'est pas réalisée par l'établissement du contact *statique* d'un solide contre un autre solide.

Prenons pour exemple la myrmékite qui se forme, parfois, au contact des grains de plagioclases et de feldspaths potassiques. Si nous admettons (et c'est encore discutable) que la myrmékite résulte de la réaction chimique entre deux solides, on remarquera que, malgré une très longue durée des temps géologiques, cette structure d'interpénétration ne se développe que sur des épaisseurs bien faibles, inférieures à un millimètre (RAGUIN, 1957). Somme toute, ce ne sont pas les valeurs absolues des températures et des pressions qui déterminent la solubilité et la précipitation, mais bien les différences des températures et pressions qui règnent dans les compartiments voisins des masses rocheuses. Aucune pression déterminée par le poids des couches sédimentaires superposées n'est susceptible de créer les conditions favorables aux réactions chimiques ayant pour théâtre les grands volumes rocheux. La chaleur modérée facilite *la recristallisation pure et simple*, avec, le plus souvent, augmentation du volume des grains composant la roche, et ceci aux dépens de leurs voisins, mais toujours de la même espèce minérale (marmorisation des calcaires, consolidation des quartzites).

VI. Quant à *la pression* des couches superposées, il faut encore noter qu'avec l'augmentation d'épaisseur elle tend à se confondre avec une pression hydrostatique. On attribue théoriquement une action considérable à la pression exercée sur les couches inférieures par l'empilement des masses des sédiments plus jeunes. Or, la nature nous place fréquemment devant des faits troublants, notamment dans les nombreuses régions où des couches de roches sédimentaires très anciennes et qui mesurent en épaisseur plusieurs centaines, voire milliers, de mètres, ne sont nullement touchées par le métamorphisme, ce qui est prouvé, entre autres, par la remarquable conservation des fossiles. Telle est, par exemple, la région de Béni-Abbès,

dans le Sahara, où les couches du Primaire contiennent des Trilobites en masse, dans un état de conservation tel qu'on les croirait sortir des mains d'un joaillier. Il en est de même pour le Glint (Cambrien) dans la région de Pskow-Reval. Et elles sont très nombreuses les régions semblables (OULIANOFF, 1953). Ces couches fossilifères se trouvaient antérieurement dans les profondeurs, supportaient de grandes charges de couches supérieures et, en plus, elles ont été soumises à l'influence de la chaleur interne. Ni l'un ni l'autre de ces facteurs physiques n'ont été suffisants pour déclencher l'action métamorphisante, c'est-à-dire la mise en contact des molécules susceptibles d'entrer en réaction. On sait, par contre, que dans d'autres régions, où les couches sédimentaires sont déjà atteintes, ne serait-ce que par un début de métamorphisme, l'intégrité des fossiles est la première à en souffrir.

Je suis loin de dénier toute influence à la chaleur et à la pression hydrostatique dans le déroulement du *métamorphisme des roches* ; mais à chaque facteur actif doit correspondre un coefficient exprimant la part qui lui revient dans l'effet définitif.

VII. C'est d'un *autre facteur* actif dans le métamorphisme que l'on parle de plus en plus fréquemment depuis quelques dizaines d'années. J'entends ici la *métasomatose*. Le terme a été introduit dans la science déjà par NAUMANN (1848), mais dès lors sa signification a été considérablement changée. LINDGREN (1919) a été l'un des premiers à mettre un accent particulier sur ce phénomène. Il le définit comme « précipitation par les réactions entre les solutions aqueuses et les solides ». GRUBENMANN et NIGGLI (1924, p. 151), précisent davantage la nature de l'apport du dehors : « Viele Gesteinsmetamorphosen erfolgen unter Stoffzufuhr, wobei der neue Stoff in der Form von Lösungen oder Dämpfen einwirkt. Findet dabei eine Bindung oder Anreicherung der zugeführten Substanz durch bestimmte chemische Reaktionen statt, an denen sich sowohl ursprüngliche als neugebildete Mineralien beteiligen, so spricht man... von einer *Metasomatose* ». Et effectivement, on définit souvent la métasomatose comme le métamorphisme avec apport. Mais il surgit ici une nouvelle complication terminologique. SEDERHOLM (1907, p. 110) a introduit un nouveau terme, migmatite, qui est actuellement largement employé. Une définition récente en a été donnée par TURNER et VERHOOGEN (1951, p. 294) : « The term migmatite has been variously defined. It is generally agreed that the most typical rocks of this class are those in which a granitic component (granite, aplite, pegmatite, granodiorite or the like) and a metamorphic host rock are intimately admixed on a scale sufficiently coarse for the mixed condition of the rock to be megascopically recognizable. » Ces auteurs indiquent plus loin que nombreux sont les géologues qui englobent dans la

catégorie des migmatites les roches nettement métasomatiques, de sorte que pratiquement toutes les roches métamorphiques se trouvent être recouvertes par le terme de migmatites.

TURNER et VERHOOGEN (1951, p. 369) énumèrent ainsi les agents du métamorphisme : « temperature, hydrostatic pressure and non hydrostatic stress. A fourth factor, of great importance in facilitating and accelerating chemical and mechanical adjustment to these conditions, is the chemical activity of aqueous solutions and gases percolating through the intergranular network of the rock. » Ce passage permet de comprendre que le coefficient d'importance (voir plus haut, paragraphe VI) du quatrième facteur, la métasomatose, cède encore la place aux trois premiers. Et pourtant c'est cette face-là du problème général du métamorphisme qui doit retenir spécialement notre attention.

VIII. La circulation des *solutions* dans les canaux et pellicules *capillaires* détermine justement la réalisation du phénomène que l'on désigne par le terme de *métasomatose*. Mais nous ne pouvons pas observer directement ce processus.

D'autre part, quand LINDGREN (1919) dit que les « rocks are termed metasomatic if their composition has been materially changed by replacement of the original minerals », on est en droit d'objecter qu'il ne s'agit là que d'une simple vue de l'esprit. En effet, sauf de rares cas où l'on peut affirmer catégoriquement que, dans de grands volumes, il est possible de reconnaître le remplacement métasomatique (gîtes métallifères dans les calcaires), le plus souvent nous nous trouvons encore devant une incertitude quant à la marche des réactions métasomatiques. Alors notre attitude vis-à-vis de phénomènes dont la structure est encore peu connue doit être la suivante : accepter, pour base des explications, les notions les plus vraisemblables, quitte à les corriger plus tard.

L'une de ces notions explicatives intéresse la plupart des schistes cristallins. J'entends l'*eau de mer*, qui imbibe presque la totalité des *sédiments* dès l'origine. Dans la nature inorganique, elle est comparable au *plasma* qui, chez les animaux, apporte la matière nutritive aux diverses parties de l'organisme.

La circulation de l'eau dans les roches ne peut s'effectuer que sous certaines conditions importantes. Lorsque les canaux, dans la masse rocheuse, sont larges, le mouvement de l'eau s'effectue sans difficultés, sous l'influence de la pesanteur. Mais dans les canaux capillaires, un bouchon gazeux peut entraver complètement la circulation. En examinant les séries métamorphiques, on s'arrête souvent avec étonnement devant la présence de grandes lentilles de calcaire, intact ou marmorisé seulement, au milieu de schistes cristallins fortement métamorphisés. Et pourtant l'examen sur le terrain montre

indubitablement que ce calcaire, par son origine, fait partie de la masse ambiante. Comme L.-C. GRATON (1930) l'a bien indiqué, la raison de ce phénomène réside dans la formation, par des réactions chimiques, de gaz carbonique qui, ne pouvant s'échapper, forme des bouchons dans les canaux capillaires et empêche la propagation des solutions, isolant de la sorte certaines lentilles de roches carbonatées.

IX. VAN HISE (1904), FULLER (1906), ADAMS (1912), LINDGREN (1919) ainsi que d'autres savants ont examiné la question du *niveau inférieur des eaux incluses dans la croûte terrestre*.

On admettait anciennement que les eaux chaudes, classées comme juvéniles, sont strictement localisées. Actuellement, avec la multiplication des forages, on sait que dans les profondeurs accessibles à la technique humaine, les eaux chaudes sont largement répandues. Les recherches minutieuses de DAY, SHEPHERD et JAGGAR sur les émanations des volcans actifs ont montré qu'elles contiennent de fortes proportions (allant jusqu'à 70 %) de vapeur d'eau.

Mettant de côté les eaux de surface, soit celles des océans, des mers, des lacs et des rivières, ainsi que l'eau à l'état solide (glaciers, neige), on peut envisager que l'eau, dans la croûte terrestre, forme une série d'enveloppes, à transitions insensibles, mais qui ont, chacune, des caractères distincts. Tout d'abord, il faut distinguer la zone où l'eau est à l'état liquide de celle où elle est à l'état gazeux, caractéristique pour les profondeurs dépassant 4000 m. Mais la zone de l'eau liquide, qui se situe entre les profondeurs de 0 et 4000 m, n'offre pas dans toute son épaisseur les mêmes conditions pour l'existence de l'eau. L'eau remplit les espaces libres entre les lèvres des failles, les interstices dans les roches poreuses. Cependant, dans les profondeurs, ces vides ont tendance à se fermer. LINDGREN (1919) a très bien exposé ce phénomène qui intéresse l'exploitation minière.

Il y a encore quatre autres catégories d'eau, d'une grande importance pour les transformations des roches dans l'épaisseur de la croûte terrestre. Cependant leur présence n'est pas toujours facile à déceler. Il s'agit, dans trois cas, d'eau complètement emprisonnée.

C'est d'abord l'eau qui fait partie des *inclusions liquides dans les cristaux*. Bien que l'existence de telles inclusions soit décelée depuis longtemps (SORBY, 1858), des études détaillées, au moyen de méthodes nouvelles et sur un matériel abondant et varié, datent de nos jours seulement, et ceci principalement grâce aux travaux de G. DEICHA (1955), chez qui je relève le passage suivant : « Les déformations mécaniques des cristaux à la faveur des mouvements tectoniques peuvent éliminer complètement les inclusions fluides. Le fait apparaît nettement lorsqu'on étudie, dans une même région, un dépôt de calcite qui a échappé à l'écrasement et un dépôt où l'écrasement se

manifeste, ne serait-ce que par une torsion légère des lamelles de clivage » (G. DEICHA, 1955, p. 29).

La *deuxième catégorie* comprend les eaux emprisonnées dans les vides lenticulaires du corps de la roche. Ils peuvent être nombreux (selon la nature du terrain) et, en plus, complètement isolés par des parois étanches.

La *troisième catégorie* comprend l'eau chimiquement liée dans les cristaux et qui — la chaleur aidant — peut abandonner le réseau cristallin et prendre part à la circulation générale des eaux dans la masse rocheuse.

La *quatrième catégorie*, certainement la plus importante par son volume et la facilité (relative) de son déplacement, est celle des très minces nappes, des pellicules d'eau (VERNADSKY, 1933) qui remplissent tous les interstices ménagés dans la structure de la roche : pores, canaux, vides entre les grains minéraux incomplètement cimentés. Une partie de cette eau peut se déplacer, l'autre restant plus fermement liée à la surface des grains (eau adsorbée). La quantité de cette eau, dans les roches, est considérable. Presque toutes les analyses chimiques de roches en constatent la présence. Ainsi, par exemple, dans le granite du massif de l'Aar H_2O^+ varie entre 0,39 % et 3,61 % et H_2O^- entre 0,00 % et 0,36 %. La quantité d'eau varie entre 0,68 % et 9,61 % dans les roches métamorphiques du massif du Mont-Blanc (Chemismus schweiz. Gesteine, 1930). Et encore, il convient de noter que les méthodes habituelles d'analyse, de même que les méthodes de prélèvement et de conservation des échantillons, ne peuvent pas garantir une précision suffisante. Une forte partie de cette eau échappe à l'opérateur le plus attentif.

Quoique la partie d'eau incluse initialement dans les sédiments diminue avec le temps, au fur et à mesure qu'ils deviennent plus compacts, plus consolidés, une proportion importante y reste à l'état fossile. L'argile est particulièrement intéressante sous ce rapport. Elle peut retenir plus d'eau que le volume total de ses parties solides. Mais avec l'augmentation de la pression, une partie de cette eau est chassée. Plus grande est cette pression et plus l'argile perd de son eau. Mais les expériences de laboratoire sur ce sujet ne sont pas probantes pour évaluer la grandeur de cette perte par les couches argileuses. Dans la nature, l'extension horizontale considérable d'une couche d'argile surmontée par les sédiments déposés postérieurement n'ouvre que des voies très limitées à l'échappement latéral de l'eau que la pression tend à chasser. L'eau excédentaire dans l'argile ne peut plus alors que se réfugier dans des chapelets de petites poches.

X. *Les changements de la pression et de la température* sont susceptibles de déclencher des réactions chimiques. En dehors de la formation de minéraux néogènes (ou authigènes), ces réactions con-

tribuent à *modifier la composition de l'eau de mer qui imbibe* les sédiments. Toutefois ces modifications ne sont pas identiques au sein de toute la grande masse des sédiments accumulés dans une fosse de subsidence, car la même eau de mer se trouvera en contact avec un matériel qui diffère d'une couche à l'autre (calcaires, argiles, sables, etc.). Mais avec le temps les eaux, dans les différents compartiments, atteignent un état de stabilité mécanique et chimique.

KORZHINSKY (1948) a introduit très utilement la notion de la mobilité des molécules. Il est évident que cette mobilité ne peut être exprimée, pour le moment, que d'une façon approximative. On peut se contenter de ranger les molécules dans l'ordre de mobilité décroissante, sans que les intervalles aient même valeur objective (comparez avec l'échelle de dureté de MOHS). Voici deux telles séries (d'après KORZHINSKY).

1) Pour les cas de température élevée et les complexes gneissiques situés dans la profondeur :

H₂O, CO₂, S, SO₃, Cl, K₂O, Na₂O, F, CaO, O₂, Fe, P₂O₅, BaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂.

2) Pour le cas de température basse, près de la surface :

H₂O, CO₂, S, K₂O, Na₂O, O₂, Cu, SiO₂, CaO, MgO, Fe, P₂O₅, Al₂O₃, TiO₂.

La grande mobilité, dans les deux séries, des molécules K₂O et Na₂O, si importantes pour la formation des feldspaths et des micas, est particulièrement intéressante. Quant à la molécule Al₂O₃, qui manifeste une certaine paresse, il y a lieu de noter que ce « défaut » est largement compensé par le fait que cette molécule est présente dans la plupart des sédiments, ce qui favorise la formation et la dispersion des minéraux du groupe des micas et de celui des feldspaths.

XI. *Tant que dure l'état d'équilibre* dans la masse accumulée des sédiments, aucune réaction chimique notable ne se produit au sein de la roche (exemple des couches à fossiles merveilleusement conservés). La reprise de l'activité chimique ne peut se produire que dans le cas où les *solutions* sont *remises en mouvement*, ce qui les mettra en contact avec des sédiments d'une autre composition chimique. Grâce aux différences, même très faibles, de pH ainsi réalisées, des réactions sont engendrées, qui aboutissent à la formation de nouveaux minéraux.

La variation du pH résulte de la filtration des solutions à travers des membranes de nature colloïdale. Cette filtration sélective (effet de filtration de KORZHINSKY) accentue ou diminue l'effet d'adsorption. En résultat : changement de l'acidité (pH) des solutions, accumulation de certains éléments dispersés dans la solution et formation de nouvelles combinaisons minéralogiques. (KAMENSKY et PRIKLONSKY, 1957). L'augmentation de l'acidité de la solution est susceptible d'a-

morcer une série de réactions avec la masse rocheuse : les bases plus fortes peuvent être expulsées par les bases plus faibles, et les acides plus faibles par les acides plus forts. La diminution d'acidité de la solution produira les réactions de caractère inverse (KORZHINSKY, 1957).

Deux causes peuvent déclencher ce mouvement des eaux : le *changement* très localisé du régime thermique et la *rupture de l'équilibre des pressions*.

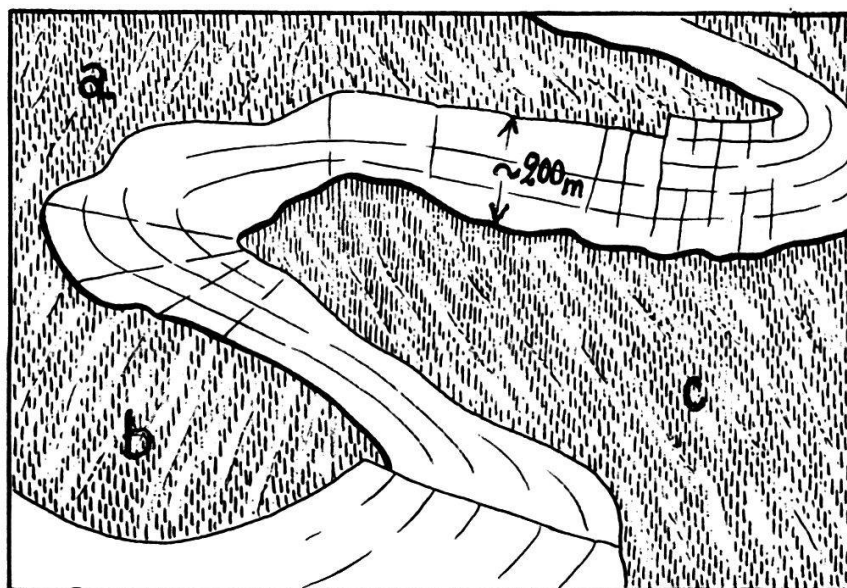


FIG. 1. — Ce dessin (d'après une photo-avion) représente les plis au dessus d'Arpenaz, sur la rive droite de la vallée de l'Arve, entre Sallanches et Cluses, en Savoie. Ces plis couchés ont profondément étonné H.-B. DE SAUSSURE («Voyages dans les Alpes», 1779-1796). Les parois abruptes sont du Malm (calcaire). Le terrain recouvert d'éboulis et de forêt est du Berriasien (a et b) et de l'Oxfordien-Callovien-Dogger (c), tous les deux fortement argileux.

La viscosité de l'eau diminue rapidement avec l'élévation de la température :

Température	Viscosité de l'eau (en $\text{cm}^{-1}.\text{g}.\text{s}$)
0°	178.10 ⁻⁴
10°	131.10 ⁻⁴
20°	101.10 ⁻⁴
30°	81.10 ⁻⁴
40°	66.10 ⁻⁴

Par conséquent, avec l'élévation de la température de l'ambiance, la circulation des eaux formant des films capillaires devient plus facile.

On comprend très bien que la première cause, thermique, est hypothétique en ce qui concerne les grands espaces. C'est l'activité

volcanique brusquement réveillée qui est susceptible de produire une telle élévation de température. Mais la région influencée par ce nouveau facteur sera toujours très petite, compte tenu de l'échelle du métamorphisme général (ou régional). Par contre, la seconde cause se réalise justement sur de grandes étendues, à la suite des mouvements tectoniques. La croûte terrestre, forcée par la pression orogénique, s'y adapte par la formation de failles et de plis. Chaque cassure, grande ou petite, dans la masse rocheuse, produit une rupture d'équilibre des pressions. *Les nappes et les films d'eau emprisonnés se mettent alors en mouvement.* Dès ce moment entre en jeu le phé-

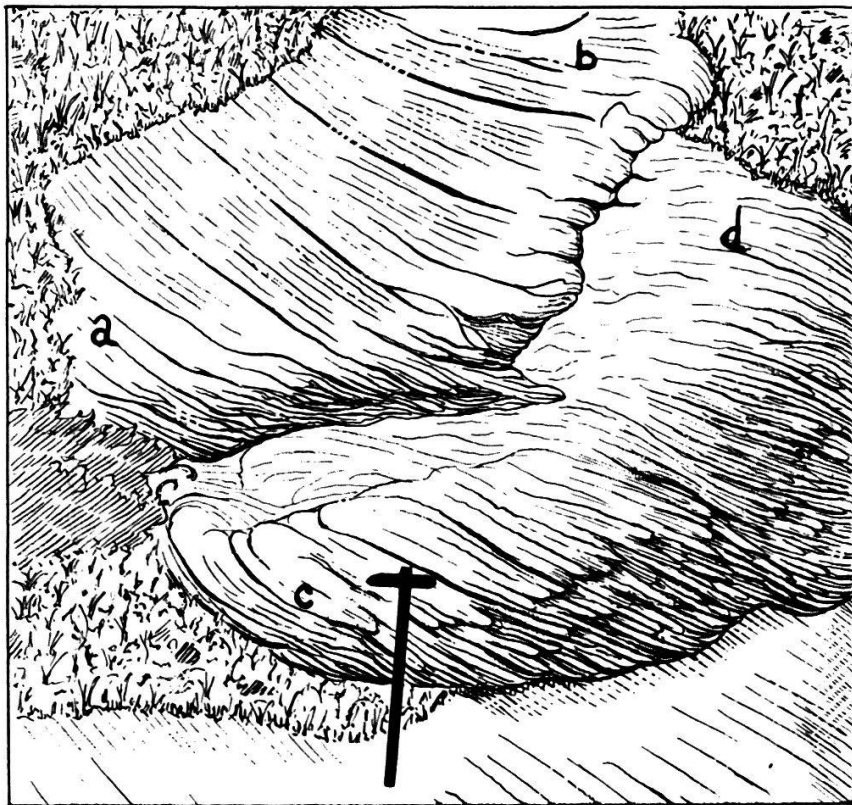


FIG. 2. — Détail de la couche de Malm de la fig. 1 qui fait voir la fissuration des couches calcaires. Elle change d'orientation en passant de *a* à *b* et de *c* à *d*. (Dessin d'après photo).

nomène que l'on se plaît à nommer métasomatose (voir le paragraphe VII).

Le grand rôle des failles dans cette remise en mouvement des solutions aquifères n'exige aucune explication. Mais ce que les géologues modernes désignent par l'expression de *tectonique plastique* doit retenir particulièrement notre attention. Les plis dans les masses rocheuses, qui nous paraissent être l'expression d'une remarquable plasticité (voir fig. 1), *ne se produisent en réalité que par l'assemblage de multiples cassures* (voir fig. 2). Ceci est vrai pour les plis qui me-

surent plusieurs dizaines de mètres comme pour ceux qui ne sont visibles qu'au microscope. Plus encore : les pressions tectoniques déterminent le sectionnement des masses rocheuses en lames, qui s'empilent en glissant les unes sur les autres. Alors, suivant les plans de glissement, se produit un écrasement donnant lieu à la formation de mylonites. Les roches situées entre les zones de mylonitisation, peuvent subir une influence considérable de la pression qui s'exprime par la schistosité (FOURMARIER, 1953) et par le dérangement souvent très profond de la structure intime, de la cohésion entre les cristaux composant la roche (OULIANOFF, 1955 b). Ainsi, par exemple, on constate presque toujours, dans le granite du massif du Mont-Blanc, que les cristaux de quartz et de feldspath sont fendillés, que le quartz

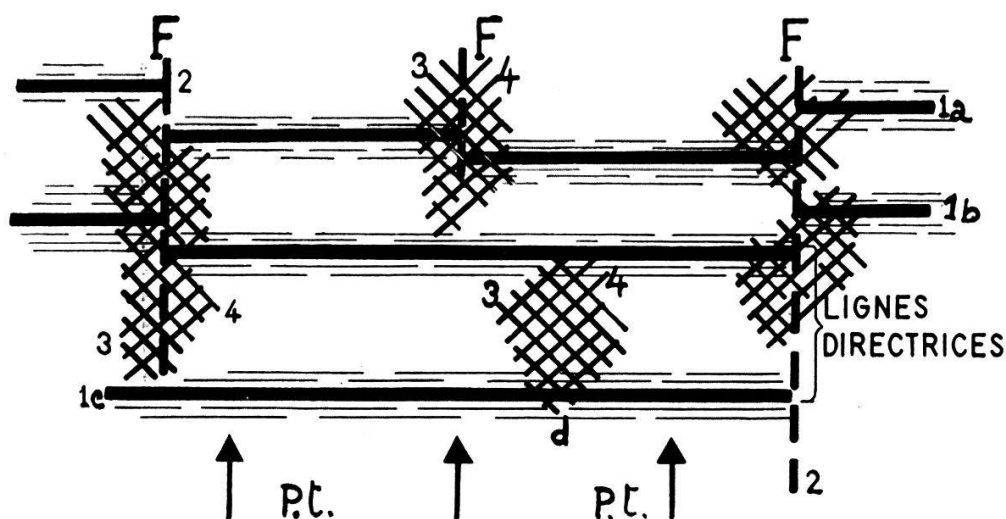


FIG. 3. — Schéma montrant l'orientation de certains éléments constructifs dépendant de la composante tangentielle de la pression tectonique (*P. t.*) : lignes directrices principales (axes des plis, traces des plans de chevauchement, (1a, 1b, 1c), failles avec décrochements parallèles à la poussée (2), cassures (3 et 4) comparables aux systèmes de lignes de Mohr.

est partiellement ou entièrement recristallisé en mosaïque, etc. (P. CORBIN et N. OULIANOFF, 1927-1958). L'apparition de nouveaux minéraux hydratés (séricite, chlorite, épidote) prouve que toutes ces fissures submicroscopiques ont ouvert de nouvelles voies à la circulation des eaux.

XII. Seules les *régions restées à l'écart* des zones de plissement échappent à l'effet du métamorphisme régional.

Pour compléter ce qui est dit au paragraphe VI, voici encore quelques passages caractéristiques sous ce rapport, que j'emprunte à M. GIGNOUX (1926) :

« Dans la région centrale du Bouclier baltique, le Cambrien est resté *horizontal et point du tout métamorphique* : les grès à *Obolus*

rappellent à s'y méprendre les grès du Tertiaire parisien » (p. 37).

Très intéressante est la coupe dans le NW de l'Ecosse, où l'on voit le Cambrien fossilifère en position presque horizontale recouvert par une nappe de charriage de gneiss très plissés et bien entendu sans fossiles (p. 40).

« Le Dévonien de la zone méditerranéenne est toujours très plissé, sans doute très souvent *métamorphique*... Les affleurements connus (donc fossilifères. N. O.) de Dévonien dans cette zone sont comme des sortes d'îlots, respectés par le métamorphisme » (p. 115).

XIII. *Chaque mouvement tectonique dérange, déforme la stabilité* du régime hydrologique dans la masse rocheuse, jusqu'aux éléments microscopiques et submicroscopiques qui le composent. Et à chaque mouvement orogénique (ou à chaque stade de la même orogénèse) correspond la formation d'un nouveau réseau de cassures (voir fig. 3) et les tectoniques superposées, à lignes directrices croisées (OULIANOFF, 1947, 1949, 1953 b. Voir aussi fig. 4) déterminent la *re-*

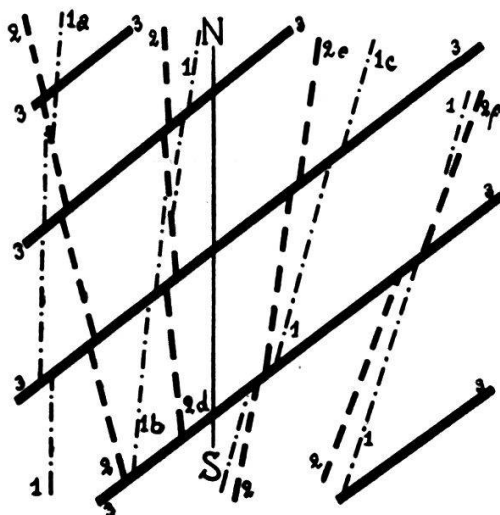


FIG. 4. — Dessin montrant schématiquement les lignes directrices (explication sous fig. 3) de trois tectoniques superposées aux axes croisés. A chaque tectonique correspondent encore les réseaux de décrochements et de cassures 3 et 4 (du dessin 3) qui ne sont pas indiqués sur le schéma présent. Mais en les considérant, on se rend facilement compte d'une énorme complexité des réseaux de cassures (grandes et petites) d'origine tectonique, qui affectent les masses rocheuses.

prise d'activité métamorphique des eaux incluses dans les roches que l'orogénèse *remet en mouvement*. Comme les effets des orogénèses embrassent de grandes régions, elles créent les conditions du *métamorphisme régional*, qui ne s'exprime pas, bien entendu, partout par des effets identiques, mais se manifeste, à cause de la diversité du matériel initial, par la formation de *roches métamorphiques* de nature pétrographique variable. Il suffit de mentionner ici les deux

groupes de formations importantes et très répandues : les *micaschistes* (sans feldspaths), qui peuvent être produits à partir des schistes argileux, et les *gneiss* (caractérisés par les feldspaths potassiques et les plagioclases), qui se rattachent aux roches marneuses comme matériel fondamental.

OUVRAGES CITÉS

- ADAMS F.-D. (1912). — *Journ. of Geol.* 20, p. 17.
 Chemismus der schweiz. Gesteine (1930). *Beitr. Geol. Schweiz., Geotech. Ser.* XIV.
- CORBIN P. et OULIANOFF N. (1927-1958). — Carte géologique du massif du Mont-Blanc au 1 : 20 000. Douze feuilles parues, accompagnées de « Notices explicatives », Paris.
- CHRISTOPHE-MICHEL-LÉVY M. (1957). — Premiers stades du métamorphisme artificiel d'une dolomie siliceuse. *Bull. Soc. fr. Min. Crist.* LXXX.
- DALY R.-A. (1933). — *Igneous Rocks and the Depths of the Earth*, New York.
- DEICHA G. (1955). — Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides, Paris.
- DELESSE A. (1858). — *Métamorphisme des roches*, Paris.
- DÉVERIN L. (1924). — L'étude lithologique des roches sédimentaires. *Bull. Soc. min. suisse*, p. 45.
- FALLOT P. (1957). — Tour de Babel. *Scientia*.
- FOURMARIER P.-J. (1953). — Schistosité et phénomènes connexes dans les séries plissées. Congr. géol. intern. à Alger (1952). C. R. fasc. III.
- FULLER M.-L. (1906). — *Water-Supply Paper* 16, 118. U.S. Geol. Surv.
- GIGNOUX M. (1926). — *Géologie stratigraphique*, Paris.
- GRATON L.-C. (1930). — Hydrotherm. Orig. of the Rand Gold Dep. *Econ. Geol.* XXV, Suppl. n° 3.
- GRUBENMANN und NIGGLI (1924). — *Die Gesteinsmetamorphose*, Berlin.
- HARKER A. (1932). — *Metamorphism*, London.
- VAN HISE C.-R. (1904). — A treatise on metamorphism. *Mon.* 47, U.S. Geol. Surv.
- HOLMES A. (1920). — *The nomenclature of petrology*, London.
- KAMENSKY G.-N. et PRIKLONSKY V.-A. (1957). Problèmes actuels d'hydrologie. *Messenger Acad. Sc. URSS*, Moscou (en russe).
- KORZHINSKY D.-S. (1948). — Phase rule and geochemical mobility of elements. Intern. geol. Congr. Part II, p. 50, London.
 — (1957). — Acidité des solutions et succession des réactions. *Messenger Acad. Sc. URSS*, Moscou (en russe).
- LEITH C.-K. and MEAD W.-J. (1915). — *Metamorphic geology*, New York.
- LINDGREN W. (1919). — *Mineral deposits*, New-York.
- NAUMANN K.-F. (1848). — *Lehrbuch der Geognosie*.

- OULIANOFF N. (1934). — Origine des amphibolites et tectonique des anciens massifs. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* (Lausanne) 58, p. 231.
- (1947). — Infrastructure des Alpes et tremblement de terre du 25 janvier 1946. *Bull. Soc. géol. France* (5) 17, p. 39.
- (1949). — Les problèmes des tectoniques superposées et les méthodes géophysiques. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 64, p. 213 et *Bull. Lab. géol. minér. géoph. et Musée géol. Lausanne* 92.
- (1953 a). — Cristallisation forcée dans les schistes cristallins. *Cahiers géol. de Thoiry XVI-XVII*.
- (1953 b). — Superposition successive des chaînes de montagnes. *Scientia*.
- (1955 a). — Note concernant l'origine et le métamorphisme des schistes de Casanna. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 66, p. 77 et *Bull. Lab. géol. minér. géoph. et Musée géol. Lausanne* 113.
- (1955 b). — Ecrasement sans trituration et mylonitisation des roches. *Eclogae geol. Helv.* 47, p. 377.
- RAGUIN E. (1957). — Géologie du granite, Paris.
- RAMBERG H. (1952). — The origin of metamorphic and metasomatic rocks, Chicago.
- ROUCH J. (1946). — Traité d'océanographie physique, t. II (L'eau de mer), Paris.
- SEDERHOLM J.-J. (1907). — *Bull. Comm. géol. Finlande* 23.
- SORBY H.-C. (1858). — On the microsc. struc. of cryst. *Quart. J. geol. Soc.*, London.
- STUDER B. (1851). — Geologie der Schweiz, Bd I, Bern und Zurich.
- TURNER F.-J. and VERHOOGEN J. (1951). — Igneous and metamor. Petrology, New York.
- VERNADSKY W. (1933). — Histoire des minéraux de la croûte terrestre. T. 2, Livraison 1 et 2. Léninegrad (en russe).
- WEGMANN C.-E. (1948). — Remarques sur le métamorphisme régional. *Geol. Rundschau* 36, p. 41.
- (1955). — Les ordres de grandeur dans les phénomènes métasomatiques de roches. Science de la Terre, Nancy.

Manuscrit reçu le 20 mai 1958.