

*Sur la genèse des terrains cristallophylliens.*

PAR

PIERRE TERMIER,

Membre de l'Institut, Professeur à l'École des mines, Paris.

Messieurs,

Si j'ai demandé la parole sur « la genèse des terrains cristallophylliens », ce n'est point que je me sente en état de vous décrire exactement cette genèse. Parmi tant de questions difficiles, ou même presque insolubles, soulevées par la géologie, celle-ci est une des plus redoutables, une de celles qui sont actuellement le moins mûres, une de celles qui, pendant de longues années encore, passionneront et décourageront tour à tour les géologues et les pétrographes de tous les pays.

Mon intention est seulement de marquer le degré de connaissance où, dans l'étude de ce problème, nous sommes actuellement parvenus. Les considérations que je vais vous exposer ne vous surprendront probablement pas: elle ne sont pas absolument nouvelles. Mais, nouvelles ou non, il importe, suivant moi, de les mettre en lumière, de les faire entrer dans le fonds commun des idées universellement admises, des idées que l'on ne discute plus. Enrichir ce fonds commun, cette portion désormais inaliénable du patrimoine scientifique de l'humanité, n'est-ce pas l'une des raisons d'être des Congrès internationaux?

Peut-être quelques-uns d'entre vous se souviennent-ils des conclusions que j'ai présentées, il y a sept ans, au Congrès de Vienne, et qui résumaient tout ce que je savais, à ce moment-là, sur la question du cristallophyllien. Vous me permettrez, néanmoins, de vous rappeler, très brièvement ces conclusions. Aucune d'elles n'a été sérieusement discutée depuis 1903; aucune ne me paraît ébranlée. Je les avais tirées de l'étude des schistes cristallins des Alpes occidentales. Elles m'ont paru, depuis lors, découler avec la même évidence de l'étude des terrains cristallins des Alpes centrales et orientales, et de l'étude, aussi, des

terrains cristallins des autres chaînes. Je voudrais les voir introduites, comme autant d'axiomes, dans l'enseignement géologique universel.

Tout d'abord, un terrain cristallophyllien, ou une série cristallophyllienne, c'est un terrain quelconque, originellement formé de sédiments, ou de roches volcaniques, ou de roches massives, ou d'un mélange de tout cela, et ayant pris — sous l'action d'une cause mal connue que nous appelons le métamorphisme — le triple caractère de l'holocristallinité, de la structure zonée à zones parallèles, et de la disposition générale en strates parallèles aux zones élémentaires. Tout terrain, sédimentaire ou non, peut devenir un terrain cristallophyllien. En fait, il y a des séries cristallophylliennes de divers âges, et même d'âge très récent. Sur ce premier principe, nous sommes, je crois bien, tous d'accord.

En second lieu, ce n'est pas aux seules actions dynamiques que l'on peut demander une telle transformation. Les actions dynamiques *déforment*; elle ne *transforment* pas. Si l'on veut, avec moi, réserver le nom de métamorphisme à une cause capable de changer, sur d'énormes épaisseurs et d'immenses étendues, un terrain quelconque en une véritable série cristallophyllienne, il n'y a pas de métamorphisme purement dynamique, il n'y a pas de dynamo-métamorphisme. De cela encore, nous sommes, au fond, tous convaincus. La discussion, quand il y a encore, sur ce sujet, quelque discussion entre nous, provient d'une équivoque. Plusieurs géologues désirent garder le nom de dynamo-métamorphisme, ou celui de dynamo-métamorphose; et ils les appliquent à des déformations de roches par écrasement ou laminage, ou à des phénomènes locaux et partiels de recristallisation dans les roches ainsi déformées. Ils disent « granites dynamo-métamorphosés », au lieu de dire « granites écrasés et laminés ». Je signale l'équivoque en passant; et c'est pour la supprimer que je demande l'abolition du mot de dynamo-métamorphisme. Plus nous avançons dans la connaissance des phénomènes de charriage, et plus nous rencontrons de ces roches écrasées et laminées. Des *mylonites*, faites aux dépens de toute espèce de roches, sont aujourd'hui signalées un peu partout, et dans toutes les chaînes. *Localement*, il peut arriver qu'elles ressemblent à un gneiss, ou à un micaschiste; mais aucun pétrographe ne prendra jamais une série mylonitique pour une série cristallophyllienne.

Ma troisième conclusion de 1903 était que, malgré cette impuissance des efforts dynamiques à produire un véritable métamorphisme, il y a néanmoins une liaison certaine entre le *métamorphisme régional* — je

veux dire la transformation, dans une vaste région et sur une grande épaisseur, d'un terrain quelconque en une série cristallophyllienne — et la naissance des chaînes de montagnes. Chaque chaîne a sa série cristallophyllienne. Les chaînes de montagnes sont liées à des géosynclinaux; et il n'est pas de métamorphisme un peu intense et un peu étendu là où n'a pas régné la condition géosynclinale. Il me semble bien que, sur ce troisième point, la discussion est close.

En quatrième lieu, j'affirmais que le métamorphisme régional n'est pas explicable par le voisinage des roches massives. Le métamorphisme régional est autre chose qu'un *métamorphisme de contact* extraordinairement dilaté. Certaines séries cristallophylliennes ne renferment pas de roches massives. Dans celles qui en renferment, et qui sont les plus nombreuses, le métamorphisme et les amas de roches massives sont liés entre eux — quand ils sont liés —, non pas comme un effet à sa cause, mais comme deux effets d'une même cause. La même cause a produit, et la série cristallophyllienne, et les amas de roches massives que celle-ci contient. L'un des objets de ma communication d'aujourd'hui est précisément de développer cette quatrième conclusion, qui n'a pas été partout bien comprise.

En cinquième lieu, la cause qui a produit le métamorphisme régional a agi de la même façon dans tous les temps et dans toutes les chaînes de montagnes. Enfin — et c'était ma sixième conclusion de 1903 — l'action métamorphosante s'est étendue inégalement aux divers étages de la série qui, dans son ensemble, devenait cristallophyllienne. Le métamorphisme s'est comporté comme la tache d'huile qui s'étend dans une pile d'étoffes, et qui s'étale inégalement, suivant leur perméabilité, dans les diverses étoffes de la pile. Sur ces deux dernières conclusions, je ne crois pas qu'il y ait lieu de revenir.

Partons, si vous le voulez bien, Messieurs, de ces six principes; et essayons d'aller un peu plus avant, et de voir un peu plus clair dans la genèse des terrains cristallophylliens.

Voici une première question, sur laquelle il faut, de toute nécessité, prendre parti: celle de savoir si, dans la transformation que nous appelons métamorphisme, il y a eu, ou non, *apport* de matériaux nouveaux. La discussion sur ce point est encore ouverte; mais je suis très convaincu qu'elle s'entretient, cette discussion, et qu'elle se perpétue, par une équivoque, tout comme le litige sur le dynamo-métamorphisme. Chacun sait que, dans une série cristallophyllienne, on voit s'affaiblir le métamor-

phisme quand on s'éloigne, soit verticalement, soit latéralement, d'une certaine région où il est à son apogée; et que l'on passe ainsi, fort souvent, par des phyllades, des quartzites micacés, des marbres plus ou moins phylliteux, à un terrain sédimentaire tout à fait ordinaire. Si l'on considère la zone de passage, déjà très recristallisée, on y trouve beaucoup de roches dont la composition chimique ne diffère pas, ou diffère très peu, de celle des sédiments intacts: et c'est sur quoi quelques-uns s'appuient pour nier l'apport. Mais, même dans cette zone de passage, il n'est pas difficile de voir s'accuser des différences chimiques: il suffit, pour cela, de prendre la moyenne d'un grand nombre d'analyses. Dès avant le développement des feldspaths dans les sédiments transformés, on constate que les teneurs en eau, en acide carbonique, en alumine, en silice varient; que les alcalis augmentent; que la chaux diminue. Quand les feldspaths apparaissent, l'apport d'alcalis n'est plus niable. On ne peut contester la réalité d'un apport que si l'on parle de séries à métamorphisme incomplet, par exemple de séries de phyllades comme il en existe dans le Précambrien de diverses régions. Mais pour les véritables séries cristalloylliennes, je veux dire pour celles qui sont formées surtout de micaschistes, de gneiss et d'amphibolites, je ne crois pas que l'on puisse raisonnablement douter d'un apport nouveau, d'un afflux d'éléments arrivant de la profondeur et chassant devant eux quelques-uns des anciens éléments. La présence, dans la plupart des mica-schistes, de nombreux cristaux de tourmaline, même très loin de toute venue granitique, est un argument, souvent oublié, et qui s'ajoute à beaucoup d'autres, en faveur de cette conception.

Une autre question qui se présente à nous, et qui est plus difficile, est celle du degré maximum de fluidité qu'ont atteint les roches quand elles se transformaient, par le métamorphisme régional, en des roches cristalloylliennes. Voici mon opinion à ce sujet.

Il n'est pas douteux que certains gneiss ne soient passés, avant l'achèvement de leur cristallisation, par un état visqueux ou semi-fluide: car ils contiennent des enclaves d'apparence étrangère, des morceaux de roches de composition différente qui semblent flotter dans la masse gneissique, comme flottent, dans le granite, les enclaves que tout le monde connaît. Voilà bien longtemps que j'ai observé des enclaves de mica-schistes et d'amphibolites dans les gneiss du Plateau central français. M. le Professeur A. G. HÖGBOM nous a montré, il y a quelques jours, au cours de l'excursion du Jämtland, dans les gneiss de l'Åreskutan, des exemples

analogues et plus beaux encore du même phénomène. Ce sont des enclaves d'amphibolite noire, les unes lenticulaires et aplaties, d'autres rondes ou ovoïdes, d'autres anguleuses avec des angles simplement arrondis, qui flottent dans un gneiss de couleur claire, riche en feldspath et dont les minéraux colorés sont le mica noir et le grenat. Autour de chaque enclave, une ceinture de grenats a cristallisé ou encore une ceinture feldspathique où le mica manque. Les enclaves lenticulaires sont zonées parallèlement à la grande section de la lentille et couchées dans la schistosité du gneiss. Quelques enclaves rondes ou anguleuses présentent une disposition plus étonnante: elles sont zonées, et leurs zones sont en travers de celles du gneiss; elles apparaissent comme *chavirées* par rapport à l'orientation générale de la roche. Quand le gneiss est froissé, plissé, contourné, les enclaves participent à tous ses mouvements et dessinent alors, en noir sur le fond clair, des zig-zags capricieux et compliqués. Que sont, au juste, toutes ces enclaves? L'hypothèse la plus plausible, à mon avis, est celle de ségrégations basiques effectuées *in situ*, dans un milieu semi-fluide. La cristallisation par zones parallèles se serait étendue, simultanément ou successivement, au gneiss et à l'enclave. Des mouvements intérieurs, çà et là, dans la masse en voie de cristallisation, mais encore incomplètement solidifiée, auraient déplacé, déformé, brisé certaines enclaves déjà solides; et quelques-uns des morceaux ainsi déplacés auraient finalement été saisis et fixés alors que leur propre zonage était en travers du zonage général. En tout cas, aucun des détails du phénomène n'est explicable en dehors d'un état de fluidité relative: et c'est là ce qu'il importe, pour le moment, de retenir.

D'autre part, il est certain que cette fluidité, dans les milieux qui ont cristallisé en gneiss, n'a été que très incomplète. On ne comprendrait pas, sans cela, la structure zonée, qui est l'un des caractères essentiels de toute roche cristallophyllienne. Dans un milieu complètement fluide, la pression n'a plus de direction: la cristallisation, dès lors, ne peut pas être zonée, elle se fait sans aucune orientation privilégiée, et c'est la cristallisation des roches massives. Au contraire, dans un milieu incomplètement fluide, où des grains solides, très nombreux, sont séparés par des vésicules liquides, la pression prend une direction, qui est, le plus souvent, la verticale, et la structure zonée, dans la cristallisation, devient nécessaire. Chaque minéral en voie de formation tend à placer, perpendiculairement à cette pression orientée, un de ses plans de solubilité maxima ou de fusibilité maxima, c'est-à-dire, pour

parler le langage de BRAVAIS, un de ses plans de plus grande *densité réticulaire*. Et si ce minéral, comme le mica, possède un plan réticulaire dont la densité soit très supérieure à celle de tous les autres plans de son réseau, c'est ce plan-là, et non pas un autre, qui se mettra perpendiculaire à la pression, réglera l'orientation de tous les cristaux et déterminera le zonage de la roche. Ce zonage devient une simple conséquence de la loi de BRAVAIS: et je ne crois pas que, pour l'expliquer, il soit nécessaire de faire appel — comme le fait M. BECKE — à une généralisation hypothétique, et par conséquent contestable, du principe de RIECKE sur la relation entre la pression et le point de fusion.

Cette remarque sur l'incomplète fluidité des milieux qui ont cristallisé en gneiss, par rapport à la complète fluidité des milieux qui ont cristallisé en roches massives, m'a été faite pour la première fois, il y a environ six ans, par un ingénieur en chef au Corps des mines de France, mon ami M. ANDRÉ LECLÈRE, bien connu des pétrographes pour ses études chimiques sur le granite de Flamanville. J'avoue qu'elle a été un trait de lumière, et que, grâce à elle, j'ai compris, d'un seul coup, toute une série de phénomènes restés jusqu'alors, pour moi, totalement énigmatiques. En particulier, la liaison entre les roches cristallophylliennes et les amas de roches massives devient toute simple: et c'est tout le problème des roches massives profondes qui s'éclaire aussi, comme vous allez en juger.

Maintenant que nous avons pris parti sur ces deux importantes questions, celle de l'apport d'éléments nouveaux et celle du degré de fluidité, nous pouvons, sans trop de hardiesse, essayer de nous figurer le métamorphisme régional.

Le métamorphisme régional complet — celui qui va jusqu'à la formation des gneiss — exige la profondeur; il ne se réalise parfaitement et ne prend toute son ampleur que dans les terrains qui sont en condition géosynclinale. Mais la profondeur ne suffit pas; la condition géosynclinale même ne suffit pas. Nous savons tous, en effet, que dans beaucoup de géosynclinaux, et qui semblent avoir été très profonds, il n'y a pas eu de métamorphisme. Il faut autre chose.

Cette autre chose, qui est absolument nécessaire au métamorphisme régional complet, c'est l'arrivée de vapeurs *juvéniles*, pour employer l'adjectif d'EDUARD SUESS, l'arrivée de vapeurs montant de l'intérieur, véritables colonnes filtrantes apportant, avec divers gaz, des silicates et des borates alcalins.

Sur le parcours de ces colonnes chaudes, la température des roches, sédimentaires ou autres, qui sont en condition géosynclinale, s'exagère rapidement. Des échanges chimiques s'établissent, favorisés par cette exagération de la température et par l'abondance des dissolvants; mais cette chimie interne n'est pas livrée au hasard. La préparation de *mélanges à point de fusion minimum*, véritables mélanges eutectiques qui fondront avant tout le reste, telle est la raison d'être des transports d'éléments dans la masse surchauffée. Les anciens éléments en excès, qui gênent la production des eutectiques, fuient devant la colonne filtrante; ils s'en vont ailleurs, et finissent par se fixer, déplaçant à leur tour d'autres corps, tandis que leur place, à eux, est prise par les éléments juvéniles.

Brusquement, çà et là, dans les régions de la masse surchauffée où des mélanges homogènes à point de fusion minimum ont pu se constituer, des fusions s'opèrent. Des amas liquides, véritables magmas, s'isolent au milieu d'un édifice qui est encore en grande partie solide, mais qui se ramollit déjà par endroits. Ces amas liquides peuvent avoir toute dimension. Plus on descend dans l'édifice, et plus ils deviennent gigantesques: tout en bas, c'est sur un immense batholite fondu que l'édifice repose. Quand cessera l'afflux de vapeurs chaudes, quand se fermeront « les puits de l'abîme », le refroidissement commencera, et, longtemps après, amas et batholites cristalliseront en roches massives, en granites ou en gabbros, en diorites ou en péridotites. Chaque grande famille de roches massives correspond à un eutectique idéal, plus ou moins grossièrement réalisé. Le nombre de ces familles de roches profondes est limité parce que ces eutectiques complexes — que nous ne savons pas encore produire, mais que les géophysiciens nous prépareront bientôt — sont eux-mêmes en très petit nombre.

Mais revenons à l'édifice traversé et surchauffé par la colonne filtrante, et qui, à l'exception des amas fondus, est encore ou solide, ou à peu près solide, ou tout au plus semi-fluide. Lui aussi va cristalliser, quand la température diminuera; et même sa cristallisation précédera celle des amas fondus. Il cristallisera en roches zonées, c'est-à-dire en roches cristallophylliennes. Dans cet édifice, les échanges chimiques sont demeurés incomplets: il restera donc hétérogène. Une fois consolidé et refroidi, il gardera cette hétérogénéité: et ce sera une alternance, bien des fois répétée, de strates de compositions différentes, gneiss, micaschistes, amphibolites ou pyroxénites.

Plus on monte dans l'édifice, et plus l'on voit s'affaiblir l'action de la colonne filtrante. Le métamorphisme est donc limité, et il décroît graduellement. La même dégénérescence s'observe quand on s'éloigne, horizontalement, de la zone traversée par les vapeurs. Dans les régions de semi-métamorphisme, les roches sont restées tout à fait solides : elles ont seulement été imprégnées par les solutions chaudes. Cela a suffi à les faire recristalliser : mais chaque assise a gardé, ou à peu près, sa composition primitive. On n'a plus de gneiss, mais seulement des phyllades, des quartzites micacés, des marbres phylliteux. Plus haut encore, ou plus loin, ce ne sont plus que des phyllades, des quartzites ordinaires, de simples marbres. L'extension horizontale du métamorphisme varie d'ailleurs suivant la perméabilité des couches ; et elle peut être plus grande dans un étage que dans celui qui lui est immédiatement inférieur.

Maintenant, la cristallisation s'achève. L'ensemble des terrains soumis au métamorphisme régional est devenu une série cristallophyllienne. Ici des gneiss, là des micaschistes, plus loin des amphibolites, plus haut des phyllades. Mais les amas liquides, qui sont des mélanges à point de fusion minimum, ne sont pas encore consolidés. Beaucoup vont cristalliser, là même où ils sont, en des roches homogènes que l'on verra plus tard apparaître brusquement, et avec des contours précis, au milieu des gneiss ou des micaschistes. D'autres vont se différencier. Plusieurs se videront vers le haut par des fractures, et serviront ainsi de source à des roches intrusives ou à des roches volcaniques.

Vous comprenez maintenant, Messieurs, ce que je voulais dire quand je parlais de la liaison des roches massives et des terrains cristallophylliens. Les premières se sont formées par le même procès général que les seconds. La production des roches massives n'est qu'un épisode du métamorphisme régional.

Pour les roches massives, le critérium de la véritable profondeur, le critérium du gisement abyssique, c'est l'amplitude et l'intensité du métamorphisme qui les entoure et qui *semble* émaner d'elles. Si un granite, par exemple, n'a autour de lui qu'une très petite auréole de phénomènes de contact, et de phénomènes peu intenses, soyez sûrs que le magma de ce granite ne s'est pas élaboré *in situ*, qu'il est venu d'ailleurs, tout formé. Mais s'il est entouré d'une vaste auréole de terrains très métamorphiques, et surtout s'il est enclavé dans une série cristallophyllienne à laquelle il paraisse réellement lié, tenez pour certain



qu'il s'est formé sur place, par la fusion complète d'un eutectique, alors que les terrains voisins étaient seulement semi-fluides ou même à peine ramollis.

Evidemment, tout n'est pas expliqué ; mais tous les faits que nous connaissons aujourd'hui s'enchaînent, et c'est là une raison suffisante pour proposer — jusqu'à ce que l'on ait trouvé mieux — une théorie scientifique. Pour mon compte, je n'en ai pas d'autre : et c'est donc à celle-ci que, provisoirement, j'adhère ; et c'est elle que, provisoirement, j'enseigne.

J'ai dit « tous les faits que nous connaissons ». La structure si particulière des assises cristallophylliennes, leur variété si grande de composition, leurs rapports indéniables avec les roches massives ; le nombre si restreint des types de ces dernières et l'étroitesse des limites entre lesquelles se tient leur composition ; les degrés du métamorphisme, sa liaison avec les chaînes de montagnes : oui, en vérité, tout cela devient relativement clair.

J'espère bien que nous irons plus loin, Messieurs, et que cette clarté relative finira par être la vraie lumière. Laissez-moi, en vous remerciant de votre bienveillante attention, terminer par ce souhait que, au prochain Congrès géologique international, une voix s'élève — la mienne, ou une autre, peu importe — pour vous annoncer quelque découverte décisive, faisant pénétrer le grand jour jusqu'au fond des abîmes où MARCEL BERTRAND voyait s'élaborer les séries cristallophylliennes de l'avenir.

---