

DÉVELOPPEMENT HISTORIQUE DE NOTRE CONNAISSANCE DES DOMAINES CRISTALLINS

P. MICHOT (*)

Il demeure donc vrai que la connaissance est, *par sa nature*, un « reflet » en ce sens qu'elle est la connaissance d'une réalité qui n'est pas notre œuvre et, en même temps, que *par sa méthode*, elle est une « construction ».

Roger GARAUDY
(in *Marxisme du XX^e siècle*, 1966).

1. LA CONCEPTION FIXISTE (FIN DU XVIII^e SIÈCLE)

C'est à la fin du XVIII^e siècle que, sous le terme de *Urgebirge*, apparaît dans l'enseignement de « Geognosie » que A. G. Werner (1787) donnait à la Bergakademie de Freiberg en Saxe, la notion de domaines cristallins.

Dans la conception fixiste de l'époque, les schistes cristallins relèvent d'une seule et même entité géologique apparue à ce stade reculé du développement de la Terre où les eaux océaniques, dotées d'une température élevée, contenaient en solution les éléments chimiques qu'elles précipitèrent directement sous la forme des minéraux actuels. Leur genèse s'intègre dans la théorie neptuniste de Leibnitz qui voyait, dans la Terre, à l'origine une masse incandescente en fusion qui, soumise au refroidissement, aurait donné d'abord une première croûte granitique, ultérieurement recouverte par les océans primitifs provenant de la condensation des vapeurs atmosphériques. L'abaissement systématique du niveau des océans jusqu'à l'époque actuelle aurait ensuite conduit au dépôt de formations lithologiques successives, se superposant et s'emboîtant les unes dans les autres puisque les schistes cristallins se rencontrent jusqu'aux altitudes les plus élevées, tandis que les sédiments récents n'occupent que les plaines basses actuelles. C'est dans cet esprit que Werner, prenant pour modèles les formations lithologiques de l'Allemagne, établit, à

(*) Université de Liège, Belgique.

l'échelle de la Terre, une stratigraphie universelle qui comprend successivement de bas en haut :

- a) les « terrains primitifs » (*Urgebirge*), qui groupent le granite, les gneiss, les micaschistes, les serpentines, les porphyres, toutes roches dépourvues de fossiles ;
- b) les « terrains de transitions » (*Übergangsgebirge*), comprenant les quartzites, les grauwackes, les schistes argileux, les schistes siliceux, où se rencontrent les premières pétrifications ;
- c) les « terrains de sédiments » (*Flötzgebirge*), en fait nos couvertures sédimentaires horizontales ;
- d) les « terrains de transport » (*aufgeschwemmtes Gebirge*), où se rangent nos alluvions et autres dépôts semblables ;
- e) les roches volcaniques, les basaltes exceptés que Werner considérait comme des sédiments fondus.

2. LA CONCEPTION TRANSFORMISTE ET LE CONCEPT DE MÉTAMORPHISME RÉGIONAL (FIN DU XVIII^e SIÈCLE À 1870)

A la même époque Hutton publie en Angleterre sa *Theory of the Earth* (1785, 1797), première apparition du transformisme dans les sciences minérales, et contestation radicale de la stratigraphie conçue par Werner : le granite, frayant sa voie au travers des terrains de transition, perd son essence primordiale et son ancienneté inconditionnelle ; le développement, dans les roches du contact, de la cristallinité et de minéraux nouveaux connus aussi dans les schistes cristallins, ruinent leur restriction à la période la plus ancienne du système de Werner, comme d'ailleurs à toute période déterminée. Ces roches transformées, Ch. Lyell (1833) les qualifiera de « métamorphiques ». Avec Hutton qui établit le fait du plutonisme éruptif et du métamorphisme, naît la nouvelle phénoménologie qui animera les sciences minérales, comme, 300 ans auparavant, la découverte de la réalité biologique des pétrifications ouvrait la voie à une conception matérialiste de l'histoire de la Terre.

La nouvelle théorie remettait donc en question la nature des terrains primitifs, bien que, dans leur cas, on ne puisse reconnaître leur passage latéral à la roche non transformée, ni expliquer la transformation par la présence d'une masse intrusive. Elle posait aussi sous un autre jour le problème du granite, constituant abondant dans ces terrains primitifs, quoique sa disposition en amas concordants marque une différence avec les granites intrusifs et discordants découverts par Hutton.

C'est dans les Alpes françaises, dans la première moitié du XIX^e siècle, qu'apparaissent les premières tentatives de reconversion des terrains primitifs, nos domaines cristallins d'aujourd'hui, suivant la formule métamorphique. Inspirées plus par l'idée que par les faits, elles introduiront néanmoins, sous la plume de Virlet d'Aoust, les rudiments d'une théorie du métamorphisme régional, dénommé par lui « métamorphisme normal » : « Toutes les roches schisteuses cristallines ne sont que des roches arénacées ou d'agrégation mécanique, postérieurement modifiées

par les agents ignés » (1836, p. 310). Ces agents ignés sont, selon lui, la chaleur centrale qui détermine une augmentation de la température grâce aux recouvrements sédimentaires successifs qui se sont accumulés, échauffement qui a pu, non seulement modifier complètement les sédiments, mais même les faire passer à l'état de fusion et « changer ainsi des roches stratifiées d'origine neptunienne en des roches ignées et massives » (1837, p. 307). Et aussi : « Certaines variétés de granite, les pegmatites, les protogines, les euphotides, les diorites, les amphibolites et d'autres variétés de roches dites ignées, peuvent n'être que le résultat de ces modifications extrêmes » (1837). « Ce sont non des masses plutoniques d'éruption, mais bien des roches métamorphiques par voie de cristallisation » (1844, pp. 825-844).

Virlet d'Aoust précisera sa conception à la suite des travaux de Scheerer (1847) qui, rejetant la nature purement ignée (au sens littéral) du granite, définit le rôle que l'eau a pu y jouer en abaissant considérablement la température de cristallisation, déterminant ainsi « la fusion ignéo-aqueuse du granite ». Acceptant ce rôle de l'eau à des températures relativement basses, Virlet d'Aoust voit l'origine de ce constituant dans les sédiments eux-mêmes : « Sa conversion de l'état de simple mélange à celui de composition est facile à concevoir ; elle s'opérait en même temps que les autres substances se combinaient entre elles et passaient probablement aussi de l'état de mélange à celui de combinaison chimique. » Virlet d'Aoust (1847) en arrive ainsi au concept de « granitification » : « Le granite serait le résultat d'une sur-modification ou d'un métamorphisme plus avancé de la bande gneissique dont il forme le prolongement. » « La transmutation des roches sédimentaires en granite, ou leur *granitification* (en italique par l'auteur), n'est donc pas plus difficile à admettre que leur changement en gneiss ; il suffit seulement de supposer ou que l'action métamorphisante en gneiss a été plus directe et plus intense, ou qu'elle a été plus prolongée. » Ce sont les « granites métamorphiques ». L'action métamorphique dont ils dérivent c'est celle du « métamorphisme normal » que Virlet d'Aoust évoque comme suit : « Le métamorphisme normal, ainsi étendu à toutes les roches primitives, n'est que le corollaire de la théorie de la chaleur centrale et de la fluidité originelle du globe » (1847).

Delesse (1861) généralisera la capacité des roches métamorphiques de passer à des « roches plutoniques les mieux caractérisées ». Le gneiss passe au granite et le schiste à hornblende à la diorite. « Les roches plutoniques se sont donc formées aux dépens de roches métamorphiques ; elles représentent le terme extrême du métamorphisme général ; elles sont l'effet et non pas la cause du métamorphisme. »

Virlet d'Aoust introduit aussi dans l'action métamorphisante à l'échelle régionale, la notion d'apport qu'il voit sous la forme d'injections de filons de quartz disséminés en de multiples fissures (1844, pp. 825-844). Ainsi naît la notion de « roches d'imbibition », résultat de la « pénétration de quelques roches schisteuses par des matières serpentineuses et feldspathiques, qui, en surgissant à travers leur masse, les ont pénétrées assez complètement pour leur faire perdre tout à fait leur structure primitive et leur communiquer leurs caractères propres ». Les roches d'imbibition se différencient donc des roches métamorphiques par simple injection ou par recristallisation. Par ce processus il a pu se produire une simple « assimilation mécanique » et aussi « une véritable assimilation chimique des éléments de la roche par fusion de celle-ci » (1844, p. 846). Et plus loin « La fusion n'a pas toujours eu lieu, la texture feuilletée originelle peut être reconnue, et on observe le passage insensible de la roche schisteuse à la roche massive, résultat de la pénét-

tration complète de la première » (1844, p. 847). On reconnaît ici toutes les formes sous lesquelles nous acceptons aujourd'hui la réalité de l'apport, depuis la veine bien individualisée jusqu'à son intime distribution dans le substrat originel.

Il est certain que les exemples, d'ailleurs peu décrits, proposés par Virlet d'Aoust à l'appui de sa théorie, ne sont pas convaincants ; la conclusion qu'il en tire n'est toutefois avancée qu'à titre d'hypothèse. Aujourd'hui ils s'interpréteraient d'une façon inverse, les soi-disant apports étant plutôt des exsudats au sein de roches massives schistifiées. Mais l'idée de la contamination est née ; elle se retrouvera bientôt dûment explicitée et invoquée comme une condition du métamorphisme régional des domaines cristallins.

Comme on le voit cette première phase du développement de nos connaissances sur les domaines cristallins porte sur la réalité lithologique originelle des terrains dits primitifs ; elle s'identifie avec le problème du métamorphisme régional dont ils nous donnent le modèle. Sa méthodologie porte la marque de l'intuition guidée par la logique des faits reconnus par Hutton. L'accent est mis sur la conception d'une genèse par voie solide des associations minérales propres aux roches plutoniques, voire même leur fusion, première expression d'un ultramétamorphisme qui n'a pas encore dit son nom. Le sentiment de l'époque se résume dans l'idée générale que Ch. Lyell exprime sur les causes du métamorphisme où il reconnaît « the influence of subterranean activity under great pressure and aided by thermal water or steam and other gases permeating the porous rocks and giving rise to various chemical compositions and new combinations, the whole of which action has been termed « plutonic » as expressing in one word all the modifying causes brought about into play at great depth, and under conditions never exemplified at the surface. To this Plutonic action the fusion of granite itself in the bowels of the earth, as well as the development of the metamorphic texture in sedimentary strata may be interpreted » (1875, p. 139).

Mais la réalité du métamorphisme ainsi acceptée et appliquée aux terrains cristallins, en particulier aux terrains « primitifs », n'avait cependant pas déraciné l'idée de leur haute ancienneté. Sans impliquer la contemporanéité rigide de leur cristallinité ainsi que l'exigeait la conception leibnitzienne, et tout en concevant que cet état puisse, suivant les régions, se développer à des temps différents, n'y aurait-il pas eu néanmoins, dans l'histoire de la Terre, une période générale qui eût été plus favorable au déroulement des processus métamorphiques ou à une élaboration plus complète, période qu'on serait tenté dès lors de placer très tôt dans l'histoire de la Terre.

C'est l'opinion de Virlet d'Aoust dont nous complétons une citation déjà rapportée : « Le métamorphisme normal, ainsi étendu à toutes les roches dites primitives, n'est d'ailleurs que le corollaire de la théorie de la chaleur centrale et de la fluidité originelle du globe ; c'est la conséquence des nombreux phénomènes chaotiques qui ont dû signaler le refroidissement de la première enveloppe solide et le dépôt des premiers sédiments ; ... il y a eu sur toute la surface du globe, pendant les premières périodes géologiques de nombreux flux et reflux de chaleur. C'est à ces retours fréquents de la chaleur et à ces effluves centrales qu'il faut principalement attribuer le métamorphisme normal qui a dû nécessairement s'étendre à toutes les masses primitives tant plutoniques que neptuniennes » (1847).

La notion de terrains primitifs, même avec la nouvelle génération de géologues, ne disparaîtra pas facilement, ou prendra des formes plus plausibles. Ch. Lory, qui a beaucoup parcouru les Alpes occidentales, l'accepte encore pour tous les

ensembles anté-houillers des Alpes en général, en particulier ceux des massifs externes, selon l'appellation actuelle des géologues alpins. Il dit à leur sujet : « Ces données ne font que rendre de moins en moins probables les idées théoriques sur l'origine des schistes cristallins par métamorphisme de sédiments plus ou moins anciens » (1881, p. 653).

La même question se posera sous des formes diverses à toutes les générations de géologues. Certes elle ne concernera pas tous les domaines cristallins. On sait déjà, grâce aux travaux de Reusch (1882) sur les Calédonides de Norvège, que des schistes cristallins de la région de Bergen renferment des fossiles ordoviciens. Charles Lory de son côté avait très bien reconnu dans des schistes cristallins des Alpes occidentales, un Trias métamorphique, comme plus tard la découverte au sud du massif du Gotthard d'abondantes gryphées dans des biotitoschistes à zoïsite, a permis de reconnaître un substrat jurassique. Mais sous eux, comme partout ailleurs sous les terrains fossilifères, on finit par trouver la « Grundgebirge », le « basement complex », termes qui apparaissent dans la littérature allemande ou anglo-saxonne pour désigner (Rosenbusch, 1889) ces complexes cristallins dont l'épaisseur échappe à toute évaluation et qui apparaissent comme le soubassement des formations fossilifères, bien qu'il ne faille pas les rapporter nécessairement à la période azoïque, les fossiles ayant pu disparaître par voie métamorphique. Becke dira, 20 ans plus tard : « Typisches Grundgebirge, d.h. krystalline Schiefer die man für älter hält als die ältesten bekannten versteinierungsführenden Formationen » (1910).

Quoi qu'il en soit de l'âge, d'ailleurs variable, de ces socles cristallins, ils constituent, dans l'écorce terrestre, la première unité continue à partir de la surface. Ainsi s'exprime Rosenbusch : « Wenige Sätze in der allgemeinen Geologie dürften so allgemeiner Zustimmung sicher sein, wie der, daß wir an jedem Orte bei hinreichend tiefem Eindringen in die feste Rinde unserer Erde die krystallinen Schiefer des Grundgebirges und unter dieses Nichts anderes Festes entgegen würden. Dieses allgemein Vorhandensein des Grundgebirges in den tiefsten Theilen der festen Erdrinde wollen wir kurz dessen Übiquität nennen » (1889, p. 88).

3. LA PHÉNOMÉNOLOGIE GÉOLOGIQUE ET LE MÉTAMORPHISME RÉGIONAL

(1870-1950)

Le dernier quart du XIX^e siècle voit s'implanter en géologie une méthodologie nouvelle où l'analyse des faits concrets du terrain introduit une phénoménologie causale, reliant l'effet pétrologique à l'agent géologique. Ainsi Lossen et Rosenbusch, en Allemagne, avaient-ils établi la nature du métamorphisme de contact dans sa relation avec les diabases et le granite.

Deux formules phénoménologiques vont tenter de résoudre le problème lithologique que posent les schistes cristallins dans les aspects caractéristiques qu'ils peuvent revêtir à l'échelle régionale : la schistosité cristalline, et la grande extension des gneiss granitiques. Schématisées sous les concepts de dynamométamorphisme et de granitisation, opposées l'une à l'autre par leurs partisans parfois jusqu'à leur négation ou leur exclusion mutuelle, elles apparaîtront finalement comme compatibles dans le cadre d'une évolution, qui est celle du développement tecto-

génique dans le temps et l'espace des segments cristallins. Dans cette opération de synthèse, la conception d'une zonation du métamorphisme suivant le plan proposé par Becke ou Grubenmann-Niggli a projeté une lumière bénéfique sur la construction des domaines cristallins.

La schistosité cristalline des schistes cristallins, Ch. Lory l'avait trouvée non seulement dans le socle cristallin des Alpes occidentales antérieur au Houiller, mais également dans les schistes lustrés du Trias supérieur qui lui semblaient apporter la solution de cette texture (1881, p. 657) : « Cette texture cristalline est uniforme, en rapport intime avec la stratification, ... ; elle est indépendante des actions mécaniques, des pressions ou des glissements que les couches ont dû subir... ; elle est la même dans les parties restées à peu près horizontales et dans celles qui sont fortement redressées ou plissées. Il est donc bien évident que c'est un métamorphisme uniforme, régional, lié à la nature même du dépôt ; et ce qui a eu lieu pour ce Trias alpin, à une époque géologique relativement récente, indique nettement qu'il en a été de même à une époque plus reculée pour les schistes cristallins sur lesquels ils reposent en stratification concordante. » Lory insiste sur le parallélisme, dans les schistes cristallins, de la texture feuilleté et de la stratification, ce qui est le cas « notamment lorsque la stratification est à peu près horizontale, ce qui arrive sur de grandes étendues... Il ne peut être ici question ni de clivage ardoisier, ni de cristallisations sous l'influence d'actions mécaniques locales. C'est la cristallinité *générale, universelle et originelle du terrain primitif* (souligné par l'auteur), antérieur à toutes les formations sédimentaires proprement dites. » C'est le rejet du dynamométamorphisme.

Le parallélisme de la schistosité cristalline avec la stratification, problème qui continue à étonner et à capter l'attention des géologues d'aujourd'hui, Lory trouve sa solution dans les schistes lustrés triasiques, où de nombreuses intercalations conglomératiques renferment des galets, eux-mêmes constitués de schistes lustrés qui selon lui ne peuvent provenir que des assises triasiques inférieures à ces conglomérats. Il conclut : « La cristallinité ou le feuilletage des roches du Trias, dans cette région, sont contemporains du dépôt même de ce terrain et indépendants de toutes les dislocations, pressions, etc, qu'il a pu subir ultérieurement » (p. 658).

Reprenant plus tard l'étude du Trias cristallin dans la Maurienne et le Briançonnais, Ch. Lory souligne encore que « le feuilletage tient à la stratification du grès triasique et n'est pas un effet d'actions mécaniques ultérieures » (1886). Puis constatant que l'augmentation de puissance de ce terrain correspond constamment, pour chacune de ses assises, à une texture de plus en plus cristalline, Lory conclut : « On est ainsi conduit à admettre que la nature et les conditions physiques des sédiments, dans les zones inférieures des Alpes occidentales, étaient éminemment favorables à la formation des minéraux cristallisés... Ces cristallisations datent de la période même du Trias et non de phénomènes métamorphiques plus récents ; elles sont indépendantes des plissements ou des dislocations que les couches peuvent avoir subis ; mais elles sont constamment en rapport avec les mouvements d'affaissement lents et continus, qui ont déterminé le développement extraordinaire en épaisseur du Trias dans certaines zones alpines » (1886, p. 45).

On serait curieux aujourd'hui de revoir, de vérifier et d'interpréter à la lueur des connaissances actuelles sur la tectonique alpine l'observation si précise de Lory concernant la constitution et l'attribution stratigraphique des galets cristallins des conglomérats triasiques ; moyennant cette réserve, la conclusion de Lory a des

accents que beaucoup de géologues modernes appuieraient ; elle annonce la thèse du métamorphisme géosynclinal qui, en France, prendra bientôt naissance.

Rosenbusch certainement en a hâté la maturation par ses recherches sur le substrat original des schistes cristallins de la Grundgebirge à laquelle ses travaux sur le métamorphisme de contact thermique l'avaient bien préparé. Outre les masses granitiques, syénitiques et dioritiques schistifiées en orthogneiss par l'action dynamométamorphique, Rosenbusch reconnaît, dans les socles cristallins, des séries détritiques, calcaro-marneuses, magnésiennes, etc. avec leurs intercalations de roches éruptives porphyriques, volcaniques et tuffiques ; il exprime comme suit sa conclusion : « Denken wir uns daher das Grundgebirge einen Augenblick seines schieferiges Gefüge entkleidet und rekonstruieren wir aus den heutigen metamorphen Facies den ursprünglichen Bestand, dann haben wir — von den ältesten Erstarrungskruste abgesehen — das Bild einer normalen geologischen Formationsreihe. » Et puisque selon lui la texture schisteuse parallèle des matériaux est la marque de la déformation orogénique, il fait dépendre la Grundgebirge « von der Maß der an einem bestimmten Punkte der Erde wirkende gebirgsbildenden Kräfte, von der Belastung der sich faltenden Formationen und von der Epoche des Eintritts und Dauer der orogenetischen Vorgänge » (1889, p. 97).

Ainsi s'opposent sur la signification à accorder à la schistosité cristalline, parallèle à la stratification, les idées de Rosenbusch et de Lory, lequel ne reconnaissait, comme liée au plissement, que la seule schistosité transversale des phyllades ardoisiers.

Les recherches de l'école française sur la genèse des gneiss granitiques vont apporter sur la relation gneiss-granite des vues qui prendront toute leur ampleur dans le concept de migmatisation qu'introduira Sederholm. Les vérités qui s'en dégagent illustrent, au-delà des oppositions de faits et de théorie qui en émane, la qualité dialectique de la Nature.

Michel-Lévy s'est attaché à étudier la relation granite-gneiss dans des conditions de gisement bathymétriques relativement peu profondes, celles de l'épizone, qui lui permettaient de la saisir aisément, et sans conteste, dans un espace restreint. Pour lui (1881), l'intrusion granitique est le phénomène majeur et causal d'où dérive la formation des gneiss granitiques. Sa théorie s'appuie sur les transformations subies par les schistes argileux de Saint-Léon (Allier, France) au contact d'un granite porphyroïde autour duquel s'est développée une couronne de schistes micacés biotitiques, où la biotite se dispose en feuillets parallèles à la stratification. Dans la proximité immédiate du granite, le biotitoschiste est injecté par des apports granitiques consistant en feldspaths et quartz, à structure grenue ; il en résulte des schistes micacés feldspathiques, où des lits noirs micacés alternent avec des veines feldspathiques : « Le métamorphisme subi par les schistes micacés, suivi d'une injection des éléments de seconde consolidation nous amène à un type de roche dont la comparaison avec le gneiss s'impose forcément à l'esprit » (1881, p. 189). C'est cette action métamorphique en deux temps qu'exercent, selon Michel-Lévy, les granites en couches intercalées dans les terrains primitifs (1881, p. 190) : « L'action du granite ou de la granulite sur les gneiss a amené la production de gneiss granitiques ou granulitiques ; cette action a dû et a pu se produire à des époques très différentes, et en tout cas bien postérieures au dépôt primitif de la roche gneissique tout comme à Saint-Léon l'action similaire du granite sur les schistes micacés est bien postérieure à leur première formation. » Et plus loin : « Il y a réellement injection d'une roche éruptive dans un schiste déjà métamorphique,

et nous pensons que cette double transformation peut être fructueusement comparée, par la structure complexe de la roche à laquelle elle donne naissance, au mode de production encore si obscur des roches gneissiques. »

Cette formation des gneiss par injection, telle qu'il la connaît en milieu épizonal, dans les schistes sérécito-chloriteux de Saint-Léon au contact d'un granite intrusif, Michel-Lévy l'applique aux terrains primitifs où il considère comme stratigraphique la succession des faciès lithologiques : « Les gneiss acides et de plus en plus cristallins dominant à la base ; puis ils admettent des intercalations fréquentes de micaschistes et de leptynites auxquels s'associent de nombreux délits d'amphibolites et de cipolins. Au-dessus de ce dernier ensemble se développent des micaschistes chloriteux et séréciteux alternant parfois avec de nouvelles strates amphiboliques. Ce dernier étage est surmonté par une série comprenant aussi des schistes amphiboliques et pyroxéniques (cornes vertes), mais en outre présentant les premières couches franchement détritiques. » « A tous les niveaux, il y a passage graduel d'un étage au suivant. Les premiers dépôts détritiques alternent avec des strates encore puissantes de schistes séréciteux et chloriteux entièrement cristallins, et en plein Cambrien, on voit se développer, par intrusion du granite ou de la granulite, de larges bandes de schistes feldspathisés qu'un examen microscopique minutieux permet à peine de distinguer des gneiss plus anciens » (1887, p. 104).

En résumé : « Le terrain primitif sert de soubassement aux premières couches détritiques franches ; sa schistosité est généralement parallèle ⁽¹⁾ à leurs strates, auxquelles il passe par gradation insensible. Il présente une certaine homogénéité générale, et ses accidents de composition sont toujours parallèles à la direction de la schistosité. »

Si l'on ne peut généraliser la première partie de la proposition de Michel-Lévy, bien que la succession qu'il présente soit bien celle qu'on trouve en France, par exemple dans le Massif central et en Bretagne, par contre on ne peut que souscrire entièrement à la relation qu'il énonce entre schistosité et stratification, ce que Lory constatait aussi dans les Alpes. Toutefois Michel-Lévy n'accepte pas de voir dans les cristallisations des schistes cristallins l'action *immédiate* (en italique par l'auteur) admise par Lory.

Il est clair que la façon dont Michel-Lévy évoque la série cristallophyllienne des terrains primitifs, allant des gneiss acides aux schistes sérécito-chloriteux, lui permet de la rapprocher de la série cristalline qui s'est développée autour du granite dans les schistes sérécito-chloriteux de Saint-Léon, bien qu'ici son épaisseur ne soit que de quelque 800 mètres, et d'établir par là une comparaison entre les gneiss d'injection de cette couronne et les gneiss acides formant la partie inférieure des terrains primitifs. Cette comparaison se complète d'ailleurs par l'identité des phénomènes structuraux qu'il reconnaît : « La structure des gneiss présente une série de poussées cristallines successives accompagnées de phénomènes mécaniques de cimentation des éléments disloqués. » Michel-Lévy y voit « les traces multiples d'une série d'actions métamorphiques sans apport, puis d'injections avec apports d'éléments étrangers, sans d'ailleurs nier l'intervention des actions secondaires d'origine mécanique ». « Il y a eu production de feuillettes, de membranes cristallines formant le ciment des roches schisteuses ; puis dislocations successives

(1) Le texte original porte « favorable » au lieu de parallèle. Il s'agit certainement d'une faute typographique qui se laisse d'ailleurs aisément corriger, étant donné que cette relation est déjà explicitée plus haut dans le texte par Michel-Lévy.

par injections généralement parallèles à la schistosité » (1887, p. 106). Bref pour Michel-Lévy la « granitisation » et la « granulitisation » peuvent être conçues comme un « métamorphisme de contact et de pénétration » dans la « zone d'influence que l'on doit attribuer aux massifs éruptifs dont les injections mécaniques se ramifient à si grande distance » (1887 ; p. 113). « Le terrain, dit primitif, est un produit complexe de roches éruptives postérieures aux gneiss et de terrains réellement détritiques et profondément métamorphisés » (1887, p. 111).

Les modalités du régime d'injections associé au granite et les processus de granitisation des sédiments ont fait l'objet de nombreux travaux à la fin du siècle dernier et dans la première moitié de ce siècle (Lacroix, 1898-1900 ; Barrois, 1910 ; Gutzwiller, 1912 ; Goldschmidt, 1920 ; Raguin, 1946). La plupart d'entre eux se rapportent à des manifestations qui ont leur siège dans les segments épizonaux, où la manifestation granitique est déterminante de l'action périphérique. L'exploitation de leurs conclusions, et plus particulièrement leur application aux domaines cristallins soulève la question du bien-fondé, non de leur généralisation, mais de l'extrapolation de résultats obtenus dans des milieux déterminés, à d'autres milieux différemment conditionnés où, en particulier, les granites sont concordants. Déjà Lory avait, dans une question du même ordre, opposé la schistosité cristalline des schistes cristallins à la schistosité des phyllades ardoisiers, à la suite de quoi il acceptait pour celle-ci et rejetait pour celle-là l'action du plissement. Il n'est donc pas étonnant que l'analyse intrinsèque des domaines cristallins ait conduit à des conceptions d'un autre type, et même radicalement opposées, dans la liaison granite-gneiss.

Pour Hölmquist (1921), Högbohm et plus tard Backlund (1936), dont l'expérience relève des domaines cristallins de la Suède, les veines granitiques de la texture cristallophyllienne sont, non pas des injections étrangères au milieu, introduites dans la texture, mais des exsudats quartzo-feldspathiques provenant de la roche même qui les enserre. Ces « vénites syngénétiques », apparues au cours de la déformation régionale, seront considérées par Stilwell comme un cas particulier de la « différenciation métamorphique », principe valable pour tous les domaines cristallins, depuis ceux de la mésozone supérieure (voire l'épizone inférieure) jusqu'à ceux de l'ultramétamorphisme. La genèse des gneiss n'est pas ici sous la dépendance d'une masse granitique préalable, c'est une manifestation régionale, intrinsèque au matériau, liée à la température régionale au moment de la déformation.

C'est semblablement par la considération directe des domaines cristallins dans les Alpes, et avant tout dans les Alpes occidentales, que P. Termier aborde le problème du métamorphisme régional. Ses déductions datent de cet état de la connaissance de la chaîne où l'on rangeait dans le Permo-Houiller les schistes cristallins du Grand Paradis, du Cervin, du Mont-Rose, du Simplon, du Tessin et de l'Antigorio, qui en sont aujourd'hui dissociés et rangés dans le socle sous-jacent ; c'est donc à ce dernier que sa conception s'attache en réalité. De toute façon elle répond à des préoccupations encore dominantes aujourd'hui sur la nature originelle des séries cristallophylliennes, ainsi que Termier désigne ces ensembles lithologiques qui vont des roches les plus cristallines, gneiss, micaschistes, amphibolites, etc. jusqu'aux muscovito-schistes et chloritoschistes.

Termier exclut radicalement des domaines cristallins l'action du dynamométamorphisme dont il nie d'ailleurs l'existence ; il situe le métamorphisme régional dans le cadre statique de la subsidence géosynclinale, bien avant l'intervention du plissement (1903) : « Le métamorphisme des schistes lustrés est donc bien antérieur

au morcellement du géosynclinal alpin, morcellement précurseur des grands mouvements orogéniques... Le métamorphisme régional était non seulement commencé, mais achevé. Après cela le plissement est venu. » C'est ce qu'avait déjà conclu Ch. Lory. La position de ces gneiss, considérés comme appartenant au géosynclinal alpin, dans le centre même de la chaîne, amenait ensuite Termier à lier le métamorphisme régional au cadre géosynclinal : « Quelle que soit la cause du métamorphisme régional, cette cause semble n'agir qu'au sein des géosynclinaux où s'élaborent les chaînes ; elle semble ne transformer que les matériaux qui sont dans une condition géosynclinale ; elle ne réalise la plénitude de ses effets que dans la région centrale de la grande fosse sédimentaire. »

P. Termier en arrive ainsi à la thèse qui l'oppose à Michel-Lévy : « Le métamorphisme n'a point pour cause l'intrusion et la mise en place de roches massives », non pas qu'il rejette, dans le cas des schistes séricito-chloriteux de Saint-Léon, la genèse des micaschistes et des gneiss à partir du granite, mais parce que dans les domaines cristallins « la venue du granite n'a été qu'un épisode du métamorphisme régional, et cet épisode semble avoir été le dernier de tous ». Et de conclure : « La montée des roches massives n'a pas fait le métamorphisme régional ; elle n'a été qu'un épisode. La cristallinité générale des assises et la mise en place des amas semblent liées entre elles, non pas comme un effet à sa cause, mais comme deux effets d'une même cause. »

Enfin la constitution des schistes cristallins supposés dérivés des sédiments du Houiller, impliquait la nécessité d'apports « puisqu'aucun terrain sédimentaire ne contient ni autant d'alcalis, ni autant de magnésie qu'un terrain cristallophyllien ». Cet apport, P. Termier le recherche dans « les colonnes filtrantes venues d'en bas, et qui montent comme d'une chaudière, du fond de la région centrale du géosynclinal, » et dont la progression et l'étalement se fait « en taches d'huile » selon le degré de porosité du sédiment. Ces colonnes filtrantes consistent dans « des vapeurs juvéniles montant de l'intérieur, apportant avec divers gaz des silicates et des borates alcalins » (1910). « Sur le parcours de ces colonnes chaudes les températures des roches sédimentaires ou autres, qui sont en condition géosynclinale, s'exagèrent rapidement. Des échanges chimiques s'établissent... La préparation des *mélanges à point de fusion minimum* (en italique par l'auteur), 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 les colonnes filtrantes. » Et enfin : « Tout en bas, c'est sur un immense batholite fondu que l'édifice repose. » Enfin la schistosité cristalline, dernier point qu'il a laissé longtemps sans solution, Termier l'attribue au caractère semi-fluide que peuvent prendre les matériaux (1910).

La thèse de Termier liant le métamorphisme régional à des apports venus de l'intérieur dans le cadre purement statique du milieu géosynclinal, dans un stade antérieur au plissement, recevra l'appui de nombreux géologues, et en particulier de E. Haug (1911). Elle sera illustrée plus tard par les recherches géochimiques de Lapadu-Hargues (1945, 1949), qui, partant de la composition chimique représentative des principaux termes de la série cristallophyllienne, explicitera la variation de leur chimisme par des apports différenciés de K et Na, compensés par des éliminations, des diffusions et des fixations différentielles de Ca, Fe, Mg.

La genèse des gneiss des domaines cristallins, telle que la conçoit Sederholm dans le cadre des Svécofennides de la Finlande, est très proche de la conception de Michel-Lévy qui s'en trouve élargie par la notion d'anatexie donnant au couple

gneiss-granite la valeur d'une interaction continue. Elle précise, dans le cadre des profondeurs géologiques, la nature de l'apport un peu mystérieux des colonnes filtrantes de Termier. Cet apport nécessaire à la transformation chimique des roches supracrustales, tant sédimentaires que basaltiques, c'est l'ichor bien défini par des veines aplitiques et granitiques souvent bien individualisées, dont la provenance est connue : « Every aplitic or granitic vein is genetically connected with some special granite outcropping in the same region and it is in most cases possible to determine with certainty to which of the different granites it belongs. » Et concluant : « The main part of the metamorphism has taken place in obvious connection with the eruption of granites ; it can be defined as a regional contact metamorphism. » Ce métamorphisme de contact s'exprime en dehors de toute action dynamique au sens de Rosenbusch : « A purely mechanical s.c. dynamo-metamorphism has in most cases been of very little importance » (1923, p. 149).

La pénétration de l'ichor à toutes les échelles engendre des roches hybrides, les migmatites, terme qui « réellement caractérise leur apparence et leur origine : They look like mixed rocks and they originated by the mixture of older rocks and a later erupted granitic magma » (1926, p. 136). L'accentuation du phénomène, jointe à la désagrégation mécanique de la roche envahie conduit, par le processus en tache d'huile, à la granitisation des roches encaissantes, à la rénovation des granites anciens, bref à l'anatexie et à la palingenèse. Le cadre géologique de cette manifestation de grande envergure est précisé dans cette conclusion, avancée par Sederholm à propos des Svécofennides de l'ouest de la Finlande : « The whole area has been in a *melting condition* (en italique par l'auteur) when it was once sunk to so great a depth, that it approached the bottomless magmaocean or tectosphere of the earth » (1907, p. 101). Cette phase profonde se déroule dans une géométrie de terrains redressés et disloqués que Wegmann (1930) a évoquée dans la forme élégante et combien pertinente d'un diapirisme de grand style. Cependant le cadre géologique des manifestations migmatitiques de la Finlande n'est nullement celui des gneiss granitiques de Termier ; c'est une phase tardive dans le développement tectonique de la région.

En fait, les thèses qui s'affrontent sur les causes du métamorphisme régional des terrains cristallins font ressortir clairement que l'aspect qu'elles expriment est étroitement lié et restreint aux domaines concernés, si différents entre eux. A la thèse d'un métamorphisme granitique généralisé, porteur de chaleur et d'apports acides, tel que le conçoit Sederholm, s'oppose celle de Becke dont l'expérience repose sur le cristallin des Alpes et du massif de Bohême. Analysant les multiples manifestations dont celui-ci a été le siège, intrusions, injections, dynamométamorphisme, et où on ne reconnaît pas d'indices d'une fusion régionale, Becke conclut à la diversité des causes (1910) : « Keine der angeführten Vorstellungen vermag für sich *allein* (en italique par l'auteur) eine befriedigende Erklärung der vorliegenden Metamorphose zu bieten, obwohl jede für einen Teil der Erscheinungen notwendig zu sein scheint » (p. 621). Il reconnaît aussi la nécessité d'un métamorphisme dû à la charge statique que lui suggère le parallélisme de la texture cristalline et de la stratification : « Ohne Mitwirkung von Pressung wäre aber die Parallelstruktur kaum verständlich. » Mais l'énigme reste pour lui l'horizontalité de ces textures sur de grandes étendues : « Schwierig ist es nur die auf ausgedehnte Strecken horizontale oder schwebende Schieferung mit der üblichen Vorstellung eines horizontalen Tangentialdruckes in der Erdrinde in Einklang zu bringen. »

Au-delà des manifestations multiples et diverses de grande extension qui façonnent la lithologie des domaines cristallins, dynamométamorphisme, migmatitisation, anatexie, palingénèse, et qui lui confèrent ces transformations complexes, souvent superposées caractérisant le métamorphisme régional, émerge, comme un aspect qui leur échappe, ce fait capital du parallélisme de la schistosité cristalline et de la stratification, particulièrement frappant, là où ces textures sont horizontales sur de vastes étendues. Il est bien évident que le diapirisme par la déformation qu'il imprime aux textures, ne peut être que postérieur à cette géométrie horizontale, et par conséquent au développement de la schistosité cristalline qui lui est associée. On en vient ainsi à la question fondamentale qui se pose dans tous les domaines cristallins, celle de l'acquisition *hâtive* d'une schistosité cristalline parallèle à la stratification, dans des conditions où celle-ci est horizontale. Elle entraîne spontanément celle de la genèse de l'association minéralogique qui lui est combinée.

Quand on peut remonter à cette dernière en dépit de l'évolution polymétamorphique que la région a généralement subie, on constate qu'elle traduit une élévation déjà notable de la température régionale, dont la cause est à rechercher. Faut-il y voir l'influence du flux thermique dont l'effet est de faire monter les isogéothermes au sein d'une accumulation de matériaux devenant de plus en plus épaisse ? Serait-ce alors ce régime qui lie de façon biunivoque la température à la profondeur et inspire le principe de la zonation métamorphique proposée par Becke et complétée par Grunbenmann-Niggli, pour autant qu'il concerne le degré de métamorphisme à caractère progressif ? On peut, dans cet esprit, concevoir des domaines épizonaux, mésozonaux et catazonaux. Faut-il au contraire attribuer l'élévation de la température à l'action de colonnes filtrantes, précoces, comme l'accepte P. Termier, et dont les apports à la fois de chaleur et de matière détermineraient simultanément l'échauffement et la granitisation, plus accusée dans les zones d'afflux maximum ? Le degré de métamorphisme, dans ce cas, ne serait donc plus, même dans une région déterminée, lié à la profondeur ; bien plus, la propagation des colonnes filtrantes se faisant latéralement à la faveur de niveaux plus favorables, il pourrait en résulter une inversion des surfaces isothermiques. C'est l'opinion de H. H. Read (1939), qui, mettant en doute la liaison du degré métamorphique avec la profondeur, invoque l'action des migmatites : « I... see with them (à savoir les migmatites) a direct causal relation between the highest grade of regional metamorphism and migmatitisation » ; et plus loin, parlant des relations Na/K dans la gamme argile, schiste argileux et phyllite : « ... regional metamorphism as a whole is genetically related to « igneous » activity of some kind ». C'est dans ce même cadre d'idées qu'il voit la tourmalinisation des sédiments jusque dans les degrés de métamorphisme les moins élevés.

Durant la période que nous venons d'évoquer et qui a porté sur trois quarts de siècle, une large confrontation dialectique s'est attachée à analyser les réalités pétrologiques et les concepts géologiques associés, dans le cadre des rapports physiques et chimiques conditionnés par la nature. La théorie du métamorphisme en est sortie comme l'expression de ces rapports, et, par là, le code qui, appliqué aux ensembles lithologiques des domaines cristallins, a permis de dissocier et de définir les manifestations souvent superposées qui les ont façonnés. L'échelonnement dans le temps de ces événements rapportés chacun à leur cadre physique et aux volumes qui en ont été affectés, a ainsi apporté la formule de l'évolution générale de ces domaines.

Mais si, dans cette opération de reconstitution du passé, la réalité des tempéra-

tures relativement élevées par lesquelles le domaine cristallin est passé, n'est pas mise en question, il n'en est pas de même de la pression qui leur est associée ; celle-ci peut en effet, pour un phénomène thermique donné, varier dans de larges limites, qu'on invoque pour ce dernier soit une action batholitique présumée, soit des réactions exothermiques liées à des apports. Mais dans le cas des domaines cristallins anciens, rien n'exclut l'existence d'un flux thermique et d'un gradient de température anormalement élevés qui introduisent une relation $P-T$ d'un autre ordre de grandeur. Toute référence à la connaissance classique des segments orogéniques récents (phanérozoïques et algonkiens) à caractère épizonal devient dès lors sans portée.

C'est sur la réalité des pressions relativement élevées, et en définitive sur la bathymétrie des domaines cristallins, que s'ouvre une nouvelle phase dans leur connaissance. Les recherches qui s'y rapportent se développent sur deux plans indépendants : la genèse minérale par voie expérimentale, et l'analyse structurale.

Si la notion de température élevée n'a jamais, dans sa signification géologique, prêté à confusion, il n'en est point de même de celle de pression, ou, autre forme d'expression, de profondeur. Celle-ci, pour les géologues de l'époque de Ch. Lyell, ne signifiait le plus souvent rien d'autre que la négation de la situation en surface ou proche de cette dernière. On retrouve ce sens dans le terme de *Tiefengestein* appliqué à la classe des roches éruptives grenues ou plutoniques. Or il y a, au sein même de cette classe, sous le rapport de la profondeur, des différences incomparablement plus grandes entre les roches des domaines catazonaux et celles des domaines épizonaux, qu'entre ces dernières et les roches volcaniques d'épanchement. Telle est donc l'ambiguïté inhérente au terme de profondeur en géologie.

La réalité des hautes pressions associées aux hautes températures dans le cadre de l'écorce terrestre a été démontrée clairement par les synthèses minérales déterminant les conditions physiques de la stabilité de minéraux symptomatiques ou d'associations minéralogiques rencontrés dans les roches métamorphiques. Qu'il me suffise ici de les replacer dans le cadre géologique, en évoquant les lignées de faciès minéraux, telles que les ont proposées E. den Tex (1965) et Anna Hietanen (1967), dont l'importance pour l'analyse des domaines cristallins est manifeste.

Certes la transposition de la valeur expérimentale de la pression dans la nature géologique, peut prêter à discussion. Elle n'est pas à confondre sans réserve avec la charge due au poids des matériaux surincombants ; dans un volume géologique, il se peut que la pression interne en certains endroits puisse lui être supérieure, voire même de beaucoup, en raison soit de la répartition inégale des forces au sein d'un ensemble lithologiquement hétérogène, soit de pressions dues à la concentration des éléments volatiles. Mais il est certain que dans les domaines très plastiques, cas des domaines profonds, la répartition de la charge statique doit être à peu près uniforme, laissant peu de place au maintien de surpressions locales dues à l'hétérogénéité des matériaux ; parallèlement ces derniers se sont largement appauvris en éléments volatiles (H_2O , CO_2) au cours de l'évolution métamorphique progressive, de sorte que les surpressions de cet ordre sont très peu probables ; on ne pourrait de toute façon les invoquer comme un fait général. On est donc ramené à accepter dans les domaines cristallins profonds des pressions lithostatiques qui sont réellement de l'ordre des valeurs fournies par l'expérimentation.

On en vient ainsi à rechercher la matérialité géologique de cette charge lithostatique, comment elle a pu se monter à des valeurs qui, traduites en épaisseur, se chiffrent à 10, 20, voire 30 km, question déjà abordée par les travaux de pionniers

sur la structure géologique des domaines cristallins des Svécofennides finlandaises (Wegmann et Kranck, 1929, 1931) et du Groenland (Wegmann).

En fait pendant toute cette période de recherches sur le métamorphisme, les domaines cristallins avaient fait l'objet de peu d'études structurales d'ensemble. Celles-ci s'étaient par contre concentrées sur les domaines à la fois épizonaux et phanérozoïques qui, il faut le reconnaître, sont les plus propices et même les seuls à pouvoir apporter le concept de géosynclinal et le principe du développement orogénique par phases partielles, échelonnées dans l'espace et le temps, avec leurs corrélations sédimentologiques (normales, flyschiques et molassiques). Dans les Alpes elles-mêmes, les recherches structurales, poursuivies au début de ce siècle, n'ont pas, malgré toute l'attention qu'on leur portait, concerné les domaines cristallins dont la participation est cependant importante ; ils présentent en fait une trop grande complexité pour servir de modèle dans la recherche d'un développement autonome exempt de toute contrainte.

4. LES ÉTUDES STRUCTURALES (1950 À NOS JOURS)

Il faut en arriver à ces vingt-cinq dernières années pour qu'affleure à la conscience géologique la réalité du problème structural que pose la constitution des domaines cristallins, et que se dégage la phénoménologie liée au métamorphisme régional.

Le problème des structures des domaines cristallins est complexe ; il ne peut être saisi en une fois dans sa généralité. C'est dans leur forme typique qu'il me paraît nécessaire et utile de l'aborder pour en dégager les principes : à savoir ces domaines de grande extension, où l'état cristallophyllien des matériaux est la règle, sans variation sensible sur de grandes étendues. Plus complexes et d'ailleurs tout autres me paraissent ces domaines cristallins qui, sur 20 ou 30 km, passent latéralement de faciès de température élevée aux faciès épizonaux au sein desquels ils sont enclavés, montrant ainsi leur dépendance d'un segment épizonal. Les domaines cristallins des grands boucliers continentaux me paraissent les mieux appropriés à nous apporter les valeurs structurales fondamentales. Encore faut-il pour éviter toute ambiguïté qu'ils n'aient pas fait l'objet de remaniements à l'occasion de leur reprise dans une orogénèse ultérieure. C'est donc les segments monocycliques seuls qu'il importe de prendre en considération.

Aujourd'hui la démonstration est faite du caractère complexe de la déformation plastique qu'ont subie ces domaines. Mais en dépit de cette complexité dont nous essaierons d'explicitier les formes, il semble bien qu'on puisse partout distinguer, ou supputer, une déformation initiale fondamentale de grand style, qui consiste en une structure en plis couchés d'extension régionale, disposés en empilement. C'est la structure dite de type « pennin » (P. Michot, 1951), puisque telle est aussi la structure des Alpes pennines.

Problèmes de méthode

Il me paraît opportun, avant de procéder plus loin, de définir dans ses grandes lignes la méthode qui, sur le terrain, guide la recherche structurale et permet de découvrir les unités tectoniques majeures, en l'occurrence les plis couchés et leur plan axial. Elle repose sur la conception d'une liaison immédiate, dans la déformation plastique, entre une déformation majeure et les déformations mineures qui lui sont associées.

Une telle dépendance a été pour la première fois exprimée graphiquement par E. de Margerie et A. Heim (1888) dans leur essai de classification des déformations de l'écorce terrestre. Traitant des associations de plis, ces auteurs en ont présenté deux schémas, d'ailleurs complémentaires, dénommés « Structure en éventail com-

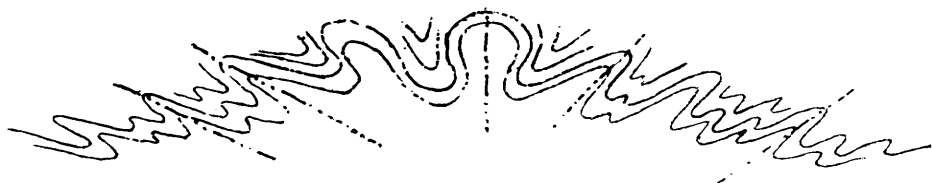


FIG. 1. — Structure en éventail composé.

posé [zusammengesetzte (aufrechte) Fächerstructur ; — composed fan-structure] (fig. 1) et « Structure en éventail composé renversé » (umgekehrte zusammengesetzte Fächerstructur ; — inverted intermont trough) (fig. 2) (p. 83) ; ce sont en fait les structures des anticlinorium et synclinorium de notre terminologie actuelle, dont

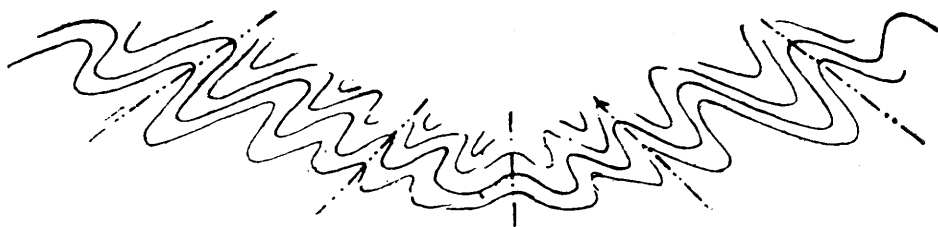


FIG. 2. — Structure en éventail composé renversé.

l'ampleur est de l'ordre de une ou plusieurs dizaines de kilomètres, dans le sens transversal. L'élément de référence choisi pour la figuration des plis est leur plan axial dont la succession, dans une coupe transversale, obéit à une disposition en éventail, symétrique par rapport à un plan majeur relatif à l'ensemble. Sans doute cette formule de plissement, conçue à l'époque du « double pli de Glaris » pourrait-elle être remise en question aujourd'hui.

Mais on doit à P. Fourmarier d'avoir apporté par ses études sur la tectonique de l'Ardenne, la preuve de cette réalité. Evoquant l'allure des plis de second ordre sur les flancs des synclinoriums, allure qu'il dénomme en escalier (déformation où le flanc principal est entrecoupé par un synclinal secondaire suivi d'un anticlinal qui ramène l'allure première) (1906, p. 56), il montre le déversement systématique de leur plan axial vers la partie centrale du synclinorium où les plans axiaux avoisinent la verticale. Cette tendance se conserve dans le sens longitudinal : « Chaque partie du pli de premier ordre a ainsi son *style tectonique* particulier » (1949, p. 509).

Aux échelles inférieures décamétriques, c'est-à-dire celles qui guident effectivement l'analyse structurale sur le terrain, ce type de déformation plastique demande une autre formulation d'ailleurs plus complète ; la notion de plan axial, qui est un concept idéalisé (plan bissecteur du dièdre formé par les flancs du pli) s'efface au profit de la déformation elle-même, plus significative que les éléments géométriques, plan axial et axe, qui la schématisent. J'en expliciterai le style dans le cas des plis couchés.

De nombreux géologues du cristallin, depuis Lory et Becke, ont mentionné l'allure, horizontale, subhorizontale à ondulante, sur de larges étendues, des textures sédimentaires et cristalloyphyllicennes des terrains cristallins ; cette allure calme a pu donner l'impression d'une tectonique sans déformation importante. Cependant quand on suit de telles allures sur le terrain, et pour autant que celui-ci soit bien découvert et observable suivant ses trois dimensions, on ne manque pas d'arriver dans des espaces où ces couches se montrent affectées par des plissements mineurs, de faible ampleur. C'est à partir de ceux-ci qu'on peut trouver la déformation majeure dont ils dépendent, et ce, dans le cadre de la loi pragmatique suivante. *Les plis mineurs associés à un même flanc principal d'un pli couché majeur satisfont à un style de déformation systématiquement le même, et qui est inverse de celui des plis mineurs de l'autre flanc principal.* Un pli couché montre donc par rapport à son plan axial, outre une symétrie stratigraphique, une symétrie de la déformation d'ordre secondaire.

Les plis en escalier, qui sont des déformations mineures, sont en réalité constitués chacun par la succession immédiate de deux petits plis simples dont les jeux s'inversent ; ils ont donc la forme générale d'un Z, normal ou renversé, dont la barre transversale peut varier d'obliquité. Ils peuvent avoir une forme aplatie ou très élancée ; leur ampleur peut varier, comme leur ouverture angulaire qui peut se resserrer jusqu'à donner au pli en échelon l'allure d'un double pli isoclinal couché dans le plan général de la texture litée dont il se différencie à peine : *sous cette forme isoclinale il est la figuration à petite échelle du pli couché principal dont il donne la géométrie spatiale.*

Les plis en escalier greffés sur le flanc principal d'un pli couché majeur répondent à un même style de la déformation plastique figurée par le même type de Z, de sorte qu'une succession de plis de ce genre conduit au déportement parallèle et toujours dans le même sens, des demi-branches horizontales du pli en escalier. C'est en cela que consiste la constance du style de la déformation plastique, dont le caractère systématique est indépendant de l'ampleur du pli en escalier. Par contre si on se réfère aux plans axiaux des plis en échelons qui se succèdent, on constate que leur disposition spatiale varie, tout au moins dans leur inclinaison, et ce, sans une quelconque coordination. Pour cette raison, ils ne sont pas utilisables dans la recherche structurale. De même les axes des plis relevant d'un même

ensemble subissent parfois dans un petit espace des variations notables dans leur orientation spatiale, de sorte que, considérés séparément, certains d'entre eux pourraient être dissociés des autres pour former un groupe considéré comme représentatif d'une déformation ultérieure surimposée. La consanguinité de tous ces axes est par contre démontrée sur le terrain par l'allure systématique de la déformation plastique dont ils sont un élément.

La forme ordinaire des plis en escalier est asymétrique ; elle consiste en deux longs flancs ayant la direction générale des couches, et un flanc court, transverse (la barre transverse du Z) dont l'effet se traduit dans le déplacement transversal du long flanc systématiquement de même sens pour tous les plis en escalier d'un même flanc principal du pli couché. D'où la règle qui permet de remonter à la déformation principale : *La succession formée par les deux longs flancs d'un pli en escalier séparés par un flanc court donne le sens où l'horizon lithologique considéré décrit sa charnière dans le plan axial principal vers lequel se fait le déplacement transversal causé par le flanc court* (fig. 3). Cette règle empirique a été déduite de la systématique de la déformation plastique mineure sur la base de plis majeurs directement observables.

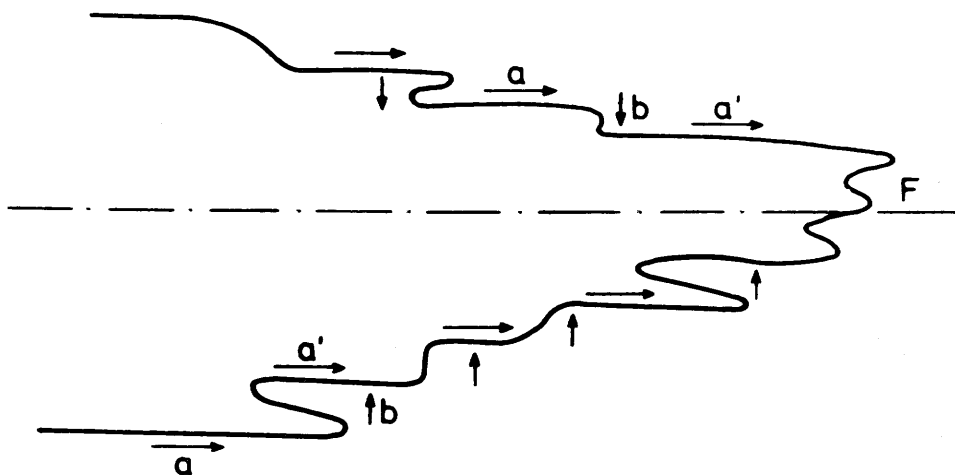


FIG. 3. — Schéma de la déformation plastique de second ordre associée à un pli couché principal. a, a' : longs flancs consécutifs d'un même pli secondaire, déplacés l'un par rapport à l'autre par l'intermédiaire du flanc court b. La charnière F du pli principal se trouve dans le sens aa' et ce pour le plan axial situé dans le sens b (sens de la flèche).

De plus, en faisant usage de la notion de surface-enveloppe (*Faltenspiegel* des auteurs allemands) relative à un ensemble de plis en escalier, il est possible d'apprécier qualitativement la plus ou moins grande proximité de la zone axiale du pli couché majeur : celle-ci est atteinte, là où cette surface-enveloppe est perpendiculaire aux plans axiaux des plis secondaires : une telle zone axiale est constituée par un empilement de plis perpendiculaire à leur plan axial.

L'analyse de la structure régionale par la méthode de la déformation plastique tient compte de toutes les données géométriques du terrain, même celles qu'il est impossible de mesurer ou que l'on a tendance à omettre ou à négliger parce que relatives à des formes ou à des espaces minimes ; tels sont les flancs courts des plis en escalier, tandis que seule l'allure des longs flancs fait l'objet de mesures en raison de leur régularité conforme à l'ensemble. Cette méthode fait enfin apparaître la polarité des couches ou, plus exactement, puisque l'ordre stratigraphique ascendant n'est généralement pas connu, elle permet de distinguer des ensembles régionaux, marqués par des polarités inverses, distinction capitale du point de vue tectonique qui échappe aux mesures planaires.

La structure des domaines cristallins

Appliquée directement sur le terrain, la méthode de l'analyse des déformations plastiques mineures a permis de résoudre la structure tectonique des grands ensembles cristallins, en particulier là où leur allure générale paraissait empreinte de la plus grande uniformité. Comme le souligne Wegmann : « Es ist nicht ratsam, die bauliche Unauflösbarkeit als charakteristisch für den Unterbau hinzustellen. »

Les domaines cristallins nous paraissent ainsi structurés suivant une superposition primaire de plis couchés de grand style. Cette structure d'accumulation tectonique semble ainsi liquider, tout au moins qualitativement, le problème des températures régionales relativement élevées, conséquence immédiate de la montée des isothermes dans une structure allant en s'épaississant. Elle définit le cadre changeant du métamorphisme régional qui, dans une première phase, est conditionné à la fois cinématiquement et bathymétriquement, et répond ensuite aux manifestations inhérentes aux nouvelles conditions bathymétriques, la migmatisation, l'anatexie et tout le développement diapirique, les plus évidentes d'entre elles.

La tectonique des domaines cristallins dépasse généralement en complexité la structure d'empilement primaire de plis couchés. De nouvelles phases déformatives apparaissent encore dans le cours du développement monocyclique du segment tectogénique ; elles se superposent aux lignes directrices premières souvent avec des directions croisées, et avec des ampleurs variables qui vont jusqu'au déclenchement de nouveaux plis couchés de grand style (P. Michot, 1956). Le stade final se traduit en structures généralement plus localisées, consistant en resserrements intenses, sous la forme de plis à plans axiaux verticaux, allant jusqu'à l'isoclinalité. C'est en liaison avec ces dernières déformations que les domaines cristallins acquièrent leur aspect le plus curieux et le plus perceptible sous la forme de grands dômes ou de cylindres (Bellière, 1958 ; Watson, 1970) d'une ampleur de plusieurs dizaines de kilomètres d'ouverture. Cette simplicité trompeuse enrobe les structures les plus complexes liées aux phases déformatives antérieures, les plus importantes et les plus significatives (fig. 4).

On comprend dès lors la réserve avec laquelle certains géologues du cristallin ont accueilli la notion de profondeur comme facteur déterminant du métamorphisme régional, et même l'ont rejeté, ainsi que l'a fait Read : « I consider depth as such, not to be a factor in metamorphism and that if we are to retain a zonal notion, then the idea of depth-control must be completely disregarded » (1939). En fait la migmatitisation et l'action ignée, qui ont la faveur de Read, jouent, dans les domaines cristallins très profonds, un rôle important au cours des phases

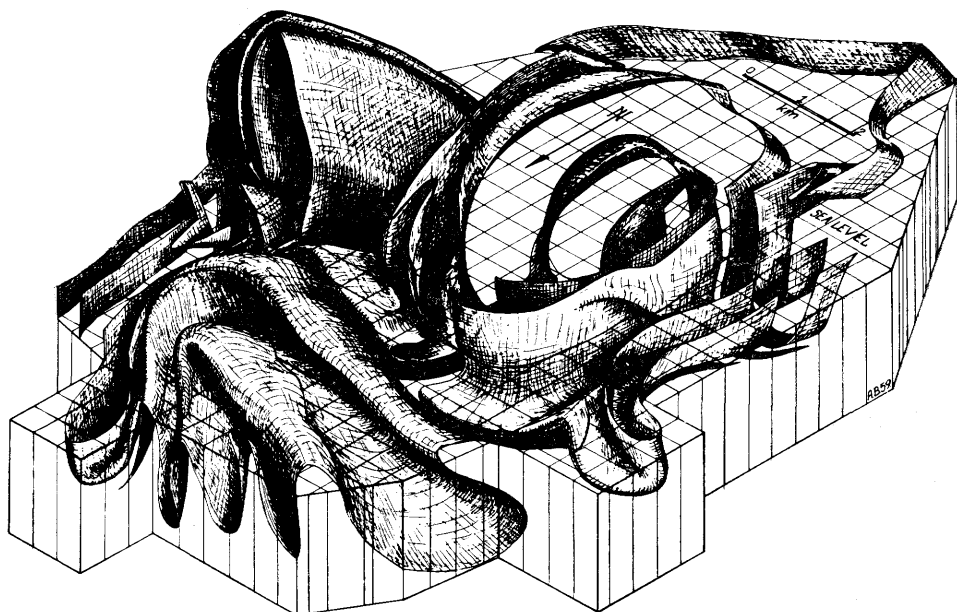


FIG. 4. — Stéréogramme structural du Western Tovqussap Nunâ, montrant la complexité structurale de ce domaine cristallin (extrait de Berthelsen, 1960).

déformatives successives, et concourent à oblitérer les aspects les plus caractéristiques du cinématométamorphisme.

La structuration des domaines cristallins, plus précisément ceux qui ont évolué dans la catazone profonde, a permis d'établir leur liaison géologique avec de grands massifs anorthositiques homogènes. Ceux-ci font en général leur apparition bien en dessous du niveau où débute l'anatexie granitique autochtone ; plus précisément c'est dans la zone de l'anatexie quartzo-mangéritique. Il est même probable que leur occurrence maximale se fait à la base de l'édifice tectonique, sous la dépendance d'une intrusion de magma plagioclasique d'extension régionale (P. Michot, 1965*b*).

Ce niveau catazonal profond, où la présence d'anorthosite est le fait le plus marquant, a permis de reconnaître la réalité de l'anatexie basique, de type leuconoritique, et dans un cadre autochtone (P. Michot, 1955). Réalisée dans ce niveau à une échelle modeste, elle se manifeste plus intense dans un niveau plus profond, sous-jacent à la pénélaine actuelle, par un processus palingénétique dont la mobilité engendre des migmatites basiques où s'associent, suivant des modalités multiples, le matériau anatectique de qualité leuconoritique et son résidu par-anatectique de nature anorthositique. Mais à un niveau plus profond encore cette manifestation a gagné une échelle régionale et s'est traduite par une palingénèse diapirique de grand style, comparable à celle qui à un niveau supérieur du segment orogénique, affecte les matériaux sialiques (J. Michot, 1961).

La part prise par les domaines cristallins dans la construction de la croûte continentale prend des formes multiples. S'il est certain que nombre d'entre eux

reposit, comme les segments épizonaux, sur un ancien domaine continental, cas de la chaîne pennine dans les Alpes, et des Calédonides de Norvège et d'Écosse (en grande partie tout au moins) le statut géologique semble être tout autre pour les segments catazonaux profonds à tréfonds anorthositiques : on peut voir ceux-ci comme dérivés de « géosynclinaux » océaniques reposant sur une croûte océanique à caractère basaltique (P. Michot, 1965a) ; leur développement orogénique se conçoit, suivant l'esthétique que l'on préfère, comme résultant du jeu entre un haut craton continental et un bas craton océanique (H. Stille), ou en fonction du jeu global de la tectonique de plaques. La croissance de la croûte continentale par la construction préalable d'un segment cristallin de type profond aux dépens de la croûte océanique marquerait donc la capacité toujours vitale de la Terre (P. Michot, 1963, 1968). La Grundgebirge, dont on connaît, grâce aux méthodes géochronologiques, l'âge bien différent selon ses parties, ne relèverait pas d'une période constructrice aujourd'hui éteinte. Elle pose néanmoins la question de la réalité d'une croûte primitive ou de sa parenté proche avec cette dernière.

Quoi qu'il en soit, il semble bien que la géologie des domaines cristallins soit bien la géologie des domaines profonds de l'écorce terrestre.

Bibliographie

- BACKLUND, H. G. (1936). — Das Magmaaufstieg in Faltengebirge. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n° 115, p. 293-347.
- BARROIS, Ch. (1910). — Sur les relations tectoniques des granites grenus et gneissiques de Bretagne. *XI^e Congr. géol. intern. Stockholm*, t. 1, p. 597-605.
- BECKE, F. (1910). — Über das Grundgebirge im niederösterreichischen Waldviertel. *XI^e Congr. géol. intern. Stockholm*, t. 1, p. 617-624.
- BELLIÈRE, J. (1958). — Contribution à l'étude pétrogénétique des schistes cristallins du massif des Aiguilles rouges (Haute-Savoie). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, Mém., t. 81.
- BERTHELSSEN, A. (1957). — The structural evolution of an ultra- and poly-metamorphic complex, West Greenland. *Geol. Rundsch.*, Bd. 46, Heft 1, p. 173-185.
- BERTHELSSEN, A. (1960). — Geology of Tovqussap Nunâ. *Meddelelser om Grönland*, Bd. 123, n° 1.
- DELESSE (1861). — Etude sur le métamorphisme des roches. *Bull. Soc. Géol. France*, 2^e série, t. 18, p. 541-547.
- FOURMARIER, P. (1906). — La tectonique de l'Ardenne. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, Mém., t. 34.
- FOURMARIER, P. (1949). — *Principes de Géologie*, 3^e édition. Editeurs : Masson, Paris et Vailant-Carmanne, Liège.
- GOLDSCHMIDT, V. M. (1920). — Die Injektionsmetamorphose im Stavangergebiet. *Vidensk. Skr. ; Math-naturv. kl.*, n° 10.
- GÜTZWILLER, E. (1912). — Injektionsgneisse aus dem Kanton Tessin. *Eclog. geol. Helv.*, vol. 12.
- HALLER, J. (1957). — Gekreuzte Faltenystem in Orogenzone. *Schweiz. Min. u. Petrog. Mitth.*, Bd. 37, Heft 1, p. 11-30.
- HAUG, E. (1911). — *Traité de géologie. Les phénomènes géologiques.*
- HIETANEN, A. (1967). — On the facies series in various types of metamorphism. *J. Geol.*, Vol. 75, p. 187-214.
- HÖLMQUIST (1921). — Typen und Nomenklatur der Adergesteine. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, Bd. 43.
- LACROIX, A. (1898-1900). — Le granite des Pyrénées et ses phénomènes de contact. I. *Bull. Serv. carte géol. France*, 1898-1899. II. *Ibid.*, 1899-1900.
- LAPADU-HARGUES, P. (1949). — Contribution aux problèmes de l'apport dans le métamorphisme. *Bull. Soc. Géol. France*, 5^e série, t. 19, p. 89-109.
- LAPADU-HARGUES, P. et RIVIÈRE, A. (1945). — Sur l'interprétation des apports dans les séries

- métamorphiques et l'origine des injections pegmatitiques. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, t. 221, p. 241-243.
- LORY, Ch. (1881). — Sur les schistes cristallins des Alpes occidentales et sur le rôle des failles dans la structure géologique de cette région. *Bull. Soc. Géol. France*, 3^e série, t. 9, p. 652-679.
- LORY, Ch. (1886). — Sur les variations du Trias dans les Alpes de la Savoie et spécialement dans le massif de la Vanoise. *Bull. Soc. Géol. France*, 3^e série, t. 15, p. 40-48.
- DE MARGERIE, E. et HEIM, A. (1888). — *Les dislocations de l'écorce terrestre*. Verlag von J. Wurster, Zürich.
- MICHEL-LÉVY, Aug. (1881). — Sur les schistes micacés des environs de Saint-Léon (Allier). *Bull. Soc. Géol. France*, 3^e série, t. 9, p. 181-196.
- MICHEL-LÉVY, Aug. (1887). — Sur l'origine des terrains cristallins primitifs. *Bull. Soc. Géol. France*, 3^e série, t. 16, p. 102-113.
- MICHOT, J. (1961). — Le massif complexe anorthosito-leuconoritique de Haaland-Helleren et la palingénèse basique. *Acad. Roy. Belg.*, Mém. Cl. des Sc., 2^e série in-4^o, t. 15.
- MICHOT, P. (1951). — Essai sur la géologie de la catazone. *Acad. Roy. Belg.*, Bull. Cl. des Sc., 5^e série, t. 37, p. 260-276.
- MICHOT, P. (1955). — L'anatexie leuconoritique. *Acad. Roy. Belg.*, Bull. Cl. des Sc., 5^e série, t. 41, p. 374-385.
- MICHOT, P. (1956a). — Structures tectoniques dans la catazone norvégienne. *Acad. Roy. Belg.*, Bull. Cl. des Sc., 5^e série, t. 42, p. 209-227.
- MICHOT, P. (1956b). — La géologie des zones profondes de l'écorce terrestre. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 80, Bull., p. 19-73.
- MICHOT, P. (1957). — Phénomènes géologiques dans la catazone profonde. *Geol. Rundsch.*, t. 46, p. 147-173.
- MICHOT, P. (1965a). — Les orogènes fondamentaux. *Freiberg Forschungshefte*, C 190, p. 49-62.
- MICHOT, P. (1965b). — Le magma plagioclasique. *Geol. Rundsch.*, t. 55, p. 956-976.
- MICHOT, P. (1963). — La structure continentale. *Acad. Roy. Belg.*, Bull. Cl. des Sc., 5^e série, t. 49, p. 1337-1373.
- MICHOT, P. (1968). — La croissance continentale. *Rev. Univer. des Mines*, n^o 9, p. 249-261.
- MICHOT, P. (1969). — Geological environment of the anorthosite of South Rogaland, Norway. In : Y. M. Isachsen (ed.), *Origin of Anorthosites and Related Rocks*. New York State Museum and Science Service, Memoir 18.
- MILCH, L. (1895). — Beitrage zur Lehre von der Regionalmetamorphose. *Neues Jb. Min., Geol. u. Paläont.*, t. 9, p. 101-128.
- RAGUIN, E. (1946). — *Géologie du granite*. Masson Editeurs, Paris.
- READ, H. H. (1939). — *Metamorphism and Igneous Action*. Brit. Ass. for Advanc. of Science, Dundee.
- ROSENBUSCH, H. (1889). — Zur Auffassung des Grundgebirges. *Neues Jb. Min., Geol. u. Paläont.*, Bd. 2, p. 81-97.
- REUSCH, H. (1882). — Silurfossiler og pressede konglomerater i Bergenskrifene. *Vidensk. Selsk Forh. Kristiania*.
- SCHAEFER, Th. (1847). — Sur la nature plutonique des granites et des silicates cristallins qui s'y rallient. *Bull. Soc. Géol. France*, 2^e série, t. 4, p. 468-495.
- SEDERHOLM, J. J. (1907). — Om granit och gneiss. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n^o 23.
- SEDERHOLM, J. J. (1923). — On migmatites and associated precambrian rocks of South-western Finland. Part I : The Pelling region. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n^o 58.
- SEDERHOLM, J. J. (1926). — On migmatites and associated precambrian rocks of South-western Finland. Part II : The region around the Barösunds fjord. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n^o 77.
- SEDERHOLM, J. J. (1910). — Die regionale Umschmelzung (Anatexie). *XI^e Congr. géol. intern.*, Stockholm, t. 1, p. 576.
- DEN TEX, E. (1965). — Metamorphic lineages of orogenic plutonism. *Geologie en Mijnbouw*, 44e jg., p. 105-132.
- TERMIER, P. (1903). — Les schistes cristallins des Alpes occidentales. *IX^e Congr. géol. intern.*, Vienne.
- TERMIER, P. (1910). — Sur la genèse des terrains cristalloyphylliens. *XI^e Congr. géol. intern.*, Stockholm, t. 1, p. 587-595.
- VIRLET D'AOUST (1836). — Communication verbale. *Bull. Soc. Géol. France*, 1^{re} série, t. 7, p. 310.
- VIRLET D'AOUST (1837). — *Bull. Soc. Géol. France*, 1^{re} série, t. 8, p. 306-308.

- VIRLET D'AOUST (1844a). — Sur les filons en général et le rôle qu'ils paraissent avoir joué dans l'opération du métamorphisme. *Bull. Soc. Géol. France*, 2^e série, t. 1, p. 825-844.
- VIRLET D'AOUST (1844b). — Note sur les roches d'imbibition. *Bull. Soc. Géol. France*, 2^e série, t. 1, p. 845.
- VIRLET D'AOUST (1847). — Observations sur le métamorphisme normal et la probabilité de la non-existence de véritables roches primitives à la surface du globe. *Bull. Soc. Géol. France*, 2^e série, t. 4, p. 498-505.
- WATSON, J. (1965). — Lewisian. In : G. Y. Craig (ed.), *The Geology of Scotland*, Oliver and Boyd, Edinburgh and London.
- WATSON, J., COWARD, M. P., FRANCIS, P. W. and GRAHAM, R. H. (1970). — Large-scale laxfordian structures of the Outer Hebrides in relation to those of the scottish Mainland. *Tectonophysics*, t. 10, p. 425-435.
- WEGMANN, E. (1929). — Beispiele tektonischer Analyse des Grundgebirges in Finland. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n° 87, p. 100-129.
- WEGMANN, E. (1930). — Über Diapirismus. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n° 92, p. 58-76.
- WEGMANN, E. (1935). — Zur Deutung der Migmatite. *Geol. Rundsch.*, Bd. 26, p. 305-350.
- WEGMANN, E. (1948). — Remarques sur le métamorphisme régional. *Geol. Rundsch.*, Bd. 36, p. 40-48.
- WEGMANN, E. und KRANCK, E. H. (1931). — Beiträge zur Kenntnis der Svecofenniden in Finland. *Bull. Comm. Géol. Finlande*, n° 89.
- WERNER, A. G. (1787). — *Kurze Classification und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten.*