

Colloque des 19-20 novembre 1973

Séance spécialisée de la Société Géologique de France :

Le métamorphisme alpin dans les Alpes occidentales

Compte rendu rédigé par Jacqueline BOCQUET *,
revu par tous les auteurs de communications

ABSTRACT. — Report on the conference held in Grenoble, November 19-20, 1973, on the general topic : the Alpine metamorphism in the Western Alps. Brief introductory comments, and abstracts of all papers read are distributed under the following headings : data from the Central Alps, nature and co-stability of the minerals, their spatial distribution, chronology of the different metamorphic phases, their P-T conditions, paleogeographic and structural setting.

Ce compte rendu comprend les résumés des communications présentées (en caractères romains), répartis en plusieurs chapitres dont les parties introductives (en italiques) tentent de montrer, d'une manière très sommaire, où en sont les connaissances actuelles en la matière. Le texte de ce compte rendu a été diffusé auprès de tous les auteurs des communications afin qu'ils puissent corriger les résumés de leurs travaux et des opinions qu'ils ont émises, et apporter leur collaboration. J. BOCQUET, qui a rédigé la première version du manuscrit, rassemblé les diverses corrections et à qui sont dues les introductions des chapitres, remercie pour leurs remarques et leurs critiques constructives les auteurs des communications : J. APRAHAMIAN, J.-M. CARON, S. CHIESA, G.-V. DAL PIAZ, M. DELALOYE, G. DUNOYER DE SEGONZAC, D.W. DURNAY, L. FIORA, M. GAY, B. GOFFE, G. GOFFE-URBANO, J.-C. HUNZIKER, J.-R. KIENAST, D. LADURON, D. LATTARD, R. LEFÈVRE, G. LIBORIO, Cl. LIÉ-

BEAUX, A. MOTTANA, E. NIGGLI, G. PASQUARE, A. PECHER, J.F. VON RAUMER, P. SALIOT, F.-P. SASSI, A. SCOLARI, A.W.B. SIDDANS, P. VIALON et H.J. ZWART.

Introduction.

Les 19 et 20 novembre 1973 l'Institut Dolomieu et le Laboratoire de Géologie Alpine associé au C.N.R.S. ont reçu, dans le cadre d'une séance spécialisée de la Société Géologique de France, une centaine de géologues intéressés par le thème : « le métamorphisme alpin dans les Alpes occidentales ¹ ». La diversité des pays d'origine des participants — en dehors des trois pays ouest-alpins (France, Italie, Suisse) : Allemagne, Angleterre, Australie, Belgique,

* Institut Dolomieu, Laboratoire de Géologie Alpine associé au C.N.R.S., rue Maurice-Gignoux, 38031 Grenoble Cedex.

¹ La liste des communications présentées a été publiée dans le *Bull. Soc. géol. Fr.*, C. R. somm. 1973, p. 118-119. Voir aussi : *Bull. Soc. géol. Fr.* (7), t. 16, p. 241-247.

Brésil, Canada, Iran, Pays-Bas et U.S.A. — montre le pouvoir d'attraction qu'exercent toujours les problèmes alpins sur les géologues.

L'étude d'un métamorphisme pose diverses questions dont les réponses, dans les Alpes occidentales, sont plus ou moins bien connues. Quels minéraux ont été formés et quelle est leur répartition géographique et structurale ? Quelle est leur succession les uns par rapport aux autres, quels sont leurs âges ? Quelles conditions de pression, température et chimisme du milieu leur présence reflète-t-elle ? Dans quel cadre pétrogénétique, paléogéographique et structural les événements métamorphiques ont-ils eu lieu ?

Les chercheurs du siècle dernier et de la première moitié de ce siècle, parmi lesquels il faut citer en premier lieu S. FRANCHI, P. TERMIER, H.P. CORNELIUS, etc., ont commencé à répondre aux premières de ces questions : la nature des minéraux formés et leurs gisements. La qualité souvent excellente des analyses chimiques de minéraux effectuées alors dans les Alpes italiennes (par exemple par F. ZAMBONINI) est à noter. La succession de deux phases dans le métamorphisme alpin avait été soulignée dès 1928 par Gb. DAL PIAZ. Plus tard les premières synthèses de jadéite, après plusieurs tentatives infructueuses dues au manque d'appareillage adéquat, ont fait apparaître que des pressions élevées étaient nécessaires pour le développement de l'association de pyroxène sodique peu ferrique et du quartz. L'hypothèse du géosynclinal de nappes émise en 1958 par F. ELLENBERGER essayait de pallier, en ce qui concerne le massif briançonnais de Vanoise, les vaines recherches de la surcharge lithostatique ayant pu engendrer des pressions élevées. Elle n'était de toute façon pas extrapolable à la totalité du domaine métamorphique alpin ni à toutes ses phases (cf. P. BEARTH, 1962). La théorie de la tectonique de plaques fournit maintenant un cadre génétique possible, où plusieurs conditions nécessaires sont réalisées, mais les détails de son application aux Alpes occidentales sont bien loin d'être tous élucidés.

Les Alpes centrales.

Dans les Alpes centrales, terrain d'étude classique du métamorphisme alpin, la progression du métamorphisme vers le Sud est bien étudiée, grâce aux travaux de E. NIGGLI, E. WENK, V. TROMMSDORFF

et des écoles de Berne et Bâle. On y voit un métamorphisme de type barrovien, de moyenne pression, qui passe du faciès schistes verts, au Nord, au faciès amphibolite avec phénomènes de mobilisation et granitisation, au Sud. L'âge de sa culmination — environ 38 Ma — est prouvé par de très nombreuses mesures qui ont permis aussi de montrer les vitesses de refroidissement et les différentes températures de fermeture isotopique des minéraux phylliteux (travaux de E. JAEGER et du laboratoire de géochronologie de Berne). L'origine de ce métamorphisme serait à chercher dans l'empilement des nappes (E. NIGGLI, 1961) ou dans un dôme thermique (E. WENK, 1962).

Malgré l'état avancé des études dans les Alpes centrales, ou peut-être grâce à lui, plusieurs problèmes s'y posent à propos du, ou mieux des métamorphismes alpins (**communication de E. Niggli**).

La distribution des amphiboles bleues de la série glaucophane-crossite-riebeckite a été publiée par les cartes de E. NIGGLI (1960) et de E. NIGGLI et C.R. NIGGLI (1965); une carte plus récente (E. NIGGLI, 1970) a été dessinée avec seulement les amphiboles de la série glaucophane-crossite. Cette distribution de part et d'autre de la culmination lépontine suggère que le métamorphisme de 38 Ma s'est surimposé à une région qu'un faciès à glaucophane avait préalablement marquée de son empreinte. Toutefois aucune relique d'un tel faciès n'a encore été trouvée dans les Alpes centrales.

Une phase récente de métamorphisme (Oligocène inférieur à moyen, c'est-à-dire juste postérieure à la déformation principale de cette région : R. TRÜMPY, 1960, 1973) a donné des associations allant jusqu'à un faciès schistes verts dans les Helvétides (Alpes de Glaris : M. FREY *et al.*, 1973). L'intensité du métamorphisme y apparaît en relation directe avec l'épaisseur des nappes empilées. L'apparition du stilpnomélane coïncide à peu près avec le milieu de l'anchizone définie par la cristallinité de l'illite, et avec la limite entre les faciès à zéolites et à pumpellyite-prehnite.

Les migmatites du domaine lépontin ne peuvent être toutes d'âge alpin : la formation de certaines ne peut qu'être antérieure au métamorphisme régional alpin qu'elles ont aussi subi.

Il subsiste encore quelques difficultés d'interprétation à propos du granite de Bergell. Les datations radiométriques qui y ont été effectuées indiquent

une cristallisation vers 30 Ma, avec âges de refroidissement de biotite entre 28 et 20 Ma. Des galets en provenance de ce massif se rencontrent déjà dans une molasse qui semble paléontologiquement datée de la limite Oligocène inférieur et moyen. Si ces datations paléontologiques sont bien exactes, le refroidissement et la surrection du massif granitique ont dû s'effectuer en un laps de temps très court (cf. E. JAEGER, 1973).

Les minéraux : nature et co-stabilité.

L'identification des minéraux formés au cours des métamorphismes alpins a été faite de manière plus ou moins précise dans le cadre d'études régionales qu'il serait trop long d'énumérer ici. Aux méthodes optiques et chimiques classiques se sont adjointes les techniques de détermination par R. X., puis d'analyse par microsondes, de telle sorte que des minéraux considérés jusqu'à présent comme rares ou même inconnus dans les Alpes occidentales y sont maintenant identifiés (ceci est le cas notamment de la margarite : M. FREY et E. NIGGLI, 1972). La nature cristallogénétique exacte des minéraux est aussi de plus en plus finement précisée.

Une ferrocapholite très magnésifère — $(Mg,Fe)OAl_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ — a été trouvée pour la première fois dans les Alpes occidentales dans les métasédiments hyperalumineux (bauxites ?) du Dogger de Vanoise (**communication de B. Goffé, G. Goffé-Urbano et P. Saliot, 1973**), en association avec \pm pyrophyllite, diaspore, chloritoïde, paragonite, chlorite, mica blanc.

Deux études ont mené à une identification des minéraux présents dans quelques coupes effectuées dans les Calcschistes - Schistes lustrés, entre le val Grana et le val d'Aoste (**communication de L. Fiora**) et entre le Queyras et le val Germanasca (**communication de S. Chiesa, G. Liborio, A. Mottana et G. Pasquarè, 1974**). Les deux études signalent de la paragonite, la deuxième notamment de la cossaïte (variété compacte de paragonite dédiée en 1874 par GASTALDI à COSSA) (cf. S. CHIESA *et al.*, 1972). Les images effectuées à la microsonde électronique (L. FIORA) montrent l'association intime de la paragonite et de la phengite à l'intérieur parfois de chaque lamelle micacée. L'aragonite n'a pas été rencontrée ; les carbonates sont la calcite, une calcite ferrifère, l'ankérite et aussi de la dolomie, même dans des roches contenant de la

paragonite (association impossible pour N.D. CHATTERJEE, 1971). L'ankérite est en fait beaucoup plus fréquente (L. FIORA) que ne l'avaient signalé d'autres auteurs (G. LIBORIO et A. MOTTANA, 1973 ; CHIESA *et al.*, 1972).

La paragonite est signalée également dans les Alpes cottiennes septentrionales, notamment dans des pseudomorphoses de lawsonite (**communication de J.-M. Caron, 1974**), et un mica blanc paragonitique dans les fissures d'une jadéite de la zone d'Acceglio (**communication de R. Lefèvre, 1974**). Ce pyroxène sodique est né aux dépens de la fraction albitique de feldspaths sodi-potassiques dont il reste une trame potassique mise en évidence par des clichés effectués au microanalyseur ionique.

Parmi les transformations des faciès de haute pression vers ceux de schistes verts il y a celle des amphiboles sodiques en amphibole bleu vert notamment. L'étude de cette transformation à la microsonde électronique a donné lieu à des diagrammes de variation de Ca, Na et d'autres éléments entre l'amphibole sodique et l'amphibole calco-sodique (**communication de J.R. Kienast** sur des échantillons de la zone Zermatt-Saas *s.l.*). L'amphibole bleu vert est identifiée comme étant une hornblende subcalcique.

La distribution régulière de Fe (total) et de Mg entre amphibole (actinote un peu alumineuse), biotite verte et chlorite indique que ces minéraux ont cristallisé à l'équilibre dans les roches du faciès schistes verts de la partie occidentale de la zone Sesia-Lanzo. Cette observation est en accord avec les résultats acquis au moyen des méthodes microscopiques classiques par G.V. DAL PIAZ *et al.* (1971) (**observation de G.V. Dal Piaz**). Les coefficients de distribution ne variant pas, il semble que les conditions de formation de ces paragenèses aient été les mêmes du Nord au Sud de la zone. Les irrégularités dans la répartition de Fe et de Mg entre les phengites et les autres minéraux sont dues vraisemblablement à l'existence d'une proportion importante de Fe^{III} (qui ne se substitue pas à Mg, mais à Al) dans les phengites (**communication de D. Lattard et J.R. Kienast**).

Les travaux sur le passage de la zone diagénétique à l'anchizone et de celle-ci aux schistes verts (cf. travaux de G. DUNOYER DE SEGONZAC, 1969 ; Ph. ARTRU, 1972, etc. ; voir ci-dessous : distribution des minéraux) mènent à l'identification des

phases argilo-phylliteuses (illite, montmorillonite, chlorite, très peu de pyrophyllite) et des feldspaths (albite, feldspaths potassiques). Des illites ont pu être analysées (**communication de G. Dunoyer de Segonzac, M. Abbas et M. Lemoine, 1974**). L'accroissement de leur cristallinité s'accompagne d'augmentation d'Al^{IV}, Al^{VI}, K et Na dans les réseaux et de déshydratation des interfoliaires (A.T.D.).

Distribution des minéraux dans l'espace.

Sur plusieurs transversales des Alpes occidentales, en allant des zones internes vers les zones externes et en ne considérant ici, dans le cas de polyphasage apparent, que la première des phases principales (travaux d'E. NIGGLI, 1960, 1970 ; P. BEARTH, 1962 ; E. NIGGLI et C.R. NIGGLI, 1965 ; J.R. KIENAST et B. VELDE, 1970 ; J. BOCQUET, 1971, 1974 ; N.D. CHATTERJEE, 1971 ; G.V. DAL PIAZ, 1971 ; W.G. ERNST, 1971, 1973 ; J.F. VON RAUMER, 1971 ; G. SAWATSKI et M. VUAGNAT, 1971 ; P. SALIOT, 1973 ; carte zonéographique des métamorphismes d'Europe, feuille Alpes et texte explicatif des Alpes occidentales par J. BOCQUET, G.V. DAL PIAZ et al., sous presse), on trouve en gros les successions spatiales suivantes :

- omphacite et grenat, jadéite + quartz, disthène, glaucophane s. str., chloritoïde Mg, phengite (\pm lawsonite) ;
- glaucophane s. l., chloritoïde Mg et Fe, lawsonite, pumpellyite, phengite \pm jadéite + quartz ;
- lawsonite, pumpellyite, phengite, actinote ;
- pumpellyite, prehnite ;
- laumontite, heulandite.

Cela traduit grosso modo la présence d'un faciès à écloğites et de schistes à glaucophane dans les zones internes, puis de schistes à glaucophane-lawsonite et de schistes verts et enfin des faciès à pumpellyite-prehnite et à zéolites dans les zones externes. Il faut souligner que ces faciès ne sont pas tous contemporains : les zones à zéolites, par exemple, n'ont subi qu'une phase de métamorphisme. Celle-ci est postérieure à la première phase, écloğitique, des zones les plus internes, car elle affecte entre autres des sédiments d'âge oligocène, époque à laquelle les écloğites étaient déjà réalisées dans les zones internes (cf. infra : chronologie).

A ce gradient général décroissant transversalement vers le côté externe de la chaîne s'ajoute un gradient général longitudinal diminuant vers le Sud. D'autres gradients ont été mis en évidence à une échelle plus locale, par exemple dans la zone Sesia où un faciès schistes verts éoalpin, situé du côté nord-occidental, semble contemporain du faciès écloğitique et schistes à glaucophane qui prédomine régionalement (G.V. DAL PIAZ, J.C. HUNZIKER et G. MARTINOTTI, 1972 ; B. VELDE et J.R. KIENAST, 1973).

Deux sujets ont été plus particulièrement traités au cours du colloque en ce qui concerne la répartition des minéraux dans l'espace : d'une part les limites entre zones diagénétique et anchizone, puis entre anchizone et zones à schistes verts, d'autre part des hétérogénéités locales de distribution, qui peuvent refléter des gradients plus généraux.

Le gradient général décroissant vers le bord externe de la chaîne a été confirmé dans les études sur les Calcschistes-Schistes lustrés (**communication de L. Fiora et communication de S. Chiesa, G. Liborio, A. Mottana et G. Pasquarè, 1974**). La limite proposée par N.D. CHATTERJEE (1971) pour l'association grenat-biotite serait, d'après les derniers chercheurs, à déplacer légèrement vers l'Est.

Diverses coupes effectuées dans le Rhétien entre la bordure cévenole et les zones briançonnaise et piémontaise externe (**communication de G. Dunoyer de Segonzac, M. Abbas et M. Lemoine, 1974**) illustrent le passage de la diagénèse à l'épimétamorphisme, tel que l'indiquent les mesures de cristallinité et les formules structurales des illites. La différence de cristallinité entre la partie charriée du chevauchement post-miocène de Digne (base de l'anchizone et sommet de l'épizone) et la partie chevauchée (limite entre diagenèse et anchizone) montre que le dernier événement thermique est antérieur à ce chevauchement, donc au plus tard miocène. La cristallinité obtenue dans les zones internes reste encore faible et caractérise le sommet de l'épizone. Dans la coupe effectuée en zone prépiémontaise (zone du Gondran) le mica est, chimiquement, à la limite des domaines illite-phengite-muscovite. La paragonite apparaît. Une montmorillonite alumineuse se développe dans la zone briançonnaise au sommet de l'épizone, témoignant de pressions de vapeur d'eau élevées en l'absence d'alcalins.

Autour des massifs cristallins externes dauphinois (**communication de J. Aprahamian**, 1974) la cristallinité de l'anchizone atteint des niveaux stratigraphiques différents, la largeur de cette zone varie et son dessin est influencé par des structures tectoniques (chevauchement et failles) dont au moins le dernier rejeu est plus récent. Les grès du Champsaur, où règnent des faciès à pumpellyite et à laumontite (J. MARTINI et M. VUAGNAT, 1970), appartiennent encore à la zone diagénétique. La paragonite a été rencontrée en plusieurs endroits.

L'apparition du métamorphisme est précédée, puis accompagnée de changements structuraux décrits au niveau de la demi-fenêtre d'Embrun, entre Barcelonnette et Savines (**communication d'A.W.B. Siddans**) : les joints deviennent plus rapprochés, les plis s'aplatissent, les fossiles sont déformés, le boudinage apparaît. Le front de la schistosité est atteint à Gap. Parallèlement la cristallinité de l'illite augmente, ainsi que le rapport de ses polymorphes 2M : 1Md (cf. Ph. ARTRU *et al.*, 1969).

Dans le massif des Aiguilles Rouges le métamorphisme est encore faible et correspond à un faciès à zéolites et à pumpellyite, avec pumpellyite, prehnite, chlorite et stilpnomélane (**communication de J.F. von Raumer**, 1974). Par contre le massif du Mont-Blanc se situe dans une zone de schistes verts, avec amphibole bleu vert, biotite verte, épidote, chlorite, stilpnomélane et albite.

De nouveaux gisements de stilpnomélane sont cités dans les nappes helvétiques du Valais, ainsi que des gisements de chamosite (**communication de D.W. Durney**, 1974). La limite entre l'anchizone et l'épizone y correspondrait à peu près au milieu du domaine de distribution du stilpnomélane.

En deux points différents des Alpes occidentales la distribution des silicates calciques semble traduire quelque gradient dans les conditions d'une phase du métamorphisme. C'est le cas dans le massif du Mont-Blanc (**communication de J.F. von Raumer**, 1974), où une prédominance de l'épidote, puis de la clinozoisite et enfin de la zoisite semble se dessiner du SE vers le NW. Dans la zone Sesia-Lanzo méridionale (**communication de Cl. Liebeaux et J.R. Kienast**) la lawsonite est fraîche dans ses gisements orientaux, pseudomorphosée vers l'Ouest.

Dans les métasédiments hyperalumineux du Dogger de Vanoise (**communication de B. Goffé**,

G. Goffé-Urbano et P. Saliot, 1973) l'association à chloritoïde, diaspore, ferrocapholite et pyrophyllite semble remplacée vers l'Est du massif par celle à chloritoïde seul, avec paragonite et muscovite.

Chronologie : Les différentes phases du métamorphisme.

*Comme cela a été rappelé plus haut, le caractère polyphasé du métamorphisme alpin a déjà été mis en évidence depuis près de cinquante ans. Les études régionales ou synthétiques soulignent maintenant toujours la présence d'une première phase de haute pression et basse température, avec éclogites, association de jadéite + quartz, glaucophane, disthène, chloritoïde, phengite, etc., développée dans les zones internes, et d'une ou plusieurs phases ultérieures caractérisées par des associations correspondant à un gradient géothermique plus « normal » (P. BEARTH, 1967 ; E. NIGGLI, 1970 ; G.V. DAL PIAZ *et al.*, 1971, 1972 ; J. BOCQUET, G.V. DAL PIAZ *et al.*, sous presse, etc.). On a décrit ainsi les transformations d'omphacite en glaucophane, de jadéite en albite, de glaucophane en amphibole bleu vert, en albite + chlorite et/ou biotite verte ou son remplacement par un mica blanc ou de la calcite, les pseudomorphoses de lawsonite en diverses associations, etc.*

La première phase a été datée du Crétacé supérieur par J.C. HUNZIKER sur des phengites de la zone Sesia-Lanzo et sur des glaucophanes de la zone Zermatt-Saas. Cette phase semble n'avoir pas dépassé le faciès schistes verts dans la partie nord-occidentale de la zone Sesia-Lanzo (G.V. DAL PIAZ, J.C. HUNZIKER et G. MARTINOTTI, 1972 ; J.C. HUNZIKER, 1974). C'est le seul endroit où, jusqu'à présent, on ait obtenu des âges crétacé supérieur liés à un faciès qui ne soit pas de haute pression et basse température.

*Pour les phases suivantes des âges éocènes, à rapprocher de ceux des Alpes centrales, ont été obtenus en plusieurs points des Alpes occidentales, ainsi que des âges miocènes. On trouvera les références bibliographiques de ces travaux dans J. BOCQUET (1971) et J. BOCQUET, M. DELALOYE *et al.*, sous presse.*

Avant les différentes phases du métamorphisme orogénique alpin, mais postérieurement (et corrélativement) à la mise en place des roches basiques et ultrabasiques dans les bassins océaniques de

l'orogène, ont pu avoir lieu des transformations analogues à celles que révèlent les recherches actuelles sur les dorsales médio-océaniques. Ces transformations (paragenèses hydratées non liées à des déformations et traduisant un gradient géothermique relativement élevé) qui constituent le « métamorphisme de fond océanique » pourraient, si elles ont existé régionalement (voir P. BEARTH, 1973), avoir été plus ou moins oblitérées par le métamorphisme orogénique alpin.

L'histoire des métamorphismes alpins se laisse approcher de deux manières : (1) de manière relative, par l'étude des successions minérales, ou par l'étude — d'interprétation cependant délicate, comme l'a fait observer P. BEARTH — des rapports entre minéraux et déformations dont la succession est démontrée par ailleurs ; et (2) de manière absolue, par les datations radiométriques. Ces deux approches ont été illustrées par plusieurs communications.

(1) L'étude des transformations d'amphibole bleue en hornblende subcalciqne dans la zone Zermatt-Saas *s. l.* a été mentionnée plus haut. Une transformation considérée comme contemporaine de celle menant du glaucophane à l'amphibole bleu vert a affecté les lawsonites de la zone Sesia-Lanzo (**communication de Cl. Liebeaux et J.R. Kienast**). Elle implique un apport de sodium et a mené à la cristallisation de zoïsité, micas blancs (phengite, paragonite, muscovite), albite, chlorite ferro-magnésienne, avec parfois grenat et amphibole bleu vert. Les formes de la lawsonite étant conservées, la pseudomorphose est considérée comme s'étant effectuée en milieu statique.

Plusieurs « générations » de lawsonite semblent exister, comme le montrent ses rapports avec différents stades de déformations dans les Alpes cottiennes (**communication de J.-M. Caron, 1974**) et le fait que dans la zone Sesia-Lanzo elle semble en équilibre avec le glaucophane (**communication de Cl. Liebeaux et J.R. Kienast**) quoiqu'on trouve aussi du glaucophane déformé inclus dans la lawsonite (**observation de G.V. Dal Piaz**).

Trois phases importantes de déformation sont individualisées dans les Alpes penniques suisses et italiennes (**communication de H. Zwart et communication de D. Laduron et M. Merlyn, 1974**). Une schistosité S_1 est associée à la première phase qui est liée au charriage. Pour H.J. ZWART la

deuxième déformation plisse cette schistosité en plis déversés vers le Sud ou le Sud-Est et est responsable de la formation du pli en retour des Mischabel et du basculement du Gothard. Pour D. LADURON et M. MERLYN, elle ébauche l'antiforme de Vanzone et se caractérise par une intensité croissant du NW vers le SE. Un clivage de crénelation S_2 se développe durant cette phase. La troisième phase a provoqué le renversement de la zone des racines et donne à l'antiforme de Vanzone sa forme actuelle. Les recrystallisations ont débuté pendant ou même avant la première phase de déformation et se sont poursuivies jusqu'après la deuxième phase de déformation.

Dans les Alpes cottiennes septentrionales (**communication de J.-M. Caron, 1974**; cf. J.-M. CARON *et al.*, 1973) des schistosités sont associées à deux phases de déformation, tandis qu'une troisième phase, mise en rapport avec le rétrocharriage, s'est encore effectuée, au moins à son début, dans un climat permettant des cristallisations (lawsonite ou produits de sa transformation).

Par ailleurs quatre phases de cristallisation sont individualisées dans l'ensemble des Calcschistes-Schistes lustrés (**communication de L. Fiora**), la première et la troisième liées à des déformations.

Dans le massif du Mont-Blanc la hornblende bleue, la zoïsité et la clinozoïsité pourraient constituer une paragenèse plus ancienne et de pression légèrement plus élevée que celle à actinote, biotite verte, chlorite et épidote (**communication de J.F. von Raumer, 1974**).

Une phase métamorphique triasico-liasique, du type de fond océanique, est invoquée pour rendre compte, dans le massif des Ecrins-Pelvoux, des paragenèses hydratées qui ont affecté des roches doléritospilitiques de cet âge ainsi que les granites et gneiss anciens qu'elles recoupent. Ces paragenèses apparaissent en effet antérieures aux phases de déformation alpines de ce massif, considérées comme s'étalant du Crétacé jusqu'après le Miocène (**communication d'A. Pêcher et P. Vialon, 1974**). Ces déformations correspondraient toutes à des mouvements de compression N-S, localement déviés par des failles hercyniennes de direction générale SW-NE (cf. P. VIALON, 1974). Le volcanisme basique et le métamorphisme océanique qui en auraient affecté les produits en même temps que les masses sialiques avoisinantes, constitueraient les indices du dernier

prolongement vers le Sud de la fosse valaisane (cf. l'hypothèse émise par R. BARBIER et J. DEBELMAS, 1966), considérée comme bassin marginal d'une plaque européenne chevauchant vers le SSE. L'idée de transformations métamorphiques triasiques pourrait trouver une confirmation dans des âges radiométriques obtenus sur des chlorites (**observation d'E. Jäger**).

A un métamorphisme de fond océanique peuvent être dues certaines transformations surtout visibles dans les ophiolites ligures, telles que le remplacement de pyroxènes magmatiques par la hornblende brune ou verte, la serpentinitisation, la rodingitisation, etc. (**communication de G.V. Dal Piaz, 1974 a et b**).

(2) En ce qui concerne l'approche par chronologie absolue des métamorphismes, deux communications ont montré que certaines transformations sont en fait plus anciennes qu'on pouvait le croire. Les socles briançonnais - Grand-Saint-Bernard recèlent ainsi des minéraux dont les mesures radiométriques ont montré l'âge anté-alpin. Ainsi une étude par la méthode au strontium (**communication de M. Gay et Y. Vialette**) confirme l'âge anté-alpin de la série inférieure du massif d'Ambin — série de la Clarea — déjà proposé par M. GAY (1970) sur la foi d'arguments stratigraphiques, pétrographiques et structuraux.

Les résultats des déterminations d'âges effectuées sur des amphiboles bleues, des micas et des minéraux associés provenant des zones internes des Alpes occidentales par la méthode K-Ar peuvent se répartir en six groupes (**communication de J. Bocquet, M. Delaloye, J.C. Hunziker et D. Krummenacher, 1974**) :

- âge hercynien pour des micas du massif d'Ambin ;
- âge permien pour des micas du massif de Vanoise ;
- phénomènes de surpression (argon hérité), entre autres dans des amphiboles des socles briançonnais - Grand-Saint-Bernard ;
- âge crétacé supérieur, lié au faciès de haute pression de la zone piémontaise ;
- âge éocène supérieur pour des amphiboles et des micas ;
- âge miocène, peut-être à interpréter comme correspondant à une ouverture isotopique due à une phase de déformation.

Conditions de pression et de température.

La phase crétacé supérieur de métamorphisme, à éclogites, jadéite + quartz, disthène et glaucophane, a eu lieu sous des pressions élevées et des températures relativement basses : c'est ce que montrent les données expérimentales. Les faciès schistes verts qui ont suivi correspondent en fait à une évolution prograde du métamorphisme, avec diminution progressive des pressions (P. BEARTH, 1967, 1973 ; W.G. ERNST, 1973 ; J.C. HUNZIKER, 1974 ; J. BOCQUET, G.V. DAL PIAZ et al., sous presse). Différentes estimations ont été faites des conditions de pression et de température qui ont pu présider à la formation de certaines associations minérales. Ces estimations sont encore gênées par la difficulté qu'il y a à déterminer l'existence d'un équilibre entre les minéraux de l'association considérée et, d'autre part, par la rareté de données expérimentales en ce qui concerne spécialement les limites inférieures de stabilité.

Des chiffres de 10 kb ou plus et 300-400° C sont proposés, sur la base des données expérimentales, pour la phase de haute pression éclogitique (**communication de G.V. Dal Piaz, 1974 a et b**). Des températures plus élevées ne paraissent pas vraisemblables, car la phase de pression moindre et de température probablement plus élevée qui a suivi la phase de haute pression - basse température, ne se serait pas, dans ce cas, déroulée dans les conditions du faciès schistes verts que l'on observe, mais dans celles d'un faciès amphibolite.

Des températures relativement élevées sont citées dans les nappes helvétiques (**communication de D.W. Durney, 1974**) sur la base de l'étude des inclusions fluides en cristaux syncinématiques. Le désaccord avec les températures indiquées par les associations minérales peut provenir du fait que les minéraux n'ont pas disposé du temps nécessaire à l'établissement de l'équilibre, ou d'une teneur faible en K. Les valeurs citées (températures d'homogénéisation jusqu'à 400° C) dépassent cependant de beaucoup celles qui ont été obtenues par la même méthode sur des cristaux de cavités dans des zones équivalentes des Alpes occidentales (**observation de B. Poty**).

Les chiffres de 4-6 kb et 350-480° C sont cités pour la paragenèse à ferrocapholite, diaspore, pyrophyllite sans kaolinite du Dogger de Vanoise,

paragenèse qui pourrait être contemporaine des associations à lawsonite-pumpellyite des roches basiques de la zone houillère (**communication de B. Goffé, G. Goffé-Urbano et P. Saliot, 1973**).

La mesure du b_0 des micas blancs potassiques a été effectuée sur environ 300 échantillons des Alpes occidentales (**communication de F.P. Sassi, A. Scolari, J. Bocquet et G.V. Dal Piaz, 1974**). Cette méthode a mené à l'individualisation rapide de trois groupes caractéristiques, l'un dans un faciès de haute pression, le deuxième d'un faciès barrovien de pression moyenne et le troisième de pression faible ou de haute température. Le fait que les deux premiers groupes de résultats aient été les seuls obtenus pour les échantillons d'âge stratigraphique mésozoïque, permet de les mettre en relation avec les deux faciès — haute pression/basse température et schistes verts — du métamorphisme alpin. La coïncidence des résultats du troisième groupe avec ceux obtenus pour des roches du massif cristallin externe de Belledonne et du complexe antégranitique du Mont Rose, montre qu'ils se rapportent à un métamorphisme anté-alpin. L'application de cette méthode aux Alpes occidentales semble donc confirmer sa validité en tant que procédé de détermination rapide des phénomènes métamorphiques subis par une région.

Considérations pétrogénétiques : cadre paléogéographique et structural.

Depuis la théorie du métamorphisme géosynclinal les idées ont évolué et plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer les pressions et les températures pétrologiquement nécessaires, alors que souvent la couverture sédimentaire et le recouvrement tectonique manquent ou sont insuffisants. Ce sont notamment : la surcharge tectonique de la part des nappes, la surpression des fluides et la subduction de plaques.

La surcharge tectonique est invoquée surtout dans les Alpes nord-occidentales et centrales, là où les nappes penniques, la nappe de la Dent Blanche et les Préalpes peuvent déjà rendre compte de quelques-uns des kilobars nécessaires et de la température qui a dû régner.

Cette hypothèse, le plus souvent considérée comme suffisant à justifier les conditions du faciès schistes verts (et, pour les Alpes centrales, de l'ensemble de la cristallisation lépontine : E. NIGGLI,

1970) est aussi appliquée à la phase de haute pression au moins pour les Alpes centrales (**communication de H.J. Zwart**).

Une surpression exercée par des fluides accumulés au cours de l'activité volcanique et du métamorphisme du type de fond océanique triasico-liasiques, en même temps qu'un flux thermique élevé non encore complètement dissipé, rendraient compte des paragenèses à pumpellyite-prehnite du massif des Ecrins-Pelvoux (**communication d'A. Pêcher et P. Vialon, 1974**). Le caractère imperméable des sédiments schisteux de couverture auraient permis la mise en pression partielle des fluides et leur conservation. Dans ce massif la couverture sédimentaire est très mince et il n'existe aucun indice d'une quelconque surcharge tectonique à un moment de son histoire alpine.

Les deux hypothèses rencontrent de sérieuses critiques générales, entre autres (**communication de G.V. Dal Piaz, 1974 a et b**) : les pressions nécessaires pour les associations éclogitiques et à jadéite + quartz sont supérieures à celles qu'ont pu donner les surcharges tectoniques possibles dans les Alpes occidentales et les surpressions fluides ; une surcharge tectonique peut provoquer un gradient géothermique spécialement bas, mais ne peut expliquer la conservation des paragenèses ainsi créées. C'est pourquoi les conditions rencontrées en profondeur par une plaque en cours de subduction sont souvent considérées comme les seules qui permettent actuellement d'expliquer les hautes pressions accompagnées de faibles températures (cf. G.V. DAL PIAZ *et al.*, 1972, avec références bibliographiques des autres schémas de tectonique de plaques appliqués aux Alpes occidentales). Le plan de Benioff aurait été situé à la limite entre la zone Sesia-Lanzo et la zone d'Ivrée, de manière intracontinentale, et plus au Sud peut-être entre la zone piémontaise et la zone ligure. La partie orientale, interne, du bassin ophiolitique (zone de Zermatt-Saas *s. l.*), ainsi qu'une partie de ses bordures continentales (Sesia-Lanzo) auraient été amenées en subduction, au cours du Crétacé supérieur, sous la plaque insubrique ; la zone du Combin *s. l.* y aurait échappé. A la fin de la période de subduction la remontée des matériaux se serait effectuée rapidement, amenant ainsi la conservation des paragenèses de haute pression réalisées en profondeur, en même temps que se serait formée une première structure en nappes.

Le bassin ophiolitique liguro-piémontais aurait, jusqu'au Crétacé supérieur, formé un bassin unique depuis les Alpes jusqu'en Corse et en Calabre. C'est précisément l'individualisation de la zone de Benioff qui aurait séparé le bassin ophiolitique liguro-piémontais en deux parties dont l'histoire devenait désormais différente : la partie piémontaise étant entraînée dans une histoire métamorphique complexe, la partie ligure en restant indemne.

L'hypothèse des plaques reste cependant d'application difficile dans le détail des Alpes occidentales. Le mécanisme de remontée rapide des matériaux amenés en subduction est peu clair.

Par ailleurs des paragenèses de haute pression et de basse température sont connues non seulement

dans la zone piémontaise, mais aussi dans le socle et le Permien de la zone briançonnaise interne (entre autres la zone d'Acceglio : **observation d'A. Michard**), où la couverture sédimentaire comprend le Paléocène sans discordance angulaire notable. Il semblerait donc que les différentes phases du métamorphisme alpin — y compris la première, celle à jadéite + quartz — y soient exclusivement tertiaires.

Les différentes phases alpines de métamorphisme des Alpes occidentales ont donc été de caractères différents suivant les régions et mènent à une complexité qui, ainsi que l'a souligné **E. Niggli** en conclusion, exigera encore l'application de nombreuses méthodes et le travail commun de chercheurs de diverses spécialités.

BIBLIOGRAPHIE

- APRAHAMIAN (J.) (1974). — La cristallinité de l'illite et les minéraux argileux en bordure des massifs cristallins externes de Belledonne et du Pelvoux (Variations et relations possibles avec des événements tectoniques et métamorphiques alpins) (*Géol. Alpine*, t. 50, p. 5-15).
- ARTRU (Ph.) (1972). — Les terres noires du bassin rhodanien (*Thèse*, Lyon, 181 p.).
- ARTRU (Ph.), DUNOYER DE SEGONZAC (G.), COMBAZ (A.) et GRAUD (A.) (1969). — Variations d'origine sédimentaire et évolution diagénétique des caractères palynologiques et géochimiques des Terres noires jurassiques en direction de l'arc alpin (France, Sud-Est) (*Bull. Centre Rech. Pau - S.N.P.A.*, t. 3, p. 357-376).
- BARBIER (R.) et DEBELMAS (J.) (1966). — Réflexions et vues nouvelles sur la zone subbriançonnaise au N du Pelvoux (Alpes occidentales) (*Trav. Lab. Géol. Grenoble*, t. 42, p. 97-107).
- BEARTH (P.) (1962). — Versuch einer Gliederung alpin-metamorpher Serien der Westalpen (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 42, p. 127-137).
- (1967). — Die Ophiolithe der Zone von Zermatt-Saas Fee (*Beitr. geol. Karte Schweiz*, n. F. 132, 130 p.).
- (1973). — Gesteins- und Mineralparagenesen aus den Ophiolithen von Zermatt (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 53, p. 299-334).
- BOCQUET (J.) (1971). — Cartes de répartition de quelques minéraux du métamorphisme alpin dans les Alpes franco-italiennes (*Ecol. geol. Helv.*, t. 64, p. 71-103).
- (1974). — Blue amphiboles of the Western Alps. Chemistry and physical characters (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 54, sous presse).
- BOCQUET (J.), DAL PIAZ (G.V.), HUNZIKER (J.C.), MARTINOTTI (G.) et PÉCHER (A.) (sous presse). — Les Alpes occidentales. Carte zonéographique d'Europe (Unesco, Paris, Leiden).
- BOCQUET (J.), DELALOYE (M.), HUNZIKER (J.C.) et KRUMMENACHER (D.) (1974). — K-Ar and Rb-Sr radiometric dating of blue amphiboles, micas, and associated minerals from the Western Alps (*Contr. Mineral. Petrol.*, p. 425-448).
- CARON (J.-M.) (1974). — Rapports entre diverses « générations » de lawsonite et les déformations dans les Schistes lustrés des Alpes cottiennes septentrionales (France et Italie) (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 16, p. 255-263).
- CARON (J.-M.), SCHUMACHER (F.) et TRICART (P.) (1973). — Chronologie comparée des déformations dans trois secteurs des Schistes lustrés piémontais (Alpes cottiennes, France et Italie) (*Réun. ann. Sc. Terre*, Paris, p. 118).
- CHATTERJEE (N.D.) (1971). — Phase equilibria in the Alpine metamorphic rocks of the environs of the Dora-Maira Massif, Western Italian Alps (*N. Jb. Miner., Abb.*, t. 114, p. 181-245).

- CHIESA (S.), LIBORIO (G.), MOTTANA (A.) et PASQUARÈ (G.) (1972). — La paragonite nei calcescisti delle Alpi : distribuzione e interpretazione geo-petrologica (*Mem. Soc. geol. Ital.*, t. 11, p. 1-30).
- CHIESA (S.), LIBORIO (G.), MOTTANA (A.) et PASQUARÈ (G.) (1974). — The Alpine « Calcescisti » in a section from Val Germanasca to Queyras (Italy and France). I, Stratigraphy and areal geology. II, Mineralogy and petrology (sous presse).
- DAL PIAZ (Gb.) (1928). — Geologia della catena Herbetet - Grivola - Grand Nomenon (*Mem. Ist. Geol. Univ. Padova*, t. 7, 83 p.).
- DAL PIAZ (G.V.) (1971). — Nuovi ritrovamenti di cianite alpina nel cristallino antico del Monte Rosa (*Rend. Soc. Ital. Miner. Petrol.*, t. 27, p. 437-477).
- (1974 a). — Le métamorphisme éoalpin de haute pression et basse température dans l'évolution structurale du bassin ophiolitique alpino-apenninique. 1^{re} partie : considérations paléogéographiques (*Boll. Soc. Geol. Ital.*, sous presse).
- (1974 b). — Le métamorphisme éoalpin de haute pression et basse température dans l'évolution structurale du bassin ophiolitique alpino-apenninique. 2^e partie (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 54, sous presse).
- DAL PIAZ (G.V.), GOSSO (G.) et MARTINOTTI (G.) (1971). — La II Zona Diorito-kinzigitica tra la Valsesia e la Valle d'Ayas (Alpi occidentali) (*Mem. Soc. geol. Ital.*, t. 10, p. 257-276).
- DAL PIAZ (G.V.), HUNZIKER (J.C.) et MARTINOTTI (G.) (1972). — La zone Sesia-Lanzo e l'evoluzione tettonico-metamorfica delle Alpi nordoccidentali interne (*Mem. Soc. geol. Ital.*, t. 11, p. 433-460).
- DUNOYER DE SEGONZAC (G.) (1969). — Les minéraux argileux de la diagenèse. Passage au métamorphisme (*Mém. Serv. Cart. géol. Alsace-Lorraine*, n° 29, 317 p.).
- DUNOYER DE SEGONZAC (G.), ABBAS (M.) et LEMOINE (M.) (1974). — Métamorphisme des argiles dans le Rhétien des Alpes sud-occidentales. Minéralogie et géochimie (*Sc. géol. Strasbourg*, t. 27, f. 4, sous presse).
- DURNEY (D.W.) (1974). — Relations entre températures d'inclusions fluides et minéraux métamorphiques dans les nappes helvétiques du Valais (*Bull. Soc. géol. Fr.*, t. 16, p. 269-272).
- ELLENBERGER (F.) (1958). — Etude géologique du pays de Vanoise (*Mém. explic. Carte géol. Fr.*, 561 p.).
- ERNST (W.G.) (1971). — Metamorphic zonations on presumably subducted lithospheric plates from Japan, California and the Alps (*Contr. Mineral. Petrol.*, t. 34, p. 43-59).
- (1973). — Interpretative synthesis of metamorphism in the Alps (*Geol. Soc. Amer. Bull.*, t. 84, p. 2053-2088).
- FREY (M.) et NIGGLI (E.) (1972). — Margarite, an importante rock-forming mineral in regionally metamorphosed low-grade rocks (*Naturwiss.*, t. 59, p. 214).
- FREY (M.), HUNZIKER (J.C.), ROGGWILLER (P.) et SCHINDLER (C.) (1973). — Progressive niedriggradige Metamorphose glaukonitführender Horizonte in den helvetischen Alpen der Ostschweiz (*Contr. Mineral. Petrol.*, t. 39, p. 185-218).
- GASTALDI (G.B.) (1875). — Sulla cossaite, varietà sodica di oncosite (*Atti R. Accad. Sc. Torino*, t. 10, p. 189-197).
- GAY (M.) (1970). — Le massif d'Ambin et son cadre de Schistes lustrés (Alpes franco-italiennes). Evolution paléogéographique antéalpine (*Bull. B.R.G.M.*, sec. I, 1^{re} sér., n° 3, p. 5-81).
- GOFFÉ (B.), GOFFÉ-URBANO (G.) et SALIOT (P.) (1973). — Sur la présence d'une variété magnésienne de ferrocarpholite en Vanoise (Alpes françaises). Sa signification probable dans le métamorphisme alpin (*C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 277 (D), p. 1965-1968).
- HUNZIKER (J.C.) (1974). — Rb-Sr and K-Ar age determination, and the Alpine tectonic history of the Western Alps (sous presse).
- JAEGER (E.) (1973). — Die alpine Orogenese im Lichte der radiometrischen Altersbestimmung (*Eclogae geol. Helv.*, t. 66, p. 11-21).
- KIENAST (J.-R.) et VELDE (B.) (1970). — Le métamorphisme alpin dans les Alpes franco-italiennes : mise en évidence d'un gradient de température et de pression (*C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 271 (D), p. 637-640).
- IADURON (D.) et MERLYN (M.) (1974). — Evolution structurale et métamorphique de l'antiforme de Vanzone - zone Mont-Rose, zone d'Antrona et complexe Camughera-Moncucco (Alpes penniques italiennes) (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 16, p. 264-265).
- LEFÈVRE (R.) (1974). — Microanalyse par émission ionique secondaire d'un pyroxène jadéitique d'âge alpin de la bande d'Acceglio (Alpes cottiennes italiennes) (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 16, p. 248-254).
- LIBORIO (G.) et MOTTANA (A.) (1973). — I carbonati dei Calcescisti in relazione alla distribuzione delle temperature metamorfiche alpine (*Rend. Soc. Ital. Miner. Petrol.*, t. 29, p. 43-80).
- MARTINI (J.) et VUAGNAT (M.) (1970). — Metamorphose niedrigst temperierten Grades in den Westalpen (*Fortschr. Miner.*, t. 47, p. 52-64).
- NIGGLI (E.) (1960). — Mineral-Zonen der alpinen Metamorphose in den Schweizer Alpen (*Int. Geol. Congr.*, XXI sess. Copenhague, t. 13, p. 132-138).

- (1961). — Bemerkungen zur tertiären regionalen Metamorphose in den Schweizer Alpen (*N. Jb. Miner.*, t. 96, p. 234-235).
- (1970). — Alpine Metamorphose und alpine Gebirgsbildung (*Fortschr. Mineral.*, t. 47, p. 16-26).
- NIGGLI (E.) et NIGGLI (C.R.) (1965). — Karten der Verbreitung einiger Mineralien der alpidischen Metamorphose in den Schweizer Alpen (*Eclogae geol. Helv.*, t. 58, p. 335-368).
- PÉCHER (A.) et VIALON (P.) (1974). — Métamorphismes, clivages schisteux, spilites et dérivés, dans le cadre pétrostructural des massifs cristallins du haut Dauphiné et de leur couverture (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 16, p. 266-268).
- VON RAUMER (J. F.) (1971). — Das Mont-Blanc-Massiv-Alt-kristallin im Bereich schwacher alpiner Metamorphose (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 51, p. 193-225).
- (1974). — Zur Metamorphose amphibolitischer Gesteine im Alt-kristallin des Mont-Blanc- und Aiguilles-Rouges-Massivs (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 54, sous presse).
- SASSI (F.P.), SCOLARI (A.), BOCQUET (J.) et DAL PIAZ (G.V.) (1974). — L'utilité de la mesure de b_0 dans l'étude des ensembles métamorphiques. Application aux Alpes occidentales (sous presse).
- SAWATZKI (G.) et VUAGNAT (M.) (1971). — Sur la présence du faciès à zéolite dans les grès de Taveyenne du synclinal de Thônes (Haute-Savoie, France) (*C. R. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, t. 6, p. 69-79).
- TRÜMPY (R.) (1960). — Paleotectonic evolution of the Central and Western Alps (*Geol. Soc. Amer. Bull.*, t. 71, p. 843-908).
- (1973). — L'évolution de l'orogénèse dans les Alpes centrales : interprétation des données stratigraphiques et tectoniques (*Eclogae geol. Helv.*, t. 66, p. 1-10).
- VELDE (B.) et KIENAST (J.-R.) (1973). — Zonéographie du métamorphisme de la zone de Sesia-Lanzo (Alpes piémontaises) : étude des omphacites et grenats des micaschistes éclogitiques à la microsonde électronique (*C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 276 (D), p. 1801-1804).
- VIALON (P.) (1974). — Les déformations « synschisteuses » superposées en Dauphiné. Leur place dans la collision des éléments du socle préalpin. Conséquences pétrostructurales (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 54, sous presse).
- WENK (E.) (1962). — Plagioklas als Indexmineral in den Zentralalpen (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, t. 42, p. 139-152).

Manuscrit déposé le 7 février 1974.