

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PÉTROGÉNÉTIQUE  
DES FACIÈS MÉTAMORPHIQUES :  
LA DIVERSITÉ DES VALEURS  
DES GRADIENTS GÉOTHERMIQUES (\*)

par C. FELIX (\*\*)

(1 figure dans le texte)

RÉSUMÉ

L'auteur montre que des faciès métamorphiques, isochimiques ou non, très dissemblables en ce sens qu'ils correspondent à des conditions P-T de genèse différentes, peuvent parfaitement coexister, et par conséquent s'intégrer, dans une même zone bathymétrique P-T symptomatique d'un gradient géothermique ayant une valeur bien déterminée, mais avec laquelle ils n'ont apparemment aucune affinité.

Soulignant l'incidence que le choix du mode d'expression de la variable thermodynamique P peut avoir sur la formulation de la valeur d'un gradient géothermique, il est amené à distinguer des gradients géothermiques réels (°C/unité de profondeur) et des gradients géothermiques conventionnels (°C/unité de pression hydrostatique expérimentale).

L'auteur conclut, dans le cas des terrains cristallophylliens,

1° que les faciès, et séries de faciès métamorphiques, de forte ( $P(P_{\text{exp}}) > P_l$ ) et de faible ( $P(P_{\text{exp}}) < P_l$ ) pressions ne sont pas nécessairement symptomatiques de gradients géothermiques réels de valeurs respectivement faibles et élevées (ces faciès sont figurés alors dans le champ P-T du métamorphisme régional par des gradients géothermiques conventionnels);

2° que, hormis le cas des séries de faciès métamorphiques de haute température ( $P(P_{\text{exp}}) = P_l$ ), symptomatiques de gradients géothermiques réels, locaux ou régionaux, de valeurs élevées, la notion de variabilité de P lors du métamorphisme régional, apparaît plus importante et plus réelle que celle de variabilité des valeurs des gradients géothermiques.

I. INTRODUCTION

L'influence des paramètres température et pression sur les équilibres minéralogiques en général, et sur la stabilité des associations minéralogiques en particulier, est connue depuis longtemps.

L'interdépendance minéralogie — conditions physico-chimiques (chimisme originel, température et pression) a d'ailleurs servi de base, partant de la notion d'équilibre, à différents concepts, tels ceux de faciès métamorphiques (P. ESKOLA,

(\*) Communication présentée le 14 décembre 1971. Manuscrit déposé le 16 décembre 1971.

(\*\*) Université de Liège, Laboratoire de Géologie et de Pétrologie, place du Vingt-Août 7, B-4000 Liège.

1915, 1939), de séries de faciès métamorphiques (A. MIYASHIRO, 1961) et de lignées métamorphiques (E. DEN TEX, 1965, 1971).

On considère ainsi, en toute logique, que les associations minéralogiques stables réalisées dans les schistes cristallins représentent un état d'équilibre thermodynamique, et on figure en conséquence leurs domaines de stabilité en fonction des seules variables thermodynamiques température et pression — pression totale, pressions partielles, ... — (pour autant bien sûr que la composition chimique globale des roches reste constante).

On admet en outre généralement que ces variables T et P sont liées entre elles par une relation simple biunivoque appelée loi du degré géothermique.

La seule incertitude qui subsiste alors, et elle est importante, est celle qui consiste à savoir si le degré géothermique garde une valeur constante d'un domaine métamorphique à un autre (voire même parfois dans un domaine unique) ou si, au contraire, chaque terrain métamorphique est caractérisé par un degré géothermique bien déterminé mais différent de celui d'autres domaines cristallins.

Certains auteurs estiment que le métamorphisme reste avant tout déterminé, dans la majorité des cas, par des valeurs normales du degré géothermique soit, approximativement, par un accroissement de température de 1°C par 30 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique de  $\pm 30^\circ\text{C}/\text{Km}$ .

D'autres pensent au contraire que la valeur du gradient géothermique peut essentiellement varier d'un domaine à un autre lors du métamorphisme régional.

A. MIYASHIRO (1961, 1968) et E. DEN TEX (1965, 1971) sont sans doute les auteurs qui, au cours de ces 10 dernières années, ont le plus clairement développé cette notion de variabilité des valeurs des gradients géothermiques lors des phénomènes orogéniques, et celle résultante de subdivision du métamorphisme régional en divers types correspondant à chacune de ces valeurs.

Elle signifie explicitement que chaque orogène est caractérisé, lors de son évolution, par un certain gradient géothermique et que, à un gradient géothermique déterminé, correspond une série de faciès métamorphiques, ou une lignée métamorphique, symptomatique de celui-ci, et donc de sa valeur propre.

L'adoption de cette hypothèse de travail, et le développement qu'elle a reçu dans les études pétrologiques récentes, ont entraîné plusieurs constatations ou conséquences qui sont souvent considérées aujourd'hui comme des évidences (voir aussi H. G. F. WINKLER, 1965).

1) Il n'y a pas, ainsi qu'on l'a longtemps supposé, de gradient géothermique de valeur « normale » ou « standard » (qui serait celui correspondant par exemple à la séquence définie par BARROW :  $\pm 30^\circ\text{C}/\text{Km}$ ).

2) La diversité des valeurs des gradients géothermiques met souvent en exergue le rôle déterminant joué par la pression lors du métamorphisme (le domaine des températures couvert par les différentes séries de faciès métamorphiques est en effet pratiquement le même quel que soit le type de gradient envisagé).

3) Enfin, dans tous les cas, on peut parler de gradients géothermiques régionaux, c'est-à-dire capables d'engendrer des associations minéralogiques stables à l'échelle régionale (faciès métamorphiques régionaux).

Bien que deux au moins de ces constatations (rôle prédominant de la pression et utilisation du faciès métamorphique en tant que valeur régionale du métamorphisme) se trouvent infirmées, dans la nature, par des exceptions significatives, il

n'entre pas dans notre propos de négliger ni l'utilité, ni l'exactitude de cette notion de variabilité des valeurs des gradients géothermiques en tant que concept aidant à la compréhension d'un phénomène; mais nous voulons plutôt la situer, ou la resituer, dans son propre contexte, qui est un contexte physico-chimique pouvant être très différent de la «réalité géologique», et souligner ainsi les divergences, voire les contradictions, inhérentes à ces deux points de vue.

## II. LES PARAMÈTRES TEMPÉRATURE ET PRESSION EN GÉOLOGIE

Le métamorphisme est avant tout un processus d'évolution géologique, c'est-à-dire un processus traduisant l'évolution d'un certain domaine de l'écorce terrestre.

La systématisation excessive des résultats et des effets de ce phénomène complexe ne saurait donc toujours être conforme aux évidences physico-chimiques qui, elles, ne font que traduire un certain degré, ou un certain stade, dans l'aboutissement de cette évolution géologique.

Il est vrai en effet que la pétrologie se trouve, depuis une vingtaine d'années, largement ouverte et aidée par les recherches des physico-chimistes.

C'est là, de toute évidence, un aspect très important de la compréhension pétrogénétique du métamorphisme. Il ne doit toutefois pas éloigner le géologue de ses préoccupations essentielles, à savoir l'étude d'un phénomène géologique en tant que tel plutôt que dérivant simplement de processus physico-chimiques complexes, ou s'assimilant purement à ceux-ci.

Il ne faut pas perdre de vue que, si le géologue définit une roche en fonction de sa genèse par des critères minéralogiques, texturaux et structuraux, c'est parce que ces trois caractères sont non seulement pétrographiquement et génétiquement indissociables, mais aussi parce qu'ils sont symptomatiques des conditions régnant dans le milieu générateur, tant conditions physico-chimiques (compositions chimiques, conditions T-P), que cinématiques (déformations, plissements, ...).

Ces constatations, tellement évidentes, sont pourtant fréquemment négligées : c'est particulièrement vrai et regrettable dans le cas des roches métamorphiques qui sont presque exclusivement définies par, et en fonction de, leur faciès minéralogique (appelé aussi faciès métamorphique) ou par l'association de plusieurs de ces faciès (séries et lignées).

Il faut noter à ce propos que les compositions ou associations minéralogiques des roches métamorphiques, fussent-elles représentatives d'un état d'équilibre thermodynamique, ne peuvent en aucun cas suffire à définir des faciès métamorphiques, et à fortiori des types de métamorphisme, si on désire les utiliser comme entités géologiques.

Si l'on agit ainsi, on en arrive à des aberrations et, dans tous les cas, à des classifications qui n'ont plus aucune signification géologique.

Deux cas sont typiques :

1) celui qui consiste à ranger le métamorphisme thermique de contact dans une série de faciès métamorphiques de faible pression et qui, de la sorte, fait fi des processus complexes pouvant intervenir lors de l'évolution géologique (intrusions magmatiques syncinématiques, post-cinématiques...).

2) celui, plus aberrant encore, qui consiste à ranger dans un même faciès métamorphique (glaucofane-lawsonite faciès par exemple) des schistes cristallins, des

sédiments et roches magmatiques n'ayant subi eux qu'un début de recristallisation (« burial metamorphism » par exemple).

Il s'agit certes là de roches qui, dans tous les cas, ont pu prendre naissance dans les mêmes conditions physico-chimiques ( $P_t$ ,  $P_{H_2O}$ ...,  $T$ ) (c'est du moins ce que laissent supposer les investigations expérimentales) et qui présentent par conséquent la même association minéralogique (même faciès métamorphique) : mais il est tout aussi évident que ces roches n'ont pas connu la même évolution géologique et ne sont donc pas identifiables, ni même comparables.

En tenant compte de ces remarques, on peut constater que la systématisation excessive des aboutissants des processus géologiques ne peut qu'accroître la difficulté de leur interprétation.

Les exemples suivants montrent bien le caractère multiforme de ces processus d'évolution.

A. W. P. de ROEVER et H. J. NIJHUIS (1963) ont appelé « plurifacielles » des roches qui montrent plus d'un faciès métamorphique sans pour autant qu'elles soient polymétamorphiques.

Ces schistes cristallins plurifaciels expriment typiquement l'évolution géologique, en ce sens qu'ils traduisent un changement des conditions physiques  $T$  ou  $P$  (à chimisme originel égal et constant) lors du métamorphisme régional, c'est-à-dire lors de l'évolution géologique-métamorphique (lors du plissement par exemple).

A quel faciès métamorphique doit-on, dans ce cas précis et fréquent (notamment lors du métamorphisme de roches basiques) de métamorphisme plurifaciel, attribuer pareilles formations cristallophylliennes, sinon à celui qui correspond au faciès régional, c'est-à-dire au gradient géothermique régional ? (voir par exemple l'association fréquente, mais locale, de roches à glaucophane avec des schistes verts : green-schist facies ou glaucophane — schist facies?).

B. A. MIYASHIRO (1961, p. 280) écrit à propos de la « série de faciès métamorphiques du type Andaloussite-Sillimanite » (série du type Abukuma, ou série de faciès de basse pression) : « The contact metamorphism by synkinematic intrusions in the terrain produced the same type of metamorphic facies series, though the highest grade of the contact metamorphism reached may be regarded as a part of the granulite facies, since orthopyroxene was formed there ».

Nous avons nous-même montré (C. FELIX, 1968) que l'évolution de micaschistes, et de certaines intercalations amphiboloschisteuses, dans une zone géométamorphique profonde (mésozone), compliquée par l'intrusion syncinématique d'un magma gabbroïque (= surimposition d'un métamorphisme thermique local à un métamorphisme orogénique régional) se marquait par la coexistence de sous-faciès appartenant apparemment à des séries ou lignées métamorphiques distinctes (coexistence des sous-faciès B 2.1, B.2.2, A.2.1 et A.2.2 — subdivision de H. G. F. WINKLER 1965).

Ce cas de *métamorphisme plurifaciel*, que l'on peut comparer dans les faits à la remarque de A. MIYASHIRO figurant ci-dessus, montre bien que la subdivision du métamorphisme régional en séries de faciès métamorphiques symptomatiques de certaines valeurs du gradient géothermique peut être factice à l'échelle d'un orogène.

C. J. R. CARPENTER (1968) a montré que, lors de l'évolution métamorphique dans une zone bathymétrique bien définie ( $P_t$  —  $T$  constants) différents faciès métamorphiques pouvaient faire leur apparition (dans des roches de même composition chimique — basaltes) comme seule conséquence de l'existence de gradients de pression « brought on by folding in the course of regional metamorphism » (p.173).

Suivant l'auteur, ces gradients de pression provoquent des migrations d'eau; et la concentration de celle-ci dans les têtes des plis est responsable de faciès métamorphiques locaux, à assemblages minéralogiques plus hydratés (association chlorite-albite) que ceux observés sur les flancs des plis (association hornblende-oligoclase).

D. Dans un ordre d'idées tout à fait comparables, N. FRY and W. S. FYFE (1969, p. 5) concluent une publication consacrée aux écolites par une constatation d'une importance exceptionnelle : « The important thing now is that we recognise wet and dry equivalents of metamorphism at the same  $P_{load}$  and T or metamorphism where total pressure and water pressure are significantly different ».

Ces auteurs notent en outre (p. 4) : « Our conclusion is that crustal eclogites form in dry environments where  $P_{load} > P_{H_2O}$  ». Dans ces conditions, la genèse des écolites ne requiert d'ailleurs pas des pressions ( $P_l$ ) très élevées.

E. Enfin, dans un travail préliminaire consacré à l'étude des schistes cristallins à glaucophane de l'île de Groix, nous avons montré (C. FÉLIX, 1969) que la coexistence de deux faciès métamorphiques distincts, l'un glaucophanique, l'autre prasinique (green-schists), contemporains tous deux de la déformation majeure et primaire en pli couché, n'était que l'expression de conditions physiques particulières régnant lors de la formation de ce pli couché.

Le faciès à glaucophane n'a constitué en effet qu'un « accident local » dans l'évolution régionale, normale, des roches dans le « green-schist facies ».

Dans le temps, et au cours d'une même phase orogénique, ces deux faciès ont alors évolué simultanément vers des états potentiellement (thermodynamiquement) identiques, caractérisés par l'association chlorite-albite.

L'étude détaillée de ces faits, qui est encore en cours, confirme pareille *évolution différentielle* dans des mêmes conditions  $P_l - T$  régionales : le gradient géothermique régional est de valeur « normale », tandis que les faciès à glaucophane expriment une anomalie locale des valeurs de la pression ( $P > P_l$ ), et non un gradient géothermique de valeur faible.

De plus, comme l'évolution géologique s'est poursuivie jusqu'à « l'annulation de cette surpression », les roches à glaucophane sont plurifacielles, et le dernier faciès minéralogique porté par ces roches est ainsi identique à celui des autres roches dont l'évolution n'a pas été influencée par cette surpression (association albite-chlorite).

Ces exemples nous permettent déjà de tirer deux conclusions assez significatives concernant les conditions d'évolution des roches métamorphiques.

1°) *Les variables thermodynamiques T et P ne sont pas nécessairement univoques lors des processus métamorphiques.*

Il est clair en effet que, dans une zone bathymétrique  $P_l - T$  bien définie, le déroulement du métamorphisme est susceptible d'être perturbé soit directement par des événements extérieurs à l'évolution métamorphique proprement dite (intrusions magmatiques syncinématiques par exemple, cas B page 200), soit au contraire par des fluctuations internes, consécutives aux modalités complexes de cette évolution (influence des pressions partielles, cas D page 201, effet de « surpression » tectoniques ou autres, cas E page 201 — voir aussi à ce propos W. R. W. RUTLAND, 1965), mais qui, dans tous les cas, sont responsables de variations des valeurs T ou P.

2°) *Lorsque l'on compare les conditions P — T de genèse de faciès métamorphiques isochemiques, il importe de formuler l'isochimisme en termes précis, en tenant compte*

notamment du rôle, et de l'influence, quantitatif des constituants dits mobiles tels que  $H_2O$  et  $CO_2$ .

Cet aspect quantitatif du comportement des constituants mobiles est souvent négligé. Pourtant, il est certainement aussi important (voir cas C et D, pages 200-201) à préciser que le précédent (composition de la phase fluide et rôle des pressions partielles).

On pourrait le résumer en disant que, dans une zone bathymétrique  $P_l - T$  bien définie, différents faciès métamorphiques isochimiques — *sauf en ce qui concerne  $H_2O$  par exemple ou tout autre constituant mobile*, — caractéristiques de conditions  $P - T$  différentes, peuvent parfaitement coexister, chacun d'eux représentant d'ailleurs un état d'équilibre.

On comprend ainsi que l'interprétation géologique des conditions  $P - T$  de genèse de certains faciès métamorphiques puisse poser des problèmes complexes et surtout que, d'un cas à l'autre, l'explication puisse être totalement différente, voire contradictoire.

En réalité, les deux conclusions ou constatations précédentes indiquent sans ambiguïté qu'un faciès métamorphique ne constitue jamais une entité géologique complète, mais au contraire un chaînon qui ne peut être ni séparé de son contexte géologique, ni étudié seul. Il est dans tous les cas insuffisant à traduire un type de métamorphisme.

Des faciès métamorphiques, isochimiques ou non, très dissemblables en ce sens qu'ils correspondent à différentes conditions  $P - T$  de genèse, peuvent ainsi parfaitement coexister dans une même zone bathymétrique bien déterminée, et par conséquent s'intégrer dans un même et seul domaine métamorphique symptomatique d'un gradient géothermique ayant une valeur avec laquelle ils n'ont apparemment aucune affinité (métamorphisme plurifaciel par exemple, cas A et E pages 200-201).

Sans mettre en doute à priori l'existence d'une diversité des valeurs du gradient géothermique lors des phénomènes orogéniques, et la subdivision conséquente du métamorphisme régional en séries de faciès métamorphiques, ou lignées métamorphiques, on peut se demander s'il n'y a pas une exagération quant à la signification génétique attribuée à ce concept.

On constatera d'ailleurs de façon tout à fait objective que si ce concept est parfaitement plausible, il ne résoud pas tous les problèmes, loin s'en faut.

### III. LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE :

#### LES CAUSES POSSIBLES DE DIVERSIFICATION DE SA VALEUR

Dans les paragraphes qui suivent, nous admettrons d'ailleurs cette diversité des valeurs des gradients géothermiques et nous essaierons de définir dans quelle mesure elle est susceptible d'éclairer le géologue dans l'interprétation de la genèse d'un certain faciès, ou d'une certaine série de faciès métamorphiques, mais aussi dans quelle mesure elle peut l'écarter de la réalité.

C'est donc exclusivement dans ce sens, et en adoptant un schéma théorique relatant des éventualités, que nous essaierons d'interpréter les données récentes relatives à la subdivision du métamorphisme régional en séries de faciès métamorphiques, ou lignées métamorphiques, ainsi que les études expérimentales qui leur servent de base.

Toutefois, avant d'envisager la variabilité des valeurs des gradients géother-

miques, il nous paraît utile de préciser ce que représente la variable thermodynamique  $P$  en géologie.

A. *Les différents modes d'expression de la variable thermodynamique  $P$ . Leur incidence sur la formulation des valeurs des gradients géothermiques.*

Dans la littérature pétrologique, il est fréquent, sinon banal, de confondre implicitement la notion de pression  $P$  en tant que variable thermodynamique du métamorphisme avec celles jugées équivalentes de profondeur (ou zone bathymétrique de l'évolution métamorphique, ou encore zone géométamorphique), de pression lithostatique  $P_l$  et de pression expérimentale  $P_{\text{exp}}$  (= pression déduite des expériences en laboratoire).

En réalité, il s'agit là de choses différentes, et il est assez facile de le montrer sans pour autant devoir recourir à toute la précision qu'exigeraient la définition et l'étude du paramètre complexe que constitue la pression en géologie.

Il est possible d'envisager ce problème de la pression en se plaçant à deux points de vue.

1°) *Le point de vue théorique :  $P = P_l$ .*

On peut admettre, ainsi qu'on le fait généralement, que, lors du métamorphisme, les transformations minéralogiques se trouvent placées sous la dépendance de la pression lithostatique  $P_l$ . Ceci revient à dire que, dans ce cas, la variable thermodynamique  $P$  s'identifie à  $P_l$  et donc à la notion de profondeur.

On assimile en effet aisément l'une à l'autre les notions de profondeur et de pression lithostatique  $P_l$ , puisque celle-ci n'est que la résultante du poids de la colonne de matériaux rocheux située au-dessus du point, ou profondeur, où on la mesure.

2°) *Le point de vue pratique :  $P = P_{\text{exp}}$ .*

En pratique toutefois, puisque la pression lithostatique ne peut pas être mesurée, et même rarement estimée, on considère plutôt que la variable thermodynamique  $P$  est la grandeur, ou valeur, déduite des expériences en laboratoire ( $P = P_{\text{exp}}$ ).

Cette grandeur  $P_{\text{exp}}$  s'exprime alors par une pression hydrostatique, généralement une pression fluide  $P_f$  qui, dès lors, ne s'identifie pas nécessairement avec la pression lithostatique  $P_l$ , ni à fortiori avec la profondeur.

Il est bien sûr théoriquement possible de rechercher les liens unissant ces différentes formes de la variable thermodynamique  $P$ , notamment  $P_l$  et  $P_f$ . Mais, si l'on considère les résultats qu'a pu apporter la confrontation des points de vue théorique et pratique, on est obligé de constater que ces corrélations ne sauraient être que des compromis plus ou moins conformes, suivant les cas, à la réalité.

L'existence de faciès et de séries de faciès métamorphiques dits de forte pression exprime d'ailleurs à elle seule l'utilité pratique de la distinction qu'il y a lieu de faire entre ces différents modes d'expression du paramètre  $P$ .

Pour expliquer les occurrences de pareils faciès, les géologues sont en effet obligés d'invoquer l'effet de surpressions (tectoniques, fluides, ... voir RUTLAND, 1965) et ce, afin de pallier l'absence totale de concordance entre les valeurs de la pression déduites de l'observation, ou plus exactement des estimations géologiques ( $P_l$ ), et celles obtenues expérimentalement ( $P_{\text{exp}}$ ). Ces surpressions sont d'ailleurs inexplicables objectivement dans la majorité des cas.

3°) *Conclusion.*

La méthode expérimentale constitue sans conteste, à l'heure actuelle, le moyen le plus objectif d'approche des valeurs de la variable thermodynamique  $P$ .

Mais, il faut bien reconnaître que, dans des cas assez fréquents, cette variable  $P_{\text{exp}}$  s'identifie difficilement avec les notions de profondeur et de pression lithostatique.

Il peut donc être erroné de transposer en valeurs géologiques — c'est-à-dire sur une échelle bathymétrique où la pression figurée est une pression lithostatique correspondant à une certaine profondeur — des données expérimentales exprimées en pressions hydrostatiques (pressions fluides —  $\text{PH}_2\text{O}$  par exemple — hydrostatiques).

*Telle qu'elle est utilisée, l'équivalence approximative 1 Km (profondeur et  $P_l$ )  $\simeq$  4Kb ( $P_{\text{exp}}$ ) n'a donc pas toujours de véritable signification géologique.*

C'est pourquoi, dans la définition ou « représentation » d'un certain faciès métamorphique, ou d'une certaine série de faciès métamorphiques, par un gradient géothermique de valeur déterminée, il y a lieu de tenir compte du type d'échelle — géologique ou expérimentale — utilisé.

*On comprend en effet aisément l'incidence que peut avoir sur la formulation de la valeur d'un gradient géothermique le choix du mode d'expression de la variable thermodynamique P qui, suivant les cas, pourra être identifiée à  $P_l$  (profondeur) ou à  $P_{\text{exp}}$ .*

Ainsi, sur une échelle bathymétrique — « grandeur ou valeur géologique » —, où c'est la *profondeur* qui figure en ordonnées, il convient d'exprimer le gradient géothermique en  $^{\circ}\text{C}$  par unité de profondeur; cette profondeur évaluée en Km par exemple correspond, et s'identifie alors réellement à la pression lithostatique (exprimée par exemple en Kb).

Dans ce cas, l'emploi de l'équivalence 1 Km (profondeur)  $\simeq$  4 Kb ( $P_l$ ) est justifié.

C'est ce que nous appellerons un *gradient géothermique réel*.

Par contre, sur une échelle expérimentale, où c'est la *pression* et non plus la profondeur qui figure en ordonnées, le gradient géothermique doit s'exprimer en  $^{\circ}\text{C}$  par unité de pression hydrostatique (généralement  $\text{PH}_2\text{O}$  exprimée en Kb) expérimentale; et, dans ce cas, pour les raisons exposées précédemment, l'utilisation de l'équivalence 1 Km (profondeur)  $\simeq$  4 Kb ( $P_{\text{exp}}$ ) n'est plus nécessairement justifiée (sauf bien sûr si  $P_{\text{exp}} = P_l$ , auquel cas, et seulement alors, ce gradient géothermique peut aussi s'exprimer en  $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ ).

C'est ce que nous appellerons un *gradient géothermique conventionnel*.

*Par conséquent, à moins que  $P_l$  soit, dans tous les cas, identifiable à la variable thermodynamique P telle qu'elle est déduite des expériences ( $P_{\text{exp}}$ ), les gradients géothermiques invoqués pour rendre compte des conditions physiques de l'évolution d'un faciès, ou d'une série de faciès métamorphiques déterminé(e), ne peuvent être que des gradients géothermiques fictifs et conventionnels : ces gradients géothermiques (expérimentaux) ne peuvent s'exprimer qu'en  $^{\circ}\text{C}$  par unité de pression.*

Il ne s'agit là bien sûr que d'une distinction ou discrimination purement théorique puisque, dans la pratique, les seules valeurs numériques de P dont nous puissions disposer sont celles fournies par les études expérimentales.

Elle est néanmoins suffisante pour que l'on puisse se poser la question de savoir si, précisément, les valeurs des gradients géothermiques invoqués dans la subdivision du métamorphisme régional en séries de faciès métamorphiques, ou lignées métamorphiques, sont réelles ou conventionnelles (= imaginaires).

C'est la raison pour laquelle nous envisagerons dans les paragraphes qui suivent les éventualités les plus simples, théoriquement possibles et plausibles, capables



d'engendrer lors des processus d'évolution métamorphique des gradients géothermiques réels de valeurs différentes.

Toutes ces éventualités qui découlent de la définition même du gradient géothermique ne devraient recevoir de confirmations et d'infirmités qu'en fonction de l'observation géologique.

*B. La variabilité des valeurs des gradients géothermiques.*

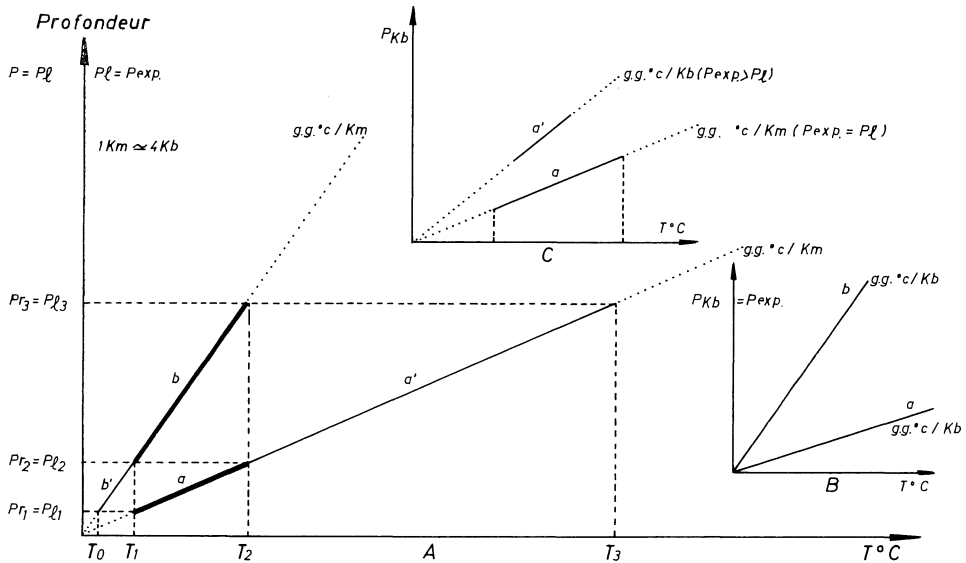
On définit le gradient géothermique comme étant la variation de température par unité de profondeur (°C/Km).

C'est donc uniquement conformément à cette définition que nous utiliserons désormais l'expression de gradient géothermique.

*On ne peut dès lors envisager a priori la variation des valeurs des gradients géothermiques que comme le résultat d'une variation du flux thermique, ou quantité de chaleur traversant les roches, au moment où elles accomplissent leur évolution par les processus métamorphiques.*

Évidemment, ce flux thermique peut éventuellement varier d'un domaine métamorphique à un autre.

Considérons par exemple deux domaines métamorphiques bien définis.



- A. *Échelle géologique ou bathymétrique*  $P_l - T$  : séries de facies métamorphiques de forte (b) et de faible (a) pressions, symptomatiques de gradients géothermiques réels (°C/Km) de valeurs respectivement faibles et élevées.
- B. *Échelle expérimentale*  $P_{\text{exp}} - T$  : a et b sont des g.g. conventionnels représentant respectivement des séries de facies métamorphiques de faible et de forte pressions ( $P_{\text{exp}}$ ), mais sans définir pour autant la zone bathymétrique  $P_l - T$  de l'évolution métamorphique (explication dans le texte).
- C. *Combinaison de A et B* : a figure un g.g. réel ( $P_{\text{exp}} = P_l$ ), et a' une série de facies métamorphiques de forte pression ( $P_{\text{exp}} > P_l$ ) associée à a dans une même zone bathymétrique. On notera ainsi que a', théoriquement symptomatique d'un g.g. de valeur faible, est un g.g. conventionnel.

L'un d'eux est caractérisé, au moment de son évolution métamorphique, par un flux thermique  $f_1$  d'intensité faible, ce qui correspond à un gradient géothermique faible, représenté par la ligne b (Fig. A); l'autre est caractérisé au contraire par un flux thermique  $f_2$  d'intensité supérieure ( $f_2 > f_1$ ) correspondant à un gradient géothermique élevé, représenté par la ligne a (Fig. A).

Une même température  $T_1$  ne peut être réalisée, dans chacun de ces domaines, qu'à des profondeurs  $Pr_1$  et  $Pr_2$  différentes, avec  $Pr_2 > Pr_1$ ; il en résulte naturellement une pression lithostatique  $P_{l_2}$ , correspondant à la profondeur  $Pr_2$ , supérieure à  $P_{l_1}$  régnant à la profondeur  $Pr_1$ .

(Inversément, dans chacun de ces deux domaines, à la même profondeur  $Pr_2$  par exemple, la même pression lithostatique  $P_{l_2}$  correspond à des valeurs différentes  $T_2 > T_1$  de la température).

Si l'on considère ainsi 2 séries de faciès métamorphiques différentes, bien que isochimiques, couvrant dans le champ  $P_l - T$  (Fig. A) un même domaine de températures,  $T_1 - T_2$  par exemple, mais des domaines de pressions ( $P_l$ ) différents, tels que  $P_{l_1} - P_{l_2}$  (série a)  $<$   $P_{l_2} - P_{l_3}$  (série b) on voit qu'il est théoriquement aisé de différencier ces deux séries de faciès métamorphiques par la valeur des gradients géothermiques correspondant à chacune d'elles; la série a (série de faible pression) est symptomatique d'un gradient géothermique de valeur élevée, tandis que la série b (série de forte pression) est symptomatique d'un gradient géothermique de faible valeur.

Ce cas est tout à fait conforme aux concepts de séries de faciès métamorphiques de faible, de moyenne et de forte pressions, de séries intermédiaires de forte et faible pressions (voir A. MIYASHIRO, 1961 et H. G. F. WINKLER, 1965).

Notons toutefois que, pour qu'il en soit bien ainsi, il faut nécessairement que la pression exprimée soit réellement la pression lithostatique (cas idéal où  $P = P_l$ ), grandeur à laquelle se trouve invariablement liée la notion de profondeur. Sinon, les notions de gradients géothermiques faible et élevé n'ont plus de sens (voir la définition du gradient géothermique et ce que nous avons dit de l'incidence du mode d'expression de la variable P sur la formulation des valeurs des gradients géothermiques).

En réalité, le géologue ne connaît les valeurs T et P que par l'expérimentation. Et, comme d'autre part, ces valeurs ne constituent elles-mêmes qu'un aspect de l'estimation des grandeurs réelles T et P, on voit que, pratiquement, les problèmes se posent différemment de ce que nous venons d'évoquer.

En clair, ceci revient à dire qu'une série de faciès métamorphiques telle que b, représentative d'un domaine de pressions élevées, n'est pas nécessairement symptomatique d'un gradient géothermique de valeur faible, ni qu'une série de faciès telle que a, figurée sur le plan P - T par un gradient géothermique de valeur élevée, est caractéristique d'un métamorphisme de faible pression (Fig. B) (voir 1<sup>o</sup> et 2<sup>o</sup> pages suivantes).

Nous insistons particulièrement sur ce point, car il importe avant tout de dissocier ces notions de pression et de variabilité des valeurs des gradients géothermiques : chacune d'elles pose en effet un véritable problème géologique qui doit d'abord être traité comme tel et indépendamment de l'autre, même si à certains moments elles se recouvrent partiellement.

La diversité des valeurs des gradients géothermiques possibles doit ainsi traduire avant toute autre chose un problème de quantité de chaleur (ou flux thermique)

traversant les roches au moment de leur évolution (métamorphique), et non un problème de pression au sens strict du terme.

C'est donc dans ce sens que nous envisagerons une telle pluralité de valeurs.

### 1° Cas des séries de faciès métamorphiques de forte pression.

Dans les lignes qui suivent, nous identifierons désormais la variable thermodynamique  $P$  à  $P_{\text{exp}}$ , puisque celle-ci est la seule valeur numérique dont nous puissions généralement disposer.

Cette identification est tout à fait conforme à la logique des choses, puisque  $P_{\text{exp}}$  exprime indifféremment suivant les cas  $P_l$ ,  $P_f$ , des pressions partielles, ou toute autre forme de la variable thermodynamique  $P$ , même si l'on doit invoquer l'effet de suppressions.

Dans le cas des séries de faciès métamorphiques de forte pression, nous envisageons ainsi deux éventualités : a.  $P(P_{\text{exp}}) = P_l$

$$b. P(P_{\text{exp}}) \neq P_l, \text{ avec } P(P_{\text{exp}}) > P_l.$$

a. Si  $P(P_{\text{exp}}) = P_l$ , autrement dit si les transformations minéralogiques sont réellement placées sous la dépendance de la pression lithostatique, et qu'une série de faciès métamorphiques b (Fig. A) est une série de forte pression lithostatique, alors, celle-ci traduit effectivement un gradient géothermique réel de faible valeur.

*Remarque* : Notons néanmoins que, pour qu'il en soit bien ainsi, il faut encore que cette série couvre un intervalle de températures relativement étroit : on voit en effet sur la figure A que la série a' par exemple, qui couvre le même domaine de pressions lithostatiques que la série b, mais un intervalle plus large  $T_2 - T_3$  de températures supérieures,  $T_2 - T_3 > T_1 - T_2$ , est symptomatique d'un gradient géothermique de valeur élevée.

a'. Réciproquement, si b est un gradient géothermique de valeur faible (= flux thermique d'intensité faible), il est tout à fait logique d'invoquer l'effet de fortes pressions lithostatiques pour que le domaine habituel et normal des températures métamorphiques soit réalisé.

Les faciès métamorphiques de forte pression (lithostatique), symptomatiques de gradients géothermiques de faible valeur, devraient ainsi théoriquement, se trouver dans des zones géométriques relativement profondes.

En réalité, il semble que ces faciès ne soient pas caractéristiques de zones bathymétriques essentiellement plus profondes que celles de la plupart des autres faciès.

Il en est d'ailleurs généralement ainsi des faciès à glaucophane (voir cas E page 201) et des faciès éclogitiques (cas D page 201, voir aussi K. SMULIKOWSKI, 1968), pour ne citer que ces deux cas de faciès de forte pression.

b. Il est sans doute plus logique d'attribuer ces faciès et séries de faciès métamorphiques à l'effet de pressions anormalement élevées (par rapport à  $P_l$ ) plutôt qu'à des valeurs anormalement faibles des gradients géothermiques.

Dans ce cas où  $P(P_{\text{exp}}) \neq P_l$  (ce qui est généralement le cas pour les faciès dits de forte pression où  $P_{\text{exp}} > P_l$ ), une série de faciès métamorphiques de forte pression n'est plus symptomatique d'un gradient géothermique de valeur faible.

Pareille série, telle que b par exemple (Fig. B), exprime alors simplement le fait que, dans un certain domaine de l'écorce terrestre, et à une certaine profondeur — c'est-à-dire sous une certaine pression lithostatique —, la pression en tant que varia-

ble thermodynamique du métamorphisme excède celle  $P_l$  régnant à cette profondeur, sans pour autant que le flux thermique y soit anormalement faible.

Si  $P(P_{\text{exp}}) > P_l$ , une telle série de faciès métamorphiques n'est donc pas une série profonde ou de forte pression lithostatique.

Dans ce cas, ces faciès métamorphiques peuvent se rencontrer dans toute zone bathymétrique, profonde ou peu profonde : ils posent un problème de pression et c'est d'abord ce problème qui doit être résolu afin d'expliquer leur existence et leurs associations avec d'autres faciès « normaux » (voir les cas C, D et E cités pages 200-201, ainsi que W. P. de ROEVER, 1967).

Les faciès et séries de faciès métamorphiques de forte pression expriment donc l'existence, lors du métamorphisme, de pressions anormalement élevées par rapport aux  $P_l$  correspondant à la profondeur (zone bathymétrique) où on les trouve, mais ils n'impliquent nullement une anomalie dans la valeur du gradient géothermique; celui-ci pourrait en effet avoir une valeur réelle identique à celle du gradient  $a$  par exemple (Fig. B).

On observe effectivement dans certains domaines cristallophylliens l'association de faciès métamorphiques de forte pression avec d'autres correspondant à des valeurs normales de la pression (voir cas E, page 201).

Le schéma de la figure C réalise une telle association où, dans une série de faciès  $a$  se glisse(nt) un (ou des) faciès de forte pression représenté(s) par le segment  $a'$ .

Ce schéma est celui avec lequel se trouve fréquemment confronté l'expérimentateur (diagramme  $P_{\text{exp}} - T$ ).

Si les faciès  $a$  correspondent par exemple à la valeur réelle du gradient géothermique, en ce sens qu'ils expriment exactement le lien unissant  $T$  et  $P_l$  (ou profondeur) (cas où  $P_{\text{exp}} = P_l$ ), le (ou les) faciès  $a'$  n'indique(nt) alors qu'une anomalie dans les valeurs de  $P$ . ( $P_{\text{exp}} \neq P_l$ , avec  $P_{\text{exp}} > P_l$ ).

Il est évident que si l'on ne tient pas compte de l'association des faciès observée sur le terrain, on peut considérer que le (ou les) faciès  $a'$  représente(nt) une série de faciès, ou une lignée métamorphique, symptomatique d'un gradient géothermique  $a'$  de valeur inférieure à  $a$ .

En réalité,  $a'$  rapporté à  $a$  n'est qu'un gradient géothermique conventionnel et leurs valeurs ne sont donc pas comparables.

## 2° Cas des séries de faciès métamorphiques dits de faible pression.

La définition de séries de faciès métamorphiques dits de faible pression, au contraire des faciès de forte pression, s'accorde mieux avec la notion de variabilité des valeurs des gradients géothermiques.

Ces faciès et séries de faciès métamorphiques sont en effet ceux qui couvrent dans le champ  $P - T$  un large intervalle de températures correspondant à un intervalle étroit de *pressions relativement faibles* : ils expriment donc théoriquement des valeurs faibles des gradients géothermiques.

a. Si  $P(P_{\text{exp}}) = P_l$ , dans une certaine partie de l'écorce terrestre, quelle que soit la profondeur à laquelle se produise un processus métamorphique, c'est-à-dire quel que soit  $P_l$ , plus le flux de chaleur est intense, plus l'intervalle de températures couvert est large et plus celles-ci sont élevées (dans ce cas, le rôle de la pression devient en quelque sorte presque négligeable vis-à-vis de celui de la température).

Les séries de faciès métamorphiques dits de faible pression ne couvrent ainsi un domaine de pressions lithostatiques relativement faibles que parce qu'ils sont révélateurs de gradients géothermiques de valeur élevée : si le flux thermique est intense, l'intervalle des températures couvert par le métamorphisme (qui, rappelons-le, est pratiquement le même pour les séries de forte et de faible pressions) est ainsi bien sûr réalisé à des profondeurs, et donc à des pressions lithostatiques plus faibles que celles correspondant à un gradient géothermique produit par un flux de chaleur d'intensité moins élevée.

Une série telle que a, qui représente une série dite de faible pression (lithostatique), couvre en effet le même domaine de profondeur et ( $P_l$ ) que la série b' par exemple (Fig. A) qui, elle, appartient théoriquement à une série de forte pression : cette série a n'est donc pas vraiment symptomatique d'un domaine de faible pression, mais bien d'un domaine où le flux thermique est d'intensité particulièrement élevée : elle est donc bien symptomatique d'un gradient géothermique réel de valeur élevée (Fig. A).

Les séries de faciès métamorphiques dits de faible pression ne devraient ainsi théoriquement se trouver que dans des zones relativement supérieures de l'écorce terrestre.

Le métamorphisme thermique de contact, qui est un métamorphisme local et qui ne constitue qu'un cas particulier, satisfait cette condition.

On doit d'ailleurs noter l'identité quasi-totale de ces faciès métamorphiques dits de faible pression avec ceux du métamorphisme thermique de contact (voir cas B page 200), ce qui confirme que l'on doit y voir une influence prépondérante de la température sur la pression.

Il est d'ailleurs possible d'interpréter en termes géologiques simples l'existence de gradients géothermiques de valeur élevée : l'effet d'intrusions magmatiques syncinématiques, soient locales, soient multiples à l'échelle régionale, n'est sans doute pas étranger à la raison d'être de valeurs élevées de l'intensité du flux thermique lors du métamorphisme régional.

C'est d'ailleurs, dans l'état actuel de nos connaissances, l'hypothèse la plus plausible que l'on puisse émettre en ce qui concerne l'existence de ces faciès et séries de faciès dits de faible pression (voir C. FELIX, 1966 et cas B cité page 200).

*Notons toutefois qu'il n'est pas encore permis de « choisir » dans ce cas entre « cause » et « effet ».*

On pourrait en effet parfaitement admettre que c'est l'existence de gradients géothermiques régionaux de valeur élevée qui est la cause de ces manifestations magmatiques syncinématiques, en ce sens qu'elle créerait des conditions favorables à la formation de corps magmatiques (favorables à l'anatexie granitique par exemple) dans des zones bathymétriques relativement peu profondes.

Dans ce cas, les intrusions magmatiques syncinématiques ne constitueraient que le côté visible — l'effet — de processus plus ou moins complexes dont la cause première serait l'intensité élevée du flux thermique.

b. Dans ces séries de faciès métamorphiques dits de faible pression, nous nous devons aussi d'examiner le cas où  $P(P_{\text{exp}}) < P_l$ .

Il est possible en effet que la stabilité et l'existence de certains faciès métamorphiques soit davantage influencée par la valeur de la pression d'un constituant (mobile) de la phase fluide — influence des pressions partielles et par conséquent par la composition de cette phase fluide — plutôt que par  $P_l$  ou par la pression fluide totale (cas où  $P_f = P_l$ ).

Le cas D cité page 201 est un exemple du rôle que peut avoir la pression partielle  $P_{H_2O}$ .

Dans le cas du métamorphisme des roches carbonatées, la valeur de la pression partielle  $PCO_2$  a une influence tout à fait comparable.

On pourrait en dire autant de  $PO_2$ . A. MIYASHIRO (1964, p. 727), discutant les problèmes d'oxydation et de réduction dans la croûte terrestre, note ainsi : « Among the metamorphic reactions that take place with rising temperature, few are independent of oxygen pressure ».

On ne peut donc pas nier l'influence de ces pressions partielles dans les processus métamorphiques.

Mais en fait, ce cas où  $P(P_{exp}) < P_l$  dépasse à lui seul le cadre des faciès et séries de faciès métamorphiques dits de faible pression car, quelles que soient  $P_l$  et  $P_f$ , et par conséquent quel que soit le type de gradient géothermique envisagé, le rôle des pressions partielles n'est jamais négligeable, autrement dit, dans toute zone bathymétrique — profonde ou peu profonde — un faciès métamorphique peut toujours correspondre au cas  $P(P_{exp}) < P_l$ .

Quelle que soit la valeur du gradient géothermique, la figuration (sur le plan  $P - T$ ) des faciès métamorphiques correspondant à la relation  $P(P_{exp}) < P_l$ , comme celle des faciès métamorphiques correspondant à la relation  $P(P_{exp}) > P_l$ , est liée à un gradient géothermique conventionnel.

Ce n'est que dans ce cas où  $P(P_{exp}) < P_l$  que l'on peut sans doute parler à juste titre de faciès métamorphiques de faible pression, puisqu'ils sont, alors seulement, symptomatiques de domaines où la variable thermodynamique  $P$  agissante est inférieure à la pression lithostatique correspondant à la zone bathymétrique dans laquelle ils sont présents.

Mais, en aucun cas, ces faciès ne sont symptomatiques de gradients géothermiques de valeur élevée : leur présence est théoriquement possible dans toute zone bathymétrique, profonde ou peu profonde.

c. On voit ainsi que les séries de faciès métamorphiques correspondant à des gradients géothermiques réels de valeur élevée ne sont pas nécessairement des séries de faible pression.

Les pressions réalisées dans ce cas sont certes inférieures à celles correspondant aux faciès métamorphiques de forte pression par exemple, mais rien n'exclut à priori non plus, par exemple la coexistence de ces deux types de faciès dans une même zone bathymétrique, c'est-à-dire à la même profondeur (et donc à la même  $P_l$ ).

Le vocable de faciès métamorphique de faible pression est donc assez ambigu, car le terme même de faible pression est relatif lorsque l'on désigne des séries de faciès correspondant à un gradient géothermique de valeur élevée.

On pourrait aussi appeler ces faciès de faible pression, des faciès de haute température.

Cette idée n'a d'ailleurs rien d'original puisque, pour désigner ces séries de faciès correspondant à des gradients géothermiques de valeur élevée, A. MIYASHIRO (1961) et E. DEN TEX (1965) utilisent concurremment les expressions respectives de « séries de faciès métamorphiques de faible pression » (Andalusite-Sillimanite type ou encore Abukuma type) et de « lignées de haute température ».

C'est dire assez que l'interprétation de la position de ces séries de faciès métamorphiques dans le champ  $P - T$  peut prêter à confusion.

## IV. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1. En géologie, la variable thermodynamique pression est rarement univoque. On l'identifie suivant les circonstances (et devrait-on écrire, suivant les convenances), soit à la pression lithostatique  $P_l$ , soit à la pression hydrostatique  $P_{exp}$  déduite des expériences en laboratoires et ce, sans connaître exactement leurs relations réciproques. L'incidence du choix  $P_l$  ou  $P_{exp}$  sur la formulation de la valeur du gradient géothermique a pourtant son importance : si  $P = P_l$ , le gradient s'exprime en °C/unité de profondeur, si  $P = P_{exp}$ , il s'exprime par contre en °C/unité de pression (expérimentale).

Étant donné que  $P_{exp}$  constitue à l'heure actuelle la seule valeur numérique dont nous puissions disposer pour représenter la variable thermodynamique  $P$ , nous avons choisi d'identifier celle-ci à  $P_{exp}$ , ce qui nous a amené à considérer 3 cas :

- 1°  $P(P_{exp}) = P_l$
- 2°  $P(P_{exp}) > P_l$
- 3°  $P(P_{exp}) < P_l$

2. Si l'on admet que l'intensité du flux de chaleur traversant les roches lors du métamorphisme varie d'un domaine de l'écorce terrestre à un autre — *cas des domaines cristallophylliens* — et, ainsi, que la pluralité des valeurs des gradients géothermiques constitue une réalité, en ce sens qu'un même intervalle de températures peut être réalisé à des profondeurs différentes, on doit s'attendre à voir *le champ*  $P_l - T$  couvert par des faciès métamorphiques se groupant en séries, ou en lignées, correspondant à ces différentes valeurs des gradients géothermiques.

Le domaine des températures métamorphiques étant en effet assez bien défini et limité, ces séries ou lignées métamorphiques vont ainsi se distinguer les unes des autres par l'intervalle de pressions (lithostatiques) plus ou moins spécifique qu'elles couvrent.

L'existence de faciès et de séries de faciès métamorphiques de faible, de moyenne, de forte... pressions correspondant à des gradients de valeurs respectivement élevée, moyenne, faible... est donc une possibilité théorique parfaitement plausible.

Il ne s'agit pourtant là que d'une possibilité.

La définition même du gradient géothermique exprime en effet une variation de température par unité de profondeur; par conséquent, si le mode d'expression de la variable thermodynamique  $P$  ne répond pas à cette condition, soit par exemple qu'un certain faciès, ou une certaine série de faciès métamorphiques, exprime des valeurs  $P$  différentes de celles  $P_l$  correspondant à la zone géométamorphique (ou profondeur) de ce (ou ces) faciès, il est faux de prétendre à la réciprocité de la correspondance établie ci-dessus entre les différentes valeurs des gradients géothermiques et les séries de faciès métamorphiques, ou lignées métamorphiques, définies par l'intervalle  $P - T$  que ces gradients peuvent représenter :

a. il existe en effet des faciès et des séries de faciès métamorphiques de forte pression qui ne sont pas symptomatiques de gradients géothermiques faibles (ce cas semble même le plus répandu), mais caractéristiques de domaines où la pression atteint des valeurs très élevées, anormalement élevées même par rapport à celles des pressions lithostatiques correspondant à la profondeur où on les trouve ( $P(P_{exp}) > P_l$ ).

b. il peut exister de même des faciès métamorphiques de « faible pression » au

sens où, lors du métamorphisme, l'existence et la stabilité de tels faciès est réglée par la valeur de la pression (pression partielle) *d'un constituant* (mobile) de la phase fluide, plutôt que par  $P_l$  ou par  $P_f$  (pression fluide totale) ( $P(P_{\text{exp}}) < P_l$ ).

Ces faciès métamorphiques, comme les précédents de forte pression-a, ne sont pas symptomatiques de valeurs réelles bien définies des gradients géothermiques : leur existence est théoriquement possible dans toute zone bathymétrique, profonde ou peu profonde.

c. enfin, si certains faciès métamorphiques sont symptomatiques de gradients géothermiques de valeur élevée, ils ne représentent pas nécessairement à proprement parler des zones peu profondes au sens où les pressions (lithostatiques) y seraient anormalement basses au point de différer considérablement de celles généralement réalisées lors des processus métamorphiques dans d'autres faciès (cas des faciès et séries de faciès métamorphiques dits de faible pression ou de haute température).

3. Le fait qu'une valeur déterminée d'un gradient géothermique appelle en principe un certain type de faciès métamorphiques, symptomatiques de cette valeur, mais que la réciproque ne soit pas nécessairement vraie, implique d'une certaine façon une anomalie dont on doit tenir compte.

Il y a lieu de distinguer dans les études pétrologiques, 2 types de gradients géothermiques :

a. *les gradients géothermiques réels*, c'est-à-dire ceux qui répondent exactement à la définition même du gradient géothermique : ils indiquent la variation de température par unité de profondeur et s'expriment en °C/Km.

Par conséquent, tout faciès, toute série de faciès ou toute lignée métamorphique symptomatique, ou correspondant à un tel gradient, peut être caractérisé par des conditions  $P - T$  de genèse qui sont celles de la zone bathymétrique réellement définie par la valeur de ce gradient géothermique ( $P = P_l$ , faciès définis par  $P_l - T$ );

b. *les gradients géothermiques conventionnels* sont ceux qui expriment un certain état particulier des conditions physiques lors des processus métamorphiques, sans répondre à la définition exacte du gradient géothermique. Ils sont conventionnels en ce sens qu'ils consacrent un usage aujourd'hui adopté par la plupart des pétrologues : mais ils sont exceptionnels ou anomaux en ce sens qu'ils établissent un lien entre deux variables  $T$  et  $P(P_{\text{exp}})$  qui, à priori, n'ont que des affinités extraordinaires. Ce sont des gradients géothermiques « expérimentaux » : ils doivent s'exprimer en °C/unité de pression expérimentale.

Dans ce cas, tout faciès, toute série de faciès ou toute lignée métamorphique correspondant à un tel gradient, ou symptomatique de sa valeur, ne peut donc être caractérisé que par des conditions  $P - T$  de genèse qui sont celles définies par la valeur de ce gradient géothermique (faciès définis par  $P_{\text{exp}} - T$ ), mais sans que celle-ci définisse à son tour la zone bathymétrique ( $P_l - T$ ) (cas où  $P(P_{\text{exp}}) \neq P_l$ ).

Les liens entre les valeurs  $P_{\text{exp}}$  et  $P_l$ , ou profondeur, n'étant pas encore, à l'heure actuelle, bien définis (dans le cas bien sûr où l'on constate des anomalies des valeurs de  $P - T$  surpressions par exemple), il est difficile de comparer les gradients géothermiques conventionnels aux gradients géothermiques réels.

*Remarque* : Il serait d'ailleurs intéressant de pouvoir préciser quelles valeurs des gradients géothermiques sont réelles ou autrement dit, dans quelles séries de faciès métamorphiques peut-on admettre l'équivalence  $P_{\text{exp}} = P_l$ .



C'est poser là un problème de pression, et il est difficile d'y répondre.

On peut simplement dire que, puisqu'on admet généralement que les séries de forte pression, et aussi celles de faible pression (cas où  $P(P_{\text{exp}}) > P_l$  et  $P(P_{\text{exp}}) < P_l$ ), sont difficilement conciliables avec les estimations et les déductions géologiques risquées sur les valeurs de la pression, ce sont vraisemblablement les gradients géothermiques invoqués pour expliquer la genèse de ces faciès qui sont conventionnels (les valeurs de  $P$  de ces faciès sont effectivement toujours des valeurs expérimentales).

Quoi qu'il en soit, ceci n'enlève rien aux précautions, ni aux distinctions, qu'il y a lieu de prendre lorsque l'on définit les notions de gradients géothermiques et de « faciès métamorphiques associés à leurs différentes valeurs ».

Les lignes qui suivent peuvent sans doute apporter quelques éclaircissements à ce sujet.

4. Nous avons accepté jusqu'à présent la variabilité de l'intensité du flux de chaleur lors des phénomènes orogéniques et métamorphiques associés.

Mais, nous pourrions aussi poser comme hypothèse de travail l'inverse, c'est-à-dire que le flux thermique est d'intensité égale et constante dans tous les domaines cristallophylliens, ce qui revient à admettre que le gradient géothermique est de valeur unique.

Supposons qu'il soit effectivement tel, et de valeur moyenne,  $\pm 30$  °C/Km.

Que représentent alors les séries de faciès métamorphiques de forte et de faible pressions ?

#### a. *Séries de forte pression.*

Dans ce cas, les séries de forte pression ne diffèrent pas essentiellement de ce que nous en avons dit précédemment : elles représentent, pour un intervalle de températures donné, des faciès dans lesquels les pressions sont anormalement élevées par rapport aux pressions lithostatiques, ou profondeurs, définies par le gradient géothermique unique.

Ces faciès, qui expriment ainsi dans une zone géométamorphique déterminée, dont les conditions  $P_l - T$  sont celles correspondant au gradient géothermique unique, des anomalies des valeurs de  $P(P > P_l)$ , définissent alors des gradients géothermiques conventionnels.

On ne pourrait d'ailleurs que répéter la même chose pour les faciès métamorphiques où  $P < P_l$ .

#### b. *Séries de faible pression.*

Ces séries représentent dans un domaine déterminé de pressions lithostatiques, ou profondeurs, définies par le gradient géothermique unique, un intervalle plus large de températures plus élevées que celles correspondant à ce gradient.

Ces séries, symptomatiques dans une zone géométamorphique déterminée de valeurs du flux thermique supérieures à celles responsables du gradient géothermique unique, définissent ainsi des gradients géothermiques réels de valeur élevée.

Cette hypothèse de l'existence d'un gradient géothermique de valeur unique, « standard » ou « moyenne », offre un grand intérêt théorique, car elle implique une recherche objective de l'anomalie de pression, ou de température, plutôt que l'idée plus ou moins hasardeuse de l'existence effective de gradients géothermiques de valeurs différentes, capables d'expliquer tous les cas rencontrés dans la nature.

Elle souligne également l'intérêt qu'il y a de considérer les phénomènes géologiques dans leur ensemble et dans leur contexte.

Et ainsi, elle indique clairement qu'il peut y avoir des variations, locales par exemple, des paramètres T ou P, suffisantes pour expliquer que, localement, la valeur d'un gradient géothermique puisse s'élever ou s'abaisser anormalement; il n'en reste pas moins vrai que, même alors, les conditions  $P_l - T$  régionales sont restées inchangées et liées à une zone bathymétrique bien définie, c'est-à-dire aussi à un gradient géothermique régional défini.

Cette hypothèse d'un gradient géothermique de valeur unique introduit donc clairement les notions réelles de gradients géothermiques régional et local, ainsi que celles associées de faciès métamorphiques régional et local.

5. Enfin, il convient encore d'insister particulièrement sur le fait que, dans une zone bathymétrique  $P_l - T$  bien définie, les paramètres P et T ne sont pas nécessairement univoques.

Il est donc faux de parler de types de métamorphisme de forte, de faible, ... pressions, si on les définit seulement en fonction des valeurs des gradients géothermiques qu'ils sont supposés représenter.

Il ne suffit pas en effet que certains faciès métamorphiques soient caractéristiques de valeurs élevées, faibles... de P ou T pour qu'ils puissent définir un type de métamorphisme : encore faut-il que leurs associations avec d'autres faciès satisfassent aussi cette condition.

Les exemples cités précédemment prouvent à suffisance l'existence de faciès métamorphiques locaux ou anormaux mais qui peuvent parfaitement s'intégrer dans une zone bathymétrique  $P_l - T$  bien déterminée, c'est-à-dire dans un processus d'évolution métamorphique défini par un gradient géothermique régional bien déterminé, avec laquelle ils n'ont apparemment que peu d'affinités.

En dernière analyse, on peut même ajouter que, dans de nombreux cas ( $P(P_{\text{exp}}) \leq P_l$ ), la notion de variabilité de la pression lors du métamorphisme régional apparaît plus importante et plus réelle que celle de variabilité des valeurs des gradients géothermiques.

Quant à la variabilité de la température, et à l'existence de gradients géothermiques réels de valeurs élevées (cas des faciès métamorphiques de haute température), elle semble induite avant tout par des manifestations extérieures à l'évolution métamorphique proprement dite, normale, par des intrusions magmatiques syncinématiques par exemple, à moins que celles-ci ne soient elle-mêmes que l'effet visible des valeurs élevées des gradients géothermiques.

Nous croyons que c'est surtout dans ce sens qu'il convient d'interpréter les données récentes relatives à la subdivision du métamorphisme régional en séries de faciès métamorphiques, ou lignées métamorphiques, ainsi que les études expérimentales ou autres qui leur servent de base.

#### BIBLIOGRAPHIE

- CARPENTER, J. R., 1968. — Apparent retrograde metamorphism : another example of the influence of structural deformation on metamorphic differentiation.  
*Contr. Mineral. and Petrol.*, **17**, 173-186.
- DEN TEX, E., 1965. — Metamorphic lineages of orogenic plutonism. *Geol. and Mijnb.*, **44**, 105-132.

- DEN TEX, E., 1971. — The facies groups and facies series of metamorphism, and their relation to physical conditions in the earth's crust. *Lithos*, **4**, 23-41.
- ESKOLA, P., 1915. — On the relation between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijärvi region. *Comm. geol. Finlande Bull.*, **44**, 109-145.
- ESKOLA, P., 1939. — Die metamorphen Gesteine, 263-407, in BARTH, T. W. F., CORRENS, C. W. and ESKOLA, P., *Die Entstehung der Gesteine*, Springer, Berlin.
- FELIX, C., 1966. — Étude pétrologique des schistes cristallins de « La série de la Butahu ». Mém. Lic. inédit, déposé à l'Université de Liège.
- FELIX, C., 1968a. — Remarque à propos de la limite épizone-mésozone : les isogrades de la biotite et du grenat. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **91**, 393-396.
- FELIX, C., 1968b. — L'association disthène-andalonsite-sillimanite : étude pétrographique. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **91**, 569-583.
- FELIX, C. 1969. — Étude pétrographique des roches basiques de l'Ile de Croix (Bretagne méridionale). Note préliminaire. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, **92**, 359-370.
- FRY, N. and FYFE, W. S., 1969. — Eclogites and water pressure. *Contr. Mineral. and Petrol.*, **24**, 1-6.
- MIYASHIRO, A., 1961. — Evolution of metamorphic belts. *Journ. Petrol.*, **2**, 277-311.
- MIYASHIRO, A., 1964. — Oxidation and reduction in the Earth's crust with special reference to the role of graphite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**, 717-729.
- MIYASHIRO, A., 1968. — Metamorphism of mafic rocks, 799-834, in *Basalts*, vol. 2. *The Poldervaart Treatise on rocks of basaltic composition*, H. H. Hess and A. Poldervaart Ed.
- ROEVER (de), W. P., 1967. — Overdruk van tektonische oorsprong of diepe metamorfose? *Koninkl. Nederl. Akad. Wetenscha., Versl. Gew. Vergad. Afd. Natuurk.*, **76**, 69-74.
- ROEVER (de), W. P. and NIJHUIS, H. J., 1963. — Plurifacial alpine metamorphism in the Betic Cordilleras (SE Spain), with special reference to the genesis of glaucophane. *Geol. Rund.*, **53**, 324-336.
- RUTLAND, R. W. R., 1965. — Tectonic overpressures. In « *Controls of metamorphism* », 119-139, W. S. PITCHER and G. W. FLINN ed., Edinburgh-London, Oliver and Boyd Ltd.
- SMULIKOWSKI, K., 1968. — Differentiation of eclogites and its possible causes. *Lithos* **I**, 89-101.
- WINKLER, H. G. F., 1965. — Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York.

