

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band: 48 (1968)
Heft: 2

Artikel: Grenats zonés de la zone du Mont Rose (Valle Anzasca, Prov. de Novara, Italie)
Autor: Béthune, P. de / Laduron, D. / Martin, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-37777>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Grenats zonés de la zone du Mont Rose (Valle Anzasca, Prov. de Novara, Italie)

Par *P. de Béthune, D. Laduron, H. Martin et K. Theunissen*
(Louvain, Belgique)*)

Abstract

Zoning of garnets, from an alpine metamorphic zone of the Monte Rosa core has been studied under the microprobe. These garnets show a core with outward decreasing amounts of Mn and Ca and increasing amounts of Fe and Mg corresponding to preferential fractionation of Mn and Ca during a first, possibly ante-alpine, phase of progressive metamorphism. This relict-core is surrounded by a surface of metamorphic unconformity corresponding to a phase of resorption. The discordant outer mantle, corresponding to the alpine phase of metamorphism shows a striking rise (ear) of the Ca profile followed by an outward decrease; the Mn profile forms a shoulder; the Mg profile rises at a steeper rate than in the core; the Fe profile compensates for the difference between the variation of the other ions. Near the border, a 20—40 microns wide zone is enriched in Mn and impoverished in Mg due to a late phase of resorption.

Résumé

Le zonage de grenats provenant d'une zone à métamorphisme alpin du noyau de la nappe du Mont Rose, a été analysé sous la microsonde. Ces grenats comprennent un noyau contenant des teneurs décroissantes du centre vers l'extérieur pour le Mn et le Ca, et croissantes vers l'extérieur pour le Fe et le Mg. Ceci correspond au fractionnement préférentiel du Mn et du Ca dans le grenat au cours d'une première phase, probablement anté-alpine, de métamorphisme progressif. Ce noyau relique est entouré par la surface de discordance métamorphique d'une phase de résorption. La couronne externe de blastèse alpine montre une augmentation marquée (oreille) suivie vers l'extérieur par une diminution de la teneur en Ca; le profil du Mn dessine une épaule; celui du Mg augmente vers l'extérieur plus vigoureusement que dans le noyau; la teneur en Fe compense les variations des autres ions. Sur le bord extrême des grenats, une zone de 20—40 microns enrichie en Mn et appauvrie en Mg représente une phase ultime de résorption.

INTRODUCTION

En 1952, BEARTH a décrit dans les micaschistes des zones à métamorphisme alpin de la nappe du Mont Rose des grenats se composant d'un noyau riche

*) Laboratoire de Pétrographie, 6, Sint-Michielstraat, Louvain (Belgique).

en inclusions enveloppé d'une couronne sans inclusions; il a interprété le noyau comme une relique d'une cristallisation plus ancienne. D'autre part, depuis quelques années, plusieurs auteurs (BANNO, 1965; VOGEL and BAHEZRE, 1965; DE BÉTHUNE, GOOSSENS et BERGER, 1965; EVANS and GUIDOTTI, 1966; HARTE and HENLEY, 1966; CRAWFORD, 1966; ATHERTON and EDMUNDS, 1966; HOLLISTER, 1966; BROWN, 1967) ont étudié au moyen de la microsonde électronique, le zonage des grenats métamorphiques. Au cours de l'étude géologico-pétrologique entreprise par l'un de nous (D.L.) dans la région de Vanzone (Valle Anzasca, Prov. de Novara, Italie), des grenats de la zone du Mont Rose nous ont montré une structure semblable à celle décrite par BEARTH; l'étude à la microsonde effectuée sur ces grenats corrobore, ainsi qu'on le verra, l'interprétation de cet auteur.

PROVENANCE ET PARAGENESE

Les micaschistes à grenats sur lesquels a porté notre étude proviennent de la „Bande de micaschistes et paragneiss de Vanzone“ que BEARTH (1957) a décrite comme la „grössere, alpinmetamorphe Paragneisszone“, comprise entre les gneiss œillés de Macugnaga au Sud et les gneiss œillés et les paragneiss et micaschistes (en partie à sillimanite) traversés d'apophyses de granite, aplite et pegmatite, du „Complexe Pozzuoli“ au Nord (BEARTH, 1952 et 1957). Deux échantillons en ont été soumis à la microsonde.

Le micaschiste à grenat VA 272 a été recueilli à Vanzone, le long du sentier qui, descendant vers le „Torrente Anza“, conduit au lieu-dit „Pontpertus“ ($4^{\circ} 20' 26''$ W par rapport au méridien de Rome — $45^{\circ} 58' 38''$ N). Sa paragenèse minérale comporte: Quartz — Mica blanc (Muscovite et/ou Phengite) — Biotite — Almandin; accessoirement nous trouvons de la clinozoïsite et de l'ilménite entourant du rutile. La texture est granolépidoblastique. Les lamelles de mica blanc montrent une orientation préférentielle nette; parfois cependant, elles forment des „arcs polygonaux“ autour de la charnière d'un pli isoclinal. Les lamelles de biotite, également orientées, ont une tendance à se concentrer autour des grains de grenats.

Le micaschiste VA 296 a été prélevé à Vanzone, sur la rive droite du Torrente Anza, en aval du lieu-dit „Pontpertus“ ($4^{\circ} 58' 46''$ W — $45^{\circ} 58' 46''$ N). Sa paragenèse minérale comporte: Quartz — Mica blanc (Muscovite et/ou Phengite) — Almandin en voie de transformation en chlorite hystérogène (teinte d'interférence bleu acier, all.+) — Albite. On trouve accessoirement de la clinozoïsite, de l'ilménite entourant du rutile, de l'apatite et de la tourmaline. La texture est granolépidoblastique; la plupart des lamelles de mica blanc montrent une orientation préférentielle tandis que la chlorite hystérogène, étroitement associée au grenat, a une orientation quelconque par rapport à la foliation.

Ces associations minérales, ainsi que toutes celles rencontrées dans les „micaschistes de Vanzone“, nous permettent de placer le faciès métamorphique de cette région dans le sous-faciès à Quartz-Albite-Epidote-Almandin (TURNER and VERHOOGEN, 1960, p. 539; WINKLER, 1965, p. 82). En effet, les grenats sont de type almandin malgré leur zonage (Tableau IA). Ce faciès métamorphique de type mésozonal est bien d'âge alpin comme l'a déjà observé BEARTH (1957 et 1958). Il se distingue d'une manière tranchée des paragenèses reliques (de faciès catazonal) rencontrées dans les gneiss et les micaschistes à métamorphisme prégranitique de la nappe du Mont Rose, notamment du Complexe Pozzuoli (BEARTH, 1952 et 1957). Néanmoins les micaschistes et paragneiss de Vanzone, comme d'autres schistes à métamorphisme alpin, se rencontrent sur le terrain en intercalations dans le socle à métamorphisme anté-alpin du Mont Rose. Ils sont probablement de même nature que les complexes prégranitiques et l'on peut supposer que la déformation et la blastèse alpine ont affecté cette partie du socle de manière à effacer toute trace du métamorphisme anté-alpin (c'est-à-dire prégranitique). Cette conception nous a d'ailleurs été confirmée de vive voix par le Professeur BEARTH.

MÉTHODE D'ÉTUDE

L'étude sous la microsonde (Appareil AMX, de la firme ARL) a été conduite sur lame mince polie (CADWELL and WEIBLEN, 1965) et métallisée au carbone, par profilage le long du diamètre des grenats, par pointés successifs avec un pas de 10 microns (par exemple fig. 1). Deux éléments ont été mesurés chaque fois simultanément: Fe et Mg, Mn et Mg, Ca et Mg, Si et Al. La répétition des profils pour Mg permet de s'assurer de la superposition des autres profils, dont il est difficile d'obtenir un repérage exact. Quelques profils de détail ont été obtenus au pas de 2 microns (par exemple fig. 2).

Cette étude par profils diamétraux a été complétée dans certains cas soit par des profils séries parallèles, soit par l'obtention d'images de balayage couvrant des parties intéressantes de certains grenats¹⁾ (Pl. II).

Le travail a été effectué à courant de sonde constant pour chaque profil, sous 15 KV, avec un courant d'échantillon de 3 ou de $7 \cdot 10^{-8}$ ampères, avec un cristal de LiF pour Fe, Mn, et Ca, de ADP pour Si et de KAP pour Mg et Al. Les comptages pendant 10 secondes, corrigés pour le bruit de fond, ont été exprimés en % pondéral des oxydes correspondants (FeO pour la teneur en fer) par proportionnalité avec les comptages effectués sur un grenat témoin, sans autre correction. Dans l'exécution des profils, la sonde passe indifférem-

¹⁾ Certaines de ces images, couvrant un champ de 720×720 microns, ont pu être obtenues par une technique particulière qui fera l'objet d'une publication séparée. (DE BÉTHUNE et MARTIN, 1968).

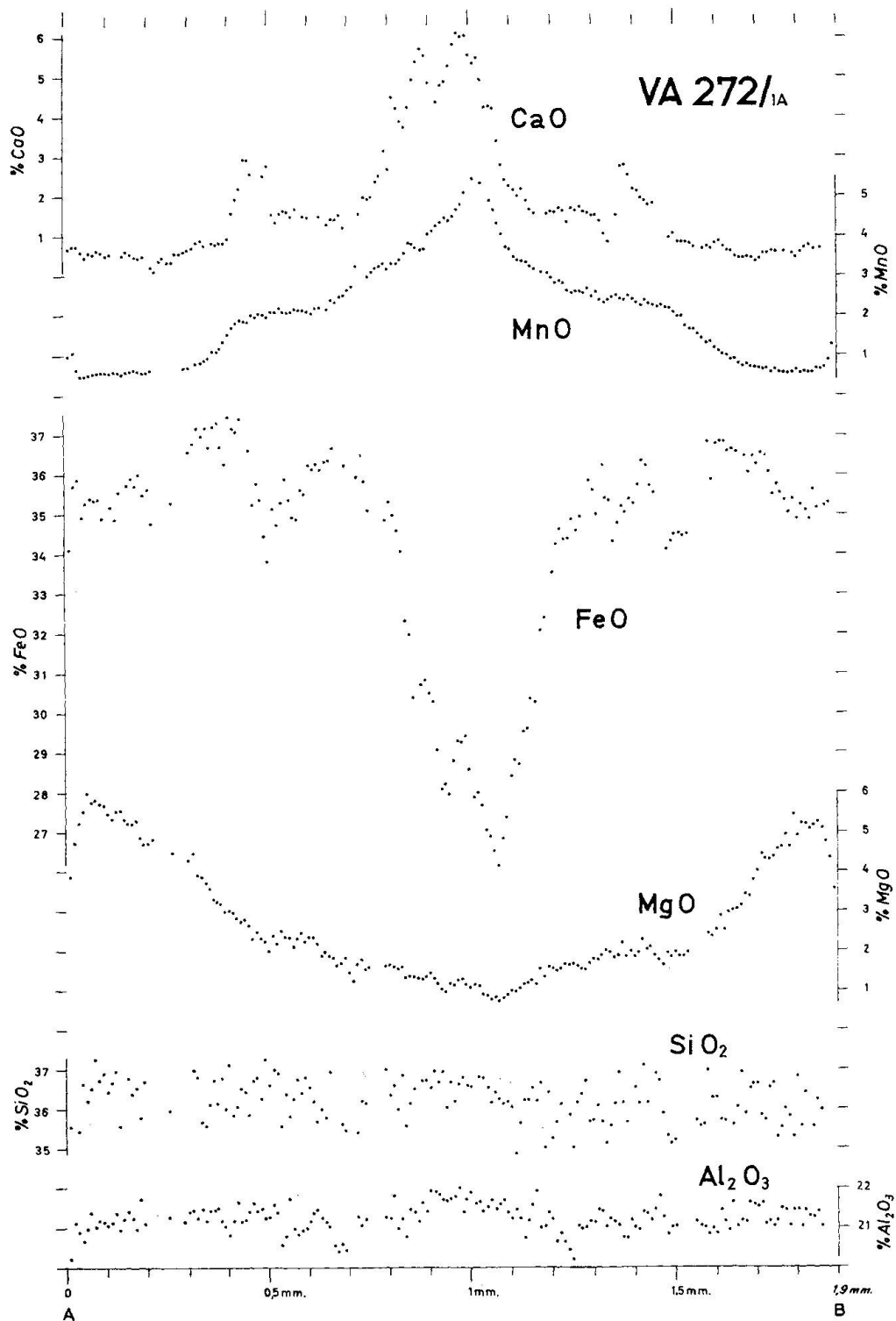


Fig. 1. Profil diamétral d'un grenat de VA 272 (voir Pl. Ia, profil A-B) réalisé avec un intervalle de 10 microns entre chaque pointé. En ordonnées, les pourcentages pondéraux des oxydes CaO, MnO, FeO, MgO, SiO₂, Al₂O₃. En abscisses, la distance depuis le bord A du grenat vers le bord B.

Le profil MgO reproduit a été réalisé simultanément avec le profil FeO; on remarquera que les minima obtenus pour ces deux éléments coïncident. Les profils MgO (non reproduits) réalisés simultanément avec CaO et MnO montrent également une bonne coïncidence du minimum du MgO avec les maxima du CaO et du MnO; le décalage apparent entre le minimum du FeO et les maxima du CaO et MnO est dû à la difficulté de repérer exactement les traversées successives.

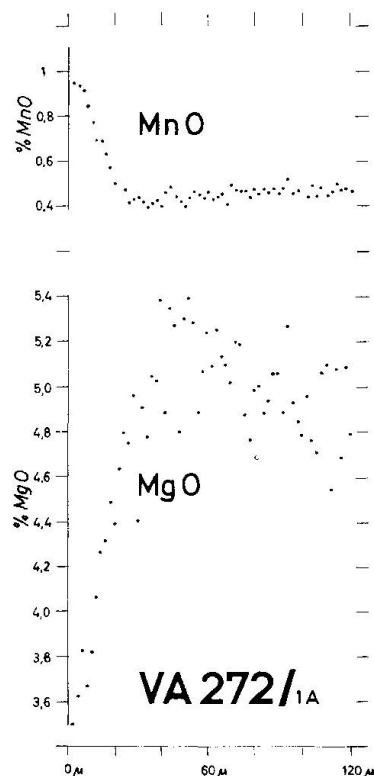


Fig. 2. Détail du bord gauche de la fig. 1, pour MnO et MgO, réalisé avec un intervalle de 2 microns entre chaque pointé.

ment au travers du grenat et des inclusions, sans qu'il soit toujours possible de distinguer l'un des autres sous le microscope; la meilleure indication est obtenue par la mesure du courant d'échantillon (sample current) qui varie inversement avec le numéro atomique moyen des constituants du minéral et reste quasi constante pour le grenat; on n'a pas tenu compte des comptages pour lesquels le courant d'échantillon s'écartait de cette valeur, et qui se rapportaient à des inclusions ou aux minéraux extérieurs au grenat.

LE ZONAGE DES GRENATS

Dans l'échantillon VA 272 (Pl. Ia et b), les grenats hypidioblastiques sont caractérisés par un noyau central riche en fines inclusions (principalement du rutile), entouré par une couronne quasi dépourvue d'inclusions. Les grenats chloritisés de l'échantillon VA 296 (Pl. Ic et d), sont xénoblastiques; leur structure zonée est marquée par une fine ligne d'inclusions divisant le grenat en un noyau et une couronne de largeur variable. Certains grains qui ne laissent apparaître aucune différence entre le noyau et la couronne montrent cependant sous la microsonde un zonage chimique identique à celui des autres grenats. Dans les grenats de ces deux micaschistes, le contour du noyau est irrégulier et ne montre pas les faces cristallines du grenat; il est au contraire parfois fortement indenté (Pl. Id).

L'étude à la microsonde révèle que la teneur en Ca, Mn, Fe et Mg varie du

centre vers la périphérie tandis que Si et Al sont constants dans tout le grenat, ainsi que le montrent par exemple les profils de la fig. 1, relevés sur un des grenats de VA 272.

Un profil diamétral de la teneur en *calcium* montre la variation la plus caractérisée. La teneur en calcium diminue du centre vers le bord avec toutefois un relèvement brutal, que nous avons appelé une *oreille*, qui se situe immédiatement à l'extérieur du noyau central.

Le profil de la teneur en *manganèse* montre une diminution progressive du centre vers le bord, avec une épaule concomittante de la discontinuité observée pour le calcium.

Le *magnésium* au contraire augmente du centre vers le bord; lentement dans le noyau et plus rapidement dans la couronne à partir du bord extérieur de l'oreille du calcium.

Le profil du *fer* présente d'abord une augmentation du centre vers le bord qui compense les maxima centraux du calcium et du manganèse; on observe ensuite une diminution locale qui correspond à l'oreille du calcium. Après une remontée, la teneur en fer montre dans la zone périphérique une diminution progressive correspondant à la montée du magnésium.

Il faut remarquer que le maximum Mn et Ca n'atteint pas la même valeur dans chacun des profils étudiés; parfois même la partie centrale du profil du Ca ne forme qu'un large plateau au-dessus duquel les oreilles s'élèvent brutalement (Pl. IIc); il est vraisemblable que ces profils ont été obtenus sur des grains qui ne sont pas coupés exactement par le centre (*cut effect* de HARTE et HENLEY, 1966). Nous remarquerons toutefois, avec HOLLISTER (1966), que les maxima du manganèse et du calcium, comme les minima du fer et du magnésium pourraient ne pas être nécessairement les mêmes pour chacun des grains de grenat d'une roche; cet effet, difficilement vérifiable, pourrait donc se surajouter au „cut effect“.

D'autre part, compte tenu de cet effet, il faut remarquer en outre que, si les maxima de Ca et de Mn coïncident bien entre eux ainsi qu'avec les minima de Fe et Mg, les oreilles de Ca ne sont pas toujours à la même distance de part et d'autre du maximum central; la teneur minimum du Ca, à l'intérieur des oreilles ne se situe pas non plus toujours au même niveau. La même asymétrie se manifeste dans le profil des autres éléments, sans toutefois être aussi caractérisée que pour le calcium. Cet effet s'observe le mieux sur l'image de balayage X de la distribution du calcium de la Planche IIb et c, sur laquelle la zone annulaire des „oreilles“ est bien reconnaissable; la teneur en calcium est assez uniforme dans le noyau I, comme le montre le profil diamétral relevé à l'oscilloscope, sauf dans un triangle Ie, plus sombre, qui est nettement moins riche en calcium; il paraît évident que ce triangle appartenait à une zone annulaire externe du noyau, qui a été presque entièrement détruite par résorption avant la formation de l'anneau des oreilles. Il est intéressant également de comparer

à l'image microscopique (Pl. II d) l'image par balayage X de la distribution du calcium (Pl. II d et e) sur laquelle on voit que l'anneau enrichi en calcium de l'„oreille“, pénètre dans l'indentation du grenat en s'appliquant étroitement aux irrégularités du contour du noyau. Celles-ci marqueraient donc une *discordance métamorphique* entre le noyau et la couronne. On peut donc déjà conclure que la croissance de ces grenats a eu lieu en deux phases de blastèse : I et II, séparées par une phase intermédiaire de résorption, ainsi que l'avait supposé, pour sa part, M. BEARTH.

Il faut signaler à ce propos que le profil du calcium, dans quelques grains, a montré une deuxième paire d'oreilles à l'extérieur de la paire principale, et que dans un grain il semble même qu'une troisième paire d'oreilles apparaisse à l'intérieur de la paire principale; ce phénomène n'est toutefois pas assez régulièrement développé pour nous y arrêter.

Une autre caractéristique des profils du Mn et Mg, bien visible sur la figure 1, est la remontée brutale de la teneur en Mn à l'approche du bord du grenat, et la chute simultanée de la teneur en Mg. Cet effet de bord a été étudié sur plusieurs grains de la lame VA 272, au moyen de profils au pas de 2 microns, et il s'observe sur une largeur de 20 à 40 microns (par exemple figure 2). Il est bien visible aussi sur la planche II a, qui est un assemblage de plusieurs images par balayage X de la distribution du Mn autour du golfe visible dans le grenat de la planche I b. Ainsi que nous le discuterons plus loin, cet effet de bord semble lié à une résorption plutôt qu'à une croissance du grenat.

Dans les grenats VA 296, un effet de bord semblable a été observé sur une largeur de quelques microns seulement. Ici toutefois la forme extérieure des grains, et l'inégale largeur de la couronne qui se limite parfois à la largeur de l'oreille (Pl. II b et c), ainsi que la chloritisation, suggèrent nettement une résorption.

SIGNIFICATION DES PROFILS

a) Manganèse et calcium

L'analyse du zonage des grenats au moyen de la microsonde a déjà montré, d'une façon suffisamment constante pour qu'on puisse la considérer comme un fait général, la diminution de la teneur en *manganèse* des grenats du centre vers la périphérie des grains, suivant le profil d'une courbe „en cloche“ régulière, semblable à celui de la partie centrale de la figure 1 (au-dessus de l'épaule).

Pour BANNO (1965), DE BÉTHUNE, GOOSSENS et BERGER (1965), HARTE et HENLEY (1966), CRAWFORD (1966), ATHERTON et EDMUNDS (1966), ce fait exprime la progression du métamorphisme régional depuis une zone moins profonde, où seul un almandin manganésifère est stable, jusque dans une zone plus profonde, où un almandin plus pur peut cristalliser à son tour. Cette interprétation s'appuie essentiellement sur l'observation, déjà ancienne,

du caractère manganésifère des grenats rencontrés dans les roches pélitiques au-dessus de l'isograde de l'almandin.

A ces considérations basées sur l'étude de la composition globale des grenats, s'ajoute la remarque (DE BÉTHUNE, GOOSSENS et BERGER, 1965) que la ségrégation progressive du manganèse dans le grenat, due à cette plus grande affinité, appauvrit graduellement le reste de la roche en manganèse. Les conditions d'équilibre, entre la périphérie du grenat et les autres minéraux de la roche, se modifient donc à chaque instant par suite de cette diminution de la teneur en manganèse dans le reste de la roche, de telle sorte que la cristallisation autour du grenat de zones successivement plus riches en almandin ne peut s'accomplir qu'au fur et à mesure que la pression et la température augmentent.

Le rôle de cette plus grande affinité du grenat pour le manganèse, envisagé aussi par HARTE et HENLEY (1966), est particulièrement bien mis en évidence par HOLLISTER (1966) qui l'exprime par le calcul du *coefficient de partage* du manganèse entre le grenat et le reste de la roche. Cet auteur a appliqué avec succès le „modèle mathématique de fractionnement de Rayleigh“ à l'étude d'un grenat zoné; il montre ainsi que la distribution observée pour le manganèse s'explique dans ce cas par ce seul effet, sans faire nécessairement appel à une modification importante des conditions de pression et de température.

Il paraît cependant difficile dans notre cas d'isoler l'influence du coefficient de partage de celle de la progression du métamorphisme. Peut-on supposer en effet que nos roches auraient atteint les conditions de pression et de température invariables dans lesquelles le fractionnement se serait opéré, sans qu'un grenat n'ait déjà commencé à cristalliser au cours de la montée préalable de la température et de la pression, lorsque la roche traversait des zones de profondeur dans lesquelles l'almandin manganésifère est stable? Cela impliquerait un retard dans la nucléation du grenat. Ce problème vaut toutefois d'être approfondi dès qu'on disposera d'un nombre suffisant d'analyses de manière à établir quelle modification de la courbe en cloche résulterait de la variation graduelle du coefficient de partage en fonction de la progression du métamorphisme.

Les critères de mesure du degré de métamorphisme de STURT (1962) et de NANDI (1967), basés sur des analyses globales et non ponctuelles ne sont évidemment pas applicables à ce problème; ils devraient être repensés en fonction des données rendues accessibles par l'analyse ponctuelle et en tenant compte de la teneur en Mn, ... de la roche.

Cette analyse de l'influence du coefficient de partage, laisse penser toutefois que, même dans le cas où le grenat pourrait continuer à grandir au cours d'une phase de régression du métamorphisme, un zonage inversé pour le manganèse ne se manifesterait pas. L'augmentation de la teneur en manganèse sur le bord de nos grenats, décrite plus haut, pose donc un problème qui a

intrigué les auteurs qui ont signalé des cas analogues, comme en témoigne la divergence de leurs interprétations (EVANS et GUIDOTTI, 1966; CRAWFORD, 1966; HOLLISTER, 1966); nous la discuterons plus loin.

Le rôle du *calcium* dans le grenat des roches pélitiques est moins bien connu que celui du manganèse; certaines études statistiques de la composition globale des grenats suggèrent que ce rôle puisse être parallèle à celui du manganèse; les études sous la microsonde de la distribution du calcium donnent toutefois des résultats divergents, car on a relevé des profils en cloche, des profils en cloche aplatie, des profils uniformes et même des profils en calice. On peut se demander si le dédoublement du maximum du profil du calcium de la figure 1 ne représente pas un profil en calice, emboîté dans un profil en cloche; nos observations n'ont pas permis d'élucider ce point. Malheureusement beaucoup d'auteurs ont omis de décrire les paragenèses associées à ces différents types de profil ce qui nous empêche d'apprécier exactement leur signification. Il semble toutefois, comme le suggèrent HARTE et HENLEY (1966), que le profil en cloche se manifesterait dans les roches où, comme dans VA 272 et VA 296, le grenat est quasiment le seul vecteur du calcium. Le rôle du calcium serait dans ce cas semblable à celui du manganèse et cette distribution en cloche manifesterait également un effet de partage préférentiel, éventuellement associé à un métamorphisme progressif.

Le noyau I des grenats de Vanzone montre clairement le zonage „en cloche“ du manganèse et du calcium que nous avons discuté plus haut; il correspond au fractionnement préférentiel de ces éléments au cours de la cristallisation du grenat, probablement en rapport avec la progression du métamorphisme au cours de la *première phase de blastèse*. Il est évident que ces noyaux de grenat I ont été entourés originellement par une zone externe qui, lors de la phase de résorption, a été détruite jusqu'à la surface de la discordance métamorphique. Il est vraisemblable que dans cette zone externe, les profils du calcium et du manganèse prolongeaient sans discontinuité les profils „en cloche“ du noyau.

Les reliques de grenats I ont joué le rôle de nuclei au début de la *seconde blastèse*. Les profils de la teneur en manganèse et calcium dans la couronne ne prolongent toutefois pas en continuité ceux du noyau, ils ont l'allure de deux courbes „en cloche“ indépendantes des courbes du noyau et ont dans l'ensemble la même signification que celles de la première blastèse. La forme des nouvelles courbes, en particulier de l'oreille Ca, montre soit — 1. que le coefficient de partage pour Ca et Mn était plus grand — et le degré de métamorphisme moins profond — au début de la blastèse II que celui qui existait, pendant la blastèse I, au niveau atteint par la résorption; soit — 2. que la teneur en Ca et Mn dans le reste de la roche était plus grande au début de la blastèse II que celle qui existait à ce niveau de la blastèse I. Il faut remarquer à ce propos, que la résorption a pénétré à des niveaux inégaux d'un grain à l'autre et même au

sein d'un même grain comme l'indique la discordance métamorphique; si un grain a été complètement résorbé, sa teneur en Mn et Ca devient disponible pour la nucléation des couronnes autour des grains subsistants; on pourrait donc éventuellement expliquer l'apparence d'une augmentation du Mn et du Ca sans devoir faire appel à l'hypothèse d'un apport extérieur (dont nous n'avons par ailleurs aucune indication). En fait, les données trop restreintes dont nous disposons actuellement ne permettent pas d'explicitier quantitativement l'interaction de ces divers facteurs, ainsi qu'on aimerait pouvoir le faire; en particulier il faudrait pouvoir calculer le coefficient de partage entre le grenat et d'autres minéraux calciques ou manganésifères (il suffirait par exemple, que l'un d'eux devienne instable pour rendre disponible la quantité de Ca contenue dans les oreilles; peut-être faudra-t-il chercher dans cette direction l'explication de la différence entre le profil du Ca et celui du Mn?).

b) Fer et magnésium

La microsonde ne permet pas de distinguer le fer trivalent du fer bivalent, mais comme l'analyse globale des grenats de la roche VA 272 l'indique (Tableau 1A), ceci ne présente guère de problème dans notre cas, puisque le fer ferrique est quasiment absent.

Pour le reste, et le profil de nos grenats ne diffère point en cela de celui de la plupart des profils qui ont été relevés sous la microsonde, la teneur en *fer* est complémentaire de celle des autres cations; non seulement elle varie en sens inverse de celles du manganèse et du calcium, dans le noyau de nos grenats, mais en plus, elle compense l'augmentation du calcium dans les oreilles par une diminution locale; d'autre part elle diminue vers l'extérieur corrélativement à l'augmentation centrifuge du magnésium dans la couronne. Dans ce dernier cas, où les teneurs en manganèse et calcium sont devenues accessoires, le problème devient essentiellement celui du partage du fer et du magnésium entre le grenat et les autres minéraux de la roche.

Le profil „en calice“ du *magnésium* correspond-il à l'effet de ségrégation des autres éléments, à un métamorphisme progressif ou à ces deux facteurs réunis? Le problème n'est cependant plus exactement le même que celui du manganèse et du calcium qui sont des éléments mineurs dont le grenat est quasiment le seul vecteur; le fer et le magnésium sont des éléments majeurs partagés essentiellement entre le grenat et les autres minéraux ferro-magnésiens. Il serait prématuré d'en dire plus.

c) L'augmentation du manganèse sur le bord des grenats

Nous avons signalé plus haut que le profil du manganèse se relève brusquement à l'approche du bord du cristal, sur 20 à 40 microns d'épaisseur, tandis que celui du magnésium montre à cet endroit une diminution caractérisée. Cet

Tableau 1

	A		B		C		D		E	
SiO ₂	37,00		36,50		36,03		36,13		36,47	
TiO ₂	0,23		*)		*)		*)		*)	
Al ₂ O ₃	20,75		21,50		21,23		21,28		21,09	
Fe ₂ O ₃	0,35		§)		§)		§)		§)	
FeO	34,70		26,10		36,12		36,07		35,04	
MnO	1,00		5,39		2,08		0,66		0,55	
MgO	3,85		0,74		2,14		4,23		5,38	
CaO	1,70		6,58		1,83		0,98		1,02	
K ₂ O	~0,15		*)		*)		*)		*)	
Na ₂ O	~0,07		*)		*)		*)		*)	
Total	99,80		96,81		99,43		99,35		99,54	
Formule structurale; O = 24										
Si	5,99	6,00	6,02	6,02	5,90	6,00	5,86	6,00	5,87	6,00
Al	0,01		—		0,10		0,14		0,13	
Al	3,93	3,97	4,18	4,18	3,98	3,98	3,93	3,93	3,86	3,86
Fe ^{'''}	0,04		§)		§)		§)		§)	
Fe ^{''}	4,68	6,04	3,59	5,70	4,93	6,06	4,88	6,18	4,70	6,25
Mn	0,14		0,75		0,28		0,09		0,08	
Mg	0,93		0,19		0,53		1,03		1,30	
Ca	0,29		1,17		0,32		0,18		0,17	
% moléculaires										
almandin	77,5		63		81		79		75	
spessartine	2,3		13		5		1		1	
pyrope	15,4		3		9		17		21	
grossulaire	4,75		21		5		3		3	
andradite	0,05		§)		§)		§)		§)	

*) Des pointés isolés sous la microsonde ont montré que les grenats de VA 272 ne contiennent ni TiO₂, ni K₂O, ni Na₂O; les teneurs de ces oxydes dans l'analyse globale A représentent les inclusions de rutile et de micas et ont été ignorées dans les calculs.

§) La microsonde ne permet pas de reconnaître le Fe^{III}, l'analyse globale A montre qu'il est en quantité négligeable.

A = Analyse globale de grenats isolés de VA 272 (Laboratoire de Traitement des Minerais — Prof. J. DE CUYPER — Institut de Métallurgie, Université de Louvain).

B = Analyse ponctuelle sur le point central du grenat VA 272/1 (maximum Ca et Mn, minimum Fe et Mg).

C = Analyse moyenne de cinq pointés à 420 microns à gauche du point central (600 à 640 microns du bord gauche A).

D = Analyse moyenne de cinq pointés à 680 microns à droite du point central (1700 à 1740 microns du bord gauche A).

E = Analyse moyenne de cinq pointés à 920 microns à gauche du point central (100 à 140 microns du bord gauche A).

effet a été étudié en détail par profilage au pas de 2 microns (par exemple fig. 2). Le fer et le calcium ne marquent pas cet effet de bord aussi clairement; il faut remarquer cependant que l'augmentation du manganèse ne compense pas entièrement la diminution du magnésium.

A première vue, cette augmentation est difficile à comprendre, car au moment où le développement du cristal s'achève, le reste de la roche ne contient presque plus de manganèse. Nous ne pouvons, par contre, sans autre élément de fait, admettre pour cette phase comme d'ailleurs pour les autres

phases de l'histoire métamorphique, un apport extérieur de manganèse qui expliquerait la croissance de cette zone bordière plus riche en manganèse. Il semble plutôt que cet effet de bord corresponde à une résorption tardive des grenats, vraisemblablement liée à une forme de „métamorphisme régressif“. La chloritisation des grenats de VA 296 et le „golfe“ visible dans un grenat de VA 272 (Pl. Ib et Pl. IIa) sont d'ailleurs très suggestifs d'un phénomène de résorption. Dans VA 272, la concentration de la biotite autour des grenats et la présence dans la roche d'ilménite entourant parfois un noyau de rutile (alors que le rutile sans couronne d'ilménite se rencontre en inclusion dans les grenats) suggèrent que ces deux minéraux représentent les produits de la résorption des grenats. Celle-ci est cependant limitée par un rééquilibrage de la partie externe du grenat avec les autres minéraux de la roche, c'est-à-dire à une réaction du bord du grenat avec la phengite et le rutile donnant naissance à de la biotite et de l'ilménite (EVANS and GUIDOTTI, 1966). Le manganèse toutefois qui ne trouve pas de vecteur important dans la roche (sauf en faible quantité dans l'ilménite comme la microsonde l'a montré qualitativement) aurait diffusé vers l'intérieur du grenat sur quelques dizaines de microns en avant du front de résorption, en prenant la place d'une certaine quantité de magnésium. CHINNER (1962) a déjà formulé la même hypothèse pour les almandins, partiellement pseudomorphosés en cordiérite-orthose, dans l'auréole thermique de Lochnagar.

Cette hypothèse d'une diffusion du manganèse est contraire à celle qui a été faite implicitement dans tous les raisonnements précédents, puisqu'on y présume qu'aucune diffusion n'est venue modifier le zonage établi au cours de la croissance du cristal. La discontinuité brutale observée dans le profil du calcium, sur le bord intérieur des oreilles, semble indiquer qu'il en est bien ainsi pour le calcium. Néanmoins, il est permis d'imaginer qu'en avant du front de résorption, la structure du grenat soit déstabilisée et permette une diffusion en son sein.

Il faut remarquer également que la résorption du grenat a pu l'entamer plus ou moins profondément. Les planches Ib et IIa qui montrent un golfe de résorption dans un des grenats de VA 272 sont frappantes à cet égard. Néanmoins, des profils au pas de 2 microns au travers du bord intérieur du golfe montrent la même teneur en MnO qu'à l'extérieur de celui-ci. L'extrême bord du grenat est également riche en MnO quelle que soit la largeur de la zone résorbée; ceci suggère qu'un équilibre a été atteint au cours de cette phase métamorphique.

CONCLUSIONS

Les phénomènes que nous avons analysés ici ne pouvaient pas être soupçonnés avant l'introduction de l'analyse ponctuelle au moyen de la micro-

sonde électronique; leur signification exacte ne pourra être dégagée rigoureusement que lorsqu'on disposera d'observations détaillées plus nombreuses pour appuyer le raisonnement. Toutefois, le zonage complexe des grenats de Vanzone permet déjà de reconnaître plusieurs étapes de l'histoire métamorphique du socle du Mont Rose.

1. Un premier métamorphisme précambrien, hercynien ou alpin précoce, a donné naissance à des micaschistes à grenats. Les résultats de notre étude ne permettent cependant pas de savoir si la blastèse de ces grenats I peut être assimilée au métamorphisme catazonal prégranitique (anté-alpin) dont certaines parties de la nappe du Mont Rose contiennent des reliques.

2. La résorption partielle des grenats I s'est vraisemblablement produite dans des conditions de pression et de température moins élevées, vraisemblablement au cours du métamorphisme progressif qui allait amener ces roches dans les conditions nécessaires à la blastèse II.

3. La blastèse II, d'âge alpin, prend naissance en discordance sur les reliques des grenats I qui jouent le rôle de nucleus.

4. La résorption finale exprime une dernière phase de rétro-métamorphisme.

Remerciements. Nous désirons remercier le Fonds belge pour la Recherche Fondamentale collective, pour l'appui dont a bénéficié cette recherche ainsi que L. M. Jones (U.S.G.S. — Menlo Park, Calif.) qui nous a procuré les grenats qui nous ont servi de témoin.

PLANCHE I

Image microscopique des grenats zonés dans les micaschistes de Vanzone

- a) Grenat hypidioblastique de VA 272 (Lumière naturelle — Champ de $2,80 \times 1,88$ mm).

On remarque clairement dans ce grenat la différence entre le noyau central très riche en inclusions de rutile et la couronne périphérique. On reconnaît autour du grenat le quartz et les micas (mica blanc et biotite) de la roche. Le diamètre A-B indique la position du profil représenté à la fig. 1.

- b) Grenat hypidioblastique de VA 272 (Lumière naturelle — Champ de $2,25 \times 1,50$ mm).

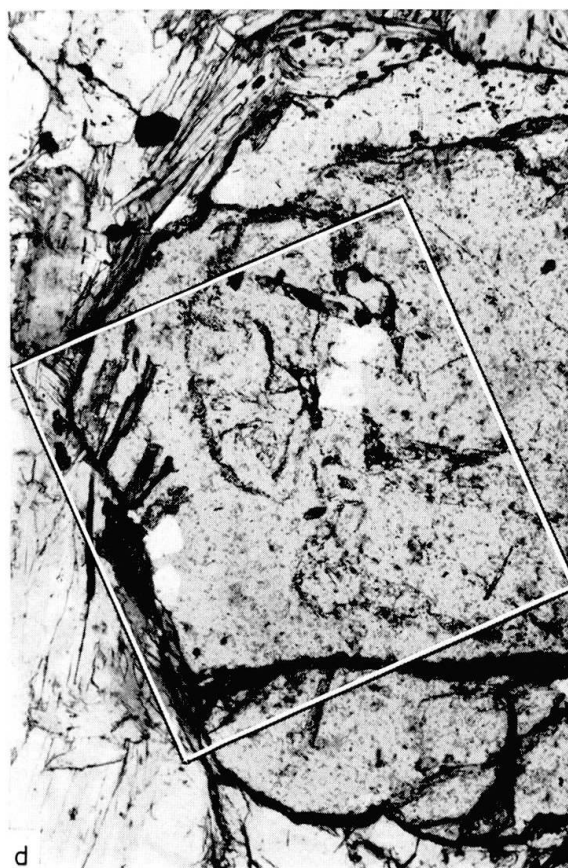
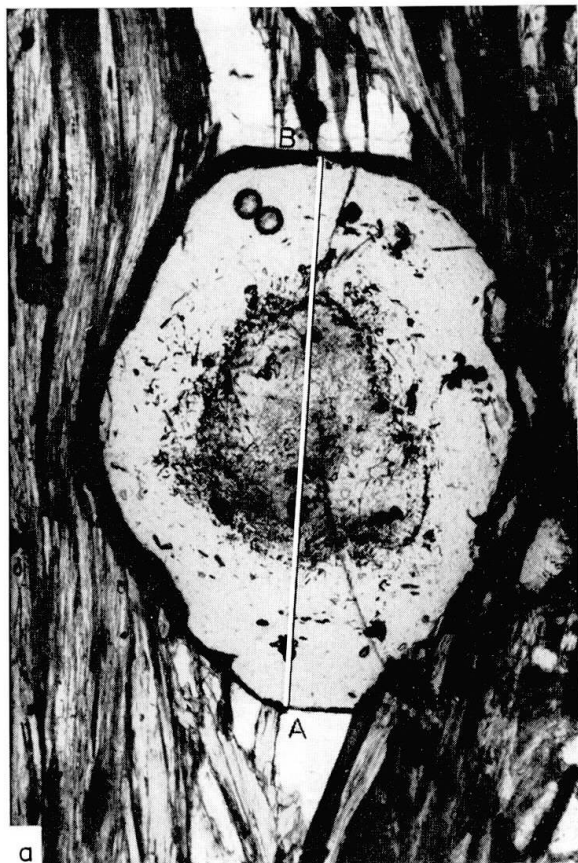
On remarque également dans ce grenat la séparation nette entre le noyau et la couronne. Sur le bord, la couronne est entaillée par un „golfe de résorption“. La partie encadrée délimite le champ de la figure (Pl. IIa) montrant la distribution du Mn sur le bord du grenat et autour du golfe de résorption. Le reste de la roche contenant du quartz, des micas et un autre grenat est obscurci par un effet de réfraction dû à l'araldite d'enrobage et à l'épaisseur de la lame. En particulier, la pointe de grenat bien visible à la limite supérieure du golfe sur la Pl. IIa et qui se reconnaît sous le microscope en lumière réfléchie est complètement obscurcie en lumière transmise.

- c) Grenat xénoblastique de VA 296 (Lumière naturelle — Champ de $1,40 \times 0,95$ mm).

La ligne d'inclusions visible sur ce grenat, sépare clairement le noyau de la couronne. Cette dernière montre une largeur variable due à la „chloritisation“ du grenat. La chlorite hystérogène (de teinte grise) se distingue clairement des lamelles de mica blanc. Les traits gris foncés traversant le grenat sont les traces de contamination laissées par la sonde sur la lame. Le plus foncé de ces traits correspond au profil oscilloscopique figuré Pl. IIc. Le champ des figures Pl. IIb et c est délimité par un carré.

- d) Détail d'un autre grenat de VA 296 (Lumière naturelle — Champ de $1,40 \times 0,95$ mm).

Le noyau I de ce grenat est délimité par une ligne d'inclusions qui marque une indentation assez marquée (vers le centre de la photo); on la repérera en s'aidant des figures Pl. II d et c, dont le champ est délimité par un carré sur cette figure. Les taches blanches que l'on remarque dans le grenat proviennent de l'arrachement accidentel du film de métallisation de la préparation. Le reste de la roche est constitué de quartz, mica et chlorite.



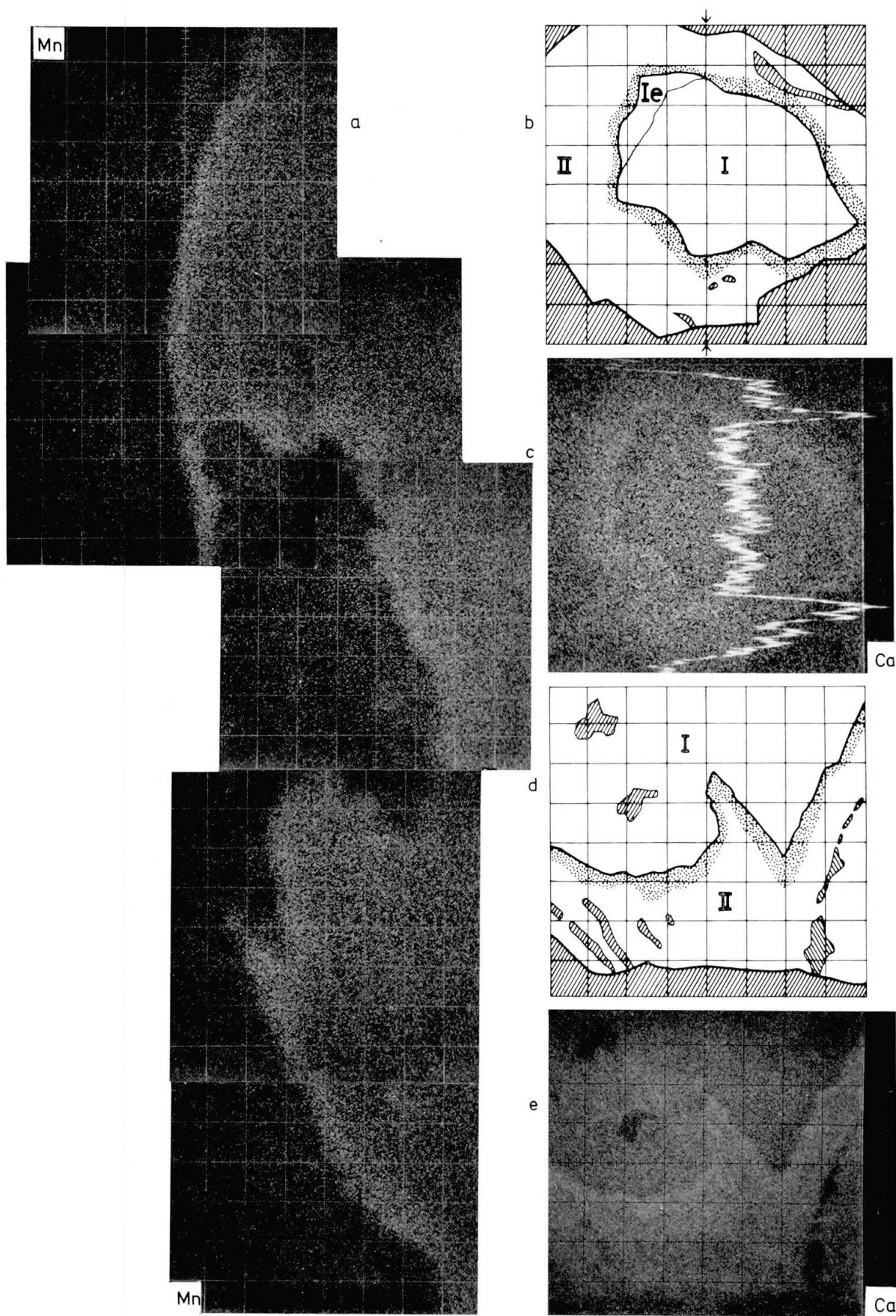


PLANCHE II

- a) Image de la distribution du manganèse (raie $\text{MnK}\alpha$) sur le bord d'un grenat de VA 272 (voir Pl. Ib).

Plusieurs champs oscilloscopiques de 180×180 microns ont été assemblés en mosaïque de manière à couvrir toute la zone du „golfe de résorption“ et de ses abords. On remarquera le bord enrichi en Mn sur le pourtour du grenat et de tout le golfe, y compris dans les deux pointes qui bordent le golfe.

- b) Croquis explicatif de la photographie c.

- c) Image de la distribution du calcium (raie $\text{CaK}\alpha$) dans un grenat de VA 296 (voir Pl. Ic). La plage représentée a 720 microns de côté.

Un profil par balayage oscilloscopique a été superposé au cliché photographique le long d'une traversée diamétrale de ce grenat (que l'on reconnaît sur la Pl. Ic par la large trace de contamination que la sonde y a laissée). Sur ce profil on reconnaît les deux oreilles, de part et d'autre d'un plateau central dans le noyau (*cut effect*); elle correspondent à un anneau (ponctué) qui entoure tout le noyau I. La teneur en Ca s'abaisse de part et d'autre des oreilles, dans la couronne II et s'annule à l'extérieur du grenat (hâchures). On remarque en outre une zone triangulaire Ie du noyau moins riche en calcium; elle appartient à une zone annulaire presque entièrement détruite par la première phase de résorption. La phase finale de résorption se manifeste dans la couronne II, qui dans le coin droit inférieur est réduite à la largeur de l'anneau des oreilles.

- d) Croquis explicatif de la photographie e.

- e) Image de la distribution du calcium (raie $\text{CaK}\alpha$) dans une partie d'un grenat de VA 296 (voir Pl. Id). La plage représentée a 720 microns de côté.

L'oreille (ponctué), plus riche en calcium, entoure le noyau I dans lequel elle pénètre suivant une indentation datant de la première phase de résorption. Les taches noires (hâchures) sont des inclusions de quartz (dans le noyau I) et de chlorite (dans la couronne II) ou une fissure (hâchures dans l'autre sens) ainsi que le reste de la roche (hâchures).

BIBLIOGRAPHIE

- ATHERTON, M. P. (1964): The garnet isograd in pelitic rocks and its relation to metamorphic facies. *Amer. Mineral.* 49, 1331—1349.
- (1965a): The chemical significance of isograds. In: *The controls of metamorphism* (Oliver and Boyd Pub., Edinburg), 169—202.
- (1965b): The composition of garnet in regionally metamorphosed rocks. In: *The controls of metamorphism* (Oliver and Boyd Pub., Edinburg), 281—290.
- ATHERTON, M. P. and EDMUNDS, W. M. (1966): An electron microprobe study of some zoned garnets from metamorphic rocks. *Earth and Planetary Sci. Letters*, 1, 185—193.
- BANNO, S. (1965): Notes on Rock-Forming Minerals (34). Zonal-Structure of Pyralspite Garnet in Sanbagawa Schists in the Bessi Area, Sikoku. *J. Geol. Soc. Japan*, 71, 185—188.
- BEARTH, P. (1952): *Geologie und Petrographie des Monte-Rosa*. Beitr. geol. Karte Schweiz, N. F. 96.
- (1957): Die Umbiegung von Vanzone (Valle Anzasca). *Eclogae geol. Helv.* 50, 161—170.
- (1958): Über einen Wechsel der Mineralfazies in der Wurzelzone des Penninikums. *Schweiz. Min. Petr. Mitt.* 38, 363—373.
- BROWN, E. H. (1967): The Greenschist Facies in Part of Eastern Otago, New Zealand. *Contr. Mineral. Petrol.* 14, 259—292.
- CADWELL, D. E. and WEIBLEN, P. W. (1965): Diamond disc preparation of polished thin sections for electron microprobe analysis. *Econ. Geol.* 60, 1320—1325.
- CHINNER, G. A. (1962): Almandine in Thermal Aureoles. *J. Petrol.* 3, 316—340.
- CRAWFORD, M. L. (1966): Composition of Plagioclase and Associated Minerals in Some Schists from Vermont, U.S.A., and South Westland, New Zealand, with inferences about the Peristerite Solvus. *Contr. Mineral. Petrol.* 13, 269—294.
- DE BÉTHUNE, P., GOOSSENS, P. et BERGER, P. (1965): Emploi des grenats zonaires comme indicateurs du degré de métamorphisme. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 260, 6946—6949.
- DE BÉTHUNE, P. et MARTIN, H. (1968): Comment agrandir le champ des images de balayage sous la microsonde? *Ann. Soc. géol. Belgique*. (Sous presse.)
- EVANS, B. W. and GUIDOTTI, C. V. (1966): The Sillimanite-Potash Feldspar Isograd in Western Maine, U.S.A. *Contr. Mineral. Petrol.* 12, 25—62.
- HARTE, B. and HENLEY, K. J. (1966): Occurrence of compositionally zoned almanditic garnets in regionally metamorphosed rocks. *Nature*, 210, 689—692.
- HOLLISTER, L. S. (1966): Garnet Zoning: An Interpretation Based on the Rayleigh Fractionation Model. *Science*, 154, 1647—1651.
- NANDI, K. (1967): Garnets as indices of progressive regional metamorphism. *Mineral. Mag.* 36, 89—93.
- STURT, B. A. (1962): The Composition of Garnets from Pelitic Schists in relation to the Grade of Regional Metamorphism. *J. Petrol.* 3, 181—191.
- TURNER, F. J. and VERHOOGEN, J. (1960): *Igneous and metamorphic Petrology*. (Second Ed.) McGraw-Hill Book Co., Inc., New-York.
- VOGEL, D. E. and BAHEZRE, C. (1965): The composition of partially zoned garnet and zoisite from Cabo Ortegal, N.W. Spain. *N. Jb. Mineral. Mh.* 5, 140—149.
- WINKLER, H. G. F. (1965): *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.