Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 50 (1970)

Heft: 2

Artikel: Le comportement des grenats dans les séries métamorphiques de Zermatt (Suisse)

Autor: Goossens, Pierre J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-39259

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 26.04.2025

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

Le comportement des grenats dans les séries métamorphiques de Zermatt (Suisse)

Par *Pierre J. Goossens* (Louvain)*)

Avec 13 figures et 19 tableaux dans le text, et 5 planches (photos 1–10)

Abstract

The grade of metamorphism, and certain relations between the chemical composition of the rocks and their mineral paragenesis, are determined from a mineralogic and petrographic study of various rocks in the region of Zermatt (Switzerland). The presence of metamorphosed Permo-Triassic sediments within albite micaschists is also discussed. In addition it is schown that there is no need to explain the sodium content, which may be at times high, of micaschists by albitisation. Finally, the chloritisation of garnet and the progressive metamorphism in the vicinity of Zermatt are described.

Zusammenfassung

An Hand von mineralogischen und petrographischen Untersuchungen von bestimmten Gesteinen aus der Umgebung von Zermatt (Schweiz) können der Grad der Metamorphose und gewisse Beziehungen zwischen der chemischen Gesteinszusammensetzung und ihrer Mineralparagenesen bestimmt werden. Das Auftreten von Glimmerschiefern in metamorphen permo-triasischen Sedimenten wird diskutiert. Der manchmal hohe Gehalt an Natrium in den Glimmerschiefern braucht nicht durch eine Albitisation erklärt zu werden. Ferner wird die Chloritisierung des Granates und die progressive Metamorphose einiger Gesteine aus der Umgebung von Zermatt beschrieben.

Résumé

A partir de l'étude minéralogique et pétrographique de certaines roches des environs de Zermatt, on arrive à déterminer le degré de métamorphisme et certaines relations entre la composition chimique des roches et leurs paragenèses minérales. On discute également de l'appartenance de certains micaschistes aux sédiments Permo-Triassiques métamorphisés, sur l'inutilité d'envisager une albitisation pour expliquer la teneur, parfois élevée, en soude de certains micaschistes, sur la chloritisation du grenat et sur le métamorphisme progressif des roches aux environs de Zermatt (Suisse).

---

*) 233, Avenue de Kersbeek, 1190 Bruxelles, Belgique. Adresse actuelle: B.P. 72, Ouagadougou, Haute Volta.

Table des matières

Introduction 292
Minéralogie 294
Les grenats 294
Les chlorites 296
Les micas blancs 297
Les micas noirs 298
Les carbonates 298
Les minerais opaques 298
Le chloritoïde 298
Les feldspaths 299
La malachite 299
Pétrographie 300
Les micaschistes calcifères 300
Les micaschistes à albite 302
Les micaschistes à grenat 302
Pétrologie 305
Le faciès métamorphique des environs de Zermatt 305
Les relations entre la composition chimique de la roche et sa minéralogie . . . 307
a) Les relations du grenat avec sa roche-mère 307
b) Les relations des chlorites avec leurs roches-mères et la chloritisation du grenat 309
c) Les relations entre la biotite et sa roche-mère; importance du degré d'oxydation de la roche 314
d) Les relations entre les micas blancs, l'albite et la teneur en soude de la roche 315
e) Les relations du chloritoïde avec sa roche-mère 316
Histoire des roches métamorphiques de Zermatt envisagée selon un métamorphisme progressif 317
Conclusions 318
Remerciements 319
Bibliographie 319

INTRODUCTION

L'étude géologique des environs de Zermatt (Suisse) a fait l'objet de diverses publications (ARGAND, 1934; BEARTH, 1939, 1952, 1953, 1967). Nous ne reviendrons pas sur sa discussion et adopterons le cadre géologique proposé par BEARTH (1952).

En général, les environs de Zermatt (Fig. 1) sont composés de roches pré-Permiennes qui ont subi les effets des orogenèses hercyniennes et alpine. Parmi ces roches, mentionnons: 1. les gneiss, marbres, gabbros et autres roches basiques de la nappe de la Dent Blanche, 2. les gneiss de la nappe du Grand-St-Bernard, 3. les gneiss et les migmatites du noyau de la nappe du Mont-Rose

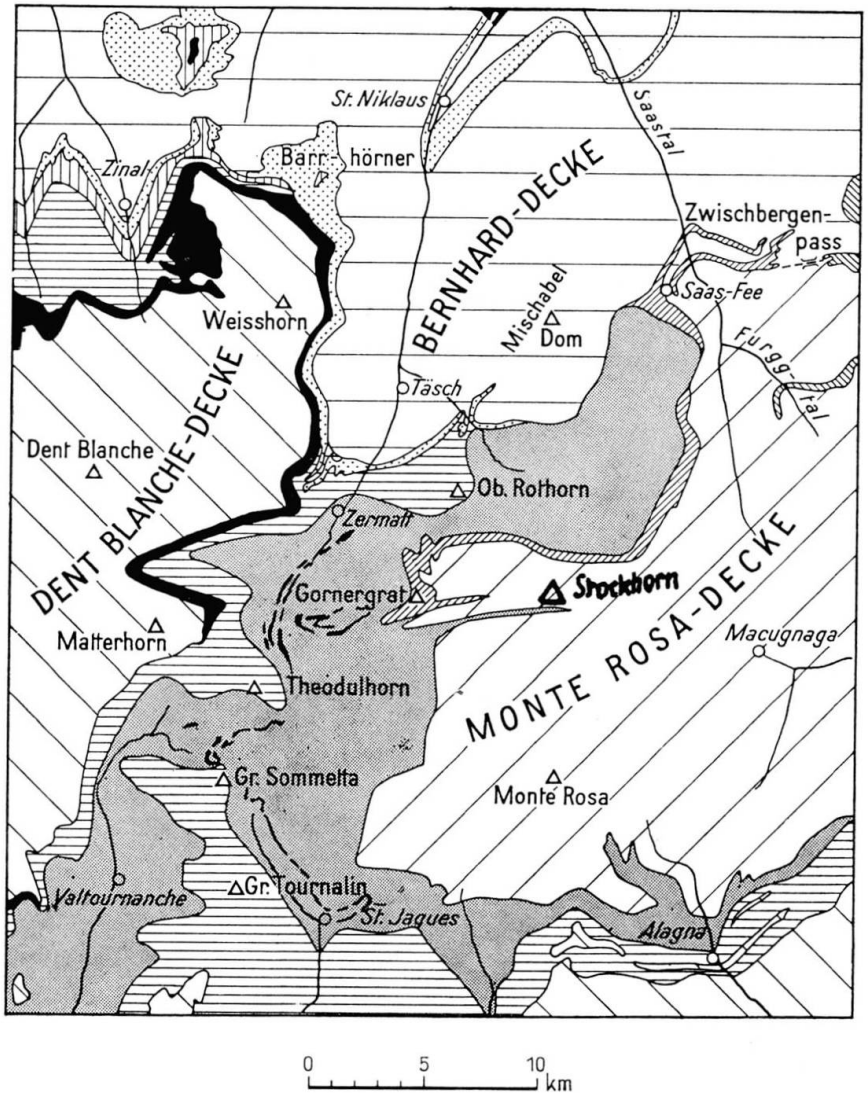

Fig. 1. Le cadre géologique des environs de Zermatt (Suisse), d'après Bearth (1967).

et les gneiss et micaschistes (quelques rares amphibolites) de la couverture de la nappe du Mont-Rose que nous appellerons dans la suite la zone du Hohtälli-Stockhorn. Parmi les roches post-Permiennes qui n'ont subi que les effets de l'orogenèse alpine, énumérons: 1. les micaschistes calcifères, les micaschistes, les quartzites, les marbres et les ophiolites de la zone de Zermatt-Saas Fee (BEARTH, 1952 et 1967).

La présente étude s'attache à vérifier: 1. le degré de métamorphisme atteint par les roches post-Permiennes au cours de l'orogenèse alpine, 2. les relations étroites existant entre la composition chimique de la roche et ses paragenèses minérales.

MINÉRALOGIE

Les grenats

La famille des grenats a servi de guide pour déterminer le degré de métamorphisme. De larges possibilités de substitution la rendent très sensible aux variations physiques et chimiques du milieu. Nous tenons en particulier à

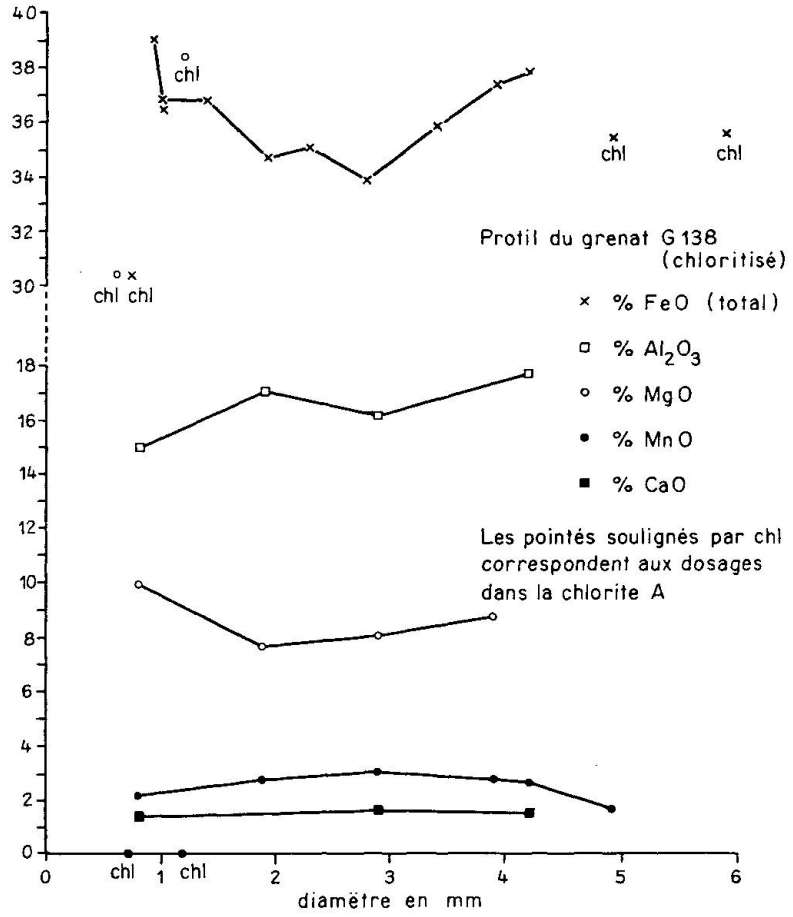

Fig. 2. Almandin partiellement chloritisé à texture zonée.

attirer l'attention sur les possibilités de substitution des éléments bivalents (Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}). En éffet, l'étude de quelques centaines d'analyses chimiques dignes de confiance, prises dans la littérature, nous a permis de constater des *limites de miscibilité* et même des *incompatibilités* parmi les éléments bivalents (Tableau 1).

On remarque par exemple que dans le grossulaire la limite supérieure de la teneur en MnO, MgO et FeO est proche de 4%, que le pyrope n'admet pas ou très peu de MnO tandis que la spessartine n'admet pas ou très peu de MgO.

Tableau 1. *„Limites maximales de miscibilité" et „incompatibilité" des éléments bivalents des grenats (pourcentage pondéral)*

	CaO	MnO	MgO	FeO
Grossulaire		± 4%	± 4%	± 4%
Pyrope	± 8%	—		± 6%
Almandin	±15%	±15%	±11%	
Spessartine	±15%		—	±15%

Tableau 2. *Analyses chimiques et physiques de grenat de Zermatt*

	G 130 1	G 74/1 2	G 74/2 2	G 78 2	G 73 2	G 4 3	G 19 4	G 132 4	G 133 4	G 134 4
Fe_2O_3	0,9	5,4	n.d.	2,1	1,6	1,1	2,1	6,2	n.d.	n.d.
FeO	7,0	22,5	n.d.	21,7	28,8	24,6	31,7	28,1	28,7	27,3
FeO tot	7,8	27,5	n.d.	23,6	25,4	25,6	33,7	33,7	n.d.	n.d.
MnO	25,3	3,4	n.d.	3,6	4,5	0,9	1,3	1,4	n.d.	n.d.
MgO	0,6	2,4	2,3	1,8	1,2	2,5	0,3	2,7	n.d.	n.d.
CaO	1,7	6,6	6,8	2,3	2,0	9,6	3,0	2,1	n.d.	n.d.
pyr	2,8	10,5		10,1	6,3	10,7	1,4	11,8		
alm	18,0	63,3		69,0	72,1	58,1	84,6	78,0		
spes	73,5	8,5		11,4	13,9	2,1	3,5	3,5		
gros	4,6	15,5		6,5	5,5	27,9	7,9	4,4		
and	1,0	2,2		2,9	2,2	1,1	2,6	2,2		
P.S:	4,01	n.d.	n.d.	4,20	3,99	n.d.	4,11	4,26	n.d.	n.d.
X	n.d.	n.d.	n.d.	50,1	n.d.	42,2	n.d.	57,3	53,3	53,3

	G 135 4	G 138 4	G 156B 4	G 158 4	G 212 4	G 218 4	G 223 4	G 228 4	G 236 4	G 260 4	G 266 4
Fe_2O_3	n.d.	6,9	1,6	7,5	n.d.	4,3	3,5	6,1	9,8	n.d.	3,6
FeO	26,8	28,6	29,6	28,0	n.d.	29,5	29,2	27,0	26,5	31,1	30,4
FeO tot	n.d.	34,9	31,1	34,8	n.d.	33,4	32,4	32,6	35,4	n.d.	33,7
MnO	n.d.	0,6	1,4	0,6	0,7	3,2	0,4	0,3	3,9	0,8	1,5
MgO	n.d.	1,9	2,4	1,3	1,6	1,9	1,6	1,7	2,1	2,0	n.d.
CaO	n.d.	4,5	2,3	2,0	1,3	2,9	3,5	2,5	2,3	2,7	n.d.
pyr		7,8	11,3	5,9		8,2	7,5	8,1	8,7	9,4	
alm		77,2	77,5	85,7		75,1	79,9	82,4	75,8	79,8	
spes		1,5	3,6	1,7		7,7	1,0	0,7	8,9	2,0	
gros		11,4	5,7	4,4		6,8	9,3	6,3	4,5	6,5	
and		2,1	1,8	2,3		2,1	2,3	2,4	2,0	2,3	
P.S.	n.d.	n.d.	4,00	4,04	4,12	4,12	n.d.	4,31	4,10	n.d.	4,10
X	53,3	59,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

X = susceptibilité magnétique (e. m. u.), P.S. = poids spécifique, 1 = spessartine, 2 = almandin manganésifère, 3 = almandin calcique, 4 = almandin pur, n.d. = non déterminé

Parmi les grenats récoltés aux environs de Zermatt, nous avons distingué chimiquement des spessartines, des almandins manganésifères, des almandins calcifères et des almandins quasi purs (Tableau 2).

Afin de nous assurer de l'homogénéité des almandins, nous avons étudié à la microsonde un almandin non chloritisé (DE BÉTHUNE et al., 1965) et un almandin partiellement chloritisé (Fig. 2). On y a constaté une hétérogénéité dans la composition chimique et même un zonage clairement défini par une bordure magnéso-ferreuse et un noyau manganéso-ferreux. L'incompatibilité du manganèse pour le magnésium dans le grenat, déjà suggérée dans le Tableau 1, se confirme donc. Le zonage des grenats nous permet de formuler plus loin une hypothèse sur le processus de chloritisation du grenat et sur sa formation au sein des ensembles métamorphiques.

Les chlorites

Parmi ces minéraux, nous avons distingué des clinochlore-pennines et des ripidolites.

L'analyse optique des clinochlore-pennines a donné les résultats suivants: Ne = 1,583; No = 1,580; pléochroisme léger à teinte verte; bissectrice aigue perpendiculaire à (001); angle 2V = 15°; biaxe positif; dispersion forte r > v; allongement négatif.

Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3. *Analyse chimique de clinochlore-pennine de Zermatt*

	pourcentage en poids d'oxyde	milli-molécules			
SiO_2	32,82	547,0	Si	6,181	8,0
Al_2O_3	13,85	135,5	Al	1,819	
Fe_2O_3	4,70	29,0	Al	1,242	
FeO	2,64	36,8	Fe^{3+}	0,650	11,99
MnO	0,00		Fe^{2+}	0,420	
CaO	0,00		Mg	9,678	
MgO	34,26	865,5	OH	16,046	16,05
H_2O^+	12,78	710,0			
total	101,05	formule type: $(Mg_{9,5}Al_{1,2}Fe_{1,1})(Si_{6,1}Al_{1,9})O_{20}(OH)_{16}$			

L'analyse aux R. X. (raies fortes à 7,11; 4,79; 3,58; 2,86 Å) et l'analyse thermique différentielle (pics endothermiques à 680° et, plus petit, à 810° – pic exothermique à 850°) confirment la haute teneur en magnésium de cette chlorite.

Parmi les ripidolites, nous avons distingué une chlorite que nous appellerons de type A: à couleurs d'interférence anormales dans le bleu, à signe optique négatif et à rapport Fe/Mg > 1 et une chlorite que appellerons de type B: à couleurs d'interférence anormales dans le brun-olive, à signe optique positif

et à rapport Fe/Mg < 1. Le tableau 4 résume les données chimiques et physiques des deux types de chlorite.

Tableau 4. *Analyses chimiques et physiques de ripidolites de Zermatt*

a) Chlorites de type A

	G 19	G 156A	G 156B	G 158	G 214	G 218	G 223	G 228
Fe_2O_3	2,0	10,5	1,3	4,4	9,6	6,8	4,1	n.d.
FeO	26,9	23,3	23,6	24,1	23,4	21,2	20,1	n.d.
FeO tot	28,76	32,80	24,88	28,05	32,12	27,36	25,96	27,07
MnO	0,28	0,28	0,46	0,44	0,15	0,18	0,21	0,28
MgO	8,5	9,5	7,8	7,5	10,1	10,8	11,4	11,7
CaO	0,32	0,40	2,3	1,1	0,6	2,8	2,8	1,4
P.S.	3,20	3,20	n.d.	3,00	3,00	n.d.	n.d.	n.d.

b) Chlorites de type B

	G 132	G 210	G 224
Fe_2O_3	5,0	8,0	2,8
FeO	21,9	18,1	20,8
FeO tot	26,51	25,30	23,34
MnO	0,15	0,15	0,15
MgO	17,8	12,4	13,9
CaO	0,5	0,8	0,8
P.S.	3,02	3,02	2,98

c) Chlorites des deux types

	G 212	G 217	G 236
Fe_2O_3	11,4	2,7	3,4
FeO	22,5	20,7	21,8
FeO tot	32,92	23,19	24,90
MnO	0,18	0,17	0,28
MgO	11,3	15,3	14,1
CaO	0,5	0,8	0,3
P.S.	2,80	n.d.	2,98

d) Moyennes

Chlorites de type A		Chlorites de type B
FeO tot	28,37	25,05
MnO	0,28	0,15
MgO	9,6	14,7
CaO	1,4	0,7
P.S.	3,10	3,00

Les micas blancs

Parmi les micas blancs, nous avons distingué la muscovite franchement potassique et une autre plus sodique (qui ne présente pas les caractères phy-

Tableau 5. *Analyses chimiques et physiques de muscovite de Zermatt*

	G 132	G 133	G 134	G 135	G 156	G 157	G 158	G 212	G 223
Fe_2O_3	3,1	1,4							
FeO	2,5	1,4							
MnO	tr	0,0							
MgO	1,6	1,1							
CaO	0,9	0,5							
K_2O	6,8	7,9							
Na_2O	4,8	2,2							
Li_2O	tr	tr							
Nm		1,604	1,604	1,608	1,595	1,600	1,594	1,590	1,594
Ng		1,608	1,608	1,608	1,598	1,602	1,596	1,594	1,598
2 V					45°	46°	44°		

siques de la paragonite) que nous avons rapprochée de la „natriumhaltigen Muskowit" de HARDER (1956). Les différentes données physiques et chimiques de ces micas sodiques sont résumées dans le tableau 5.

Les micas noirs

Parmi les micas noirs, nous avons distingué la biotite verte de la biotite brune et la phlogopite. La pauvreté en biotite dans les roches des environs de Zermatt ne nous a pas permis de la séparer de la roche et d'en faire une étude minéralogique spéciale. Seule la phlogopite a fait l'objet d'observations plus détaillées. C'est à la microsonde que nous l'avons mise en évidence parmi les micas blancs. Ces derniers nous avaient déjà fourni par l'analyse optique un angle 2V proche de 0°. Le dosage des éléments à la microsonde a donné les résultats suivants: MgO = 15,9%, Al_2O_3 = 36,8%[1]), SiO_2 = 47,0%, CaO = 1,4%, MnO = 0,0%, FeO tot = 2,8%. Faute de témoin, nous n'avons pas pu doser le potassium.

Les carbonates

Parmi les carbonates, grâce à des tests de coloration et à des analyses complexométriques, nous avons distingué de la calcite, de la calcite magnésienne et de la dolomite[2]) (tableau 6).

Des éssais de coloration ont montré que: 1. la calcite seule apparaît jusqu'à concurrence de 19,7% de $MgCO_3$ (calcite magnésienne), 2. entre 19,7% et 35,9% de $MgCO_3$ coexistent la calcite magnésienne et la dolomite, 3. à partir de 35,9% de $MgCO_3$ seule la dolomite subsiste.

Les minerais opaques

Mis à part les petits filons de pyrite à gangue de quartz et albite, et d'hématite à gangue quartzeuse représentant une phase hydrothermale faible et tardive, les minerais opaques, composant intime de la roche, sont de la magnétite, un peu de chalcopyrite, du rutile et de l'ilménite, de l'hématite et de la pyrite généralement transformée en goethite.

Le chloritoïde

Les caractères optiques du chloritoïde (photo 1) sont les suivants: biaxe négatif, angle 2V = 30°, angle d'extinction = 13°, pléochroisme léger à teintes bleu très léger selon X, et incolore suivant Y, un bon clivage (110) et un autre

---

[1]) Le coefficient d'erreur est certainement élevé, surtout pour l'alumine.

[2]) Ces tests chimiques utilisés généralement pour des roches sédimentaires doivent certainement être interprétés avec prudence lorsqu'on les applique aux roches métamorphiques.

Tableau 6. *Analyses de carbonates de Zermatt*

A. Calcite et calcite magnésienne

	G 61	G 62 A	G 64	G 66	G 74	G 79/1	G 79/2	G 80	G 254	G 87	G 89	G 90	G 103
CaO	53,6	54,7	53,3	54,8	50,7	52,7	53,6	53,4	54,9	54,4	55,4	53,7	54,5
MgO	2,0	1,1	2,3	1,0	4,5	2,8	2,2	2,0	1,0	1,4	2,0	2,3	1,3
CO_2	44,3	44,2	44,4	44,1	44,8	44,5	44,5	44,2	44,2	44,2	44,3	44,4	44,2
$CaCO_3$	95,8	97,7	95,3	97,8	90,6	94,1	95,7	95,4	98,0	97,1	95,8	95,2	97,2
$MgCO_3$	4,3	2,3	4,7	2,1	9,4	5,9	4,6	4,3	2,1	2,9	4,2	4,7	2,7

	G 88	G 74	G 86	G 252	G 384	G 441	G 442	G 443	G 415	G 430	G 431	G 433	G 77
CaO	50,7	55,4	53,7	51,1	52,8	52,0	53,8	53,5	50,4	52,9	54,2	52,6	53,6
MgO	0,5	4,5	1,9	4,1	2,7	3,4	11,9	2,2	4,8	2,7	1,6	2,9	2,0
CO_2	44,1	44,8	44,3	44,7	44,4	44,6	44,3	44,4	44,8	44,4	44,3	44,5	44,3
$CaCO_3$	99,0	90,6	95,9	91,3	94,2	92,9	96,0	95,5	90,0	94,4	96,7	93,9	95,8
$MgCO_3$	1,0	9,4	4,0	8,7	5,7	7,0	4,0	4,5	9,9	5,6	3,2	6,1	4,2

B. Dolomite

	G 62 B	G 128	G 250	G 251	G 253	G 420	G 424	G 425	G 426	G 427	G 428	G 354	G 356
CaO	34,7	31,6	34,9	32,3	31,6	35,9	29,7	32,4	32,1	33,2	34,5	31,1	30,0
MgO	18,2	20,8	18,0	20,0	20,6	17,1	22,4	20,1	20,4	19,4	18,3	22,0	23,6
CO_2	47,1	47,6	47,0	47,3	47,4	46,9	47,8	47,4	47,5	47,3	47,1	46,9	47,6
$CaCO_3$	61,9	56,5	62,3	57,7	56,5	64,1	53,0	57,9	57,3	59,3	61,7	54,4	51,5
$MgCO_3$	38,1	43,5	37,6	41,9	43,2	35,9	46,9	42,1	42,7	40,7	38,3	45,6	48,5

moins bien marqué et perpendiculaire au premier, biréfringence faible = 0,013, mâcles polysynthétiques parallèles au clivage (110), allongement négatif.

Les feldspaths

Seule, parmi les feldspaths, l'albite est représentée d'une manière importante dans les roches étudiées. L'albite contient en moyenne 7% d'anorthite (variation entre 0 et 15%). Quelques porphyroblastes d'albite ont montré des inclusions d'andésine (photo 2) contenant 34% d'anorthite (variation de 30 à 40%). Quelques grains de microcline, toujours mâclé (quadrillage), existent dans les gneiss pré-Permiens.

La malachite

Des imprégnations de malachite (photo 3) ont été observées dans les micaschistes à albite de la zone du Gornergrat, juste en dessous des serpentines sur lesquelles est construit le belvédère du Gornergrat. Les données optiques sont les suivantes: pléochroïsme faible (teintes: incolore selon Np et vert pâle suivant Ng), biaxe négatif, angle $2V = 40°$, dispersion nette $r > v$, Np est quasi perpendiculaire au clivage plus ou mois transversal des fibres, allongement négatif, angle d'extinction = 22°, mâcles polysynthétiques fréquentes. Nous supposons la présence d'un minéral primaire de cuivre (chalcopyrite) dans la serpentine sous-jacente[3]).

[3]) Au cours d'une excursion géologique au Gornergrat en septembre 1967, le professeur P. de Béthune en compagnie de l'auteur a ramené d'autres indices de malachite, cette-fois-ci dans la serpentine.

PÉTROGRAPHIE

Les micaschistes calcifères

Les micaschistes calcifères sont très largement répandus dans la région de Zermatt. Ces roches de structure schisteuse possèdent une texture à gros grains de quartz et de calcite grenue et entièrement recristallisée, de micas (muscovite et phlogopite) lépidoblastiques et souvent plissés, d'épidote-clinozoïsite nématoblastique et de porphyroblastes poeciloblastiques de grenat et parfois de sphène.

La calcite magnésienne qui représente la plus grande partie de la roche est souvent entourée d'une auréole limonitique quand l'échantillon est frais.

La chlorite, incolore à vert pâle, ne se rencontre pas en grande quantité. Quand le grenat est chloritisé (uniquement dans la bande des micaschistes calcifères du Gornergrat), la chlorite a une biréfringence anormale dans le bleu et correspond à la chlorite hystérogène de type A (cfr. p. 296).

L'épidote commune associée à de la clinozoïsite et plus rarement à de la zoïsite représente le groupe des épidotes. On constate une étroite association entre la clinozoïsite et la calcite.

De nombreux échantillons des micaschistes calcifères comportent un almandin manganésifère, porphyroblastique et poeciliblastique (photo 4), à inclusions de quartz, de mica blanc et de carbonate. Parfois même on observe une alternance de bandes parallèles (photo 5). Le grenat en tamis s'entoure parfois d'une couronne grenatifère plus homogène (photo 6). D'autres grenats présentent une texture hélicitique (photo 7).

Etroitement associé sur le terrain aux micaschistes calcifères apparaît une roche particulière: la Queluzite (Holtrop, 1965). Cette roche affleure aux

Tableau 7. *Paragenèse des micashistes calcifères*

qtz		musc	phlog	chl	alm	ép-clin	calc	
qtz		musc	phlog	chl		ép-clin	calc	
qtz		musc	phlog	chl		zoïs	calc	
qtz	alb	musc		chl		ép-clin	calc	
qtz		musc			alm	ép-clin	calc	hornb
qtz		musc	phlog	chl	alm	ép-clin	calc	
qtz		musc	phlog	chl	alm		calc	
qtz		musc	phlog				calc	
qtz		musc					calc	
qtz		musc				ép-clin	calc	
qtz		musc				zoïs	calc	
qtz						ép-clin	calc	

qtz = quartz, alb = albite, micr = microcline, musc = muscovite, musc Na = muscovite sodique, phlog = phlogopite, chl = chlorite, chl A = chlorite de type A, chl B = chlorite de type B, alm = almandin, spes = spessartine, ép-clin = épidote-clinozoïsite, zoïs = zoïsite, calc = calcite, calc Mg = calcite magnésienne, carbon = carbonate, hornb = hornblende, biot v = biotite verte, biot b = biotite brune, ap = apatite, op = minerai opaque, chlïde = chloritoïde, trém = trémolite.

Tableau 8. *Analyses chimiques de micaschistes calcifères de la zone de Zermatt–Saas Fee*

	pourcentage d'oxyde en poids	milli-molécules	pourcentage d'oxyde en poids	milli-molécules	pourcentage d'oxyde en poids	milli-molécules
	G 74/1		G 74/2		G 78	
SiO_2	30,65	510,0				
TiO_2	0,35	4,5				
Al_2O_3	6,18	60,8				
Fe_2O_3	0,42	3,0	1,0	6,2	0,9	5,6
FeO	1,70	24,0	1,5	20,8	7,3	101,4
FeO tot	2,07	28,7	2,4	32,8	8,1	112,2
MnO	0,10	1,0	0,12	1,7	1,16	16,3
MgO	1,65	40,9				
CaO	30,64	547,0				
K_2O	1,17	12,7				
Na_2O	0,29	4,8				
H_2O^+	1,73					
H_2O^-	0,07					
CO_2	24,72	561,8				
P_2O_5	0,06	0,6				
total	99,80					

environs du Schwarzsee. Signalée pour la première fois comme un „Granatfels" par SCHNELL (1920), elle n'est jamais plus mentionnée par la suite par aucun auteur. La roche se compose de 66% de spessartine, 25% de trémolite, 4,3% de calcite, 4,3% de sphène, 0,5% d'orthose, 0,3% d'apatite et de 0,1% de magnétite. Le grenat se présente en petits cristaux arrondis se concentrant en bandes; entre celles-ci s'accumulent les amphiboles. L'analyse partielle d'un concentré de grenat nous a donné les résultats suivants: 18% d'almandin, 73,5% de spessartine, 2,8% de pyrope, 4,2% de grossulaire et 1,0% d'andradite.

Tableau 9. *Analyse chimique de la queluzite du Schwarzsee*

	pourcentage en poids d'oxyde	milli-molécules
SiO_2	39,47	656,8
Al_2O_3	16,00	157,0
TiO_2	1,75	22,0
Fe_2O_3	1,57	10,0
FeO	6,93	96,0
MnO	17,00	239,4
CaO	12,75	228,0
MgO	2,18	54,5
Na_2O	0,08	1,6
K_2O	0,05	0,5
P_2O_5	0,11	1,0
H_2O^-	0,04	
H_2O^+	0,38	20,0
CO_2	1,89	43,1
total	100,20	

Les micaschistes à albite

Nous décrivons une série de roches pélitiques d'âge mésozoïque (BEARTH, 1952) que l'on a rencontré aux environs du Gornergrat (Zermatt).

La texture de ces micaschistes riches en porphyroblastes d'albite poecilo-blastique est généralement cataclastique, avec une recristallisation prononcée.

Le quartz se présente en grains fracturés, à bords souvent dentelés et généralement étirés dans le sens de la schistosité.

L'albite est fréquemment porphyroblastique et poeciloblastique; les porphyroblastes composés de plusieurs cristaux contiennent souvent de minuscules lamelles de mica blanc et de petits grains de quartz dont l'alignement est parallèle à la schistosité. L'albite est rarement cataclasée; les grains brisés sont cimentés par du quartz. Au sein des porphyroblastes d'albite, on observe des petits grains d'andésine mâclée (photo 2).

Le mica blanc souvent plissés et déchirés correspond très vraisemblablement à une muscovite potassique comme l'indique la teneur élevée en potasse de la roche et cela en l'absence de microcline.

La biotite à teinte de pléochroisme verte est caractéristique de ce type de roche.

La chlorite présente des teintes de pléochroisme vertes et des teintes de polarisation anormales dans le brun-olive (chlorite de type B).

L'épidote-clinozoïsite se rencontre dans toutes ces roches mais en faible quantité.

Les micaschistes à grenat

Des micaschistes affleurent dans la contrée comprise entre le Hohtälli et le Stockhorn. Structurellement ces roches ne diffèrent pas des micaschistes précédents (à albite); néanmoins, ils s'en distinguent sur le terrain par leur aspect et surtout leur couleur. D'autre part, dans cette série, apparaissent de nouveaux minéraux tels que le grenat, la chlorite hystérogène du type A, la biotite brune, la muscovite sodique et le chloritoïde tandis que la biotite verte disparaît.

L'albite continue à représenter les plagioclases.

Le mica blanc reste le minéral le plus important dans ce type de roche. En présence d'albite, on trouve une muscovite potassique; quand l'albite est absente (cas des micaschistes à cloritoïde), la muscovite devient sodique.

La biotite à teinte de pléochroïsme brune n'est jamais très abondante. Elle est parfois chloritisée et, dans ce cas, renferme de fines aiguilles de sagénite.

Le chloritoïde apparaît dans quelques échantillons et se présente toujours sous la forme de cristaux allongé dans les lits micacés.

Le grenat est toujours chloritisé. Cette altération l'attaque sur les bords ou dans les fractures. Des minerais opaques peuvent accompagner cette chlorite

Tableau 10. *Mode et analyses chimiques partielles de micaschistes de la Zone du Gornergrat* (voir légende du tableau 7, page 300)

	G 27	G 28	G 29	G 33	G 150
qtz	8,1	51,8	41,1	60,1	40,1
micr		0,3		0,2	
alb	29,1	18,3	22,2	4,8	16,9
mic bl	56,3	29,0	25,3	34,4	42,5
chl			8,1		tr
biot v	3,5		2,7		
ép-clin		tr	0,5		0,3
carbon	0,3	0,4			
ap	0,3	0,2		0,2	0,1
op	2,6	0,1	0,2	0,2	0,1
nbre points	3.500	15.600	2.800	3.000	2.000

	pourcentage en poids d'oxydes	milli-molécules	pourcentage en poids d'oxydes	milli-molécules	pourcentage en poids d'oxydes	milli-molécules
	G 27		G 28/2		G 29	
Fe_2O_3	5,0	31,6	1,4	8,5	1,2	7,2
FeO	0,9	12,9	0,2	2,5	1,8	25,7
FeO tot	5,4	76,1	1,4	19,4	2,9	40,3
MnO	0,00		0,00		0,00	
K_2O	6,18	65,6			2,70	28,7
Na_2O	1,98	31,9			1,48	23,9
	G 150		G 151		G 33	
Fe_2O_3	0,9	5,6	1,5	9,2	1,0	6,3
FeO	0,2	2,4	0,2	2,5	0,4	5,1
FeO tot	1,4	19,2	1,5	21,0	1,8	25,5
MnO	0,00		0,03	0,4	0,00	

Tableau 11. *Paragenèse de la roche de la Zone de Hohtälli-Stockhorn* (voir la légende du tableau 7, page 300)

qtz	alb	musc	biot b	chl B	alm (+chl A)			
qtz	alb	musc	biot b	chl B				
qtz	alb	musc	biot b		alm (+chl A)			
qtz	alb	musc		chl B	alm (+chl A)			
qtz	alb	musc			alm (+chl A)			
qtz	alb	musc			chl A)			
qtz	alb	musc		chl B		ép-clin		
qtz	alb	musc	biot b			ép-clin		
qtz	alb	musc	biot b	chl B		ép-clin		
qtz	alb	musc		chl B		ép-clin		
qtz	alb	musc		chl B	alm (+chl A)	ép-clin		
qtz	alb	musc						
qtz	alb				chl A	ép-clin		
qtz		musc Na		chl B	alm (+chl A)		chlïde	
qtz		musc Na		chl B			chlïde	
	alb		biot b	chl B		ép-clin		hornb
	alb					ép-clin		hornb

hystérogène. Parfois complète, la chloritisation ne laisse alors qu'une plage de chlorite pseudomorphe du grenat (photo 8). Le grenat à texture en ,,tamis" est rare; la texture en ,,atoll" se rencontre parfois (photos 9 et 10), ainsi que la texture hélicitique. Des inclusions de minerais opaques se concentrent souvent

au centre du grain laissant les bordures sans inclusions. La limite entre ces deux zones dessine souvent une forme hexagonale.

Tableau 12. *Mode et analyses chimiques de micaschistes et gneiss de la Zone de Hohtälli-Stockhorn*

	G 206	G 19	G 132	G 133	G 134	G 135	G 156	G 158	G 162	G 166	G 168	G 171
qtz	38,5	32,6	23,9	25,8	32,5	68,0	25,0	51,4	19,3	30,3	24,0	42,1
alb		4,4					18,6	4,3	4,3	18,0	34,2	
musc	40,8	48,3	53,5	50,6	45,2	16,1	44,5	41,6	58,2	40,5	23,5	40,2
biot b							tr	0,3			12,3	
chl	12,7	6,5	8,7	5,4	9,5	3,3	5,0	tr	16,9	4,4		9,5
alm	3,1	6,5	6,6	12,8	10,4	3,2	5,6	1,7		4,2		5,6
chlïde	4,0		5,6	4,8	1,5	9,4						0,5
ép-clin		0,1								2,0	5,5	
sph		tr								0,4	0,6	
op	0,6	1,1	1,7	0,5	1,4	0,1	1,1	0,9	1,5	0,6		2,2
ap	tr		tr					0,1				
tourm					tr							
nbre pts	3.000	7.400	3.000	3.000	2.400	3.000	3.400	2.700	2.000	6.100	6.000	9.000

	G 207	G 212	G 214	G 215	G 217	G 220	G 222	G 224	G 228	G 231 A	G 233	G 236
qtz	31,0	50,1	46,9	49,6	17,5	57,9	32,6	28,9	30,6	5,3	23,2	13,0
alb		4,0	36,3	39,0	19,7	2,5		27,3	19,7	66,9	51,6	17,6
musc	51,8	39,2	38,0	8,3	42,8	29,7	46,1	22,2	36,8	18,0	20,7	
biot b					4,8	7,7			1,0		2,5	
chl	8,2	3,8	17,0	1,4	7,6		13,6	18,4	4,5	5,8		12,9
alm	4,4	1,4			5,0		1,3	tr	5,4			4,5
chlïde	3,9						2,9					
ép-clin								1,0		1,1	2,0	0,3
sph			0,8			1,1		0,9	1,0	0,7	tr	tr
op	0,5	1,3		1,2	2,6	1,1	3,4	1,3	1,3			
ap		0,1		0,3								
tourm										0,8		
rut												
nbre pts	3.000	3.000	6.000	6.000	3.000	6.000	9.000	3.100	3.000	6.000	11.200	2.600

	G 166/1	G 168/1	G 171/1	G 214/1	G 215/1	G 220/1	G 222/1	G 231 A/1	G 233/1
SiO_2	68,75	66,70	62,60	52,50	65,35	76,80	65,40	63,10	71,90
TiO_2	0,56	0,67	0,99	1,06	0,81	0,66	0,64	0,50	0,26
Al_2O_3	15,40	15,30	17,55	22,75	19,92	10,40	17,70	19,85	15,32
Fe_2O_3	0,70	1,53	1,01	1,22	0,30	1,30	0,84	0,64	1,04
FeO	4,00	2,80	6,71	6,34	0,64	2,33	4,26	1,27	0,85
FeO tot	3,75	4,18		7,44	0,91	3,51		1,84	1,79
MnO	0,06	0,06	0,11	0,05	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02
MgO	1,40	1,70	2,14	3,35	0,61	1,30	1,95	1,30	0,88
CaO	1,55	2,52	1,40	0,50	1,01	0,52	0,83	1,25	0,84
K_2O	3,20	3,60	3,50	4,62	1,57	4,05	3,75	1,40	2,42
Na_2O	1,90	3,15	0,55	3,57	8,26	0,58	0,60	8,55	5,28
H_2O^+	2,00	1,58	2,98	3,74	0,70	1,83	3,25	1,44	0,94
H_2O^-	0,05	0,03	0,13	0,03	0,02	0,03	0,19	0,04	0,02
CO_2	0,06	0,02	0,11	0,03	0,03	tr	0,13	0,15	0,02
P_2O_5	0,31	0,31	0,17	0,18	0,47	0,08	0,21	0,17	0,11
Li_2O	0,002	0,013	0,017	0,009	0,002	0,002	0,018	0,002	0,002
S	0,07	0,10		0,10	0,08	0,06		0,06	0,07
total	100,01	100,08	99,97	100,05	99,78	99,97	99,79	99,74	99,98

	G 19	G 132	G 133	G 134	G 135	G 138	G 156A	G 156B	G 158	G 162	G 156/2
Fe_2O_3	6,7	1,2	4,9	2,5	0,4	2,1	2,8	3,4	1,2	1,7	1,3
FeO	8,8	6,3	8,6	5,3	4,6	10,9	3,5	4,2	3,1	4,6	2,6
FeO tot	14,8	7,3	13,0	7,5	5,0	12,8	6,0	7,3	4,3	6,2	3,7
MnO	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	1,3	0,0	0,0
K_2O	n.d.	3,84	2,05	4,95	4,72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na_2O	n.d.	1,29	0,63	1,00	1,00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

	G 168/2	G 171/2	G 216	G 207	G 212	G 214/2	G 215/2	G 217	G 218	G 220/2
FeO_3	1,7	1,1	2,4	2,3	2,6	1,6	0,1	2,2	n.d.	2,5
FeO	2,0	2,9	7,0	5,9	4,9	5,8	0,4	5,3	3,7	1,5
FeO tot	3,5	3,9	9,2	8,0	7,2	7,2	0,4	7,3	n.d.	3,8
MnO	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,8	tr
K_2O	n.d.	4,1	4,3	4,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Na_2O	n.d.	0,8	2,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

	G 222/2	G 223	G 224	G 228	G 231A/2	G 233/2	G 236	G 260
Fe_2O_3	2,1	1,1	0,8	0,8	2,7	2,6	0,7	2,6
FeO	3,9	6,4	5,0	3,2	1,3	0,6	5,9	7,9
FeO tot	5,7	7,4	5,8	4,0	3,8	2,9	6,5	10,2
MnO	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,4
K_2O	4,17	n.d.	n.d.	n.d.	1,1	n.d.	n.d.	n.d.
Na_2O	1,1	n.d.	n.d.	n.d.	1,5	n.d.	n.d.	n.d.

Les chlorites se présentent sous les deux types A et B. Celle de type A est toujours associée à la chloritisation du grenat. Celle de type B, plus rare, paraît indépendante du grenat. Les deux chlorites peuvent coexister dans la même roche.

PÉTROLOGIE

Dans ce chapitre, nous tentons d'interpréter les différentes paragenèses minéralogiques comme la conséquence de compositions chimiques initialement différentes de la roche, en supposant que la pression et la température ont agi d'une façon semblable sur toutes les roches examinées. Toutes les paragenèses seraient alors en équilibre dans la zone de métamorphisme de l'almandin. Pour reconstituer l'histoire de ces roches, nous envisageons un métamorphisme progressif, passant d'un degré faible (celui de la chlorite) à un degré plus fort (celui de l'almandin).

Le faciès métamorphique des environs de Zermatt

Nous définissons d'après ESKOLA (1915) le faciès métamorphique:

„on attribue à un faciès défini les roches qui, avec la même composition chimique globale, présentent la même composition minéralogique, et dans lesquelles, quand change la composition chimique, change également la composition minéralogique, ceci suivant des règles déterminées."

Les paragenèses observées sont les suivantes:

1. quartz - muscovite - phlogopite - chlorite - almandin - épidote - clinozoïsite - calcite magnésienne (micaschistes calcifères),
2. spessartine - trémolite - calcite (quéluzite),
3. quartz - albite - muscovite - biotite verte - chlorite de type B (micaschistes à albite),
4. quartz - albite - muscovite - biotite brune - chlorites de type A et B - almandin (micaschistes à grenat),
5. quartz - muscovite sodique - chlorite de type A e B - almandin - chloritoïde (micaschistes à chloritoïde).

Nous proposons de vérifier l'état d'équilibre entre les minéraux suivants: quartz - albite - muscovite - muscovite sodique - phlogopite - chlorite de type A -

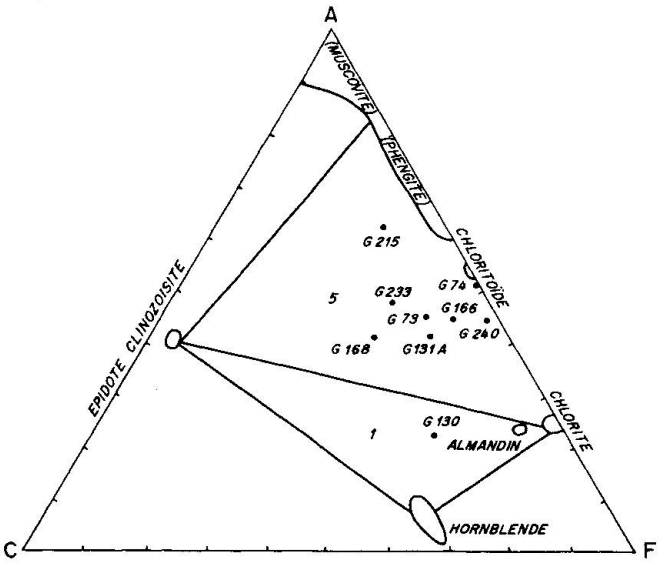

Fig. 3a. Diagramme ACF.

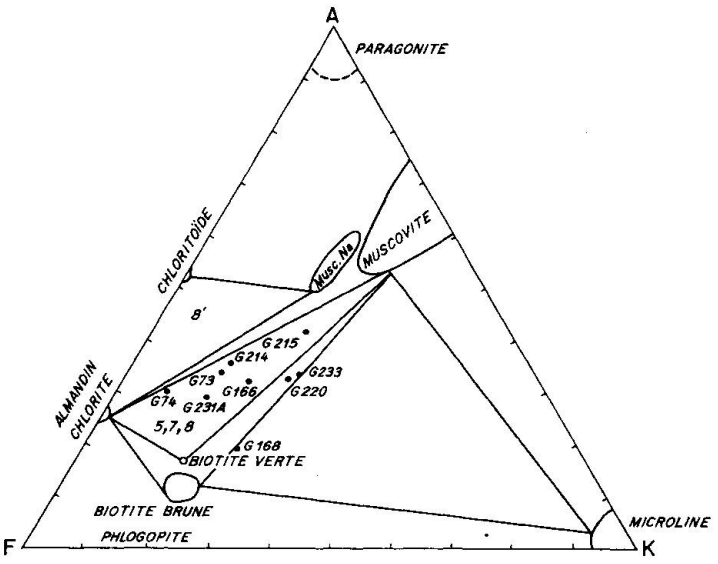

Fig. 3b. Diagramme AKF.

chlorite de type B - almandin - spessartine - calcite magnésienne - calcite - épidote - clinozoïsite - trémolite - biotite verte - biotite brune - chloritoïde.

D'après les lois de la thermodynamique, à condition d'assimiler nos roches à des systèmes fermés, l'équilibre sera atteint lorsque ce système, caractérisé par une composition chimique définie, comprendra un ensemble de phases différentes. Ainsi, un système quelconque, en équilibre, peut comprendre une biotite verte ou une biotite brune mais pas les deux ensemble. La muscovite potassique apparaîtra dans un système (roche) différent de celui où se formera la muscovite sodique, de même pour la phlogopite et les autres micas noirs, pour la calcite et la calcite magnésienne, pour la spessartine et l'almandin. Seule la chlorite magnésienne (type B) et la chlorite ferreuse (type A) font exception puisqu'on les observe ensemble dans une même association. Cette paragenèse retiendra spécialement notre attention plus loin.

Afin de représenter ces paragenèses dans des diagrammes triangulaires, nous nous sommes inspirés des diagrammes ACF et AKF de ESKOLA (1915).

Pour TURNER et VERHOOGEN (1951), ces paragenèses appartiennent au faciès à amphibole et à épidote. Pour ces mêmes auteurs (1960), celles-ci appartiendraient au faciès „schistes verts" et plus précisément au sous-faciès à „quartz-albite-épidote-almandin". Quelques minéraux n'y sont pas mentionnés tels que la phlogopite, la chlorite ferreuse et la muscovite sodique. La température de stabilité de ce faciès serait de l'ordre de 300 à 500° C et la pression de 3000 à 8000 bars. Pour BARTH (1962), ces paragenèses se situent dans le faciès „amphibolite à épidote" et plus précisément dans le sous-faciès „amphibolite à albite et épidote". La température serait comprise entre 250 et 400° C.

Les relations entre la composition chimique de la roche et sa minéralogie

a) Les relations du grenat avec sa roche-mère

Afin de connaître la relation existant entre le grenat et la roche qui le contient (roche-mère), nous nous sommes inspirés principalement des études de WRIGHT (1938), JAFFÉ (1951), MIYASHIRO (1953) et TRÖGER (1959). En nous limitant à la famille des pyralspites, nous obtenons le diagramme triangulaire de la Fig. 4.

Les grenats de Zermatt montrent des différences dans leurs compositions chimiques: la spessartine apparaît dans la quéluzite, l'almandin manganésifère dans les micaschistes calcifères, l'almandin quasi pur dans les micaschistes[4]). Ces compositions sont résumées dans les Fig. 5 et 6.

---

[4]) L'analyse chimique d'un grenat provenant d'une ophiolite nous montre un almandin calcifère (échantillon G 4, p. 295).

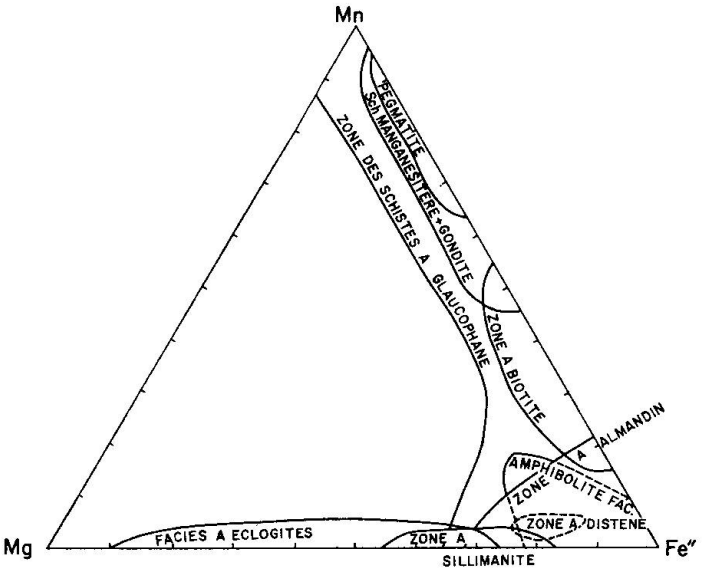

Fig. 4. Distribution des grenats dans un diagramme $Mn/Fe^{2+}/Mg$.

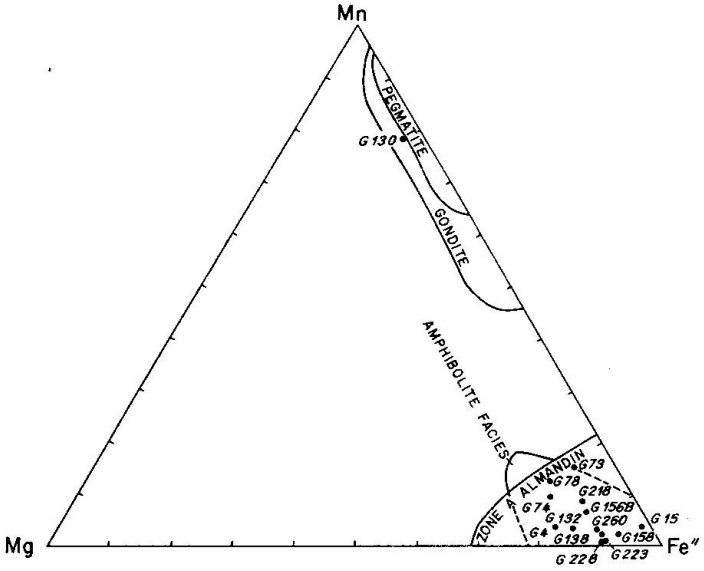

Fig. 5. Distribution des grenats de Zermatt dans un diagramme $Mn/Fe^{2+}/Mg$.

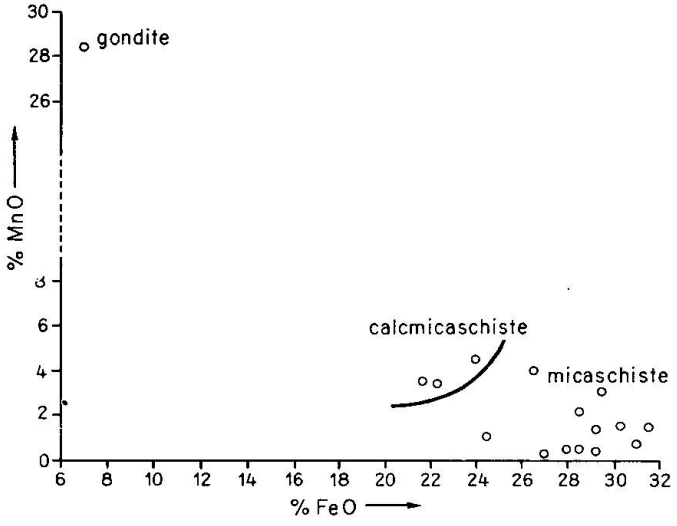

Fig. 6. Distribution des grenats de Zermatt dans un diagramme MnO/FeO.

La quantité de manganèse dans les grenats est en gros proportionnelle à celle de la roche-mère. Cette relation est évidente pour l'ensemble queluzite-spessartine. Mais la relation est identique pour les micaschistes calcifères (0,53% de MnO en moyenne) qui contiennent des almandins manganésifères et pour les micaschistes (0,13% de MnO en moyenne) qui contiennent des almandins pratiquement purs. En poussant ces constatations jusqu'au bout, on doit remarquer que les micaschistes à albite dépourvus de manganèse, ne contiennent jamais de grenat.

La quantité de fer du grenat par rapport à la roche-mère est également proportionnelle comme le montre la Fig. 7.

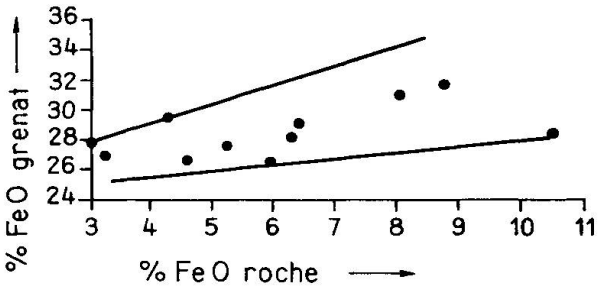

Fig. 7. Distribution du FeO entre les grenats et leurs roches-mères.

On peut conclure que l'apparition des grenats de la famille des pyralspites dépend étroitement de la teneur en manganèse et en fer de la roche-mère.

b) Les relations des chlorites avec leurs roches-mères et la chloritisation du grenat

Nous avons exposé précédemment la distinction que nous établissons entre les chlorites A (ferreuse) et B (magnésienne), toutes deux associées à l'almandin dans certains micaschistes.

La teneur en fer de ces chlorites est liée à celle de la roche-mère (Fig. 8) par une règle inversément proportionnelle, ce qui signifierait que dans les roches riches en fer, cet élément est fixé de préférence par le grenat tandis que la chlorite assimilerait le magnésium et le fer restant. Mais dans le cas de roches pauvres en fer, le grenat aurait des difficultés à se former et alors le fer se concentrerait plus facilement dans la chlorite.

Le fer (cfr. supra) de la roche joue donc un rôle primordial dans la formation non seulement des grenats mais aussi des chlorites.

Laissons pour le moment le cas de la chlorite de type B pour nous concentrer sur l'étude de l'association almandin-chlorite A. Nous avons vu que la chlorite A était le produit de l'altération de l'almandin (chloritisation du grenat). Le tableau 15 résume les correspondances chimiques entre ces deux minéraux.

On constate que la teneur en fer est supérieure dans l'almandin, que la teneur en magnésium est supérieure dans la chlorite, que la teneur en manganèse est supérieure dans l'almandin et que le calcium se répartit également entre l'almandin et la chlorite.

Tableau 15. *Analyses chimiques et rapports caractéristiques dans l'almandin et la chlorite A*

	nombre d'atomes ×1.000 G 19	nombre d'atomes ×1.000 G 156B	nombre d'atomes ×1.000 G 218	nombre d'atomes ×1.000 G 223	nombre d'atomes ×1.000 G 158	nombre d'atomes ×1.000 G 228
Fe tot	399,5	345,6	380,1	360,6	389,6	376,0
Fe^{3+}	25,0	16,0	85,0	52,0	55,0	n.d.
Fe^{2+}	374,0	329,0	295,0	309,0	335,0	n.d.
Mn^{2+}	4,0	6,5	2,5	2,9	6,2	3,9
Mg^{2+}	187,0	192,0	268,0	283,0	186,0	290,0
Ca^{2+}	59,0	42,0	49,0	49,0	39,0	50,0
			Chlorite A			
Fe tot	468,6	431,5	464,5	449,8	484,0	439,6
Fe^{3+}	27,0	20,0	54,0	44,0	95,0	75,0
Fe^{2+}	442,0	412,0	410,0	406,0	388,0	376,0
Mn^{2+}	18,2	19,5	45,0	5,3	9,1	3,8
Mg^{2+}	72,0	42,0	48,0	39,0	32,0	42,0
Ca^{2+}	54,0	40,0	49,0	42,0	36,0	45,0
			Almandin			
$\frac{\text{Fe tot (gren)}}{\text{Fe tot (chl)}}$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$\frac{\text{Mg (gren)}}{\text{Mg (chl)}}$	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
$\frac{\text{Mn (gren)}}{\text{Mn (chl)}}$	4,5	3,0	16,0	1,8	1,5	1,0
$\frac{\text{Ca (gren)}}{\text{Ca (chl)}}$	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9

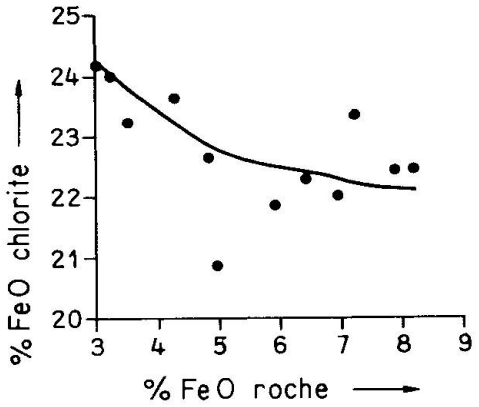

Fig. 8. Distribution du FeO entre les chlorites et leurs roches-mères.

Les lois de répartition des éléments entre deux ou plusieurs phases ont été étudiées par de nombreux géothermodynamiciens depuis les travaux précurseurs de Ramberg et de Vore (1951). Dans le cas de la chloritisation, on est en présence d'un système à deux phases (chlorite A et almandin) qui contiennent, en proportions variées, les mêmes éléments. On peut supposer que ces deux phases minérales forment un système fermé, au moins pour le fer, le magnésium, le manganèse et le calcium. En fait, ce système n'est pas rigoureusement fermé puisque pour former de la chlorite, il faut nécessairement lui apporter

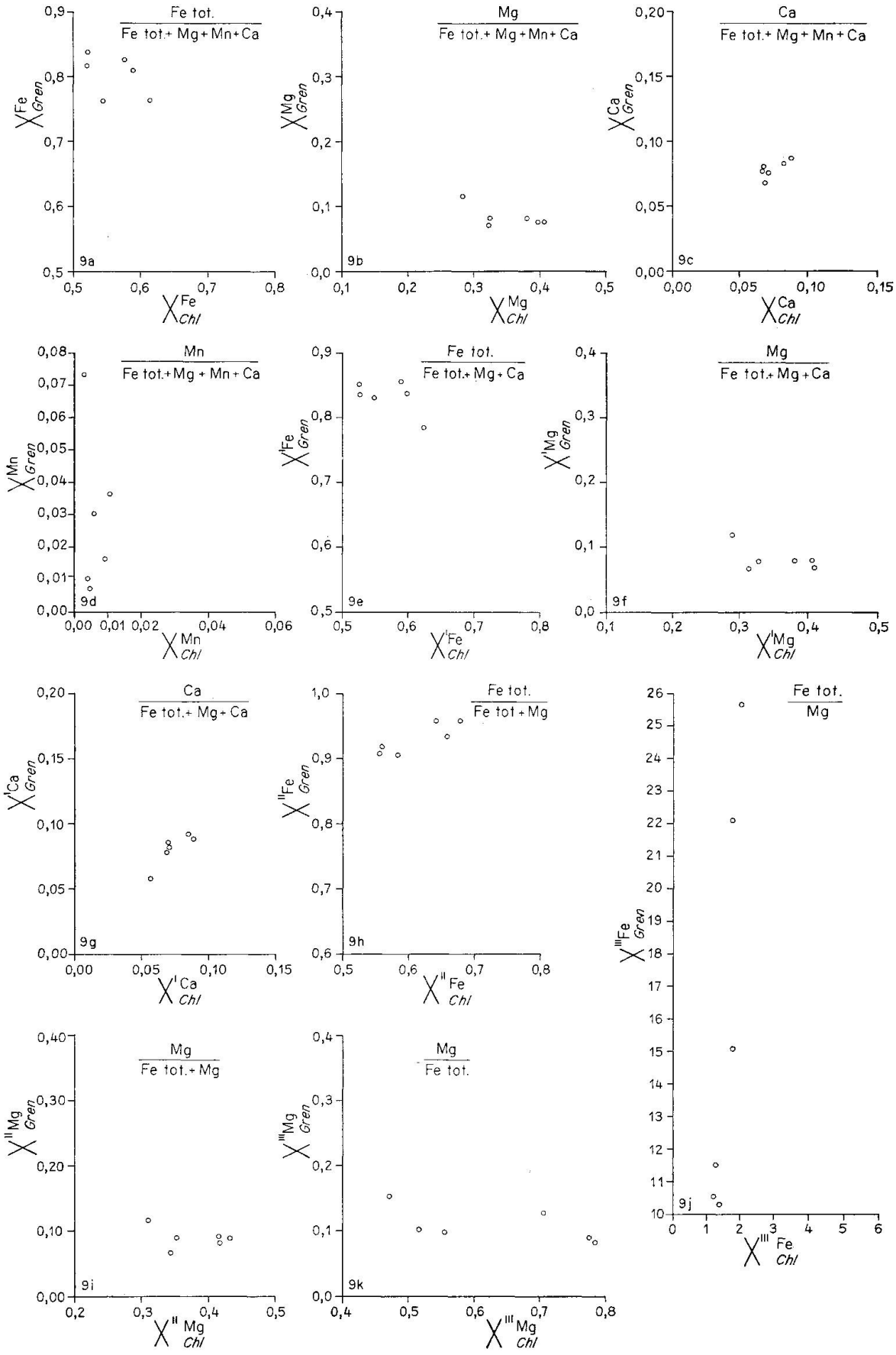

Fig. 9. Coefficients de distribution entre les almandins et les chlorites de type A à Zermatt.

Tableau 16. *Coefficients de distribution entre l'almandin et la chlorite A*

		G 19	G 156	G 218	G 223	G 158	G 228
$\frac{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K_D =$	1,244	1,371	1,411	1,620	1,375	1,588
$\frac{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K_D =$	0,406	0,241	0,206	0,179	0,190	0,196
$\frac{\frac{\text{Ca}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Ca}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K_D =$	0,967	1,042	1,157	1,114	1,016	1,214
$\frac{\frac{\text{Mn}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Mn}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K_D =$	5,000	3,273	24,667	2,500	1,600	1,400
$\frac{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K'_D =$	1,273	1,409	1,517	1,629	1,383	1,590
$\frac{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K'_D =$	0,417	0,248	0,221	0,178	0,191	0,197
$\frac{\frac{\text{Ca}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Ca}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}+\text{Ca}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K'_D =$	1,000	1,083	1,243	1,113	1,032	1,214
$\frac{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K''_D =$	1,414	1,488	1,546	1,643	1,385	1,619
$\frac{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}+\text{Mg}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K''_D =$	0,417	0,249	0,228	0,182	0,192	0,200
$\frac{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Mg}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Fe tot}}{\text{Mg}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K'''_D =$	12,054	12,933	7,279	9,052	7,219	8,076
$\frac{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}}\text{ (almandin)}}{\frac{\text{Mg}}{\text{Fe tot}}\text{ (chlorite A)}}$	$= K'''_D =$	0,329	0,175	0,146	0,111	0,138	0,123

de l'eau. La répartition de ces éléments, si les phases minérales sont en équilibre à la pression et à la température qui conditionnent le degré de métamorphisme de Zermatt et si le minéral est bien homogène (BARTHOLOMÉ, 1960), se fera suivant un coefficient de distribution constant (Tableau 16 et Fig. 9).

Par l'examen des figures, on constate que seule la distribution du calcium se rapproche de l'équilibre. Ceci correspond bien à la teneur constante en calcium remarquée dans les profils de microsonde (cfr. Fig. 2) tandis que l'hétérogénéité des autres éléments rend impossible une distribution linéaire de ces éléments entre la phase almandin et la phase chlorite.

L'altération du grenat qui est le résultat d'un déséquilibre chimique (altération hydrothermale) ou physique (baisse de pression ou de température) produira une chlorite aux dépens de la partie externe, ou couronne, du grenat dont la composition chimique est voisine de 26% de fer, 5% de magnésium et 0,2% de manganèse (DE BÉTHUNE et al., 1965). On sait d'autre part que la chlorite produite est du type A c'est-à-dire à teneur voisine de 21,0% de fer, 5% de magnésium et 0,2% de manganèse (cfr. supra). Cette chlorite, au moins pour les éléments envisagés, peut se former exclusivement aux dépens de la couronne du grenat. Il faut néanmoins supposer la formation d'un minéral absorbant les 5% de fer en excès. Or, on constate (cfr. photo 8) la présence d'un oxyde de fer à côté de la chlorite hystérogène. On arrive ainsi aux équations suivantes:

1. Almandin Mg $\underset{P,\,T}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}}$ Chlorite A + Oxyde de fer.

La formation de cette chlorite hystérogène sera freinée et arrêtée par la teneur en manganèse du noyau du grenat. C'est ainsi que, dans le cas du grenat à couronne d'almandin magnésien et à noyau d'almandin manganésifère, on arrive aux équations suivantes:

2. Almandin = Almandin Mg + Almandin Mn.

En remplacant (2) dans (1), on obtient:

3. Almandin $\underset{P,\,T}{\overset{H_2O}{\rightleftharpoons}}$ Chlorite A + Oxyde de fer + Almandin Mn.

On utilisera pour schématiser ce phénomène le diagramme de RAMBERG (1962) modifié et complété par quelques valeurs absolues (Fig. 10).

On voit clairement que le grenat non altéré peut rester en équilibre avec une chlorite de type B (plus magnésienne) mais que, en s'altérant, ce même grenat se décompose en deux ou trois nouvelles phases qui ne sont plus en équilibre avec la chlorite B.

Les micaschistes à grenat de la zone du Hohtälli-Stockhorn présentent une paragenèse dont les éléments ne sont pas tous en équilibre. Ce déséquilibre peut provenir soit d'un processus purement chimique (pression partielle de l'eau), soit d'un processus physico-chimique (pression partielle de l'eau et diminution du couple pression-température).

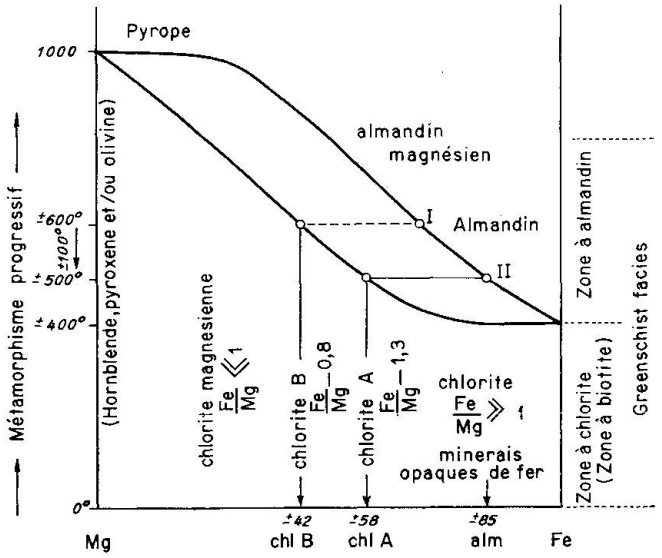

Fig. 10. Diagramme de RAMBERG (1960) modifié.

c) Les relations entre la biotite et sa roche-mère; importance du degré d'oxydation de la roche

La biotite se présente sous deux formes: une biotite de coloration verte et une biotite brune. La biotite verte apparaît uniquement dans les micaschistes à albite de la zone du Gornergrat tandis que que la biotite brune se restreint aux micaschistes à grenat de la zone du Hohtälli-Stockhorn.

La couleur des biotites semble varier suivant leur composition chimique (DEER et al., 1965, p. 62); la biotite verte contenant plus de fer ferrique que de fer ferreux et, inversément, la biotite brune plus de fer ferreux que de fer ferrique. En d'autres termes, le degré d'oxydation est plus élevé dans la biotite verte que dans la biotite brune. Afin de représenter le degré d'oxydation, on a choisi le rapport Fe^{2+}/Fe^{3+}.

Or on constate que le degré d'oxydation des roches varie selon leur appartenance aux micaschistes à albite ou à grenat. Le degré d'oxydation des micaschistes à albite se rapproche de celui des biotites vertes et le degré d'oxydation des micaschistes à grenat de celui des biotites brunes (Fig. 11). D'autre part, la teneur en fer total est basse dans les biotites vertes. De même les roches qui contiennent les biotites vertes ont une teneur en fer total inférieure à celle des roches à biotite brune (Tableau 17).

Tableau 17. *Relations entre les variétés de biotite et le degré d'oxydation des roches*

	Fe^{2+}/Fe^{3+}	% Fer total
Biotite verte	<1	moins
Micaschistes à albite	<1	moins
Biotite brune	>1	plus
Micaschistes à grenat	>1	plus

En conclusion, on constate que *le degré d'oxydation d'une roche et sa teneur en fer total influe sur la couleur de la biotite.*

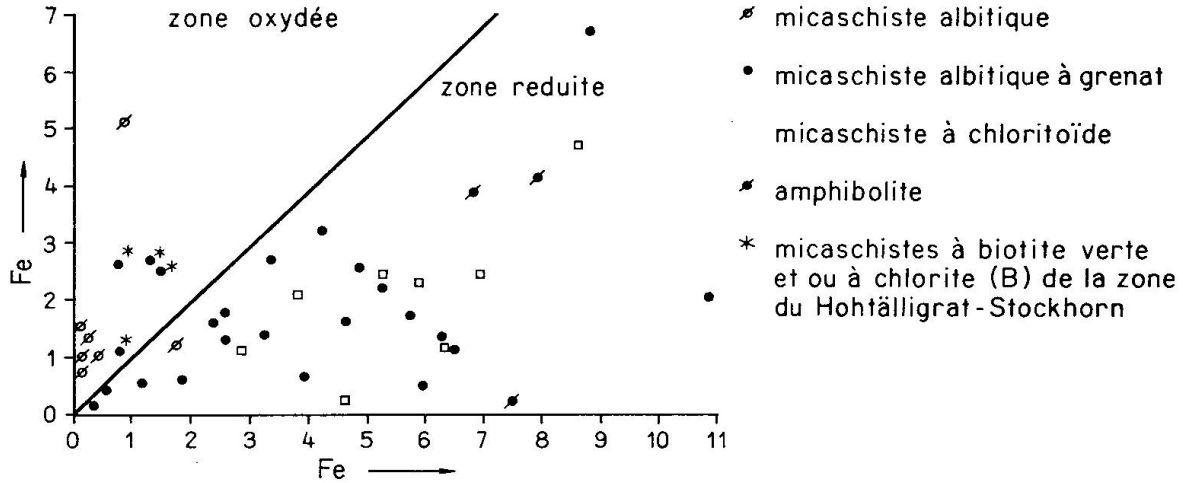

Fig. 11. Distribution de quelques roches dans un diagramme Fe^{2+}/Fe^{3+}.

Le degré d'oxydation des micaschistes à albite entraîne une autre conséquence d'ordre stratigraphique. En éffet, on a toujours associé ce type de roche au Permo-Trias (BEARTH, 1952) pour des raisons de ressemblance pétrographique. Le Permo-Trias dans ces contrées est représenté par des formations continentales ayant subi une oxydation intense. Le fait de retrouver cette oxydation élevée conservée dans des formations métamorphisées apparaît comme un argument objectif et suplémentaire pour les rattacher au Permo-Trias.

d) Les relations entre les micas blancs, l'albite et la teneur en soude de la roche

On a décrit un type de muscovite riche en soude (muscovite sodique) apparaissant dans les formations des micaschistes à grenat de la zone du Hohtälli-Stockhorn, ceci uniquement en l'absence d'albite. En présence d'albite, la muscovite est du type normal, c'est-à-dire potassique. On constate également que la teneur en soude de la roche est toujours faible (1,00% Na_2O au maximum) en présence de muscovite sodique et nettement supérieure (2,00% Na_2O au minimum) lorsque l'albite se trouve dans la roche. La teneur en soude de cette dernière est proportionnelle au pourcentage en muscovite sodique, tout comme dans les micaschistes à albite la teneur en soude de la roche est proportionnelle à la quantité d'albite (Fig. 12).

Il apparaît donc que le *teneur en soude de la roche règle la présence ou l'absence de la muscovite sodique et de l'albite.*

Les micaschistes à albite de ce district ont été généralement rattachés à des sédiments métamorphisés et albitisés (BEARTH, 1953). Or la teneur moyenne en soude de 17 analyses ne dépasse pas 2,65% de Na_2O. Cette valeur ne dépasse que de peu les valeurs moyennes de soude pour les schistes donnés par RANKAMA et SAHAMA (1950) et par GOLDSCHMIDT (1954). Le rapport moléculaire K_2O/Na_2O moyen se rapproche de 1,7 (tableau 18). De nombreux sédiments montrent des

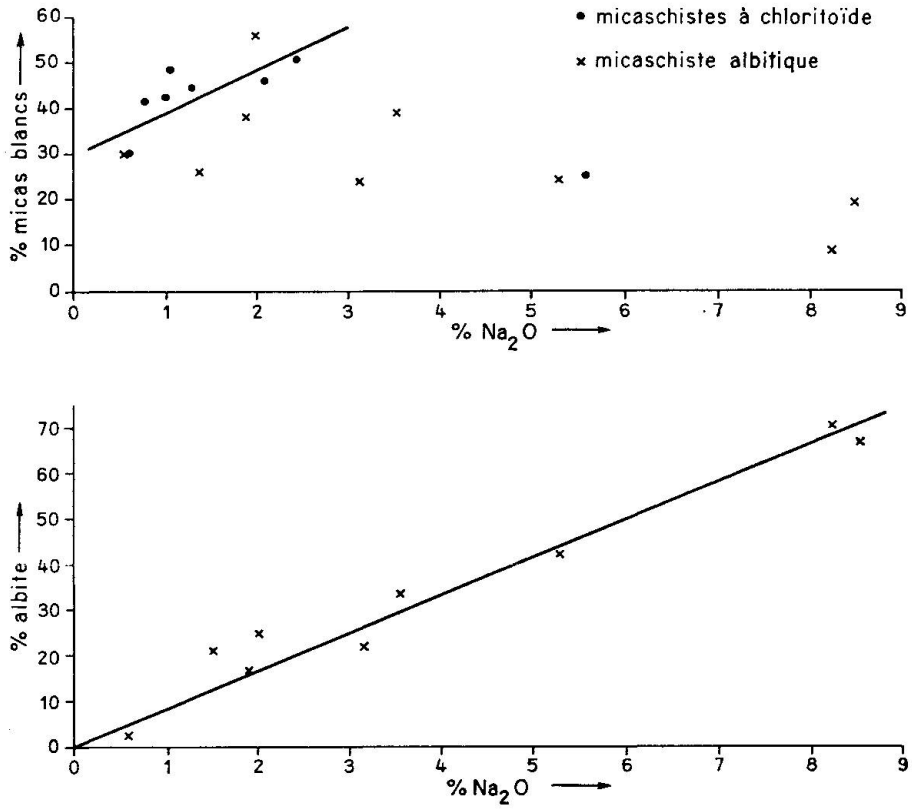

Fig. 12. Pourcentage des micas blancs et de l'albite en rapport avec la teneur en soude des micaschistes à albite et des micaschistes à chloritoïde.

teneurs en soude bien supérieures à cette moyenne. Comme les valeurs en soude varient largement d'un échantillon à l'autre (de 0,58 à 8,55%), on envisage un déplacement local et limité de la soude au cours du métamorphisme (migration) au sein de la même formation, probablement attirée vers des centres de cristallisation tels que les grains détritiques d'andésine (voir photo 4).

Tableau 18. *Rapqorts K_2O/Na_2O dans des micaschistes albitiques du Gornergrat et de la zone Hohtälli-Stockhorn*

	G 27	G 29	G 132	G 133	G 134	G 135	G 166/1	G 168/1	G 172/2	G 206
$\frac{K_2O}{Na_2O}$ mol	2,0	1,2	2,0	2,1	2,6	3,1	1,1	0,7	3,3	1,3

	G 207	G 214/1	G 215/1	G 220/1	G 222/2	G 231/A	G 233/1
$\frac{K_2O}{Na_2O}$ mol	1,3	0,9	0,1	4,6	2,6	0,1	0,3

e) Les relations du chloritoïde avec sa roche-mère

Le chloritoïde n'apparaît que dans les micaschistes à teneur élevée en fer[5]), la richesse en fer de la roche jouant un rôle important dans l'apparition du chloritoïde (HALFERDAHL, 1961).

[5]) On n'a malheureusement aucune donnée sur l'influence du magnésium.

Histoire des roches métamorphiques de Zermatt envisagée selon un métamorphisme progressif

La zonalité des grenats dans les séries affectées par un métamorphisme régional nous suggère une histoire commencée dans la zone à chlorite et terminée dans la zone à almandin.

Quand la roche subit les premiers éffets du métamorphisme, le manganèse qu'elle contient se concentre dans les cristaux de spessartine plus ou moins riches en almandin suivant la quantité de fer disponible dans la roche. Les

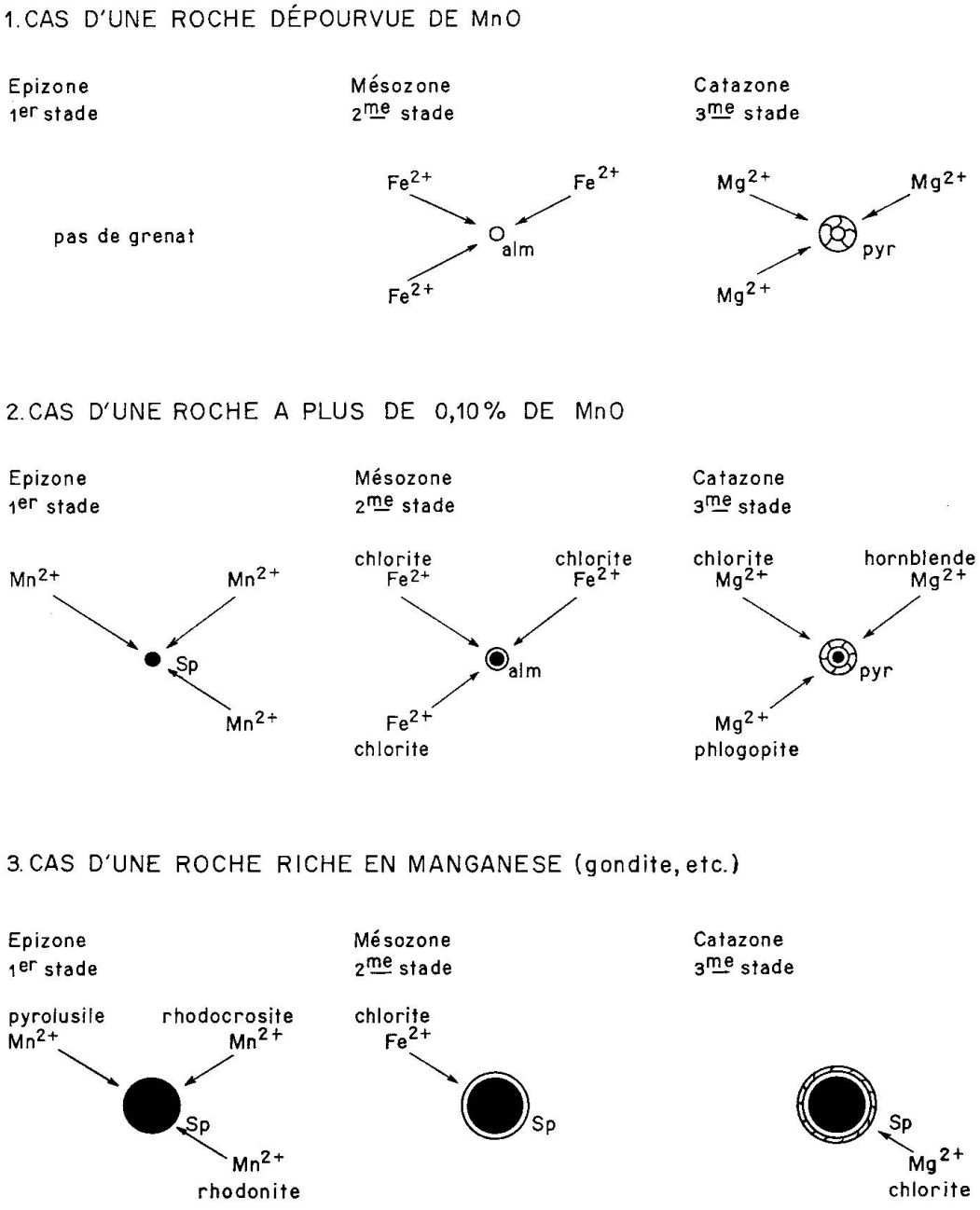

Fig. 13. Formation probable de quelques types de grenats.

éffets du métamorphisme s'accentuant, le fer des chlorites ferreuses migre vers les cristaux de spessartine-almandin et forme une auréole d'almandin. Dans un degré de métamorphisme encore plus avancé, le magnésium de la phlogopite et de la biotite (quand il y en a) et des chlorites (devenues magnésiennes par le départ de fer), clinochlore-pennine, migre vers les cristaux déjà formés de grenat et le pyrope apparaît entourant la couronne almandifère. Les roches de Zermatt ont atteint ce degré de métamorphisme. La couronne almandifère est typomorphe du degré de métamorphisme de la roche. On peut continuer à envisager la suite de l'histoire de la roche métamorphique de la façon suivante: le magnésium restant dans la phlogopite, la biotite et la hornblende continue à migrer vers l'almandin qui devient un almandin-pyrope, caractéristique de la catazone. Suivant cette hypothèse, on se représente la formation zonaire des grenats, selon le type de la roche, de la manière schématisée dans la Fig. 13.

La zonalité du grenat peut être envisagée d'une manière différente lorsque la roche est affectée par un autre type de métamorphisme, par exemple dans le cas d'un métamorphisme de contact. La roche ayant atteint en une seule fois la zone à almandin, la migration des éléments commencerait par celle du manganèse, suivie de celle du fer et enfin par celle du magnésium. Cette hypothèse n'envisage pas le passage de la roche par la zone à chlorite, à biotite et à almandin.

De toutes façons, dans un cas comme dans l'autre, on peut retenir que, malgré l'absence de métasomatose, il y a une *migration locale et préférentielle de certains ions par rapport aux autres.* C'est là, pensons-nous le point principal prouvé par l'hétérogénéité des grenats.

CONCLUSIONS

Les roches des environs de Zermatt, qu'il s'agisse de micaschistes calcifères ou de micaschistes[6]), ont atteint la zone de métamorphisme à almandin. La plupart des paragenèses semblent en équilibre.

Il existe des relations étroites entre la composition chimique de la roche et la paragenèse minérale: 1. l'apparition de grenat dépend notamment de la teneur en manganèse et en fer de la roche, ces teneurs étant liées dans le grenat; 2. dans le cas des chlorites, le fer joue également un rôle important, ici cependant la teneur en fer des chlorites semble inversément proportionnelle à celle de la roche; 3. le degré d'oxydation de la roche et sa teneur en fer déterminent l'apparition et le type de biotite (verte ou brune); 4. lorsque la teneur en soude de la roche ne dépasse pas un certain seuil (dans le cas de

---

[6]) Cette conclusion peut être étendue aux ophiolites, marbres, quartzites, etc.

Zermatt, se seuil se rapproche de 1,0% de Na_2O), l'albite ne peut pas exister et la soude se concentre dans la muscovite pour former une muscovite sodique; 5. la présence du chloritoïde est intimement liée à la teneur en fer de la roche (tableau 19).

Tableau 19. *Teneurs en fer, manganèse et sodium de quelques associations minérales*

Fer total		MnO		Na_2O	
±5,8%	= almandin + chloritoïde	±17%	= spessartine	>1%	= albite
±5,5%	= almandin + biotite brune	± 0,53%	= almandin manganésifère	<2%	= muscovite sodique
±5,1%	= almandin	± 0,13%	= almandin		
±3,4%	= chlotite B	0,0 %	= pas de grenat		
±1,7%	= biotite verte				

La mise en évidence d'une certaine zonalité dans les grenats semble prouver une migration locale des ions au cours du métamorphisme isochimique. Cette migration locale rappelle celle suggérée pour le sodium, enrichissant et appauvrissant certains bancs de roche ainsi que celle encore hypothétique du magnésium dans les marbres, faisant apparaître de fins bancs de dolomite et de fins bancs de calcite différenciées à partir d'une calcite magnésienne. La zonalité du grenat peut expliquer également, d'une manière moins empirique, la chloritisation du grenat suivant l'équation:

Almandin $\overset{H_2O}{\underset{P,\,T}{=}}$ Chlorite hystérogène (ferro-magnésienne) + Almandin manganésifère + Oxydes de fer.

Enfin, l'hétérogénéité dans la distribution des éléments constitutifs du grenat laisse prévoir le même phénomène pour d'autres minéraux.

Remerciements. L'auteur tient à remercier vivement le professeur P. de Béthune (Louvain) qui a dirigé ces travaux toujours avec tant d'attention. Les professeurs P. Bartolomé (Liège) et P. Bearth (Bâle) ont toujours bien voulu accordé leurs valeureux conseils, qu'ils en soient sincèrement remerciés. Il tient également à remercier le professeur Woodtli (Lausanne) pour la correction du manuscrit. En fin il est reconnaissant à l'aide financière apportée au cours de ses travaux par le Fond National de la Recherche Scientifique et par l'Institut de Recherche Scientifique appliquée à l'Industrie et l'Agriculture (Belgique).

BIBLIOGRAPHIE

Argand, E. (1934): La zone pennique. Geol. Führer der Schweiz, fasc. III, 149–189.

Barth, T. F. W. (1962): Theoretical Petrology. 2e ed., Wiley & Sons, N. Y.

Bartholome, P. (1960): L'interprétation pétrogénétique des associations d'olivine et d'orthopyroxène. Ann. Soc. géol. Belgique *83*, 319.

Bearth, P. (1939): Über den Zusammenhang von Monte Rosa und Bernhard-Decke. Eclogae geol. Helv. *32*.

— (1952): Geologie und Petrographie des Monte Rosa. Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F. *96*.
— (1953): Geologischer Atlas der Schweiz 1 : 25000, Nr. 29: Blatt Zermatt (mit Erläuterungen). Schweiz. Geol. Kommission.
— (1967): Die Ophiolithe der Zone von Zermatt-Saas Fee. Beitr. geol. Karte Schweiz, N.F. *132*.
DE BETHUNE, P., GOOSSENS, P. et BERGER, P. (1965): Emploi des grenats zonaires comme indicateur du degré de métamorphisme. C. R. Acad. Sci. Paris *260*, 6946–6949.
DEER, W. A., HOWIE, R. A. and ZUSSMANN, J. (1965): Rock-forming minerals. John Wiley and Sons Inc., New York, 4e impression.
ESKOLA, P. (1915): On the relation between chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks on the Orijarvi region. Comm. géol. Finlande *44*.
GOLDSCHMIDT, V. M. (1954): Geochemistry. Oxford.
HALFERDHAL, L. B. (1961): Chloritoid: Its composition, X-ray and optical properties, stability and occurences. J. Petrol. *2*, 1, 49.
HOLTROP, J. F. (1965): Manganese deposits of the Guiana Shield. Econ. Geol. *60*, 1185–1212.
HARDER, H. (1956): Untersuchungen an Paragoniten und an natriumhaltigen Muskoviten. Heidelberger Beitr. Mineral. Petrogr. *5*, 227–271.
JAFFÉ, H. W. (1951): The role of yttrium and other minor elements in the garnet group. Amer. Mineral. *36*, 133–155.
MIYASHIRO, A. (1953): Calcium-poor garnet in relation to metamorphism. Geochim. Cosmochim. Acta *4*, 179–208.
RAMBERG, H., DE VORE, G. W. (1951): The distribution of the Fe^{2+} and Mg^{2+} in coexisting olivines and pyroxenes. J. Geol. *59*, 193–210.
RAMBERG, H. (1960): The origin of metamorphic and metasomatic rocks. The University of Chicago press.
RANKAMA, K. and SAHAMA, T. G. (1950): Geochemistry. Chicago press.
SCHNELL, J. R. (1921): Les roches basiques des nappes penniques. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. *1*, 273.
TRÖGER, E. (1959): Die Granatgruppe: Beziehungen zwischen Mineralchemismus und Gesteinsart. Jb. Mineral. *93*/1, 1–44.
TURNER, F. J. and VERHOOGEN, J. (1951): Igneous and Metamorphic Petrology. McGraw-Hill, New York, 1re ed.
— (1960): Igneous and Metamorphic Petrology. Idem, 2de ed.
WRIGHT, W. I. (1938): The composition and occurence of garnets. Amer. Mineral. *23*, 436–449.

Manuscrit reçu le 3 septembre 1969.

En cours de publication: l'étude à la microsonde de „muscovites sodiques" a révélé l'existence d'un agglomérat orienté de fines lamelles de muscovite potassique, de paragonite et de phengite (P. de Béthune, communication orale). Cette association n'avait pas pu être définie aux R. X. La découverte de cette association ne change pas nos conclusions pétrologiques; elle complique seulement la discussion des équilibres thermodynamiques entre ces nouvelles phases du mica blanc.

Bull. Suisse de Min. et Pétr.
Tome 50/2, 1970

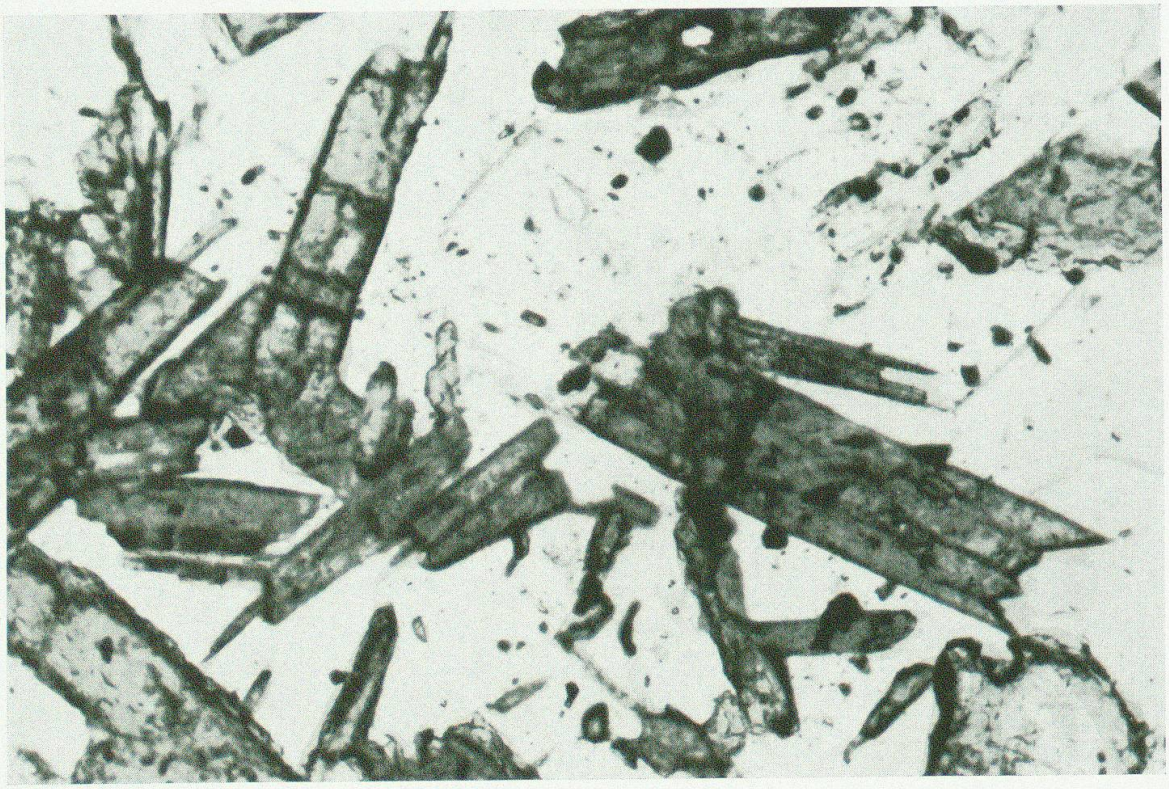

Photo 1. Micaschistes à chloritoïde de la zone du Hohtälli-Stockhorn. Agrandissement 64 ×, lumière naturelle (P. J. Goossens).

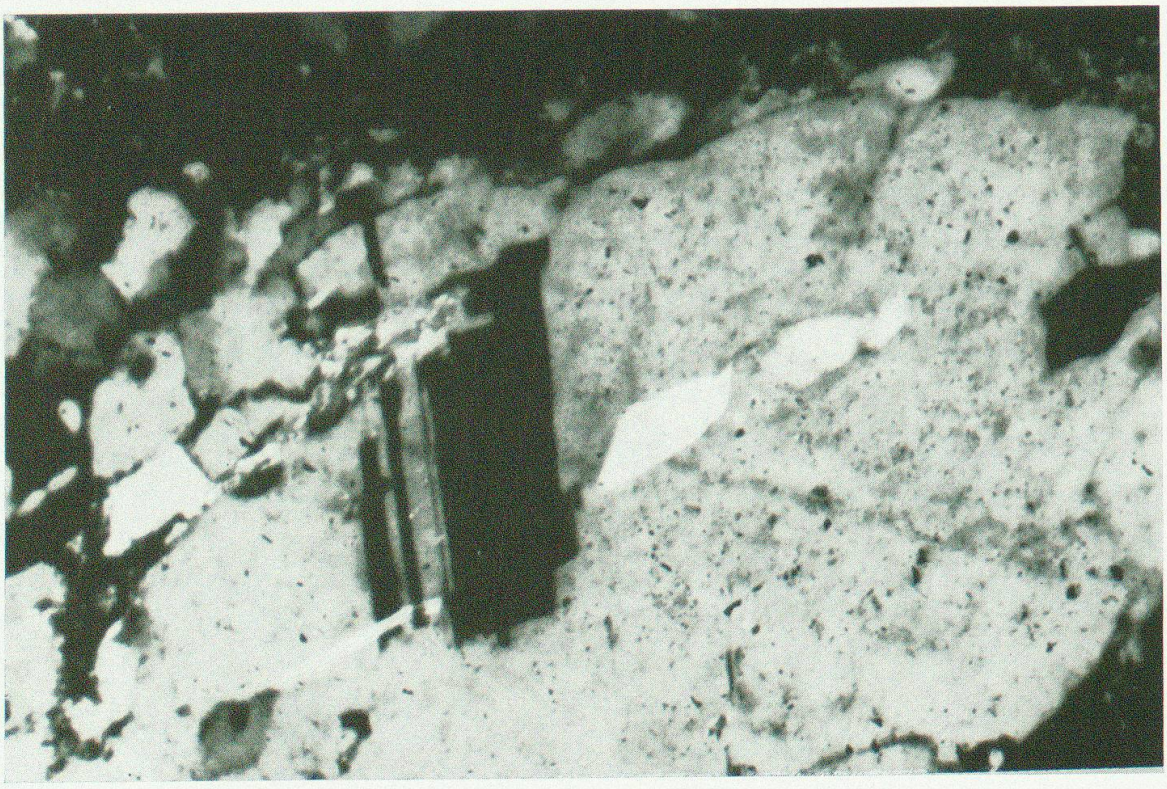

Photo 2. Inclusion d'andésine dans un porphyroblaste d'albite, micaschistes de la zone du Gornergrat. Agrandissement 40 ×, lumière polarisée (P. J. Goossens).

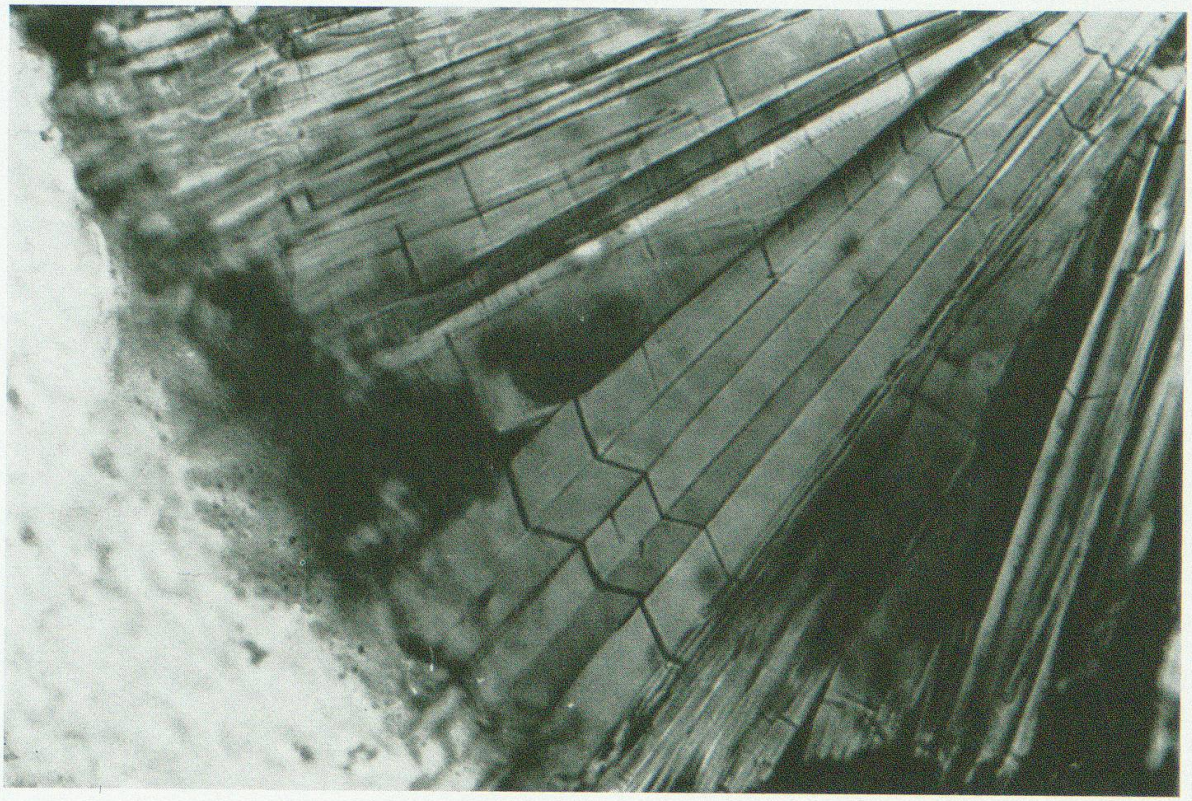

Photo 3. Imprégnation de malachite, micaschistes à albite de la zone du Gornergrat. Agrandissement 512 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).

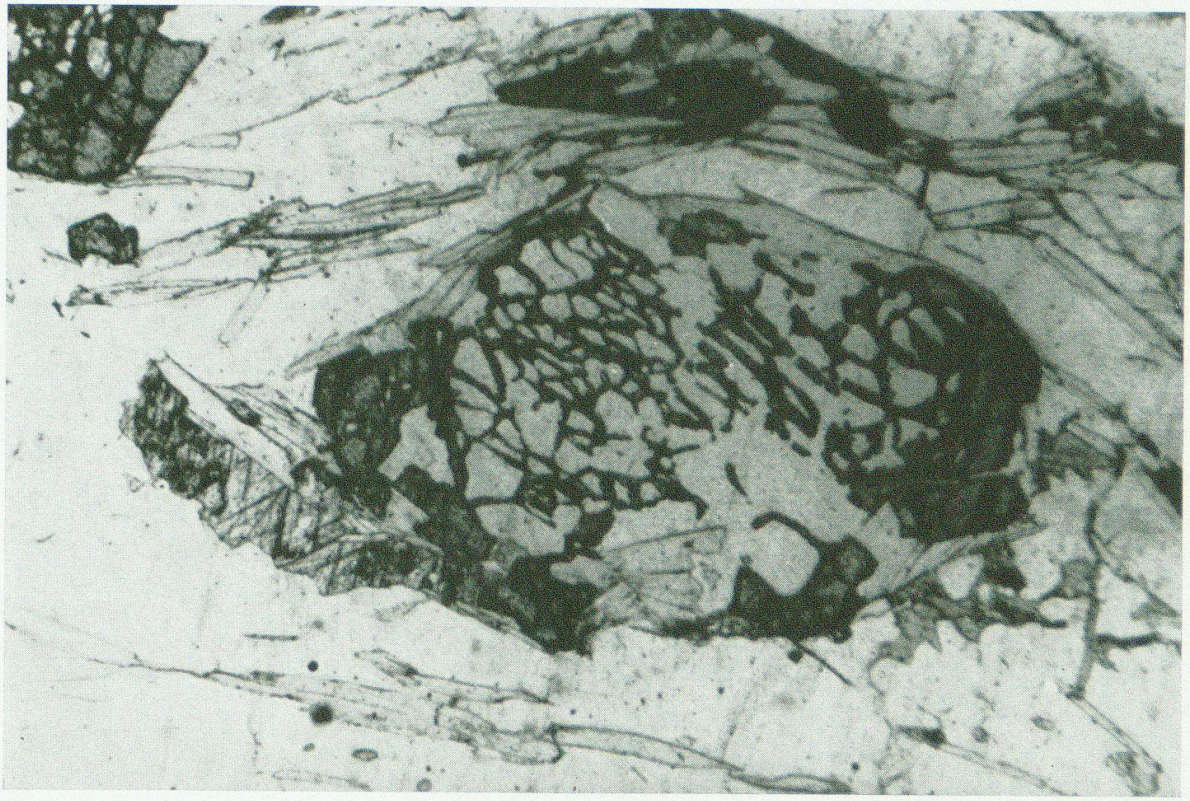

Photo 4. Texture en tamis dans un almandin, schistes lustrés de la zone de Zermatt-Saas Fee. Agrandissement 12 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).

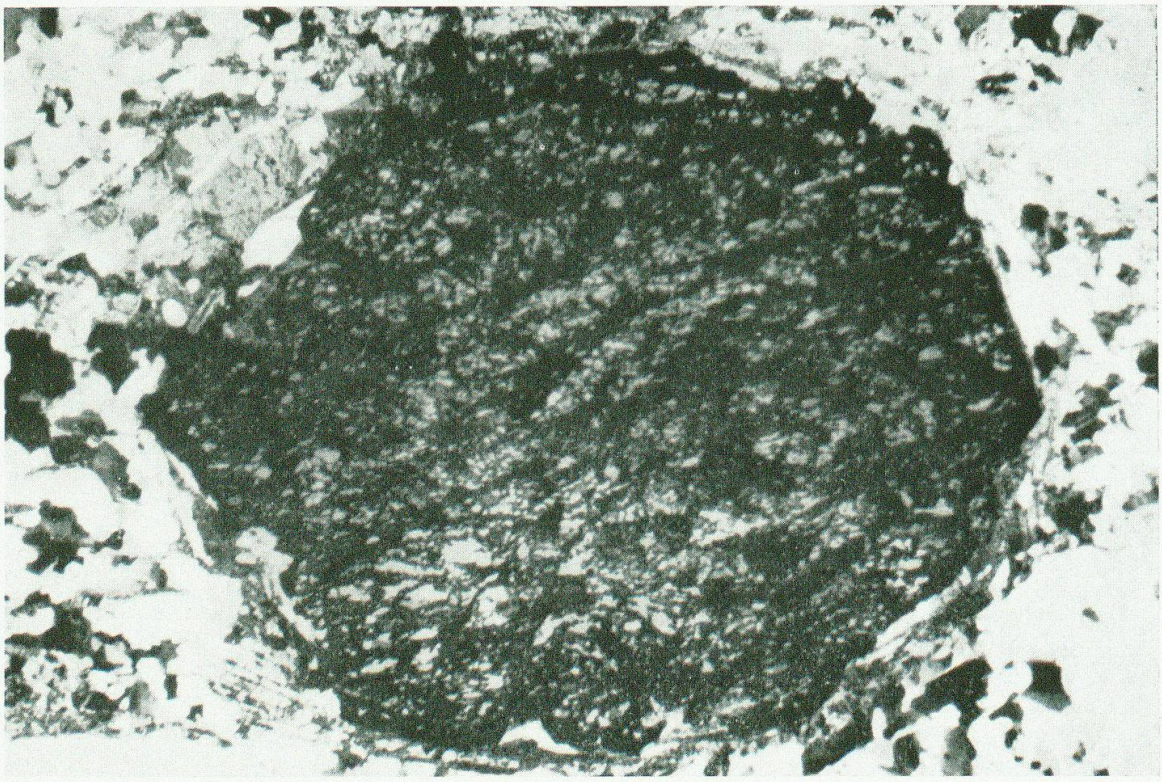

Photo 5. Almandin poeciloblastique à bandes parallèles, schistes lustrés de la zone de Zermatt-Saas Fee. Agrandissement 32 ×, lumière polarisée (P. J. Goossens).

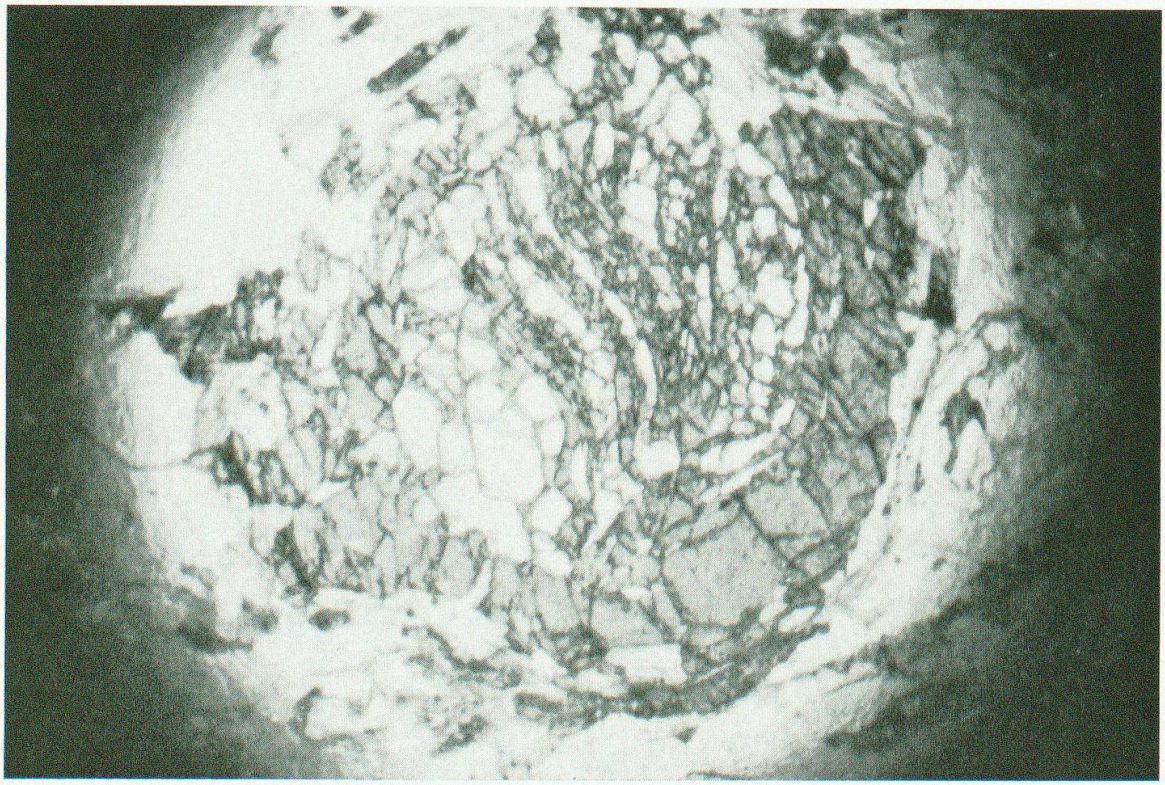

Photo 6. Texture en tamis dans un almandin avec couronne grenatifère plus homogène, schistes lustrés de la zone de Zermatt-Saas Fee. Agrandissement 6 ×, lumière polarisée (P. J. Goossens).

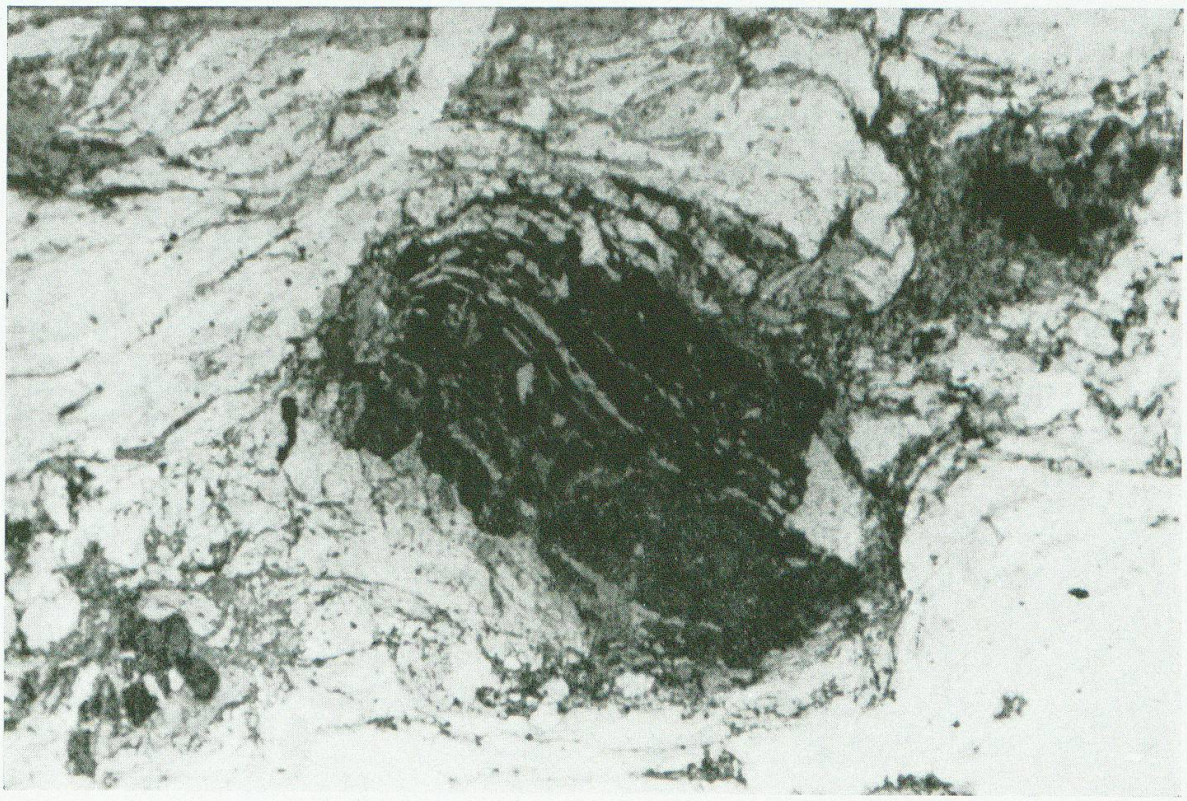

Photo 7. Texture hélicitique dans un almandin, schistes lustrés de la zone de Zermatt-Saas Fee. Agrandissement 128 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).

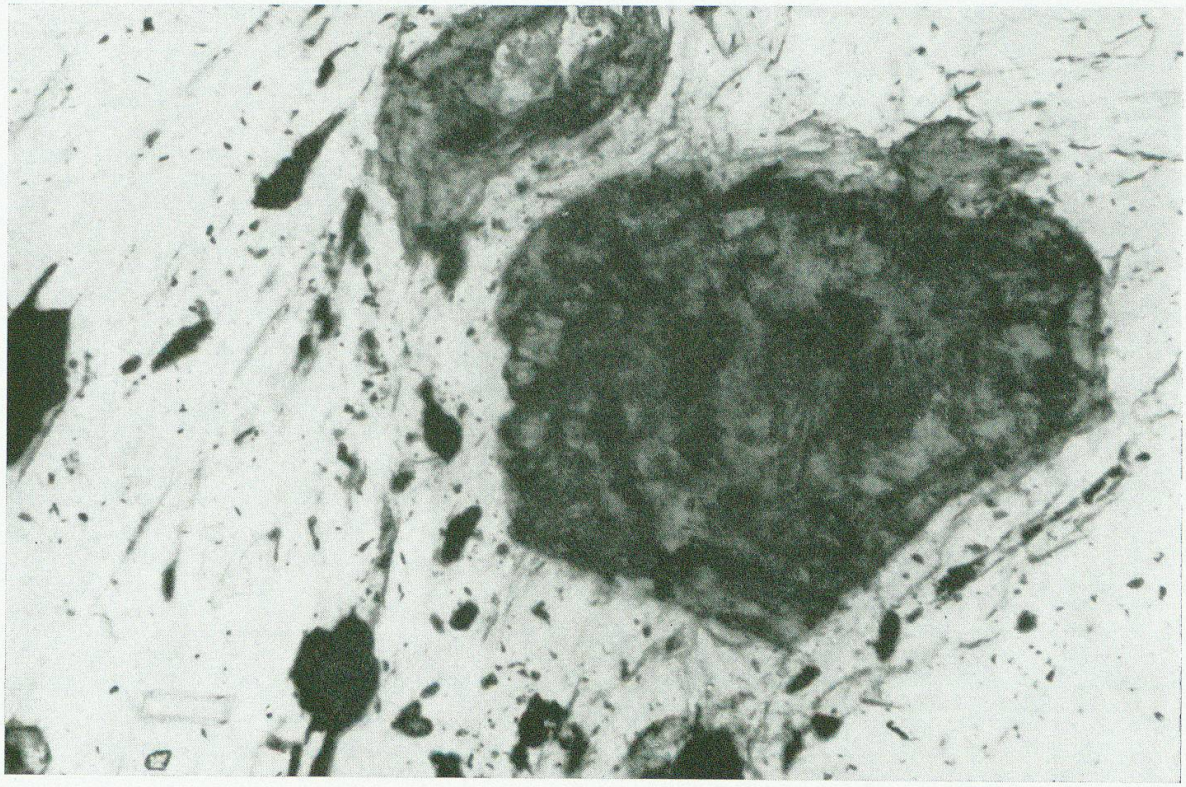

Photo 8. Pseudomorphose d'un almandin par de la chlorite de type A avec formation d'oxyde de fer, micaschistes à grenat de la zone du Hohtälli-Stockhorn. Agrandissement 64 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).

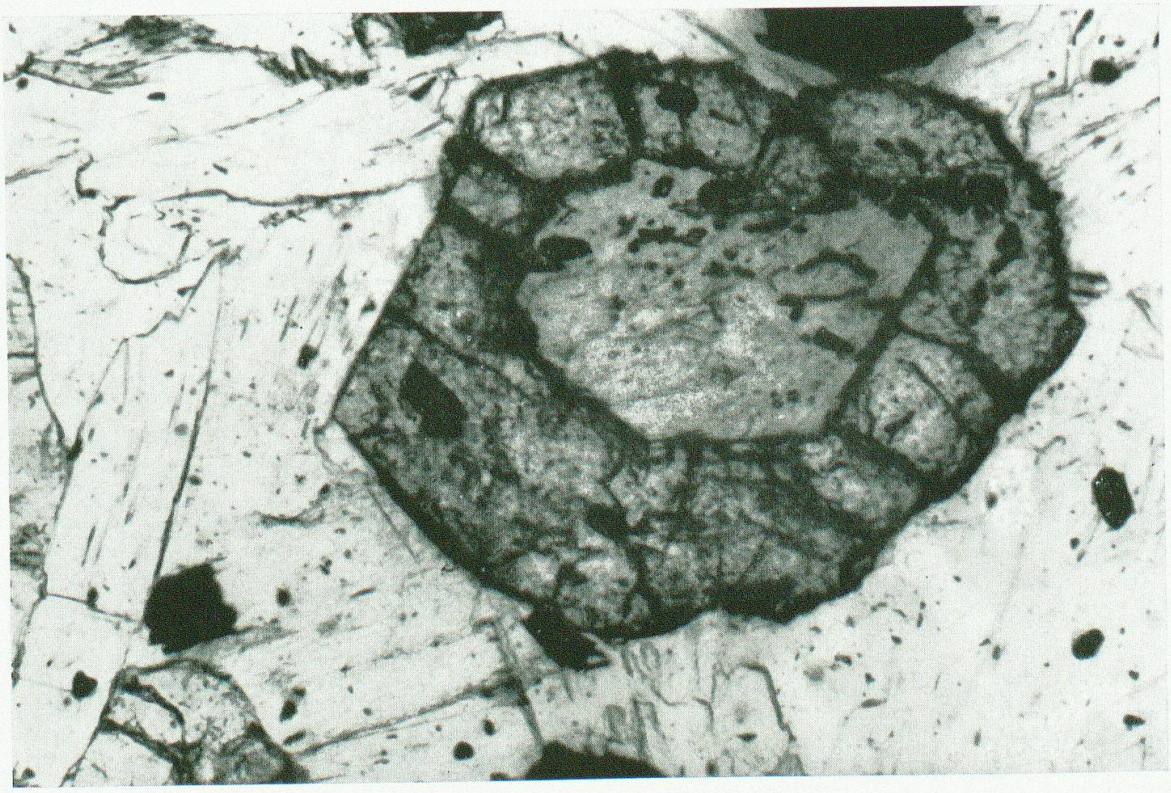

Photo 9. Texture en atoll dans un almandin, micaschistes à grenat de la zone du Hohtälli-Stockhorn. Agrandissement 64 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).

Photo 10. Idem. Agrandissement 64 × , lumière naturelle (P. J. Goossens).