

Les glaucophanites et roches associées de l'île de Groix (Morbihan, France): étude minéralogique et pétrogénétique

C. Triboulet

Laboratoire de Pétrographie*, Université de Paris VI

Reçu le 30 novembre 1973

Glaucophane Schists and Associated Rocks in Île de Groix (Morbihan, France): A Mineralogical and Petrogenetic Study

Abstract. The petrographic and mineralogic study of the different rock facies on île de Groix shows that two metamorphic episodes have affected the alkaline basic rocks and associated pelitic schists. The first is represented by a zonation (west-east): II-III-II-I-II where I = eclogite facies glaucophanites (8,5 bars, 530°C), II = glaucophane-epidote-garnet facies (8 kbars, 500°C), III = greenschist facies containing blue-green amphibole (7,5 kbars, 470°C). The second metamorphic episode has partially transformed these rocks to the albite-chlorite-epidote-blue green amphibole facies (6,5 kbars, 470°C). The variations of P_{O_2} and P_{H_2O} as they affect local assemblages is detailed.

Introduction

Plateau rocheux d'une vingtaine de km² qui domine la mer à l'ouest d'une trentaine de mètres et s'incline progressivement vers l'est, l'île de Groix a attiré les premiers chercheurs dès la fin du siècle dernier.

Les premières études de Ch. Barrois (1883, 1884) et Von Lasaulx (1884) ont mis à jour le caractère exceptionnel des roches qui la constituent; à 10 km environ de la rade de Lorient, donc peu éloignée du continent, elle en diffère par la nature de ses gisements. Elle est dans sa totalité composée de roches métamorphiques: gneiss et micaschistes «à minéraux», roches «prasinitiques», amphibolites, d'un métamorphisme considéré jusqu'ici comme cadomien ou hercynien. Ce métamorphisme ancien développe des amphibolites particulières à amphibole sodique, la glaucophane, qui ne semble exister que très sporadiquement sur le continent qui lui fait face (présence de glaucophane détritique dans le lit du Blavet, Rampon, 1971). Plus au sud, dans la région de Nantes, on la trouve dans les éclogites (B. Velde, 1970). A cette particularité s'ajoute le fait que le métamorphisme à glaucophane décrit dans le monde est souvent d'âge plus récent, créacé ou tertiaire (Alpes, Japon, U.S.A.).

Jusqu'ici les recherches sur l'île de Groix se sont orientées sur l'étude des glaucophanites dans leur contexte pétrographique (J. Cogné, 1957; C. Félix, 1970, 1972; B. Velde, 1967; Mäkanjuola et Howie, 1972) et structural (Lamouche, 1929; D. Jeannette, 1965; M. Ruhland et D. Jeannette, 1966; J. Cogné, M. Ruhland et

* Equipe de recherches associée au CNRS: «Pétrogénèse des roches éruptives et métamorphiques».

D. Jeannette, 1966). A partir de ces données nous avons entrepris une étude pétrographique générale. De nouvelles observations et analyses chimiques relatives à chacun des grands groupes des minéraux constitutifs des roches, puis une étude des caractères chimiques des roches basiques nous ont conduits à définir des types d'assemblages de minéraux caractéristiques de faciès métamorphiques différenciant des zones. On doit préciser que cette zonation n'est pas due au jeu de failles profondes dans la structure, mais seulement à des différences de conditions physiques au cours du métamorphisme.

Bien que les roches basiques, et les roches à glaucophane en particulier, n'affleurent pas à plus de 50 mètres des côtes vers l'intérieur, nous avons extrapolé à toute la surface de l'île les données qui suivent. Les paragenèses des roches pélitiques font en effet le lien nécessaire entre les différentes observations effectuées sur les roches basiques des côtes.

I. Etude Minéralogique

A. Les amphiboles

Dans ce chapitre on se limitera volontairement à l'étude des amphiboles des amphibolites et schistes verts, où elles sont abondantes. Les amphiboles de ces roches sont de trois types: amphibole verdâtre, amphibole bleu-vert et amphibole bleue. Les associations de ces trois types, caractéristiques d'un type de roche donné (glaucophanite, amphibolite à amphibole bleu-vert et schiste vert), sont complexes: cristaux isolés ou individus zonés d'une même paragenèse (primaire) souvent déchiquetés en cristaux de nature différente (secondaires) formés au détriment des précédents (tableau ci-dessous; pour les abréviations, voir chapitre IIB).

Conditions 1 paragenèse primaire	Conditions 2 paragenèse secondaire	Nature de la roche
bleue 1 dominante ± blv 1	blv 1+ blv 2 (bl 1 blv 2)	glaucophanite à Ep rétro-morphosée
bleue 1 (cœur) blv 1 (périphérie)	blv 1+ blv 2 (bl 1 blv 2)	glaucophanite à Ep et amphibolite à Ab—Ep rétro-morphosées
verdâtre 1 (cœur) blv 1 (périphérie)	verdâtre 1 + blv 1	amphibolite à Ab—Ep
blv 1	blv 1	schiste vert
verdâtre (cœur) blv (périphérie)	verdâtre + blv	schiste vert

1. L'amphibole verdâtre

On la trouve aussi bien dans les amphibolites à Ab-Ep que dans les schistes verts. Dans ces deux types de roches, elle est quelquefois associée à une autre amphibole calcique bleu-vert par des zonations concentriques d'un même cristal, le cœur

étant plus vert, la périphérie plus bleu-vert (voir tableau précédent). On n'observe pas d'amphibole verte et d'amphibole bleu-vert de même âge en cristaux isolés dans la même roche.

Dans la représentation triangulaire de Banno (1964) (Fig. 1), les points représentatifs de l'amphibole verte BM 1 de Makanjuola et Howie et de celles du Tableau 1 se situent vers le pôle actinote, un peu déplacés vers les pôles édénite et tschermackite. Hormis l'amphibole LH 14 (Makanjuola et Howie) riche en Al^{IV} , ce ne sont pas des hornblendes; on les a appelées «actinotes alumineuses».

On sait que dans les amphiboles calciques la teneur en Al^{IV} et les relations $Al^{IV}-Al^{VI}$ varient avec les conditions métamorphiques, en admettant que la teneur en Al^{IV} ne dépend pas de la teneur totale en Al dans la roche. La Fig. 2 illustre les données de Zakrutkin (1968) selon lesquelles la variation $Al^{IV} = f(Al^{VI})$ dans les amphiboles calciques est fonction du degré du métamorphisme dans lequel elles ont pris naissance, et corrobore le fait que les amphiboles verdâtres de Groix appartiennent à un métamorphisme du type amphibolite à épidote, plus proche du faciès amphibolite pour les roches à grenats, plus proche du faciès schistes verts pour les roches à chlorite.

2. L'amphibole bleu-vert

On la trouve sur toute l'île, associée généralement à une autre amphibole (actinote alumineuse ou amphibole sodique) dans les amphibolites. Dans les schistes verts, elle est plus rarement associée à une autre amphibole; on la trouve cependant quelquefois en zonation avec un peu d'actinote alumineuse.

Parmi l'ensemble des amphiboles bleu-vert analysées à la microsonde on en a choisi 5 qui satisfaisaient, en fonction des éléments dosés, aux données de Seki, Aiba et Kato (1959) et Deer, Howie et Zusman (1963, analyses 3 et 6, Tabl. 41) (Tableau 1). L'amphibole blv 1 de Sp 13, produit de déstabilisation secondaire d'une amphibole primaire, est enrichie en Al^{IV} , et elle est proche du pôle pargasite. Sp 13 blv 2 et CdS 5 blv 2 sont proches du pôle édénite (Fig. 1). L'amphibole CdS 5 zonée se rapproche des hornblendes.

Une étude ultérieure plus complète, qui comprendra aussi des analyses d'amphiboles bleu-vert des schistes verts et des amphibolites à Ab—Ep, fournira des données supplémentaires à ces affirmations. C'est pourquoi dans l'exposé qui suit on ne parlera pas d'édénite ni de pargasite, et que l'on rangera ces amphiboles sous la rubrique «amphiboles bleu-vert».

3. L'amphibole bleue

Constituant essentiel des amphibolites de la partie orientale et médiane de l'île, elle est plus rare dans la partie occidentale. Elle est souvent liée à de l'amphibole bleu-vert (en cristaux zonés ou non) en paragenèse primaire. La rétro-morphose l'a partiellement transformée en amphibole bleu-vert associée en paragenèse secondaire le plus souvent avec albite, chlorite et épidote. On a séparé et analysé par voie classique les amphiboles bleues de 5 amphibolites de la partie orientale. Dans la représentation carrée glaucophane-ferroglaucophane-magnésioriébeckite-riébeckite (Miyashiro, 1957; Borg, 1967), les points représentatifs des glaucophanes de Makanjuola et Howie, de celui de B. Velde (1967) et de ceux du Tableau 1

Tableau 1. Amphiboles

	Amphiboles vertes				Glaucophanes				Amphiboles bleu-vert					
	Krlv3	PdC1	PeL2	PdC3	CdS11	LM7	PdC4	IdG2'	IdG4'	Spl3 blv1	Spl3 blv2	CdS5 blv2	CdS5 blv(p)	CdS5 blv(c)
	SiO ₂	54,63	53,33	53,55	53,57	56,03	54,56	54,83	56,34	56,37	42,90	46,49	47,72	43,81
Al ₂ O ₃	2,92	5,19	4,53	3,44	9,26	11,40	9,94	8,21	8,43	14,62	10,38	8,62	7,27	7,98
Fe ₂ O ₃	2,17	3,61	1,12	6,83	5,75	3,57	2,54	7,40	7,04	22,11	19,52	20,35	20,68	20,68
FeO	6,86	5,43	8,02	2,71	7,85	10,90	8,06	4,94	3,78	tr	tr	tr	tr	tr
MnO	0,08	0,12	—	0,16	—	—	0,06	0,09	—	8,07	10,66	10,71	11,67	11,92
MgO	18,89	16,85	18,43	17,78	9,66	8,00	11,83	13,88	12,56	8,22	7,47	8,12	9,53	9,84
CaO	12,10	11,72	10,69	11,89	1,81	1,55	2,97	—	0,51	3,97	2,83	3,47	2,63	2,74
Na ₂ O	0,62	1,00	1,39	0,90	7,13	6,65	5,21	6,35	7,61	tr	tr	tr	tr	tr
K ₂ O	0,06	0,11	0,11	0,07	0,03	0,07	0,03	0,11	0,06	nd	nd	nd	nd	nd
TiO ₂	—	—	—	—	0,34	0,44	0,37	0,55	0,65	nd	nd	nd	nd	nd
P ₂ O ₅	0,06	—	0,06	0,03	0,18	0,03	0,18	0,03	0,05	nd	nd	nd	nd	nd
H ₂ O ⁺	2,29	1,91	2,86	2,32	2,28	2,14	3,00	1,89	2,23	nd	nd	nd	nd	nd
H ₂ O ⁻	0,03	0,17	0,03	—	0,10	0,11	0,16	0,05	0,03	99,90	97,35	99,22	95,60	96,11
total	100,71	99,44	100,79	99,70	100,42	99,32	99,18	99,84	99,32	6,317	6,869	6,977	6,752	6,604
Si	7,616	7,488	7,510	7,510	7,768	7,647	7,691	7,720	7,750	1,683	1,131	1,023	1,248	1,396
AlIV	0,384	0,512	0,490	0,490	0,232	0,253	0,309	0,280	0,250	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
ΣZ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	0,854	0,676	0,461	0,072	0,049
AlVI	0,100	0,356	0,267	0,084	1,298	1,650	1,352	1,065	0,900	2,723	2,412	2,488	2,665	2,659
FeIII	0,229	0,384	0,119	0,287	0,604	0,516	0,270	0,771	0,720	—	—	—	—	—
FeII	0,806	0,643	0,948	0,807	0,918	1,289	0,955	0,570	0,430	1,770	2,348	2,335	2,681	2,733
Mn	0,009	0,014	—	0,019	—	—	0,006	0,010	—	—	—	—	—	—
Mg	3,964	3,561	3,891	3,752	2,016	1,689	2,497	2,860	2,530	—	—	—	—	—
Ti	—	—	—	—	0,035	0,046	0,039	0,057	0,065	5,347	5,436	5,284	5,418	5,441
ΣY	5,108	4,958	5,225	4,949	5,071	5,190	5,117	5,233	5,645	—	—	—	—	—

Ca	1,822	1,778	1,619	1,801	0,270	0,234	0,450	—	0,074	1,297	1,182	1,272	1,574	1,621
Na	0,169	0,275	0,381	0,247	1,937	1,821	1,432	1,710	2,000	1,135	0,810	0,982	0,785	0,817
K	0,010	0,018	0,019	0,013	0,005	0,008	0,005	0,019	—	—	—	—	—	—
Σ X + A	2,001	2,071	2,019	2,061	2,212	2,063	1,887	1,729	2,074	2,432	1,992	2,254	2,359	2,438
2 V	86°	86°	76°	75°	37°	36°	65°	39°	36°					
n _D	1,645	1,647	1,655	1,649	1,637	1,649	1,643							
n _p	1,622	1,630	1,634	1,622	1,622	1,612	1,612							

1. Krlv 3: amphibole vert foncé d'une amphibolite à chlorite. — 2. PdC 1: amphibole vert clair d'une amphibolite à grenat. — 3. PeL 2: amphibole vert clair d'une amphibolite à grenat. — 4. PdC 3: amphibole verte d'une amphibolite à grenat. — 5. CdS 11: glaucophane d'une glaucophanite à Cpx-Gr. — 6. LM 7: glaucophane bleu foncé d'une glaucophanite à Cpx-Gr. — 7. PdC 4: glaucophane bleu clair d'une amphibolite à grenat. — 8. IdG 2': glaucophane bleu foncé d'une glaucophanite à épidote. — 9. IdG 4': glaucophane bleu foncé d'une glaucophanite à épidote. — 10. Sp 13: amphiboles bleu-vert d'une glaucophanite à Gr-Ep. — 11. CdS 5: amphiboles bleu-vert d'une glaucophanite à Gr-Ep. Ions calculés sur la base anhydre O = 23 par formule unité.

Analystes: 1 à 4: N. Vassard; 6 et 9: A. Bérard-Nétilard; 5, 7 et 8: M. Doucet; 10 et 11: C. Triboulet. Laboratoire de Pétrographie.

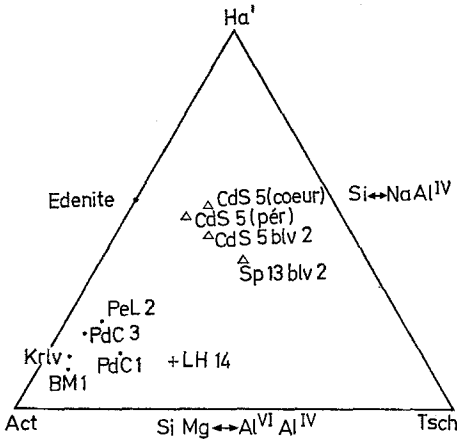


Fig. 1

Fig. 1. Représentation des amphiboles calcoïques dans le diagramme Ha'-Ac-Tsch. ● actinotes alumineuses; △ amphiboles bleu-vert; + amphibole intermédiaire entre glaucophane et barroïsite (analyses: Tableau 1 et Makanjuola et Howie)

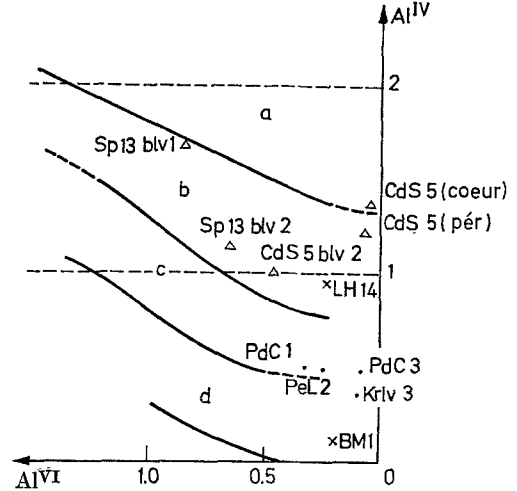


Fig. 2

Fig. 2. Corrélation Al^{IV} — Al^{VI} dans les amphiboles de divers faciès métamorphiques. a faciès granulite; b faciès amphibolite; c faciès amphibolite à épidote; d faciès schistes verts

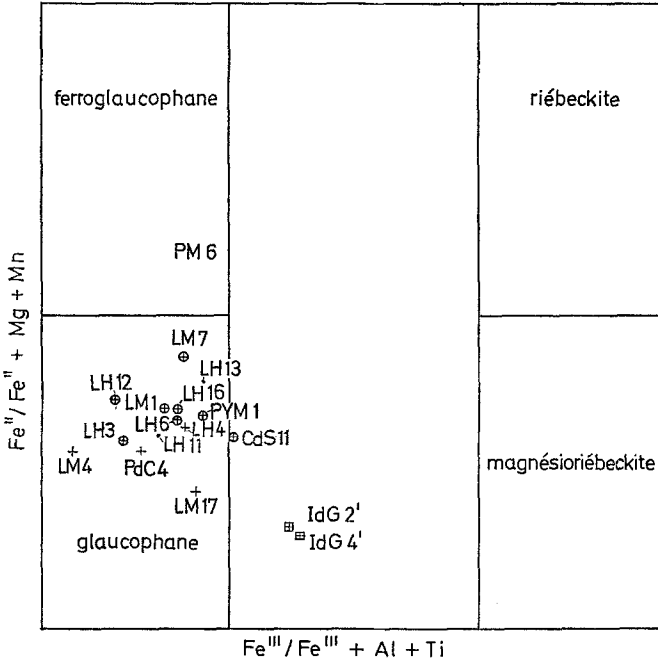


Fig. 3. Place des amphiboles bleues dans le diagramme glaucophane-ferroglaucophane-magnésioriébeckite-riébeckite, tenant compte des substitutions $Fe^{2+} \leftrightarrow Mg$ et $Fe^{3+} \leftrightarrow Al$ ● glaucophanes de roches à Cpx-Gr; + glaucophanes d'amphibolites à grenats; □ glaucophanes d'amphibolites à épidote sans grenats; ● glaucophanes de roches pélitiques ou calcschistes. (Tabl.1, Makanjuola et Howie, et B. Velde)

Tableau 2. Pyroxènes

	CdS11	LM7		CdS11	LM7
SiO ₂	53,14	52,53	Si	1,934	1,933
Al ₂ O ₃	9,21	9,73	Al ^{IV}	0,066	0,067
Fe ₂ O ₃	5,61	8,12			
FeO	3,20	4,73	Σ Z	2,000	2,000
MnO	0,01	—			
MgO	7,66	4,72	Al ^{VI}	0,333	0,359
CaO	12,86	10,78	Fe ^{III}	0,154	0,226
Na ₂ O	6,23	7,44	Fe ^{II}	0,098	0,146
K ₂ O	0,17	0,07	Mg	0,418	0,261
TiO ₂	0,89	0,80	Ti	0,024	0,022
P ₂ O ₅	0,05	0,10			
H ₂ O ⁺	1,12	0,71	Σ MI	1,027	1,014
H ₂ O ⁻	0,08	—			
total	100,23	99,73	Ca	0,505	0,428
			Na	0,444	0,536
			K	0,007	0,003
2 V	76°	73°			
n _g	1,694	1,705	Σ M2	0,956	0,967
n _p	1,682	1,687			

1. CdS 11: omphacite d'une glaucophanite à Cpx-Gr.

2. LM 7: omphacite d'une glaucophanite à Cpx-Gr.

Ions calculés sur la base O = 6 par formule unité.

Analyses: 1.: N. Vassard; 2: A. Bérard-Nétilard. Laboratoire de Pétrographie.

montrent que les amphiboles bleues sodiques des roches basiques de Groix ont des compositions variables, et sont fonction de la minéralogie de ces roches.

4. La coexistence des amphiboles primaires et le problème des solutions solides

Les deux types de coexistence d'amphiboles primaires dans les paragenèses de Groix: glaucophane-amphibole bleu-vert et amphibole bleu-vert-actinote alumineuse, sont régis par des lacunes de miscibilité qui dépendent des conditions physiques du métamorphisme primaire. Les analyses (en cours) à la microsonde de ces couples permettront ultérieurement de définir l'extension des deux domaines.

B. Les pyroxènes

Ils sont limités en extension (voir plus loin les limites géographiques) et apparaissent dans des amphibolites à grenats. On a analysé 2 pyroxènes par voie humide: ce sont des omphacites assez peu riches en molécule jadéitique (Tableau 2), 31,7 et 30,0. D'après les études de Dobretsov (1968), Dobretsov et Ponomareva (1964), Essene et Fyfe (1967) sur les relations entre le chimisme de ces pyroxènes et les conditions physiques, les pyroxènes de Groix se sont formés à assez fortes pressions et températures. Ils ne correspondent probablement pas au maximum de solution solide de jadéite dans la molécule sous les conditions physiques de formation, car on n'a jamais trouvé d'albite—sinon rétro-morphique, donc secondaire—

Tableau 3. Grenats

	PeL2	Que4	LM7	CdS11
SiO ₂	37,13	36,70	36,02	37,07
Al ₂ O ₃	20,71	18,08	22,48	20,31
Fe O	27,96	32,35	26,98	27,06
MnO	0,94	0,27	0,34	1,44
MgO	2,66	1,41	1,39	1,91
CaO	10,76	10,44	10,73	11,31
Na ₂ O	0,05	0,06	0,12	0,09
K ₂ O	0,02	0,03	0,09	0,04
TiO ₂	0,57	0,77	1,75	0,74
P ₂ O ₅	—	—	0,01	0,03
H ₂ O ⁺	—	—	—	—
H ₂ O ⁻	—	0,06	—	0,05
total	100,80	100,17	99,91	100,05
Si ^{IV}	2,926	2,978	2,849	2,948
Al	0,074	0,022	0,151	0,052
Σ	3,000	3,000	3,000	3,000
Al	1,871	1,726	1,965	1,873
Fe ^{III}	0,095	0,227	—	0,088
Ti	0,034	0,047	0,105	0,039
Σ	2,000	2,000	2,000	2,000
Fe ^{II}	1,764	1,987	1,798	1,728
Ca	0,916	0,915	0,915	0,971
Mn	0,063	0,018	0,022	0,098
Mg	0,315	0,172	0,165	0,228
Na	0,007	0,009	0,018	0,014
K	0,001	0,002	0,009	0,003
Σ	3,065	3,103	2,927	3,042
n	1,782	1,782	1,787	1,787

1. CdS 11: grenat d'une glaucophanite à Cpx-Gr.

2. LM 7: grenat d'une glaucophanite à Cpx-Gr.

3. Que 4: grenat d'une amphibolite à Cpx-Gr.

4. PeL 2: grenat d'une amphibolite à Cpx-Gr.

Ions calculés sur la base O = 12 par formule unité.

Analyste: N. Vassard. Laboratoire de Pétrographie.

dans les amphibolites à Cpx. Dès lors, leur teneur en jadéite n'est pas un critère permettant de définir avec précision les conditions réelles qui ont permis leur cristallisation. Elles représentent seulement les conditions minimum. La rétro-morphose a eu sur eux des répercussions diverses; ils se sont plus ou moins déstabilisés en amphibole (bleue, bleu-vert ou verdâtre) \pm Ab \pm Chl \pm Ep.

C. Les grenats

Omniprésents dans les roches basiques de la partie orientale, ils sont totalement absents de la partie occidentale, sauf dans quelques schistes verts *et schistes pé-litiques*. Quatre analyses de grenats de roches basiques sont données dans le tableau 3.

D. Les chlorites

Malgré leur identification aisée étant données leur taille et leur abondance, les chlorites sont les minéraux les plus difficiles à dater dans l'histoire des roches. Dans les roches à Cpx-Gr primaires, elles n'apparaissent que par déstabilisation rétro-morphique des associations Gl-Pa, Gl-Gr, Gl-Ep et du grenat seul en Ab + Chl ± Amp blv ± Ep. Dans les roches sans Cpx, la mise en évidence de la co-existence de chlorite primaire + secondaire avec amphibole et/ou grenat est plus délicate.

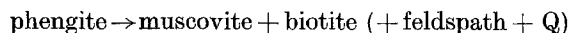
L'ensemble des analyses ces chlorites des roches basiques (Tabl. 4 et Mäkanjuola et Howie, Tabl. 14, IV, p. 110) indique de faibles substitutions (Mg, Fe) Si ↔ Al^{IV} Al^{VI}. Les substitutions Mg, Fe²⁺ ↔ Fe³⁺, Al sont négligeables. Les substitutions Mg ↔ Fe²⁺, bien que plus importantes, sont peut-être liées au chimisme de la roche (degré d'oxydation) et à sa nature, les amphibolites contenant en règle générale des chlorites moins riches en FeO que les schistes verts. Cependant ces substitutions sont trop faibles pour envisager des différences importantes dans les conditions thermiques leur ayant donné naissance.

Dans les schistes pélitiques la teneur en FeO est plus forte que celle des schistes basiques (Tabl. 4 et Mäkanjuola et Howie, Tabl. 14, I et III).

E. Les micas

1. Les micas blancs

On dispose de nombreuses analyses chimiques de phengites de roches variées de Groix (B. Velde, 1967; Mäkanjuola et Howie, 1972). Le Tableau 5 donne 5 nouvelles analyses. Ces phengites sont primaires, et dans de nombreux cas la réaction:



qui se traduit par la cristallisation de lamelles d'exsolution de biotite dans les clivages de la phengite témoigne de leur réadaptation aux conditions rétro-morphiques.

Les variations de teneur en Si⁴⁺ dans nos phengites sont minimes (3,2 à 3,3) malgré les différences importantes de compositions chimiques des roches. Il s'ensuit que les différences de *PT* qui se sont exercées pendant le métamorphisme n'ont pas été importantes d'un point à l'autre de l'île (B. Velde, 1967).

La paragonite.

Elle est totalement absente des schistes verts et se trouve dans les roches pélitiques en quantités mineures par rapport à la phengite. Dans certaines amphibolites de l'extrême SE et du nord de l'île elle fait partie de la paragenèse secondaire de ces roches. Dans la partie médiane de l'île, elle a été rapportée au métamorphisme primaire (voir plus loin les descriptions des paragenèses).

2. La biotite

Peu développée dans les amphibolites et glaucophanites à épidote pauvres en K, sa croissance est liée à celle de l'amphibole, ce qui est peu fréquent (Turner et Verhogen, 1960; Ernst, 1963) et indique une température de formation assez élevée (Triboulet, 1971). Plus abondante dans les roches pélitiques, elle n'est

Tableau 4. Chlorites

	PeL2 (Amp)	PeL2 (Gr)	PdC3	PdC1	Krlv3	Kerig2	Poulz2
SiO ₂	29,80	27,46	27,66	29,47	27,93	28,03	24,31
Al ₂ O ₃	18,58	15,96	21,59	20,04	21,37	18,49	20,96
Fe ₂ O ₃	5,91	7,57	3,45	2,67	1,52	4,08	8,53
FeO	14,44	17,53	14,21	14,17	14,32	17,09	21,40
MnO	0,26	0,07	0,13	—	0,14	0,14	—
MgO	19,09	20,20	20,48	22,40	21,67	19,69	8,67
CaO	0,75	—	0,43	0,14	—	0,44	—
Na ₂ O	0,27	0,11	0,06	0,17	0,03	0,22	4,34
K ₂ O	0,07	0,06	0,38	0,50	0,01	0,10	0,65
TiO ₂	1,01	—	0,18	—	—	0,68	0,20
P ₂ O ₅	—	—	—	—	0,08	—	0,09
H ₂ O ⁺	10,52	10,02	11,66	11,17	11,58	11,11	10,45
H ₂ O ⁻	0,24	0,12	0,54	0,16	0,72	0,21	0,94
total	100,94	99,10	100,77	100,89	99,37	100,28	100,54
Si	5,821	5,593	5,459	5,682	5,561	5,617	5,160
Al ^{IV}	2,179	2,407	2,541	2,318	2,439	2,383	2,840
Σ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al	2,146	1,467	2,540	2,287	2,631	2,032	2,461
Fe ^{III}	0,875	1,169	0,515	0,390	0,229	0,620	1,373
Fe ^{II}	2,379	3,012	2,367	2,305	2,405	2,889	2,832
Mn	0,043	0,011	0,017	—	0,023	0,023	—
Mg	5,613	6,193	6,087	6,502	6,495	5,939	2,770
Ti	0,150	—	0,026	—	—	0,103	0,042
Na	0,103	0,043	0,022	0,063	0,010	0,086	1,805
K	0,016	0,014	0,094	0,124	—	0,025	0,176
Σ	11,583	11,909	11,758	11,699	11,793	11,811	12,439
2V	uniaxe	uniaxe	13°(+)	petit	11°(-)	petit	petit

1. PeL 2: chlorite verte associée aux amphiboles, d'une amphibolite à épidote.
 2. PeL 2: chlorite verte associée aux grenats.
 3. PdC 1: chlorite vert pâle d'une amphibolite à épidote.
 4. PdC 3: chlorite vert pâle d'une amphibolite à épidote.
 5. Krlv 3: chlorite vert très pâle d'une amphibolite à Ep.
 6. Kerig 2: chlorite verte d'un schiste vert à amphibole bleu-vert, albite, épidote.
 7. Poulz 2: chlorite vert très foncé d'un gneiss albitique.
- Ions calculés sur la base anhydre O = 28 par formule unité.
Analystes: 1 à 5: N. Vassard; 6 et 7: A. Bérard-Nétilard. Laboratoire de Pétrographie.

cependant pas uniformément représentée. Sa teinte est variable: brune dans la partie orientale, elle est brun-vert puis franchement verte quand on se dirige vers l'ouest.

F. Le chloritoïde

Etant données sa taille et son abondance, le chloritoïde est connu depuis longtemps dans les micaschistes de Groix (Barrois, 1884; Von Lasaulx, 1884), que l'on a pu ainsi comparer aux micaschistes à chloritoïde de la bande du Pouldu, sur

Tableau 5. Phengites

	Amer4	Kerz 3	Sp2	PdGr2	CdS2
SiO ₂	48,50	47,81	47,33	48,63	49,26
Al ₂ O ₃	27,13	28,31	28,20	26,53	29,78
Fe ₂ O ₃	3,39	3,73	4,85	5,87	1,74
FeO	1,49	1,51	1,60	1,44	1,44
MnO	—	0,05	—	0,14	—
MgO	2,74	2,42	2,32	2,68	2,66
CaO	—	—	—	0,17	—
Na ₂ O	0,72	0,55	0,62	0,70	0,19
K ₂ O	9,37	9,91	9,92	8,29	9,44
TiO ₂	2,45	0,40	0,52	1,10	0,46
P ₂ O ₅	0,18	—	—	0,13	0,03
H ₂ O ⁺	4,69	4,64	4,86	4,73	4,71
H ₂ O ⁻	0,24	0,09	0,12	0,23	0,17
total	100,90	99,42	100,34	100,64	99,95
Si	3,227	3,227	3,190	3,248	3,265
Al ^{IV}	0,773	0,772	0,810	0,752	0,735
Σ	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Al ^{VI}	1,378	1,504	1,450	1,359	1,617
Fe ^{III}	0,171	0,190	0,248	0,297	0,087
Fe ^{II}	0,083	0,085	0,090	0,081	0,080
Mn	—	0,002	—	0,007	—
Mg	0,274	0,245	0,235	0,269	0,265
Ti	0,123	0,020	0,026	0,055	0,023
Σ Y	2,029	2,046	2,049	2,068	2,072
Ca	—	—	—	0,012	—
Na	0,093	0,072	0,081	0,091	0,024
K	0,802	0,860	0,860	0,712	0,805
Σ X	0,895	0,932	0,941	0,815	0,829
2 V	36°	39°	39°	35°	35°
n _g	1,600	1,601	1,607	1,601	1,597
n _p	1,579	1,583	1,587	1,581	1,577

1. Amer 4: phengite d'un gneiss albitique à grenat.
2. Kerz 3: phengite d'un micaschiste à grenat.
3. Sp 2: phengite d'un gneiss albitique à grenat.
4. PdGr 2: phengite d'un gneiss albitique à chloritoïde.
5. CdS 2: phengite d'un gneiss albitique à grenat.

Ions calculés sur la base anhydre O = 11 par formule unité.

Analystes: 2,3 et 5: A. Bérard-Nétilard; 1 et 4: N. Vassard. Laboratoire de Pétrographie.

le continent (Cogné, 1957). Il cristallise le plus souvent antérieurement aux grenats et au sphène, à l'apatite, aux minéraux opaques. Atteint lui aussi par la rétro-morphose, il entre en réaction avec la biotite ou le grenat. Les analyses chimiques (B. Velde, 1967; Mekanjuola et Howie, 1972) montrent que les teneurs en Fe₂O₃ et MgO sont particulièrement importantes par rapport aux chloritoïdes habituels (Halferdahl, 1961).

G. *La stilpnomélane*

Elle est ubiquisite sur toute l'étendue de l'île, dans les roches pélitiques et dans les roches basiques. Dans les roches pélitiques, elle peut coexister en paragenèse primaire avec biotite et grenat (Triboulet, 1971). Secondaire, elle a cristallisé à leurs dépens. Dans les roches basiques, elle peut être liée à la biotite en paragenèse primaire dans des roches de relativement haute température. Secondaire, elle y apparaît par rétro-morphose des grenats et des amphiboles, associée respectivement à de la chlorite ou de l'albite.

H. Coefficients de distribution

Sachant que la répartition de deux éléments entre deux minéraux est contrôlée par les conditions physiques dans lesquelles ils se sont formés (Ernst, 1964; Saxena, 1968 a, b), on va appliquer la loi de répartition du fer et du magnésium entre Cpx et grenat. Si on considère que les substitutions dans ces minéraux sont idéales, le coefficient de répartition K_D est de la forme :

$$K_D = \frac{(\text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{Cpx}} (1 - \text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{Gr}}}{(1 - \text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{Cpx}} (\text{Fe}/\text{Fe} + \text{Mg})_{\text{Gr}}}$$

Les valeurs de K_D calculées à partir des données de Mäkinen et Howie et de celles des Tableaux 2 et 3 sont comprises entre 0,028 et 0,050. Ces variations importantes ne traduisent pas forcément des différences dans les conditions de PT , mais peuvent être expliquées par le fait que la température de formation de roches à Cpx-Gr-amphibole bleue ou bleu-vert est plus faible que celle d'autres roches où les coefficients sont plus homogènes (éclogites et pyroxénites par exemple). Ces valeurs de K_D indiquent que les roches à Cpx-Gr de Groix associées à des amphibolites à épidote-grenat ont cristallisé dans des conditions inférieures à celles des éclogites à amphibole verte de la région nantaise dont elle est peu éloignée ($K_D \sim 0,085$, B. Velde 1970). Ces conditions ont été uniformes et correspondent au faciès schistes à glaucophane-Cpx de Coleman *et al.* (1965) pour lesquels $K_D \sim 0,04$.

II. Etude Pétrologique

Connaissant maintenant la nature des minéraux des roches basiques et des schistes pélitiques, ainsi que leur mode d'occurrence dans l'un et l'autre type de roche, nous allons décrire les assemblages primaires et rétro-morphiques en relation avec les compositions chimiques. Puis nous envisagerons la façon dont ces assemblages peuvent être associés ou s'exclure, ce qui conduira à définir des zones de même type métamorphique où seules des différences ou particularités de chimisme mènent à des roches minéralogiquement différentes. Nous les relierons ensuite aux faciès métamorphiques, et à l'aide des analyses et des données expérimentales de stabilité des minéraux ou des assemblages de minéraux, nous préciserons les conditions exactes de mise en place.

A. Caractères chimiques des éclogites à amphiboles, des amphibolites et des schistes verts.

Les études maintenant classiques des schistes à glaucophane associés à des schistes verts et/ou des roches éclogitiques ont montré, après les fluctuations dues à la théorie métagénétique, que ces schistes peuvent ne pas être plus riches en al-

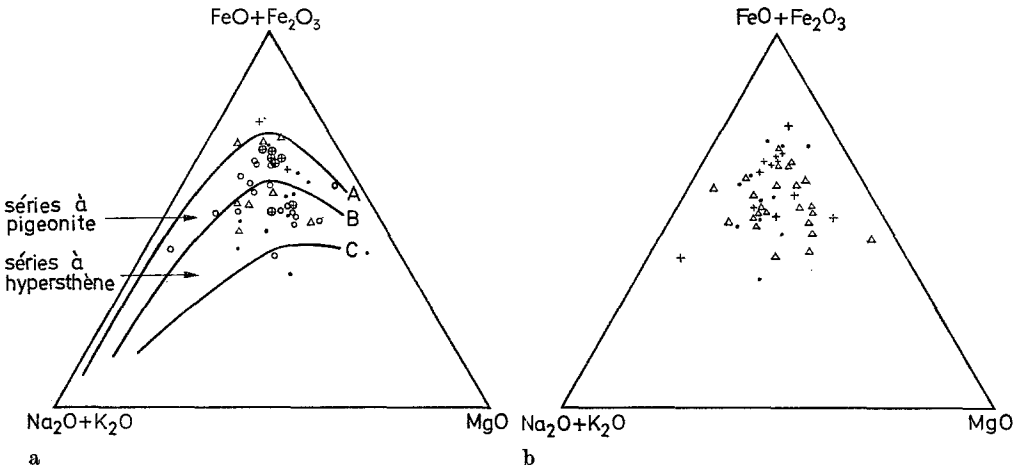


Fig. 4a Place des différents types de roches dans un diagramme de Kuno (1968). \odot roches à Cpx-Gr; \circ glaucophanites et amphibolites à grenats; Δ glaucophanites et amphibolites sans grenats; schistes verts. A lignée du Skaergaard; B lignée tholéitique; C lignée de différenciation calco-alkaline. b Zones d'occurrences des roches représentées sur la Fig. 4a. + zone orientale; Δ zones médiane, extrême-orientale et extrême-occidentale. \bullet zone occidentale

calins que les roches associées. Seuls la composition totale (Ernst, 1964) et le jeu des variables P_{tot} , P_{H_2O} et T (Dobretsov, 1964; Morgan, 1970; Félix, 1972) mènent à des assemblages avec ou sans glaucophane.

On a analysé par fluorescence X (analyste M. Lenoble, laboratoire de Pétrographie) 49 roches comprenant 15 glaucophanites, 13 amphibolites à amphibole bleu-vert ou actinote alumineuse, 8 «éclogites à glaucophane», et 13 schistes verts.¹ Un diagramme $FeO + Fe_2O_3 - Na_2O + K_2O - MgO$ (Kuno, 1968, p. 649) (Fig. 4 a et b) montre que les roches basiques de Groix ne suivent aucune série de roches éruptives. En particulier, les roches dépourvues de glaucophane ne sont pas moins riches en alcalins que les schistes à glaucophane.

Ce n'est donc pas le chimisme global des roches qui conduit à la zonation et à la différenciation des faciès en coexistence. Ayant écarté la possibilité d'originalité des roches à glaucophane par leur chimisme, il reste à voir dans quelles mesures ce ne sont pas des différences de teneur en eau qui, dans des conditions identiques de P totale et T , auraient cristallisé des roches à Gl-Cpx, Gl sans Cpx et schistes verts. De plus, la coexistence spatiale deux à deux des trois groupes ci-dessus oblige dans certains cas à faire intervenir une autre variable: P_{O_2} , qui détermine dans des roches contenant un élément à deux degrés de valence (ici le fer) les paragenèses. Sur un diagramme $H_2O\% = f(Fe_2O_3/FeO)$ (Fig. 5) les roches à Cpx-Gr se distinguent des amphibolites sans Cpx qui les avoisinent surtout par leur plus faible teneur en eau (ce qui s'explique simplement par le fait que l'assemblage Cpx-Gr est moins hydraté que les assemblages à amphibole-Gr-Ép), et par un état plus réduit. Il est à remarquer cependant qu'une amphibolite à Gl-chloritoïde et un schiste vert pris tous deux dans la «zone à Cpx» montrent une teneur particulièrement faible en eau par rapport aux roches de même minéralogie d'autres gisements. La différenciation des roches à glaucophane avec les schistes verts

¹ Ces analyses sont à la disposition des lecteurs et seront envoyées à toute demande de leur part.

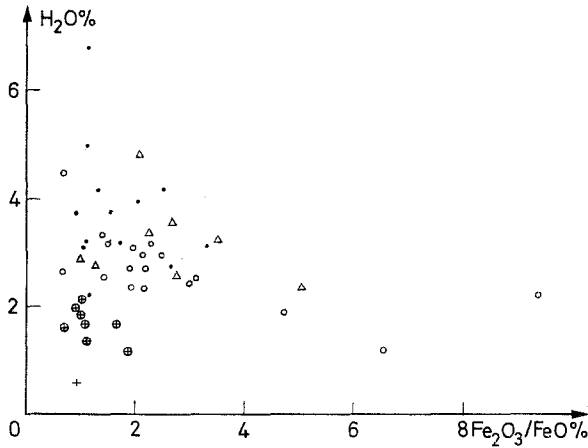


Fig. 5. Variation de la teneur en eau en fonction du degré d'oxydation, pour différents types de roches.
 ⊙ roches à Cpx-Gr;
 ○ glaucophanites et amphibolites à grenats; △ glaucophanites et amphibolites sans grenats; ● schistes verts

n'est pas, quant à elle, mise en évidence: on obtient sur le diagramme une imbrication des différentes compositions. Si les variations du rapport Fe_2O_3/FeO varient dans de faibles mesures (1 à 2,5), à quelques exceptions près, on peut cependant remarquer que les schistes verts ont tendance à être plus hydratés que les roches à glaucophane. Nous reprendrons ce problème du rôle de l'eau au cours du métamorphisme dans la dernière partie.

	1	2	3
	roches basiques		
zone I	Cpx Gr Gl Ep Pa Ep Gl Gr Gl Ep Gr AcAl	Ampblv Chl Ab Pa	{ Ap Sph Pheng Chtd Stilp Mnop Biotbr
zone II	{ Gl Ampblv Ep Gr Ampblv ± AcAl Chl Gr Ep Pa Gl Ep Ampblv	Ab Chl Ampblv Pa	{ Peng Stilp Biotbrv Q Ap Sph Mnop Calc
zone III	Ep Gl Chl Ampblv Ep Gl Chl Ab Ab Ep Pa Ampblv	{ Ab Chl Ep Ampblv Pa	{ Biotv Stilp Calc Ap Sph Pheng Q Minop
	roches pélitiques		
zone I	Biotbr Pheng Gr ± Stilp Pheng Chtd Gr	Chl Stilp Ab	{ Ep Ab Tour Sph Amph Mnop
zone II	{ Stilp Pheng Q Gr/Chl Chtd Pheng Gr Q	Ab Chl Stilp	{ Ep Tour Ap Sph Amph Biotbrv Mnop
zone III	{ Chtd Pheng Stilp (Chl/Gr)		{ Ab Q Tour Amph Biotv Ap Sph Mnop

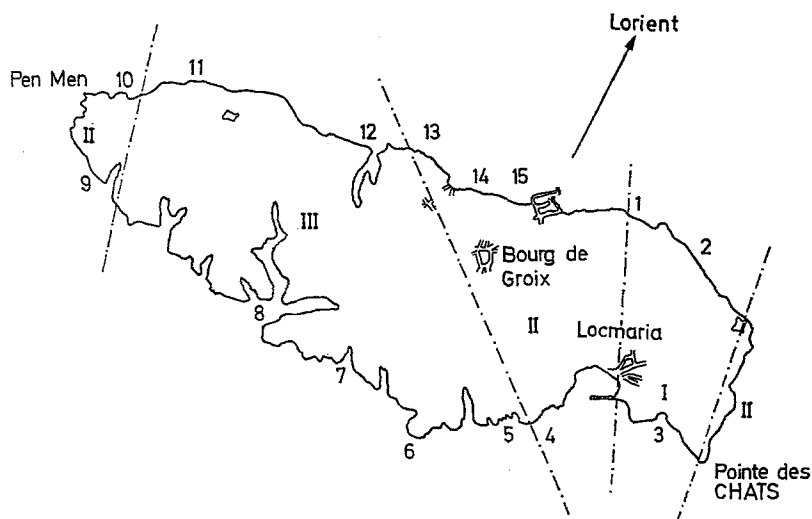


Fig. 6. Carte schématique indiquant les limites des zones I, II et III. Pour la tectonique se reporter à J. Cogné, M. Ruhland et D. Jeannette. Les chiffres représentent les localisations comme suit: 1 Port Quedoul; 2 plage du Trech'; 3 Porh Morvil; 4 Porh Roëd; 5 Locqueltas; 6 pointe de l'Enfer; 7 vallon du lavoir; 8 port Saint Nicolas; 9 trou du tonnerre; 10 Biléric; 11 Inévéli; 12 port Mélin; 13 Stanverec; 14 côte des Sœurs; 15 côte d'Héno

B. Etude des assemblages minéraux et définitions des faciès

1. Zone I

C'est dans cette zone que l'on rencontre des amphibolites à Cpx jadéitique (Fig. 6). *Roches basiques*. Les paragenèses primaires de ces roches peuvent être rapportées à trois assemblages :

- | | |
|------------------|---------------|
| a) Gl Ep Gr AcAl | rare |
| b) Cpx Gl Gr Ep | très répandue |
| c) Pa Ep Gl Gr | rare |

qui correspondent à des chimismes différents. On peut en faire une représentation tétraédrique, sachant que le système est parfaitement défini par les éléments Na_2O , Al_2O_3 (Mg, Fe, Mn), O et CaO, en considérant SiO_2 et H_2O en excès (Ernst, 1963). Les volumes délimités par les assemblages précédents, comme ceux d'autres assemblages de chimisme plus sodique (non observé à Groix) sont à 4 phases. Ils

Cpx: clinopyroxène; Gr: grenat; Amphlv: amphibole bleu-vert; AcAl: actinote alumineuse; Gl: glaucophane; Ep: épidote; Pheng: phengite; Chl: chlorite; Pa: paragonite; Ab: albite; Q: quartz, Stilp: stilpnomélan; Chtd: chloritoïde; Ap: apatite; Calc: calcite; Sph: sphène; Biot: biotite (br: brune; brv: brun-vert; v: verte); Mnop: minéraux opaques; Tour: tourmaline

1: minéraux des assemblages primaires.

2: minéraux de formation secondaire, dont la cristallisation provient d'un minéral ou d'un assemblage primaire 1.

3: minéraux accessoires.

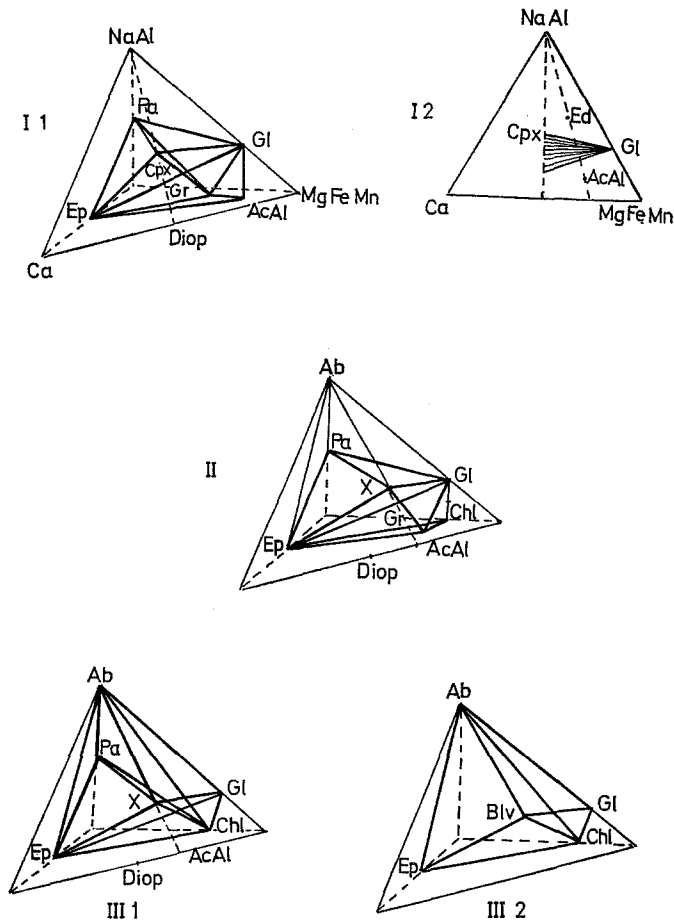


Fig. 7. Paragenèses des roches basiques, avec SiO_2 et H_2O en excès. Dans la figure I 1 le joint Cpx-Gr passe derrière le plan Ep-Cpx-Gl. Pour la position du point X sur les figures II et III 1, voir le texte.

sont représentés Fig. 7 I 1. On n'a pas fait intervenir l'amphibole bleu-vert, la chlorite ni l'albite dans la représentation des assemblages primaires. L'amphibole bleu-vert n'intervient qu'en fin de cristallisation de l'amphibole bleue. On la retrouve associée ou non à la chlorite formée au détriment des minéraux précédents. Amphibole bleu-vert, chlorite et albite ont alors été attribuées à une rétro-morphose, plus ou moins complète, mais qui a eu tendance à remplacer les paragenèses primaires par d'autres :

Ab Pa Chl Ep

Ab Chl Ep Amp blv

Les transformations ne sont pas partout uniformes: le grenat le plus souvent reste stable; quelquefois cependant il a tendance à se déstabiliser en $\text{Chl} \pm \text{Ep}$. L'omphacite connaît un

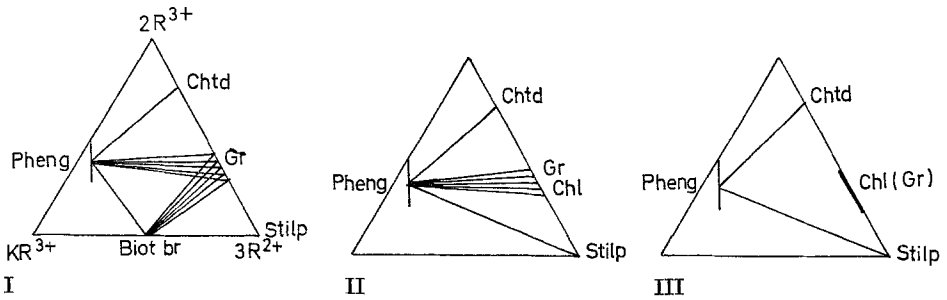


Fig. 8. Paragenèses des micaschistes et gneiss albitiques, avec excès de SiO_2 et H_2O

phénomène analogue à l'ouralitisation et se déshiquette en aiguilles d'amphibole bleu-vert. Enfin, l'association $\text{Ab} + \text{Chl}$ provient aussi de la réaction de la glaucophane sur la paragonite.

Roches pélitiques. Quartz, feldspath (albite) et mica blanc sont répandus uniformément dans toutes les roches pélitiques de la zone I. Gneiss et micaschistes de cette zone sont caractérisés en outre par la coexistence de biotite brune-grenat et chloritoïde-grenat. Les paragenèses primaires rencontrées sont de deux types fondamentaux :

- Biotbr Gr Pheng
- Gr Chtd Pheng

La chlorite peut être difficilement comptée dans ces paragenèses, l'apparition de chlorite rétomorphique ayant masqué le plus souvent les relations entre les différentes générations de phyllites. On décrit chimiquement l'ensemble de ces minéraux par le jeu de combinaisons des éléments KR^{3+} (feldspath potassique) — $2\text{R}^{3+} - 3\text{R}^{2+}$. La Fig. 8 I en donne la représentation graphique.

Les assemblages primaires de ces roches pélitiques ont subi, comme ceux des roches basiques, une rétomorphose en $\text{Chl} \pm \text{Stilp}$ nomélane.

Faciès des roches à Cpx-Gr-amphibole primaires. D'après la définition originelle de Haüy (1822) une roche constituée d'omphacite et de grenat almandin est une écolite. L'étude pétrographique des roches à Cpx-Gr de la zone I montre que Cpx et Gr sont toujours associés en paragenèse primaire à de l'amphibole bleue. Les omphacites sont assez peu riches en molécule d'almandin. Les coefficients de distribution du fer et du magnésium entre ces deux minéraux prennent des valeurs intermédiaires entre celles des écolites de la région nantaise (B. Velde, 1970) et des roches de Californie (Coleman *et al.*, 1965) (B. Velde et H. Sabatier, 1972). L'absence de chlorite primaire dans les roches basiques signifie une température de cristallisation relativement élevée. Les roches à Cpx-Gr-Gl ont donc cristallisé à des températures inférieures à celles de la région nantaise, à une pression supérieure. Ces amphibolites sont de toute façon des schistes à glaucophane : écolites à glaucophane ou glaucophanites à omphacite, que l'on attribuera au faciès écolitique. Elles correspondent à des conditions de pression-température un peu supérieures à la limite écolite-amphibolite proposée par B. Velde (1970).

2. Zone II

Nous l'avons définie comme zone des amphibolites à grenats sans Cpx (Fig. 6).

Roches basiques. On en distingue plusieurs types, correspondant vraisemblablement à des chimismes différents: des glaucophanites à grenats, à glaucophane dominante sur l'amphibole bleu-vert; des amphibolites à grenats, à glaucophane et amphibole bleu-vert en quantités égales; des amphibolites à grenats à actinote alumineuse dominante.

La composition de l'amphibole est déterminée par la composition globale de la roche et le rapport des éléments chimiques dans les autres minéraux, dans des conditions *PT* données. Les variations de ces conditions, pour un même chimisme, régissent, en fonction des domaines d'immiscibilité, l'apparition d'une ou deux amphiboles. Les niveaux différemment colorés, qui ont pris naissance dans un même régime de conditions physiques et traduisent alors de seules variations chimiques, donnent des roches à actinote alumineuse \pm amphibole bleu-vert ou à amphibole bleu-vert \pm actinote alumineuse, ou à glaucophane \pm amphibole bleu-vert.

Les paragenèses primaires sont de trois types :

- a) Amp blv Gl Ep Gr très répandue
- b) Pa Gl Ep Amp blv exceptionnelle
- c) Amp blv \pm AcAl Chl Gr Ep peu répandue

Dans la représentation des assemblages à l'aide du tétraèdre précédent (Fig. 7 II) le point X représente une composition intermédiaire dont la valeur peut mener ou non à une démixion dans les amphiboles calciques. Les analyses chimiques (voir paragraphe A 1 et 2 et le Tableau 1) montrent qu'on peut faire varier X entre les pôles actinote et édenite sur la face Na_2O , Al_2O_3 — CaO —(Fe, Mg) O du tétraèdre. Cette représentation rend compte en particulier des paragenèses à Amp blv-Chl-Gr-Ep et de celles à AcAl-Chl-Gr-Ep, et de l'existence fréquente de tous les intermédiaires à deux amphiboles. Elle souligne l'impossibilité de coexistence en paragenèse primaire d'Ab-Chl, Ab-Gr, Pa-Gr-Amp blv. Outre l'absence de Cpx omphacitique dans des roches de compositions chimiques voisines de celles de la zone I, on note ici la présence d'amphibole bleu-vert ou d'actinote alumineuse et de la chlorite dans les paragenèses primaires. La paragenèse à amphibole bleu-vert-Gl-Gr-Ep remplace celle à Cpx-Gl-Gr-Ep.

La rétro-morphose a touché l'ensemble des roches, et comme dans la zone précédente a commencé à uniformiser les faciès à Ab-Chl-Ep-Amp-blv.

Roches pélitiques. Peu différentes macroscopiquement des roches pélitiques de la zone I, elles ne présentent cependant jamais l'association Gr-biotite brune. La stilpnomélane et la chlorite sont des minéraux possibles de certaines paragenèses primaires pauvres en Al et K. Les assemblages rencontrés sont :

- Pheng Stilp Gr/Chl
- Pheng Gr/Chl Chtd

Dans la représentation précédente (Fig. 8 II), grenat et chlorite ont des champs de compositions qui se recouvrent, ce qui n'est pas gênant puisqu'ils sont associés de façon ubiquiste avec chloritoïde ou stilpnomélane dans les paragenèses primaires.

La rétro-morphose a, comme dans la zone précédente, répandu chlorite + stilpnomélane.

L'inexistence d'assemblages à biotite brune-grenat dans la partie extrême-orientale de l'île permet de rapporter cette zone à un métamorphisme de type II

différent de celui décrit dans la zone I qui lui est contiguë à l'ouest, où la paire Gr-Biotite brune est fréquente dans les roches pélitiques. Cette considération lève l'indétermination dans les roches basiques sur l'appartenance de la paragonite aux assemblages primaires ou secondaires. En effet, d'après la Fig. 7 il est impossible que la paragonite existe avec Gl et Gr dans les conditions II (la coexistence Gl-Pa sans grenat est par contre possible). Cela implique que la paragonite est secondaire dans les schistes à Gl-Gr de la zone extrême orientale.

Facès des roches à grenat-amphibole primaires. Les roches basiques de la zone II sont des amphibolites, principalement des glaucophanites à Ep-Gr. La présence d'amphibole bleu-vert associée à la glaucophane, de biotite brun-vert et de chlorite dans les assemblages primaires signifie que les conditions physiques ont été moins intenses que celles de la zone I à Cpx-Gr. Dans les roches pélitiques, l'absence de la paire Gr-Biotbr vient étayer ces considérations.

3. Zone III

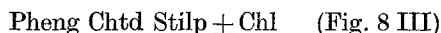
Roches basiques. Deux types se différencient sur le terrain: des schistes verts à structure «prasinitique», à albite ocellaire, épidote, chlorite et amphibole; des amphibolites sans grenats, à amphibole bleu-vert ou glaucophane, quelquefois actinote alumineuse. Les paragenèses de ces roches sont de 4 types:

- a) Gl Ep Chl Amp blv très répandue
- b) Pa Ep Chl Amp blv
- c) Ab Ep Pa Amp blv
- d) Ab Gl Ep Chl

On rencontré des roches à structure «prasinitique» et des roches à structure d'amphibolite qui rentrent dans chacun des 4 assemblages. Compte tenu de la définition des prasinites (roches à Ab Chl Ep Act) les schistes verts de Groix ne sont pas des prasinites s.s. En effet, les roches à structure prasinitique sans glaucophane contiennent une amphibole qui est toujours de couleur bleu-vert, rarement associée à des quantités minimales d'actinote alumineuse. Celles, plus rares, qui contiennent la paire Gl-Ep, ne peuvent non plus par définition être appelées des prasinites, malgré leur structure. Les 4 types de paragenèses sont représentés par la Fig. 7 III 1. Pour respecter les règles d'incompatibilité, le joint Gl-Ep ne peut être tracé que s'il ne perce pas le plan Ab-Chl-Amp blv, ce qui est réalisé si la chlorite est relativement alumineuse et/ou si la glaucophane de l'amphibolite est riche en ferromagnésiens. Cependant, sur le terrain, l'association étroite dans la zone III de roches à structure prasinitique à Gl-Amp blv-Ab-Chl primaires et de glaucophanites à Ep est très fréquente. Or les chlorites de ces roches, d'un vert souvent très foncé, dénotent une teneur importante en fer (Kerig 2, tabl. 4). Il est dès lors nécessaire d'invoquer, pour expliquer ce phénomène, des différences dans les conditions d'oxydation. En effet, hormis l'état d'oxydation du fer, les roches en coexistence ne montrent pas de différences essentielles dans leur chimisme global; on ne peut pas, dans le cas de ces roches en coexistence spatiale étroite, invoquer des différences de *PT* qui auraient en deux endroits éloignés mené aux assemblages primaires à Gl-Ep et à Gl-Amp blv-Ab-Chl, paragénétiqument incompatibles. Les analyses des roches totales qui correspondent à la partie

«schiste à Gl-Ep» et à la partie «prasinite à amphibole bleu-vert» montrent que ces roches diffèrent essentiellement par leurs états d'oxydation, les premières étant plus oxydées que les secondes. L'état d'oxydation du fer régit à lui seul les paragenèses: chlorite, amphibole bleu-vert et clinzoïsite pour la partie «prasinitique»; glaucophane, amphibole bleu-vert et pistachite pour la partie «glaucophanitique». Ces données rejoignent les affirmations d'Iwasaki (1963) selon lesquelles les schistes à Gl associés aux schistes verts sans Gl présentaient un degré d'oxydation plus intense que ceux-ci.

Roches pélitiques. Semblables à celles des zones I et II, elles ne contiennent cependant pas de biotite, sinon de la biotite verte en quantités mineures. Les paragenèses rencontrées sont:



Faciès des roches de la zone III

La moitié ouest de l'île de Groix représente le terme primaire le plus bas du gradient de métamorphisme qui comprend à l'est les schistes à glaucophane à Cpx-Gr et schistes à Gl-Gr-Ep. On a différencié cette zone de la zone II contiguë parce qu'elle ne contenait pas de paragenèse à Gl-Gr ni à Gl-Pa primaires dans les roches basiques. Les seules paragenèses à grenats sont à amphibole bleu-vert-Chl-Ab-Ep (amphibolites à Ab-Ep), dans des roches exemptes de glaucophane. On a déjà signalé la coexistence de biotite brune et de grenat dans de telles roches (Triboulet, 1971), mais ils sont en quantités assez faibles et associés à de larges cristallisations de stilpnomélane et de chlorite.

Sur la côte nord, les amphibolites sont à Ab-Ep-Amp blv ou à Gl-Ep-Chl, de faciès des amphibolites à Ab-Ep. Les roches à structure prasinitique (appelées schistes verts) sont toutes à amphibole bleu-vert (faciès intermédiaire entre schistes à Gl-Ep et schistes verts s.s.). On peut donc dire que cette partie de la côte nord a été placée primitivement dans des conditions voisines à la fois de celles des schistes à Gl-Ep, des schistes verts s.l. et des amphibolites à Ab-Ep. Les rares intercalations basiques de la côte sud constituées aussi de masses de schistes verts associés à de rares glaucophanites ont été placées dans ces mêmes conditions.

La rétro-morphose a eu dans la zone III des répercussions diverses. Elle a été moins marquée que dans les zones I et II parce qu'elle s'est effectuée dans des conditions moins différentes des conditions primaires. Les roches primaires à Gl ont été soumises à un métamorphisme terminal gradué, qui a opéré une rétro-morphose plus importante à l'ouest qu'à l'est. Ce gradient aurait été assez sensible pour faire passer dans le cas extrême des roches du faciès schistes à Gl-Ep à des roches à Ab-Chl-Ep-Amp blv («prasinites» à amphibole bleu-vert) et à Gl-Amp blv-Ab-Chl (faciès intermédiaire), sans jamais atteindre les conditions du faciès schistes verts s.s. à actinote (Fig. 7 III 2). Les schistes verts à amphibole bleu-vert n'ont, eux, pas connu de transformations minéralogiques secondaires.

En résumé, on peut avancer que toutes les fluctuations locales du métamorphisme primaire se sont effectuées dans des conditions plus proches du faciès schistes à Gl-Ep vers l'est (III 1), plus proches du faciès schistes verts vers l'ouest (III 2). On considérera que les roches de la zone III se sont formées dans des conditions «normales» de pression et/ou température inférieures à celles des zones I et II (le terme «anormal» étant représenté par les schistes à Gl-Ep) mais néanmoins plus fortes que celles du métamorphisme classique des schistes verts à actinote. La rétro-morphose a eu tendance à réunifier les faciès et à les placer dans les conditions où Ab-Ep-Chl-Amp blv sont costables (III 2).

Les roches pélitiques de la zone III ont subi, comme les roches basiques, moins de transformations minéralogiques que celles des zones I et II durant cette rétro-morphose.

A l'ouest du trou du tonnerre, sur la côte sud, il a pu exister, avant la rétro-morphose, des amphibolites à grenats, rapportées ci-dessus au faciès schiste à Gl-Ep-Gr. Ayant été soumises ensuite aux conditions du « faciès intermédiaire », elles auraient subi de plus profondes transformations que les roches identiques existant plus à l'est. Le grenat aurait totalement disparu (présence d'une relique dans une roche basique très altérée du trou du tonnerre). Quant à la glaucophane, il n'en subsisterait que de faibles traces.

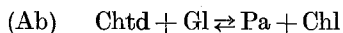
III. Conditions physiques de formation et d'évolution des roches

A l'aide des différentes études effectuées sur la stabilité des minéraux et de leurs assemblages que l'on vient de décrire, nous allons maintenant analyser plus précisément quelles ont été les conditions physiques lors du métamorphisme.

L'étude précédente des paragenèses primaires des roches basiques a montré que les roches à Gl-Cpx-Gr-Ep (zone I) devaient correspondre au métamorphisme le plus intense. Elles se situent, dans un diagramme PT , dans le domaine éclogitique limité vers les basses pressions par la courbe de transition éclogite-amphibolite (B. Velde, 1970). La teneur moyenne en molécule de jadéite du pyroxène (30%, jamais associé à de l'albite primaire) et les coefficients de répartition K_D du fer et du magnésium entre Cpx et grenat (0,035 à 0,06) les situent au delà de la droite:



D'autre part, la courbe univariante tracée par Kiénast et Triboulet (1972) pour un système idéal élogné peut-être de notre système naturel:



limite aussi la paragenèse antéretromorphique des glaucophanites de la zone I vers les basses pressions. Il s'ensuit que l'on peut attribuer au métamorphisme primaire de la zone I des conditions voisines de 8,5 kbars et 530°C (Fig. 9).

Pour fixer de façon précise le métamorphisme primaire des zones II et III, on manque encore de données sur la stabilité des assemblages décrits dans le chapitre précédent. On sait néanmoins que les paragenèses des amphibolites du SE de l'île tombent dans un domaine PT situé au-dessous des courbes (Ab) et éclogite \rightleftharpoons amphibolite. De plus, elles correspondent à un métamorphisme de type II. Comme le gradient qui a joué de la zone I à la zone III a été graduel et qu'il n'a pas pu être très intense étant données les dimensions de l'île, on peut penser que les conditions du métamorphisme primaire ont été voisines, pour la zone II de 8 kbars et 500°C, pour la zone III de 7,5 kbars et 470°C. Les données relatives aux réactions de rétro-morphose sont aussi inexistantes. Les seules données applicables sont les courbes (Gl) et (Chtd) du système précédent qui délimite le champ des paragenèses rétro-morphiques à Ab-Chl et/ou Pa vers les hautes pressions et températures, ainsi que la droite $\text{Jd } 30 \rightleftharpoons \text{plagio} + \text{Q}$ qui traduit dans le domaine des hautes températures la stabilité du plagioclase au détriment du pyroxène, et représente les conditions maximum. Il s'ensuit que les faciès primaires ont eu tendance à s'uniformiser dans des conditions de température voisines des leurs, mais à des pressions plus faibles: environ 6,5 kbars et 470°C (point R, Fig. 9)

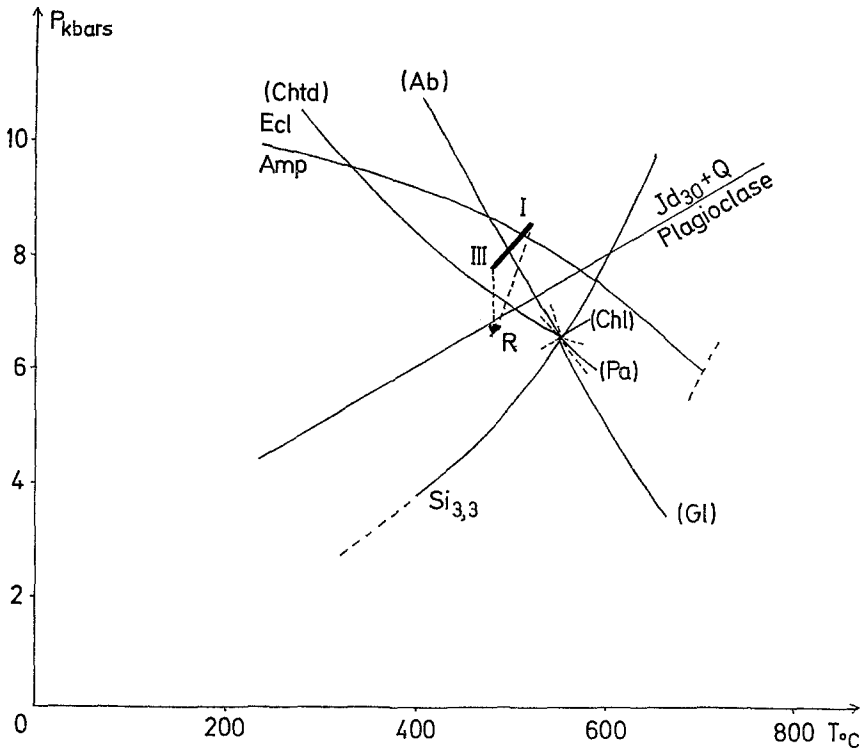


Fig. 9. Conditions de formation et d'évolution des roches de Groix (variables P et T), basées sur les données suivantes: limite éclogite-amphibolite: B. Velde (1970); $Jd_{30} + Q \rightleftharpoons$ plagioclase: Essene et Fyfe (1967); $Si_{3,3}$: B. Velde (1967); (Ab) , $(Chtd)$, (Gl) : Kiénast et Triboulet (1972)

IV. Rôle de l'eau

Nous n'avons considéré jusqu'ici que l'action des trois variables P , T et P_{O_2} au cours des épisodes métamorphiques, l'eau étant partout considérée comme constituant excédentaire. Nous allons voir maintenant brièvement dans quelle mesure des variations de la pression d'eau n'ont pas elles aussi joué un rôle dans l'apparition de tel ou tel assemblage, et ce au cours du métamorphisme primaire ou au cours de la rétro-morphose.

Au niveau de l'affleurement, il n'est pas rare de trouver des variations importantes de faciès sur des coupes de falaises de moins de 10 mètres. Par exemple à port Lay on observe une variation continue non répétitive dans la lithologie, du type: glaucophanite à Gr-Ep, amphibolite à Amp blv-Ep-Gr, schiste vert à Amp blv. Dans ce genre de succession, plusieurs hypothèses viennent à l'esprit:

1) ou bien les différences de teneur en eau sont un héritage de «bandes» de roches basiques différemment hydratées. Le métamorphisme, isochimique, aurait mobilisé sur place l'ensemble des éléments, et même après la rétro-morphose les différents assemblages minéraux seraient le reflet des différences dans les roches originelles.

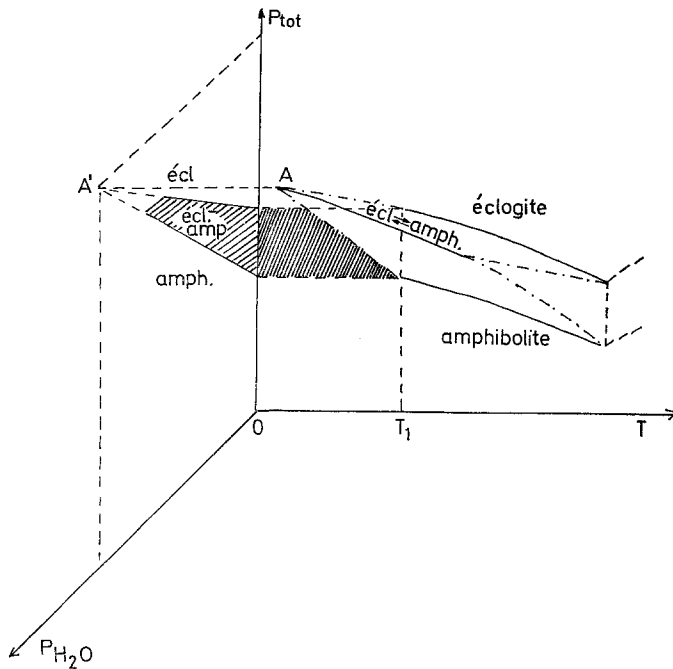


Fig. 10. Allure des domaines de stabilité des élogites et/ou des amphibolites (variables P_{H_2O} , P_{tot} et T), pour la composition chimique Cpx-Gr. AB courbe univariante élogite-amphibolite (B. Velde, 1970) pour $P_{H_2O} = P_{tot}$

2) ou bien la roche (les roches) originelles présentaient une hydratation quelconque masquée ultérieurement par des migrations d'eau durant le métamorphisme primaire. Dans le cas où la rétro-morphose de la suite de ces assemblages primaires s'est effectuée sans départ ni apport d'eau, il est possible sur un diagramme de type Korjinskii (1957) $\mu_{H_2O} - \mu_A$ (où A est un élément mobile comme l'eau, tous les autres éléments étant constants) de systématiser les variations de ces deux éléments à P totale et T constantes, puis de les relier aux analyses chimiques des roches actuelles et aux paragenèses primaires reliques.

3) ou bien l'eau a aussi migré pendant la rétro-morphose et on ne peut pas relier μ_{H_2O} et μ_A avec les analyses ni avec les observations.

Au niveau de l'île, des différences de pression d'eau permettent d'expliquer pour de mêmes compositions chimiques globales la présence d'amphibolites (schistes à Gl-Gr) dans la zone à Cpx, de roches à Cpx dans la zone II des amphibolites à grenats (plage du Rolaz-côte des Sœurs), et de schistes à Gl dans la zone III des schistes verts.

En effet, si P_{H_2O} devient une variable, les courbes univariantes du genre élogite \rightleftharpoons amphibolite deviennent des portions de plan dans l'espace PT (Fig. 10). Quand P_{H_2O} augmente, ce domaine diminue et tend vers la droite d'univariance élogite-amphibolite. La projection de la variation de P_{H_2O} avec P_{tot} à température constante T_1 sur le plan $P_{H_2O} - P_{tot}$ a l'allure d'un secteur centré sur le point A', pour lequel $P_{H_2O} = P_{tot}$. Ce secteur est limité par deux droites de pente positive, une

augmentation de la pression d'eau favorisant la cristallisation d'amphibolites, pour mêmes pression totale, température et composition chimique (celle de l'assemblage Cpx-Gr) (Fig. 10). Une variation de T déplacerait ce secteur suivant $\overrightarrow{A'O}$.

Si l'on prend les variables 2 à 2, les surfaces d'univariance représentent des domaines où on peut trouver aussi bien des éclogites que des amphibolites. Un raisonnement identique expliquerait la coexistence de schistes à glaucophane, de faciès «anormal», au sein de schistes verts. A l'échelle de l'île, un gradient de P_{H_2O} déplacerait donc dans le domaine $P_{tot} - T$ les courbes univariantes de stabilité des faciès les uns par rapport aux autres et conduirait ainsi à des assemblages localement anormaux, en particulier aux limites géographiques de ces faciès, I—II et II—III.

Conclusion

L'étude minéralogique et pétrographique de l'île de Groix a montré que les roches basiques et les schistes pélitiques associés ont été soumis à deux épisodes métamorphiques. Le premier a développé une zonation ouest-est de type II—III—II—I—II. Dans la zone I, les assemblages basiques principaux sont à omphacite-glaucophane-grenat-épidote, ceux des roches pélitiques à biotite brune ou chloritoïde-grenat-phengite (faciès éclogitique). La teneur en molécule de jadéite des pyroxènes ($\sim 30\%$) et la coexistence possible de glaucophane et chloritoïde dans certaines amphibolites situe les conditions de formation de ces paragenèses primaires à 8,5 kbars et 530°C. Dans les zones II, les assemblages principaux des roches basiques sont à amphibole bleu-vert-glaucophane-épidote-grenat; ceux des roches pélitiques sont à phengite-stilpnomélane-grenat/chlorite \pm biotite brun-vert (faciès schistes à glaucophane-épidote-grenat). Ils correspondent à des conditions PT de 8 kbars et 500°C. Dans la zone III l'absence de glaucophane-épidote-grenat au profit de l'assemblage amphibole bleu-vert-glaucophane-épidote-chlorite dans les roches basiques, et la coexistence possible de chloritoïde-stilpnomélane-chlorite \pm biotite verte dans les gneiss et micaschistes implique des conditions de 7,5 kbars et 470°C (faciès schiste vert à amphibole bleu-vert).

Le deuxième épisode, rétro-morphique, a transformé partiellement ces roches et a eu tendance à répandre (au détriment des assemblages primaires) albite, chlorite épidote, amphibole bleu-vert dans les roches basiques, et phengite, chlorite, stilpnomélane dans les roches pélitiques ($\sim 6,5$ kbars, 470°C).

Des variations locales de la pression d'oxygène et de la pression d'eau permettent d'expliquer: au niveau de l'affleurement la coexistence de roches paragenétiquement incompatibles (par exemple schistes à glaucophane-épidote et schistes verts à amphibole bleu-vert); au niveau de l'île la présence de schistes à glaucophane-grenat sans clinopyroxène dans la zone I, de schistes à Cpx-grenat dans la zone II, et de schistes à glaucophane-épidote dans la zone III.

On a fondé la pétrogénèse sur quelques-unes seulement des réactions observées dans ces roches. Elle pourra être quantifiée de meilleure façon quand des données expérimentales supplémentaires concernant les autres réactions seront mises à la disposition des géologues. Le cadre géographique lui-même limité à un secteur très restreint en étendue et considéré, faute de témoins suffisamment éloquents

sur le continent, comme unique quant à son métamorphisme, n'admet pas d'hypothèse relative à la genèse d'une chaîne quelconque, ni même d'un massif. Une investigation pétrographique effectuée elle aussi mètre par mètre sur les « roches du faciès schistes verts » de la bande du Pouldu à l'ouest de Lorient et sur les autres affleurements basiques viendront peut-être ultérieurement éclairer les relations entre Groix et le continent.

Remerciements. Je remercie B. Velde qui est à l'origine de ce travail et en permit l'achèvement grâce à ses conseils fructueux, en particulier lors de la correction du manuscrit. Je remercie aussi J. R. Kiénast dont l'aide sur le terrain et au laboratoire m'a été très précieuse.

Bibliographie

- Banno, S.: Petrologic studies on Sanbagawa crystalline schists in the Bessi-Ino district, central Sikoku, Japan. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sect. II*, **15**, 203—319 (1964)
- Barrois, Ch.: Sur les amphibolites à glaucophane de l'île de Groix. *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.* **6**, 289—293 (1883)
- Barrois, Ch.: Sur les schistes métamorphiques de l'île de Groix. *Ann. Soc. Géol. Nord* **11**, 18—71 (1884)
- Borg, I. Y.: Optical properties and cell parameters in the glaucophane-riebeckite series. *Contr. Mineral. and Petrol.* **15**, (1) 67—92 (1967)
- Cogné, J.: Schistes cristallins et granites en Bretagne méridionale. Thèse, Strasbourg (1957)
- Cogné, J., Ruhland, M., Jeannette, M.: L'île de Groix. Etude structurale d'une série métamorphique à glaucophane en Bretagne méridionale. *Bull. Serv. Carte Alsace Lorraine* **93**, 370—385 (1966)
- Coleman, R. G., Lee, D. E., Beatty, L. B.: Eclogites and eclogites: their differences and similarities. *Geol. Soc. Am. Bull.* **76**, 483—508 (1965)
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, M. A.: *Rock-forming minerals* vol. II. London: Longmans 1963
- Dobretsov, N. L.: Jadeite rocks as indicators of high-pressure within earth crust. *Dokl. Sov. Geol. IGK, XXII sess., probl.* **16**, 137—150 (1964)
- Dobretsov, N. L.: Paragenetic types and compositions of metamorphic pyroxenes. *J. Petrol.* **8**, 358—377 (1968)
- Dobretsov, N. L.: Types paragenétiques et relations entre la composition des pyroxènes métamorphiques et la composition et les conditions de formation des roches qui les contiennent (en russe). *Sov. Geol.* **12**, 39—57 (1964)
- Dobretsov, N. L., Ponomareva, L. G.: About pyroxenes of eclogitic facies, jadeitic rocks and glaucophane schists (russian). *Tr. Institut. Geol. Geophys., Siberian section, Acad. Sci URSS* **2**, 56—95 (1964)
- Ernst, W. G.: Significance of phengitic micas from low-grade schists. *Am. Mineralogist* **48**, 1357—1373 (1963a)
- Ernst, W. G.: Petrogenesis of glaucophane schists. *J. Petrol.* **4**, 1—30 (1963b)
- Ernst, W. G.: Petrochemical study of coexisting minerals from low-grade schists, Eastern Sikoku, Japan. *Geoch. Cosmochim. Acta* **28**, 1631—1668 (1964)
- Essene, E. J., Fyfe, W. S.: Omphacite in Californian metamorphic rocks. *Contr. Mineral. and Petrol.* **15**, 1—23 (1967)
- Félix, C.: Etude pétrographique des roches basiques de l'île de Groix (Bretagne méridionale). *Ann. Soc. Géol. Belg.* **95**, 359—370 (1970)
- Félix, C.: Contribution à l'étude pétrogénétique des faciès métamorphiques: la diversité des valeurs des gradients géothermiques. *Ann. Soc. Géol. Belg.* **95**, 197—215 (1972)
- Félix, C.: Pseudomorphes à épidote s.l., paragonite, muscovite s.l., chlorite, albite... de porphyroblastes de lawsonite (?) dans les glaucophanoschistes de l'île de Groix (Bretagne, France). *Ann. Soc. Géol. Belg.* **95**, 323—334 (1972)
- Halferdahl, L. B.: Chloritoid: its composition, X-ray and optical properties, stability and occurrence. *J. Petrol.* **2**, 49—135 (1961)

- Haüy, R. J.: *Traité de minéralogie*. Paris: Bachelier 1822
- Iwasaki, M.: Metamorphic rocks of the Kotu-Bizan area, eastern Sikoku. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sect. II* **15**, 1—90 (1963)
- Jeannette, M.: *Etude tectonique de l'île Groix*. Thèse de troisième cycle, Strasbourg (1965)
- Kiénast, J. R., Triboulet, C.: Le chloritoïde dans les paragenèses à glaucophane, albite ou paragonite. *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.* **95**, 565—573 (1972)
- Korjinskii, D. S.: Bases physico-chimiques de l'analyse des paragenèses de minéraux. (traduction française B.R.G.M.) Moskva Izd. Akad. Nauk SSSR (1957)
- Kuno, H.: Basalts. The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition vol. 2, p. 623—688. New York: Interscience (1968)
- Lamouche, C.: *Etude tectonique de l'île de Groix*. *Bull. Soc. Sci. Nat. Ouest* **9**, 70—87 (1929)
- Makanjuola, A. A., Howie, R. A.: The mineralogy of the glaucophane schists and associated rocks from Ile de Groix, Brittany, France. *Contr. Mineral. and Petrol.* **35**, 83—118 (1972)
- Miyashiro, A.: The chemistry, optics and genesis of the alkali amphiboles. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sect. II* **9**, 57—83 (1957)
- Morgan, B. A.: Petrology and mineralogy of eclogites and garnet-amphibolites from Puerto Cabello, Venezuela. *J. Petrol.* **11**, 101—145 (1970)
- Rampon, A.: Contribution à l'étude pédologique et hydrogéologique de la Bretagne centrale. Le Blavet et ses affluents. Thèse, Paris (1971)
- Ruhland, M., Jeannette, M.: La baie de Ker-Béthanie: secteur clef de la structure géologique de l'île de Groix. *Bull. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine* **19**, 1, 97—104 (1966)
- Saxena, S. K.: Distribution of elements between coexisting minerals and the nature of solid solution in garnet. *Am. Mineralogist* **53**, 994—1014 (1968)
- Saxena, S. K.: Distribution of Fe and Mg between coexisting garnet and clinopyroxene in rocks of varying metamorphic grade. *Am. Mineralogist* **53**, 2018—2024 (1968)
- Seki, Y., Aiba, M., Kato, C.: Edenite in Sanbagawa crystalline schists of the Sibukawa district, central Japan. *Jap. J. Geol. Geogr.* **30**, 233—243 (1959)
- Triboulet, C.: Mise en évidence de stilpnomélane, biotite verte et phengite chromifère à l'île de Groix, Morbihan (France). *Compt. Rend.* **272**, 1477—1480 (1971)
- Turner, F. J., Verhogen, J.: *Igneous and metamorphic petrology*. New York: Mc Graw-Hill 1960
- Velde, B.: Si⁴⁺ content of natural phengites. *Contr. Mineral. and Petrol.* **14**, 250—258 (1967)
- Velde, B.: Note sur un micaschiste à chloritoïde et glaucophane de l'île de Groix, Morbihan. *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.* **90**, 265—266 (1967)
- Velde, B.: Les éclogites de la région nantaise: de Campbon au Cellier (Loire atlantique). *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.* **93**, 370—385 (1970)
- Velde, B., Sabatier, H.: Eclogites from Northern Vendée, France. *Bull. Soc. Franc. Mineral. Crist.* **95**, 396—400 (1972)
- Von Lasaulx, A.: Die mineralen eines neuen Glaukophangesteins von der Insel Groix and der Südwestküste des Bretagne. *Z. Krist.* **9**, 422—424 (1884)
- Zakrutkin, V. V.: The evolution of amphiboles during metamorphism (russian). *Zap. Vses. Mineral. Obsch.* **96**, 1, 13—23 (1968)

Dr. C. Triboulet
 Université de Paris VI
 4, place Jussieu
 F-75230 Paris Cedex 05
 France