

Zeitschrift:	Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band:	65 (1985)
Heft:	2-3
Artikel:	Evolution des amphiboles et de leurs associations au cours d'un métamorphisme progressif polyphasé dans les metabasites de la Vilaine (Bretagne méridionale)
Autor:	Triboulet, Claude / Audren, Claude
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-50225

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 25.01.2026

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

Evolution des amphiboles et de leurs associations au cours d'un métamorphisme progressif polyphasé dans les metabasites de la Vilaine (Bretagne méridionale)

par *Claude Triboulet*¹ et *Claude Audren*²

Abstract

The volcano-detrital group of the Vilaine river area is mainly composed of micaschists that have recorded a two-step progressive metamorphic evolution. The first step characterizes a prograde M1 metamorphism from high-pressure / medium-temperature to high-pressure / high-temperature, and the second a retrograde M2 metamorphism from high-pressure / high-temperature to low-pressure / medium-temperature. A late retrogression occurred in the greenschist facies.

The same metamorphic evolution can be recognized in basic rocks of particular composition (calco-alcaline and magnesian cumulates), interbedded in the same micaschists. A direct correlation of successive mineral paragenesis has been established with a progressive variation in amphibole composition during M1-M2, and with successive S1 to S2 deformations.

During M1, early lath-like-zoned amphiboles crystallized continuously according to the L1 stretching lineation in the S1 shear plane. The following successive mineral paragenesis has been observed: actinolite to light-green actinolitic hornblende + epidote, blue-green Mg-hornblende + plagioclase + sphene, green Mg-hornblende + plagioclase + ilmenite. During M2, late large amphiboles crystallized in the S2 plane compatible with a W to E tangential shearing. The following successive mineral paragenesis has been observed: green Mg-hornblende + plagioclase + rutile, blue-green Mg-hornblende + plagioclase + sphene, light green actinolitic hornblende + sphene, clear green actinolite.

As the amount of Al^{VI} and Na A in amphiboles is, in some cases, poorly controlled by P-T factors, it is proposed that a better control may be obtained by substituting edenite-tremolite-hornblende components in amphiboles.

In spite of immiscibility gaps leading to jumps in amphibole compositions, it is possible to propose a metamorphic evolution during which M1 is prograde in terms of pressure and then prograde in terms of temperature, and M2 is retrograde in terms of both pressure and temperature.

¹ Laboratoire de pétrologie minéralogique, équipe de recherche associée au CNRS n° 1009 «Pétrologie métamorphique», Université Pierre et Marie Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex, France.

² Centre Armoricain d'Etude Structurale des Socles, Laboratoire propre du CNRS n° 4661, Institut de Géologie, Université de Rennes, campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France.

This evolution recorded by amphiboles is consistent with the pressure-temperature-time-deformation path recorded by the surrounding micaschists.

Keywords: amphibole zonations, progressive metamorphism, orogenic processes, Armorican massif, south Brittany.

RÉSUMÉ

La série volcano-sédimentaire polymétamorphique et polystructurale de l'estuaire de la Vilaine est constituée de micaschistes affectés d'un métamorphisme progressif, d'abord prograde (M1) de haute pression / moyenne température à haute pression / haute température, puis rétrograde (M2) de haute pression / haute température à basse pression / moyenne température, puis rétromorphosé dans le faciès schistes verts.

Ces micaschistes contiennent des niveaux basiques bien développés qui sont des marqueurs intéressants des événements tectonométamorphiques. A partir d'une amphibolite du Guernehué (ancien cumulat calco-alcalin magnésien) on peut suivre l'évolution des paragenèses minérales successives en relation avec les variations de composition des amphiboles au cours des épisodes M1-M2. Dans M1, des amphiboles zonées aciculaires soulignent une schistosité initiale S₁. L'évolution des assemblages est la suivante: actinote à hornblende actinotique vert limpide + epidote, Mg hornblende bleu-vert + plagioclase + sphène, Mg hornblende verte + plagioclase + ilménite.

Dans M2, des amphiboles plus trapues soulignent une schistosité S₂, avec une évolution: Mg hornblende verte + plagioclase + rutile, Mg hornblende bleu-vert + plagioclase + sphène, hornblende actinotique vert clair + sphène, actinote vert limpide.

Il est classique de considérer que les teneurs en Al^{VI} et en Na A des amphiboles sont régies respectivement par la pression et la température. Comme ces critères semblent, dans certains cas, trop approximatifs, on propose un contrôle de P et/ou de T par le jeu de substitutions édénite-trémolite-hornblende dans le réseau des amphiboles. Malgré les sauts de composition liés aux lacunes de miscibilité, une évolution progressive prograde de P puis rétrograde de P/prograde de T dans M1, rétrograde de P et T dans M2, est ainsi mise en évidence.

Cette évolution progressive et continue enregistrée par les amphiboles définit un chemin Pression-Température-temps (chemin PTt) qui s'intègre bien dans le chemin PTt enregistré par les minéraux des micaschistes de l'encaissant, et qui complète celui-ci. Ce chemin peut-être corrélé aux déformations successives S₁ → S₂ définissant ainsi un chemin Pression-Température-temps-déformation (chemin PTtd) pour l'ensemble de la série métamorphique de la Vilaine.

INTRODUCTION

Le complexe métamorphique de l'Estuaire de la Vilaine est constitué d'un ensemble de niveaux basiques peu épais, centimétriques à métriques, inclus dans une puissante série de micaschistes monotones (AUDREN, 1971, 1986) affleurant en Bretagne méridionale depuis le golfe du Morbihan jusqu'en Basse Loire (figure 1a).

Ces niveaux basiques correspondent à un ancien complexe volcanique composé de laves calco-alcalines à tholéïtiques, de gabbros et de cumulats magnésiens interstratifiés dans des sédiments d'origine pélitique (TRIBOULET et AUDREN, 1985a).

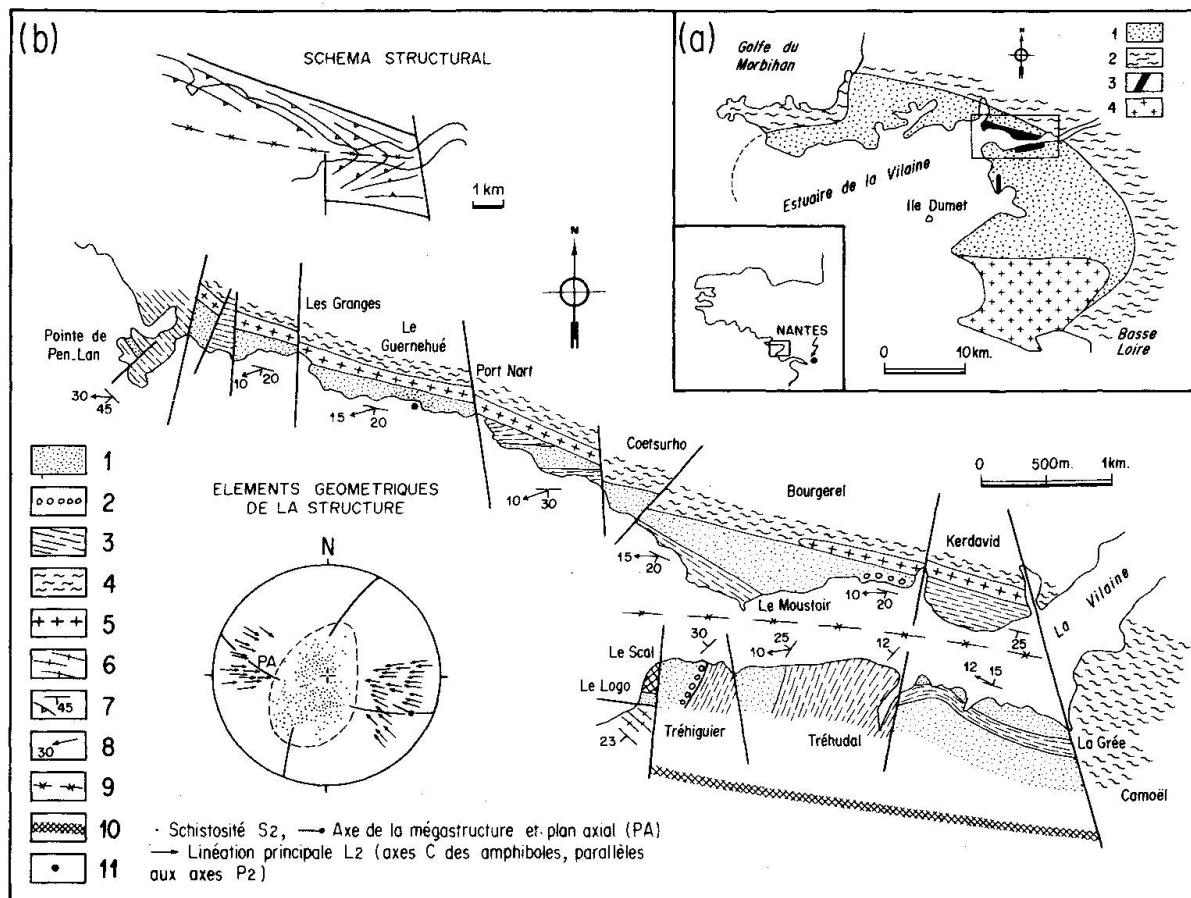


Fig. 1 a: Schéma de situation

1: micaschistes, 2: gneiss et migmatites, 3: roches basiques, 4: leucogranites d'âge carbonifère.

b: géologie et structure de la zone étudiée

1: Roches basiques, 2: skarns, 3: micaschistes, 4: gneiss et migmatites, 5: leucogranites, 6: orthogneiss (Penestin), 7: schistosité régionale $S_2(S_1 + S_2)$, 8: linéation régionale L2 (L1 + L2) minérale et d'allongement, 9: trace axiale de la mégastructure synforme de la Vilaine, 10: zones mylonitiques, 11: zone d'échantillonnage (Le Guernehué).

L'étude des associations minérales, des variations de composition des minéraux à l'équilibre et de la thermodynamique des réactions successives dans les micaschistes en relation avec les déformations ont montré (TRIBOULET et AUDREN, 1985b; AUDREN, 1986) que la série volcano-détritique originelle a subi une histoire structurale et métamorphique complexe. Un premier événement M1 progressif de haute pression / moyenne température à haute pression / haute température est contemporain d'une schistosité résiduelle S_1 .

Un second événement M2 progressif de haute pression / haute température à basse pression / moyenne température est contemporain de la schistosité régionale S_2 associée aux plis majeurs P2 et à la linéation L2 (linéation d'allongement).

Une rétromorphose de type moyenne pression / moyenne température clôt l'évolution métamorphique.

L'évolution continue $M_1 \rightarrow M_2$ et $S_1 \rightarrow S_2$ caractérise un chemin Pression-Température-temps-déformation (chemin PTtd) (figure 4) enregistré par les minéraux des micaschistes au cours de la période orogénique préhercynienne (Siliuro-Dévonien) (AUDREN, 1986). A l'Hercynien, au sens strict (Carbonifère), la schistosité S_2 et la linéation L_2 sont déformées par un vaste pli synforme, orienté EW, à faible plongement vers l'Ouest, qui met à l'affleurement les niveaux basiques et donne à la région sa structure dominante (figure 1b).

L'étude détaillée des métabasites (TRIBOULET et AUDREN, travaux en cours) nécessite une accumulation importante de données analytiques étant donné que les roches, selon leur nature originelle et leur localisation, enregistrent seulement un fragment plus ou moins important de l'histoire métamorphique et structurale (chemins PTtd partiels). Cependant, parmi ces roches, un cumulat magnésien provenant du «Guernehué» (figure 1b) s'est révélé être un marqueur pétrologique et structural particulièrement précieux.

Il est caractérisé par un système simple de trois constituants majeurs: CaO, Al_2O_3 et $MgO \pm TiO_2 \pm MnO (\pm FeO \pm Na_2O)$ et un nombre limité de phases minérales: amphiboles, plagioclases, sphènes, opaques. Il montre clairement plusieurs types d'amphiboles zonées (incolore, bleu-vert, verte) dont on peut analyser les relations avec les microstructures.

Le but de ce travail est donc d'étudier les variations de composition des amphiboles et de leurs associations dans un niveau basique particulier au cours d'une évolution métamorphique et structurale progressive et polyphasée, puis de les comparer à l'évolution enregistrée par les minéraux des micaschistes de l'encaissant.

ASSEMBLAGES MINÉRAUX ET MICROSTRUCTURES

La roche se débite grossièrement suivant un plan principal de schistosité qui porte une forte linéation minérale (axe C des amphiboles) orientée EW à NW-SE (figure 1b), parallèle aux axes de plis P2 et à la linéation d'allongement régionale L2 reconnue dans les micaschistes (AUDREN, 1986). La figure 2a schématise la structure d'un échantillon orienté dans les trois directions de l'espace X, Y, Z (l'axe X est orienté E-W).

Dans le plan de schistosité (plan XY), il n'apparaît qu'une seule linéation marquée par les sections allongées des amphiboles et par l'alignement des cristaux de sphène et de minéraux opaques.

Dans le plan perpendiculaire à la schistosité et perpendiculaire à la linéation (plan YZ) la schistosité est difficilement identifiable et l'on observe de façon systématique des sections basales d'amphiboles. Dans le plan perpendiculaire à la schistosité et parallèle à la linéation (plan XZ) on distingue très nettement deux types d'amphiboles:

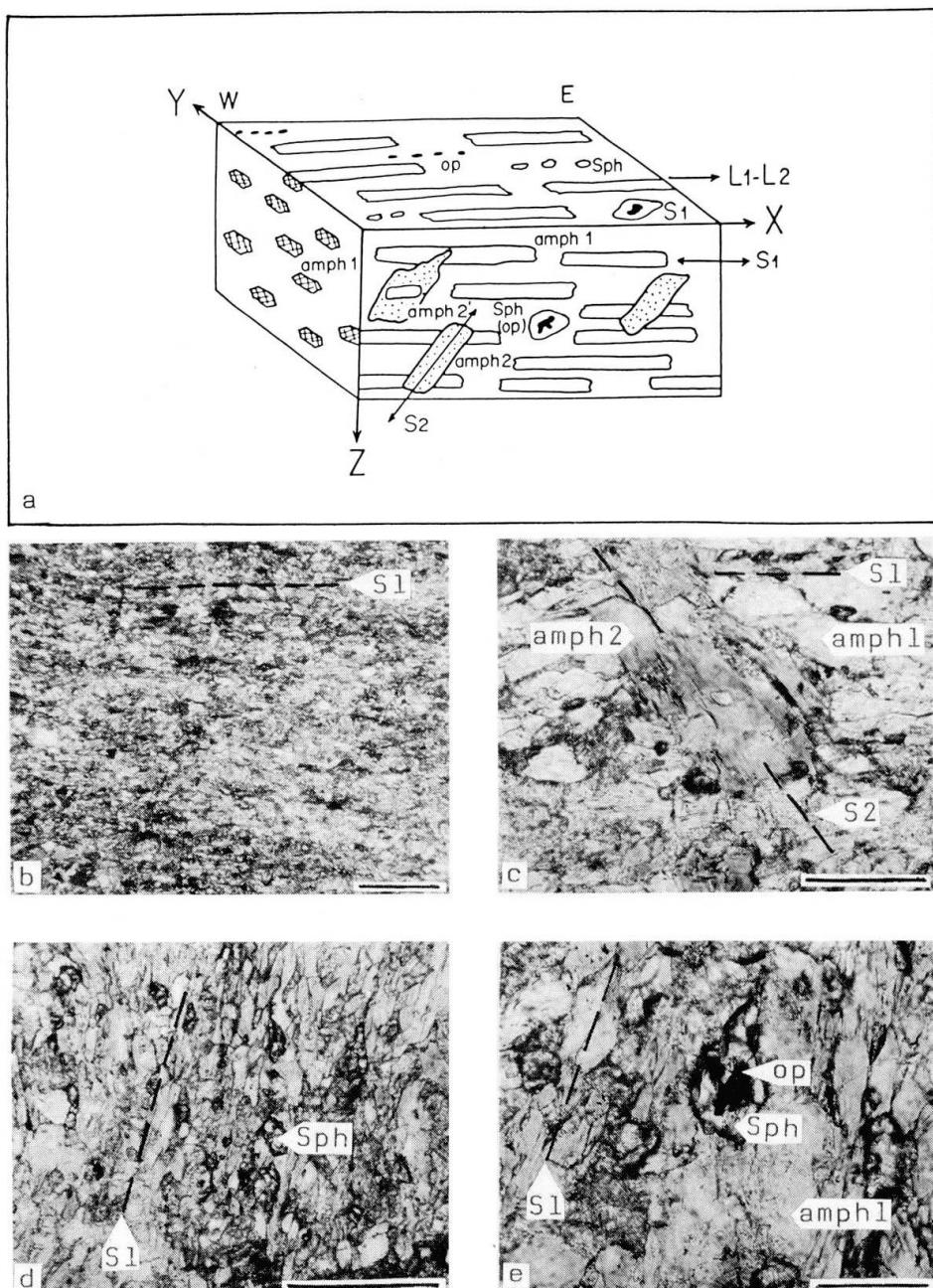


Fig. 2 a: schéma de la microstructure d'un échantillon orienté selon les axes XYZ (l'axe X est orienté EW)

L1-L2: linéation minérale cumulative parallèle à X.

S₁: schistosité principale dominante.

S₂: schistosité secondaire.

amph 1: amphibole syn S₁.

amph 2: amphibole syn S₂.

amph 2': amphibole syn D₂ nucléée par une amphibole syn S₁.

Sph: sphène; op: opaques.

Sph(op): opaques inclus dans les cristaux de sphène.

b: microphotographie illustrant la structure planaire dominante S₁ dans la roche (plan XZ) (trait d'échelle = 1 mm).

c: microphotographie montrant une amphibole (amph 2) de S₂ recoupant la structure planaire S₁, composée d'amphiboles zonées (amph 1) (plan XZ) (trait d'échelle = 250 µ).

d: microphotographie montrant les cristaux de sphène (Sph) alignés en chapelets parallèlement à S₁ (plans XZ ou XY) trait d'échelle = 200 µ.

e: microphotographie montrant des minéraux opaques (op) inclus dans les cristaux de sphène (Sph) post S₁ (plans XZ ou XY) (trait d'échelle = 100 µ).

- des amphiboles aciculaires zonées soulignant une schistosité S_1 très marquée (figure 2b). Ces amphiboles montrent un cœur incolore à vert limpide, une première zone périphérique (zone 1) bleu-vert et une seconde zone périphérique à la première (zone 2) verte à vert-bleu. Dans certains cas les amphiboles vertes à vert-bleu (zone 2) peuvent avoir une orientation cristallographique différente par rapport à S_1 . Ces amphiboles aciculaires zonées associées au plagioclase, au sphène et aux minéraux opaques (figure 2d) définissent la paragenèse du premier épisode de métamorphisme M1.
- des amphiboles plus trapues soulignant une schistosité S_2 peu accusée (figure 2c). Ce sont des amphiboles vertes à vert bleu peu zonées, des amphiboles bleuâtres non zonées qui, associées au rutile et au sphène (figure 2e) définissent la paragenèse du second épisode de métamorphisme M2. Certaines amphiboles cristallisant selon S_2 peuvent être nucléées par des amphiboles de S_1 .

Seuls les critères microstructuraux permettent de différencier les amphiboles vertes et vert-bleu de M1 de celles de M2. La rétromorphose finale se traduit par des associations à chlorite verte et micas blancs (séricitisation des plagioclases).

La structure plano-linéaire dominante S_1 -L1 de la roche a été acquise au cours du métamorphisme M1 sans que la structure S_2 acquise au cours du métamorphisme M2 - et visible seulement dans le plan XZ - ne perturbe considérablement celle-ci; en effet, dans le plan XY, les amphiboles de S_2 ne montrent pas une orientation L2 différente de L1: les deux linéations sont colinéaires et confondues. Ceci tendrait à montrer que la cristallisation des amphiboles au cours de M1 → M2 s'est réalisée selon une direction constante et unique d'allongement régional correspondant au même régime de déformation (linéation cumulative L1 + L2). Cette orientation linéaire unique est également illustrée par les cristaux de sphène et les minéraux opaques (plan XZ et YZ).

Le régime de déformation mis en évidence dans les micaschistes de cette zone est un cisaillement tangentiel de l'Ouest vers l'Est selon une schistosité subhorizontale (AUDREN, 1986). Dans les roches basiques la cristallisation des amphiboles selon S_2 (plan XZ de la figure 2a) correspondrait alors à la direction d'allongement incrémentale compatible avec la fin du cisaillement tangentiel précédent.

Dans les roches acides de l'encaissant (micaschistes) ce sont les structures S_2 -L2 acquises au cours du métamorphisme M2 qui sont dominantes et tendent à effacer les structures S_1 -L1 qui ne subsistent plus qu'à l'état de reliques dans des microlithons (TRIBOULET et AUDREN, 1985b; AUDREN, 1986). L'enregistrement de la même histoire structurale est donc différent selon la nature des minéraux constituant les roches basiques et les roches acides.

COMPOSITION CHIMIQUES DES MINÉRAUX

Amphiboles, plagioclases, sphènes et minéraux opaques ont été analysés à la microsonde électronique CAMEBAX (Laboratoire de Pétrologie, Paris VI, analyste: C. TRIBOULET).

Les amphiboles

Sur une soixantaine d'amphiboles analysées, 30 types ont été retenus (tableau 1). Ces amphiboles sont dans l'ensemble pauvres en MnO, TiO₂ et K₂O.

Les amphiboles vertes à vert-bleu tardif S₁ et syn S₂ ont des teneurs en Na₂O plus importantes que les amphiboles vertes limpides et bleu-vert de S₁.

CaO varie très peu; cela est dû au fait qu'à tout moment le milieu est tamponné en Ca par le sphène et/ou un plagioclase riche en anorthite (voir plus loin).

Pour le calcul de Fe³⁺, les formules cationiques ont toutes été calculées sur les bases suivantes:

1. T1 + T2 = 8,000
2. T1 + T2 + M1 + M2 + M3 = 13,000
3. T1 + T2 + M1 + M2 + M3 + M4 = 15,000
4. Fe²⁺ = Fe²⁺ total.

Dans chaque cas, on a vérifié l'équilibre des charges:

(Na,K)A + Al^{VI}(M1) + Fe³⁺ + 2 Ti = Al^{IV}(T) + Na M4. Lorsqu'il était réalisé à la fois dans les cas 2 et 3, on a écarté le mode de calcul 3 qui menait à remplir partiellement le site M4 par Mg. Quelquefois, les types de calcul 2 et 4 menaient aussi à l'équilibre des charges. Dans ces conditions, on a choisi le type de calcul 2 qui faisait intervenir Fe³⁺ et qui permettait des comparaisons plus fiables avec le cas précédent.

D'après la classification de LEAKE (1978), ces amphiboles sont dans M1 des actinotes et des hornblendes actinotiques plus ou moins zonées de Mg hornblendes. Dans M2 ce sont des Mg hornblendes plus ou moins zonées, des hornblendes actinotiques et des actinotes non zonées.

Les plagioclases

Ils sont volumineux, très abondants, mais très séricités. Il n'y a aucune trace d'albite fraîche tardive (tardi à post M2) si répandue dans tout l'estuaire (AUDREN, 1986). Sur une trentaine de plagioclases analysés, une seule analyse a mis en évidence un plagioclase An 91,7. Tous les autres sont de l'anorthite pure, témoins d'un métamorphisme de haute T. Il n'y a pas (plus?) de trace de plagi-

Tableau I Analyses à la microsonde électronique des amphiboles de l'amphibolite du Guernehué.

Amphiboles de la schistosité S_1 : actinotes incolores à vert clair (1, 11, A, 13, M, Q, B); hornblendes actinotiques vert clair (Y, O); Mg hornblendes bleu-vert à vertes (8, W, D, S).

Amphiboles de la schistosité S_2 : Mg hornblendes vertes (7, V, X, 5, 6, T, P, 10, 3, 14, 2); hornblendes actinotiques vert clair (4, N); actinotes vert clair à incolores (9, Z, α).

Amphiboles zonées (du cœur à la périphérie): 1-2; A-B-D; Q-R; Y-W-X-V; 13-14, 5-6.

Analyste: C. TRIBOULET, CAMEBAX, Laboratoire de Pétrologie.

	1	11	A	13	M	Q	B	Y	0	V	X	10	2	3
SiO ₂	54,09	53,76	54,68	54,39	55,23	53,78	54,53	52,47	52,01	46,10	47,20	46,10	46,41	45,82
TiO ₂	0,11	0,15	0,12	0,17	0,07	0,09	0,10	0,16	0,19	0,28	0,38	0,41	0,56	0,42
Al ₂ O ₃	3,30	3,84	2,98	3,11	2,06	2,01	2,91	4,22	4,40	8,86	8,44	10,64	10,12	10,24
FeO	7,99	7,63	7,65	7,93	8,45	7,31	7,29	8,20	9,38	9,59	10,95	9,24	10,21	10,83
Fe ₂ O ₃	1,15	2,54	1,44	1,44	0,93	2,01	2,10	2,61	1,93	4,59	2,59	4,90	3,51	3,10
MnO	0,26	0,19	0,24	0,24	0,30	0,18	0,21	0,23	0,22	0,16	0,32	0,24	0,28	0,26
MgO	17,71	17,47	18,02	17,95	17,99	17,83	18,26	16,92	16,20	13,51	13,80	13,45	13,16	12,83
CaO	12,87	12,74	12,83	12,94	12,99	12,63	13,04	12,89	12,71	12,51	12,81	12,58	12,54	12,68
Na ₂ O	0,57	0,62	0,54	0,46	0,36	0,27	0,49	0,68	0,84	1,27	1,48	1,51	1,38	1,33
K ₂ O	0,01	0,05	0,02	0,02	—	—	—	—	—	0,08	0,11	0,16	0,11	0,15
total	97,95	98,74	98,38	98,26	98,23	95,94	98,73	98,12	97,68	96,49	97,82	98,74	97,93	97,35
Si	7,624	7,523	7,657	7,631	7,762	7,719	7,613	7,430	7,433	6,771	6,865	6,613	6,719	6,697
Al _{IV}	0,376	0,477	0,343	0,369	0,238	0,281	0,367	0,570	0,567	1,229	1,135	1,387	1,281	1,303
Σ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al _{VI}	0,172	0,157	0,149	0,146	0,103	0,059	0,092	0,134	0,174	0,306	0,312	0,413	0,446	0,461
Ti	0,012	0,016	0,013	0,018	0,007	0,010	0,011	0,017	0,020	0,031	0,042	0,044	0,061	0,046
Fe ³⁺	0,135	0,291	0,167	0,167	0,109	0,237	0,240	0,303	0,227	0,546	0,309	0,568	0,415	0,372
Fe ²⁺	0,929	0,871	0,881	0,887	0,976	0,858	0,833	0,947	1,101	1,140	1,306	1,070	1,204	1,293
Mg	3,721	3,644	3,761	3,754	3,769	3,814	3,800	3,571	3,451	2,958	2,992	2,876	2,840	2,795
Σ	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Ca	1,944	1,911	1,925	1,946	1,956	1,943	1,951	1,956	1,947	1,969	1,997	1,934	1,945	1,986
Na _{M4}	0,056	0,089	0,075	0,054	0,044	0,057	0,049	0,044	0,053	0,031	0,003	0,066	0,055	0,014
Σ	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Na _A	0,100	0,079	0,072	0,071	0,055	0,018	0,084	0,143	0,179	0,331	0,414	0,354	0,333	0,363
K	0,002	0,009	0,004	0,004	—	—	0,005	—	—	—	0,015	0,020	0,029	0,028
Σ	0,102	0,088	0,076	0,074	0,055	0,023	0,084	0,143	0,179	0,346	0,434	0,383	0,353	0,391

	R	14	P	W	D	7	5	6	T	S	8	4	9	N	Z	α'
SiO ₂	45,62	45,50	48,27	47,29	49,05	44,53	47,05	47,25	47,83	48,21	SiO ₂	49,57	52,66	53,13	52,71	55,22
TiO ₂	0,47	0,47	0,32	0,37	0,37	0,42	0,31	0,37	0,39	0,28	TiO ₂	0,31	0,19	0,16	0,17	0,07
Al ₂ O ₃	10,23	10,98	8,50	9,85	7,40	11,51	9,35	8,54	7,93	7,58	Al ₂ O ₃	6,67	4,43	3,95	4,17	1,76
FeO	10,14	9,37	9,92	10,74	9,54	12,01	11,22	11,82	10,32	10,66	FeO	9,78	9,25	8,11	9,33	7,43
Fe ₂ O ₃	4,62	4,30	3,80	3,12	2,65	3,33	2,91	2,18	3,38	2,38	Fe ₂ O ₃	3,47	1,41	1,26	1,42	1,85
MnO	0,24	0,19	0,26	0,19	0,26	0,28	0,25	0,25	0,23	0,24	MnO	0,27	0,24	0,20	0,22	0,24
MgO	12,77	13,06	13,87	13,32	14,75	11,72	13,15	13,08	13,97	14,07	MgO	14,71	16,49	17,39	16,57	18,31
CaO	12,61	12,36	12,63	12,83	12,47	12,66	12,49	12,48	12,67	12,77	CaO	12,68	12,77	12,84	12,88	12,89
Na ₂ O	1,21	1,52	1,01	1,20	1,26	1,58	1,59	1,46	1,17	1,06	Na ₂ O	0,96	0,78	0,70	0,71	0,21
K ₂ O	0,11	0,09	0,10	0,11 !	0,08	0,18	0,13	0,09	0,13	0,10	K ₂ O	0,05	0,04	0,03	0,03	—
total	97,55	97,41	98,30	98,71	97,57	97,88	98,16	97,27	97,68	97,11	total	98,12	98,12	97,64	98,07	97,97
Si	6,647	6,609	6,791	7,066	6,528	6,819	6,917	6,934	7,023	Si	7,112	7,473	7,530	7,488	7,762	
Al _{IV}	1,353	1,391	1,209	0,934	1,472	1,181	1,083	1,066	0,977	Al _{IV}	0,888	0,527	0,470	0,512	0,238	
Σ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	Σ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	
Al _{VI}	0,404	0,489	0,366	0,458	0,323	0,518	0,417	0,391	0,290	0,325	Al _{VI}	0,240	0,214	0,190	0,186	0,098
Ti	0,052	0,051	0,035	0,040	0,040	0,046	0,034	0,041	0,043	0,031	Ti	0,033	0,020	0,017	0,018	0,005
Fe ³⁺	0,546	0,507	0,454	0,368	0,313	0,400	0,346	0,264	0,400	0,286	Fe ³⁺	0,406	0,166	0,148	0,167	0,151
Fe ²⁺	1,195	1,102	1,148	1,260	1,124	1,440	1,332	1,423	1,220	1,274	Fe ²⁺	1,142	1,082	0,947	1,093	0,894
Mn	0,030	0,023	0,023	0,032	0,032	0,035	0,031	0,027	0,028	0,030	Mn	0,033	0,029	0,024	0,026	0,029
Mg	2,773	2,828	2,967	2,851	3,167	2,561	2,841	2,854	3,019	3,055	Mg	3,146	3,488	3,674	3,503	3,824
Σ	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	Σ	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
Ca	1,969	1,942	1,974	1,925	1,989	1,940	1,958	1,969	1,994	Ca	1,950	1,942	1,950	1,961	1,939	
Na _{M4}	0,031	0,076	0,058	0,026	0,075	0,011	0,060	0,042	0,031	0,006	Na _{M4}	0,050	0,058	0,050	0,039	0,051
Σ	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	Σ	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	
Na _A	0,311	0,352	0,224	0,309	0,277	0,438	0,387	0,372	0,298	0,293	Na _A	0,217	0,157	0,143	0,156	0,006
K	0,020	0,017	0,018	0,020	0,015	0,034	0,024	0,017	0,024	0,019	K	0,009	0,007	0,005	0,005	—
Σ	0,331	0,369	0,242	0,329	0,292	0,472	0,411	0,389	0,322	0,312	Σ	0,226	0,164	0,148	0,162	0,006

classe de type haute pression (albite), soit qu'il n'ait pas existé, soit qu'il corresponde aux parties les plus altérées des plagioclases séricités.

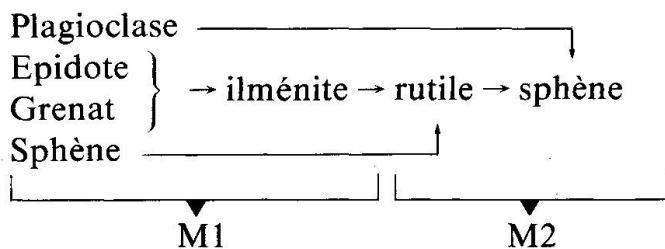
Il est donc impossible dans ces conditions d'utiliser le géothermomètre plagioclase-hornblende de PERCHUK et RIABCHIKOV (1976).

Le sphène et les minéraux opaques

Le sphène se présente en chapelets de petits cristaux arrondis syn S_1 (figure 2d) et en gros cristaux pœcilitiques post S_1 qui contiennent en inclusions plagioclase et/ou opaque (figure 2e). Les compositions de ces sphènes sont très voisines (tableau 2). Ils contiennent très peu de fer ($0,5 < \text{FeO total} < 0,6\%$) et un peu d'alumine (0,8 à 1,06%). Les opaques sont toujours en inclusions dans le sphène post S_1 et sont de natures variées. Ce sont en majorité de gros cristaux d'ilménites qui se présentent en amas allongés suivant S_1 (tableau 2). D'autres ont des compositions intermédiaires qui appartiennent à deux types distincts:

- des minéraux riches en TiO_2 ($> 90\%$), contenant environ 3 % de SiO_2 , FeO et CaO , évoquent une transformation partielle de sphène syn S₁ en ilménite puis en rutile,
 - des minéraux plus pauvres en TiO_2 ($\sim 27\%$), riches en SiO_2 et CaO , peuvent correspondre à d'anciennes epidotes ou d'anciens grenats partiellement transformés en ilménite.

La chronologie peut être résumée comme suit:



On peut penser que le début de M2 se caractérise, en ce qui concerne les relations sphènes-minéraux opaques, par l'apparition du rutile liée à la déstabilisation de l'ilménite. En effet, l'ilménite saine appartient incontestablement à S₁, et le rutile se trouve uniquement à l'intérieur des gros cristaux de sphène et en inclusions dans des amphiboles (ex: R, W) qui caractérisent la fin de M1 et l'évolution syn M2 (voir plus loin).

ÉVOLUTION DES PARAGENÈSES AU COURS DES ÉPISODES M1 ET M2

On peut la suivre aisément sur un diagramme ACF (figure 3), où la projection du plagioclase se trouve au milieu du joint CA quelle que soit sa teneur en

Tableau 2 Analyses à la microsonde électronique des sphènes et minéraux opaques de l'amphibolite du Guerne-hué.

(c)	(a)	(b)	(d)	(e)
TiO ₂ 53,59	SiO ₂ 30,54	30,30	30,38	2,48
FeO 43,69	TiO ₂ 38,31	38,96	27,42	91,26
MnO 2,61	Al ₂ O ₃ 1,06	0,82	7,40	0,10
—	FeO 0,61	0,52	6,28	2,99
99,43	CaO 28,53	28,77	22,40	2,87
	MnO —	—	—	0,23
	—	—	—	—
	99,05	99,37	93,88	99,93

Sphènes: (a) petits syn S₁ et (b) gros pœcilitiques post S₁. Ilménites (c). Minéraux opaques «intermédiaires»: (d) epidote ou grenat → ilménite; (e) : ilménite/sphène → rutile. (a) et (e) sont systématiquement blindés dans des sphènes de type (b).

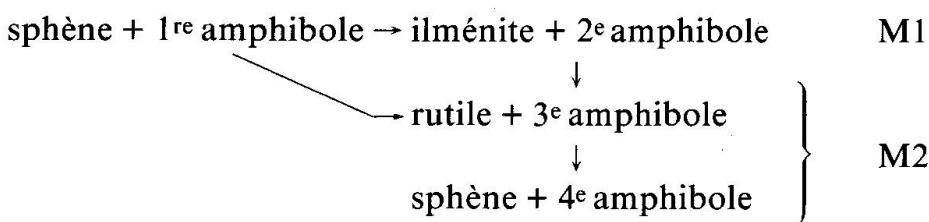
Analyste: C. TRIBOULET, CAMEBAX, Laboratoire de Pétrologie.

anorthite, et où l'épidote est son équivalent dans des assemblages où intervient de l'albite pure.

Le point représentatif de la composition de la métabasite (analyse in TRIBOULET et AUDREN, 1985a) se trouve sur le joint epidote/plagioclase-amphibole tout au long de M1 et M2, les amphiboles montrant des rapports A/(A+C) très constants (figures 3a et 3b). Le rapport modal plagioclase/amphibole augmente durant M1, et diminue durant M2.

Il s'ensuit que, au cours de M1 et M2, l'évolution des assemblages amphibole-plagioclase d'une part, et des sphènes-minéraux opaques d'autre part, se fait de façon indépendante. Ainsi, les amphiboles sont des marqueurs propres de l'évolution des paramètres physiques dans un milieu en permanence tamponné par TiO₂ et CaO.

L'évolution des «minéraux accessoires» qui pourrait s'effectuer par réactions de déstabilisation faisant intervenir les amphiboles dans un système réduit aux trois constituants TiO₂-(Fe,Mg)O-CaO:



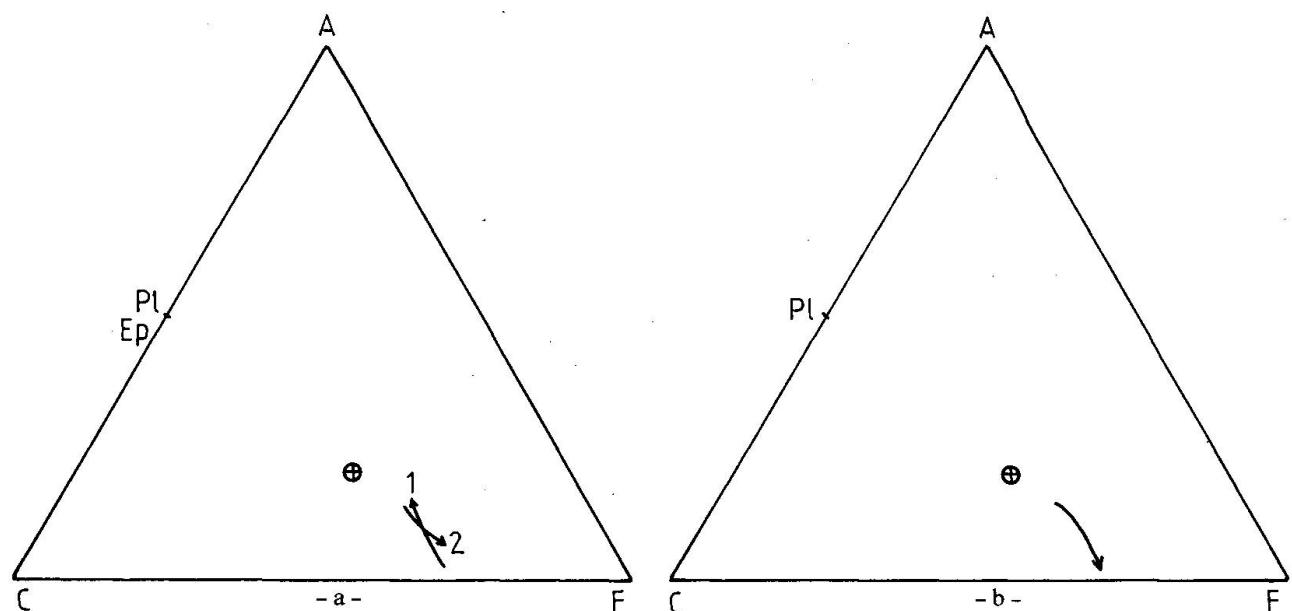


Fig. 3 Evolution des amphiboles et de leurs paragenèses en coordonnées ACF.

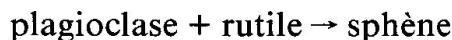
a: dans M1, 1: amphiboles syn S_1 , 2: amphiboles nucléées par celles de S_1 et syn S_2 .

b: dans M2.

\oplus : composition de la roche.

Pl: plagioclase, Ep: épidaite.

n'est jamais observée. Par contre, l'existence de plagioclase et d'opales blin-dés dans des sphènes syn à tardi M2 suggère l'intervention de réactions continues. La réaction:

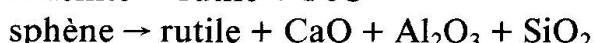


mettant en jeu les trois constituants Al_2O_3 , CaO et TiO_2 n'est pas possible puisque les rapports Al/Ca du plagioclase et du sphène sont très différents l'un de l'autre. Une autre réaction de type:



ne pourrait s'expliquer qu'avec départ de fer et d'alumine, qui, durant M2, pourraient entrer respectivement dans l'amphibole et le plagioclase. Un tel processus reste douteux en ce qui concerne MnO : les amphiboles de M2 ne sont pas plus riches en MnO que celles de M1.

Le rutile, quant à lui, ne peut se former que par métasomatose à partir d'il-ménite ou de sphène:



Les constituants CaO , Al_2O_3 et SiO_2 peuvent rentrer dans du plagioclase.

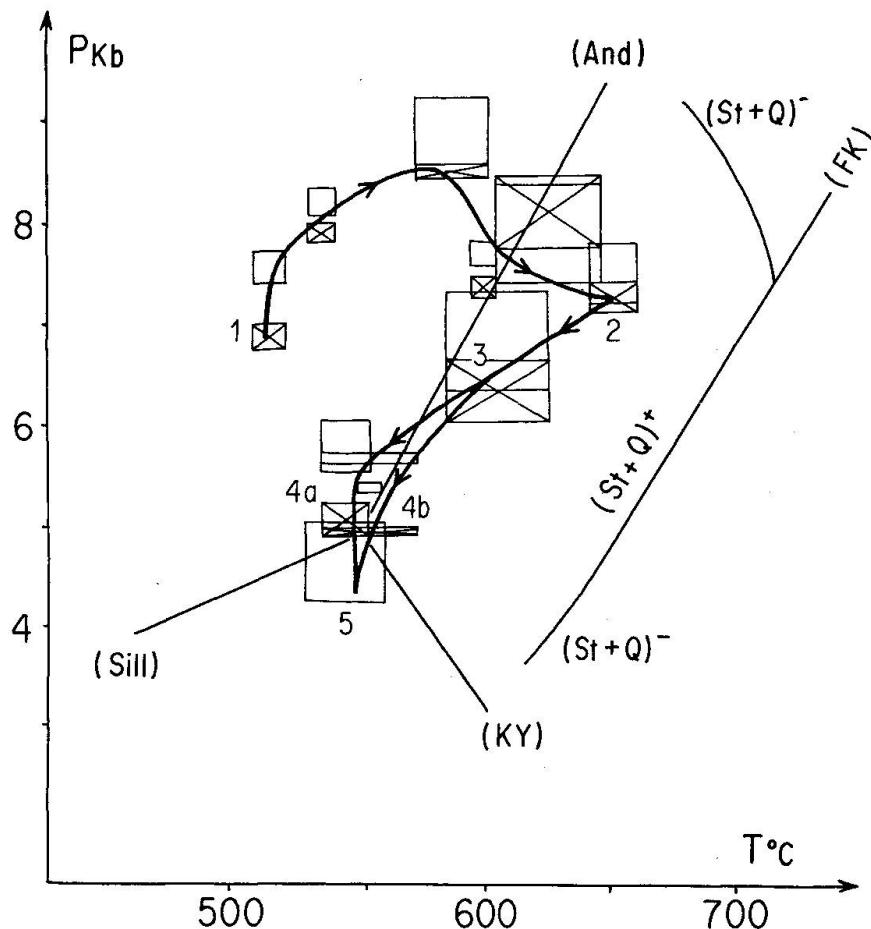


Fig. 4 Chemin P-T établi d'après l'étude des micaschistes du Guernehué (TRIBOULET et AUDREN, 1985b).

ÉVOLUTION DES AMPHIBOLES AU COURS DE M1 ET M2

Il est classique de considérer que la répartition des ions Si⁴⁺, Al³⁺ et Na⁺ dans le réseau des amphiboles est sensible aux variations des conditions physiques:

- Si⁴⁺ augmente et (NaA + NaM4) diminue quand le métamorphisme diminue (BOYD, 1954, 1956; BARD, 1970),
- NaA augmente quand T augmente (VITTEL et FABRIÈS, 1982),
- AlVI (dans le site M1) augmente quand P augmente, à température constante (LEAKE, 1965; BINNS, 1965a, b; FABRIÈS, 1963).

Sachant que les événements enregistrés dans les micaschistes associés à la métabasite correspondent, pour M1 à une augmentation puis une diminution de P avec augmentation constante de T, et pour M2 à une diminution progressive de P et T (figure 4), nous allons essayer de corrélérer ces informations avec l'évolution de la répartition des cations ci-dessus dans les sites des amphiboles.

Contrôle de la variable T

Afin de cerner l'influence de T, on a illustré sur les figures 5a et b les variations de NaA dans l'amphibole, en fonction de Na₂O.

- dans M1 (figure 5a), les amphiboles de type actinote (coeur)-Mg hornblendes (périmétrie) (A → B → D) et les hornblendes actinotiques-Mg hornblendes zonées (Y → W) enregistrent une augmentation, puis une diminution de température. Les hornblendes actinotiques ont cristallisé à des températures intermédiaires entre celles des actinotes et celles des Mg hornblendes. Les Mg hornblendes vertes à vert-bleu tardif S₁ à début S₂ situées à la périphérie des actinotes correspondent (figures 5b) à une augmentation de température (2, 10, 14, X) puis à une chute de température (X → V).

Le saut de composition qui semble n'exister nettement qu'entre 8 et W, D ou S en ce qui concerne Na₂O, n'est pas accompagné d'autres sauts de composition, en particulier pour FeO et MgO (tableau 1).

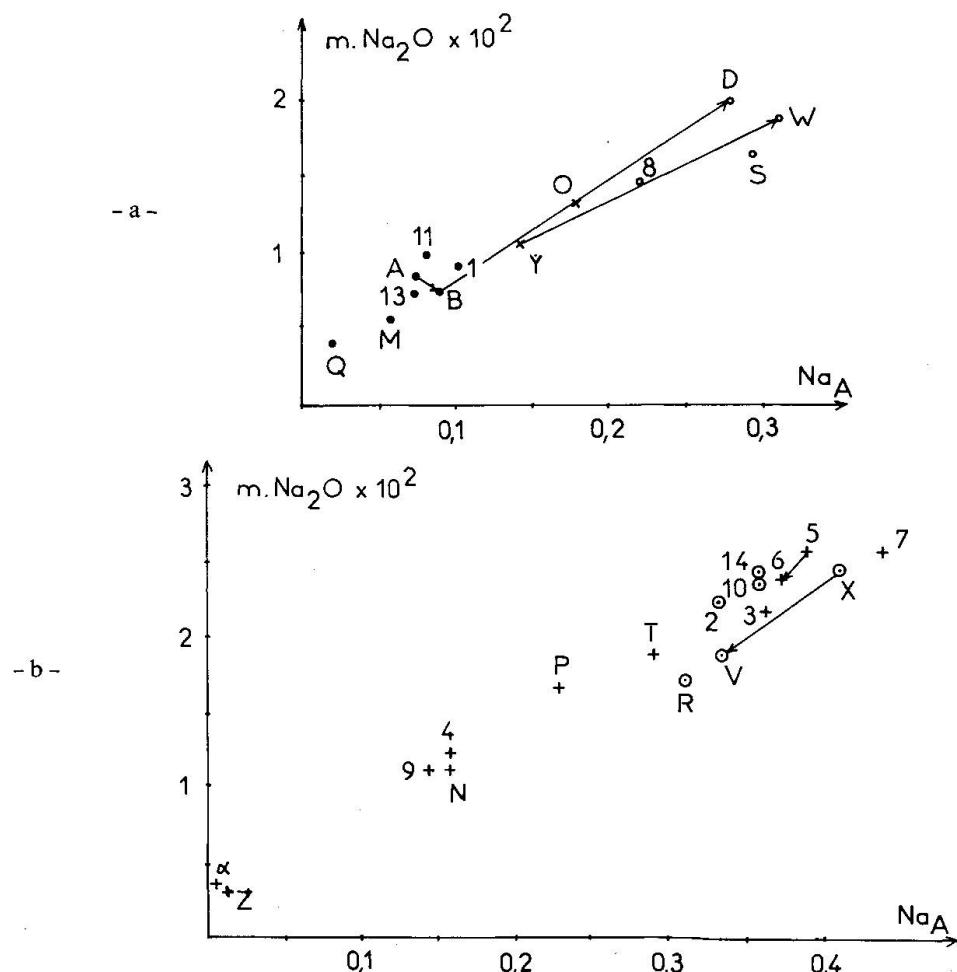


Fig. 5 Evolution du remplissage du site A des amphiboles par Na, en fonction de leur teneur en Na₂O exprimée en mole de Na₂O × 10².

a: pour les amphiboles de la schistosité S₁; ●: actinotes; x: hornblendes actinotiques; O: Mg hornblendes.

b: pour les amphiboles de la schistosité S₂ (+)

○: amphibiols nucléés par les amphiboles de S₁ mais étant syn S₂.

Les flèches indiquent le sens des zonations (cœurs → périphéries).

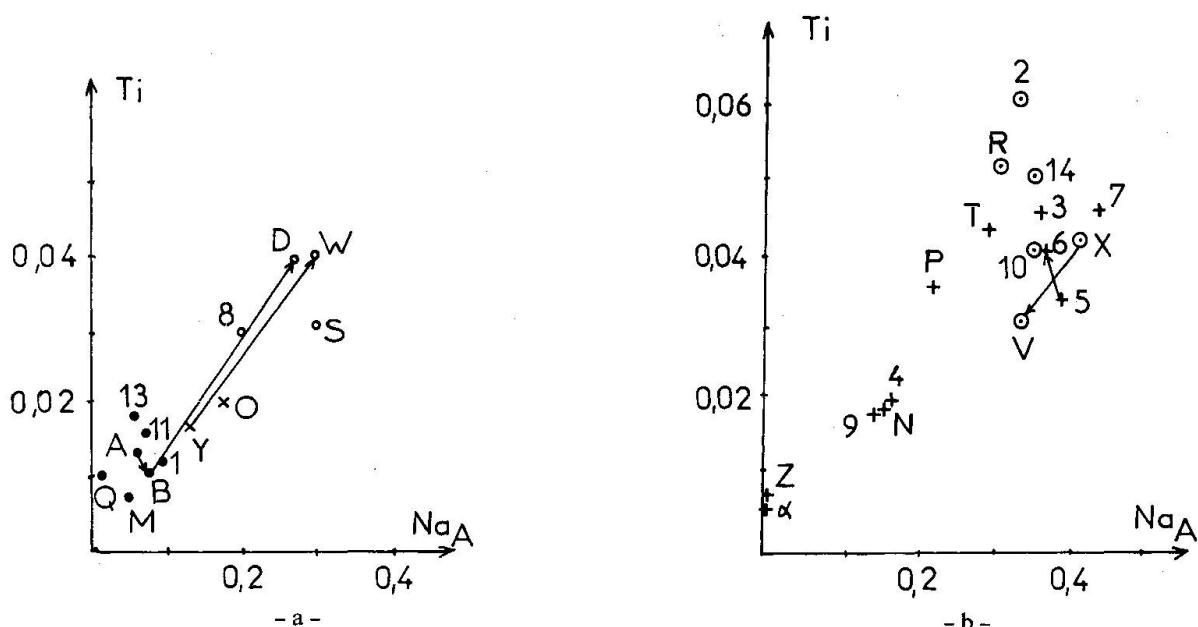


Fig. 6 Relations Ti-NaA. a: pour les amphiboles de S_1 ; b: pour les amphiboles de S_2 .
Légende identique à celle de la figure 5.

- dans M2 s.s. (figure 5b), une diminution progressive de température s'effectue de 7 à 9. Les amphiboles 9, N et 4 se sont formées à des températures voisines. Les amphiboles Z et α , tardi M2, sont des actinotes très pauvres en NaA.

Les sauts de composition actinote-hornblende actinotique et hornblende actinotique-Mghornblende sont, pour une gamme de températures analogue à M1, plus larges dans M2, ce qui voudrait signifier qu'ils sont sensibles à la pression, si l'on considère que la représentativité des analyses est assez significative pour ne pas confondre saut de composition avec déficit de mesures.

Ces sauts de composition montrent que les variables extensives liées aux amphiboles peuvent réagir de manière discontinue à des variations continues des variables intensives.

TiO_2 est aussi un marqueur utile fiable à la variable T (ZAKRUTKIN, 1968; RAASE, 1974): TiO_2 augmente dans l'amphibole quand la température augmente.

Dans M1 (figure 6a), les variations de Ti^{4+} sont similaires à celles de NaA, et sans liaison aucune avec la présence de sphène ou d'ilménite à l'équilibre avec l'amphibole; ceux-ci jouent le rôle de tampon pour TiO_2 tout au long de M1. Les variations de TiO_2 du sphène et de l'ilménite d'une part, et le rapport modal sphène-ilménite / amphibole d'autre part sont très peu affectés par le fait que peu de TiO_2 est remobilisé quand la température augmente.

La corrélation Ti^{4+} -NaA est moins nette pour les Mghornblendes, lors de la transition ilménite-rutile (figure 6b). On notera que les amphiboles 9, 4 et N (associées au sphène?) sont là encore regroupées.

Contrôle de la variable P

Connaissant, grâce à NaA, les variations de température enregistrées par les amphiboles au cours de M1 et M2, il doit être possible de suivre les variations conjuguées de P en suivant le remplissage du site M2 par Al³⁺ (Al^{VI}).

Si l'on relie T et P au remplissage des sites NaA et Al^{VI} (figures 7a et b), on peut suivre à partir des actinotes, des hornblendes actinotiques et de quatre des Mg hornblendes de S₁ une évolution prograde de T et P. Une chute de P à T croissante, analogue au trajet de la fin de l'épisode M1 dans les micaschistes se retrouve dans l'amphibolite si certaines autres Mg hornblendes de type 10, R ou X appartiennent à la foliation S₁. Un seul doute existe en ce qui concerne l'amphibole X.

Les amphiboles R et 10, nucléées par des actinotes/hornblendes actinotiques de S₁, soulignent incontestablement la foliation S₂ (figure 3). De même, les Mg hornblendes 2, 14 et V, syn S₂ s'intègrent (figure 7b) à un trajet en accord avec une chute progressive de P et T liées à la fin de mise en place du dôme (AUDREN, 1986).

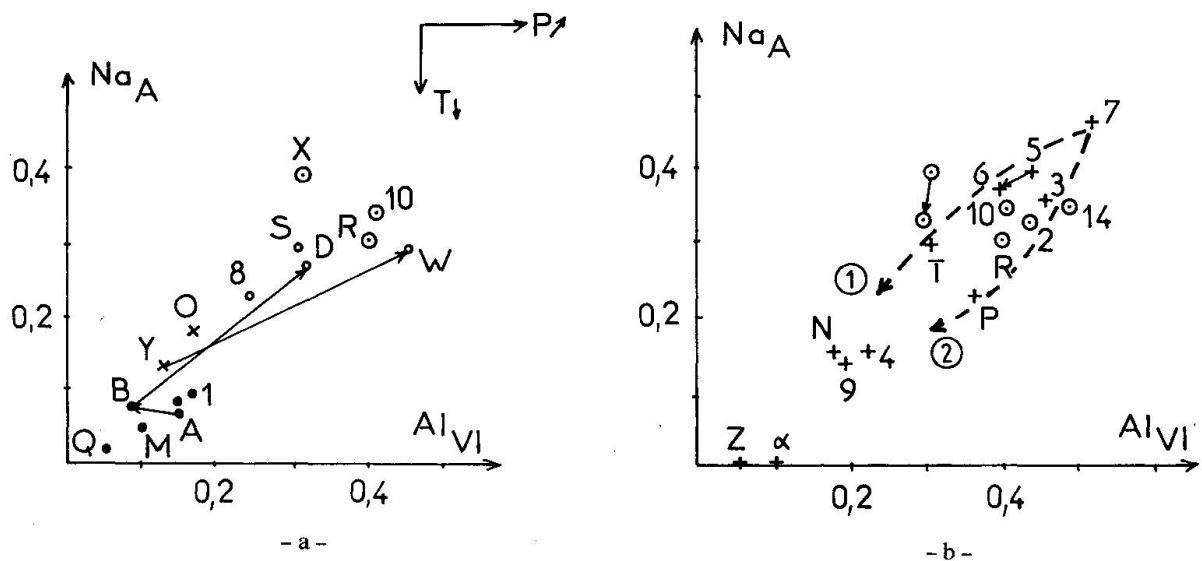


Fig. 7 Essai de corrélation P-T d'après le remplissage des sites M1 et A des amphiboles, respectivement par Al³⁺ et Na⁺
 a: amphiboles de la schistosité S₁.
 b: amphiboles de la schistosité S₂.

Discussion

D'après le type de diagramme illustré par la figure 7 une certaine imprécision demeure en ce qui concerne les variations relative de P et T au cours de M2 (trajets 1 et 2, figure 7b). Des précisions peuvent être apportées si on prend en compte certaines substitutions.

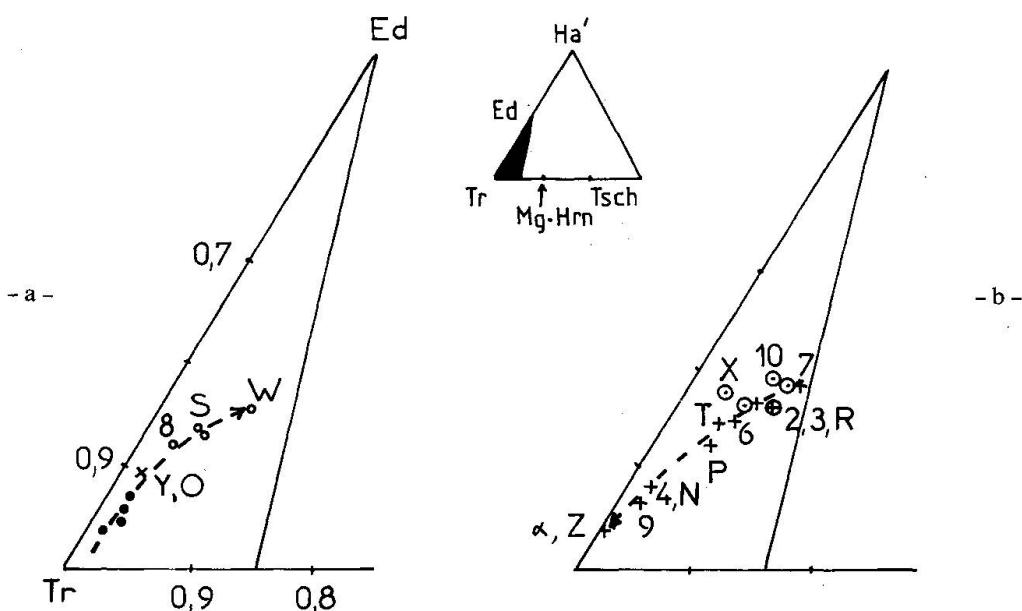


Fig. 8 Evolution des amphiboles de S_1 (a) et S_2 (b) rapportées aux pôles édénite (Ed)-trémolite (Tr)-Mg hornblende dans un diagramme hastingsite (Ha') $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ - trémolite (Tr) - tschermakite (Tsch), tenant compte des substitutions $\text{Si} = (\text{Na} + \text{Al}^{\text{IV}})$ et $\text{Si} + \text{Mg} = \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Al}^{\text{IV}}$.

On peut définir les amphiboles de la métabasite par le jeu des pôles actinote, édénite et hornblende reliées entre elles par les substitutions (figure 8):

$\text{Si} = \text{NaA} + \text{Al}^{\text{IV}}$ (actinote \Rightarrow édénite)
et $\text{Si} + \text{Mg} = \text{Al}^{\text{IV}} + \text{Al}^{\text{VI}}$ (actinote / Mg hornblende \Rightarrow tschermakite).

Des études thermodynamiques (TRIBOULET et AUDREN, en préparation) montrent que les substitutions de type trémolite / actinote \Rightarrow édénite et de type édénite \Rightarrow Mg hornblende sont fonction de P et T. Si «a» représente l'activité d'une amphibole, le rapport «a» édénite / «a» trémolite augmente avec P et T. Le rapport «a» Mg hornblende / «a» édénite augmente avec T, et diminue quand P augmente, à activité constante du constituant n'intervenant pas dans le rapport. Ainsi, à une valeur X du rapport «a» hornblende / «a» édénite donné, le long d'une isopleth donnée (courbe d'isovaleur de KD, constante d'équilibre Mg hornblende \Rightarrow édénite) une évolution de l'amphibole de A à B correspondra à une diminution de P et/ou T (figure 9a). A une augmentation progressive de la température à pression constante correspondra une évolution A' B' (figure 9b).

Des variations simultanées de P et T mèneront à des amphiboles dont les variations de compositions correspondront à une résultante des deux vecteurs précédents.

Les amphiboles de M1 indiquent une augmentation progressive de P et T ($\text{Q}, \text{M} \rightarrow \text{D}, \text{S}$), puis l'infléchissement $\text{D}, \text{S} \rightarrow \text{W}$ dénote une augmentation plus rapide de T que de P.

Les variations de composition des amphiboles de M2 sont liées essentiellement à une diminution importante de P (figure 8b). Une grande partie des

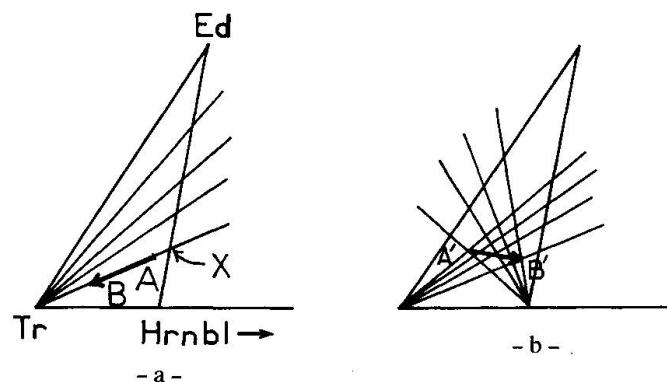


Fig. 9 En coordonnées identiques à celles de la figure 8:

- a: AB: variation progressive de la composition d'une amphibole à température constante, définie par le rapport
 $X = \text{activité Mg hornblende} / \text{activité édénite}$, lors d'une diminution progressive de la pression.
b: A'B': id. par augmentation progressive de T à P constante.

Mg hornblendes de la périphérie 2 (voir plus haut) suivent un début de trajet en tous points superposable, ce qui indique qu'elles sont contemporaines des amphiboles de S₂, bien qu'elles aient été nucléées par les amphiboles de S₁.

Ces données qualitatives permettent d'affiner les résultats obtenus précédemment (figures 4 et 10).

L'étude des variations d'occupation des sites des amphiboles zonées dans M1 et M2 montre que:

- les actinotes du début de M1 ne sont pas réellement de haute pression,

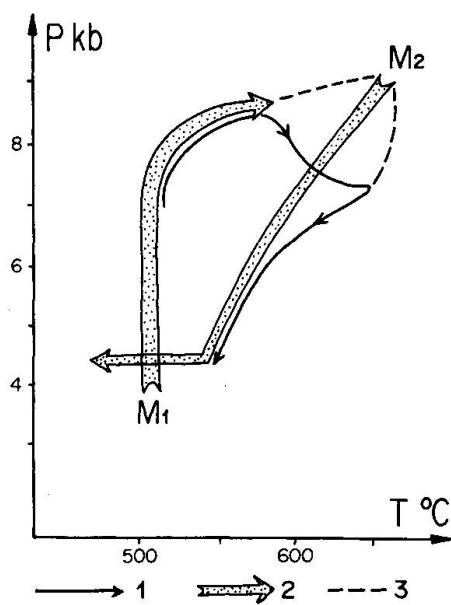


Fig. 10 Chemins P-T suivis par les roches basiques et les roches acides de la Vilaine au cours du métamorphisme M1 → M2.

- 1: chemin calculé dans les micaschistes.
2: chemin estimé dans les roches basiques.
3: chemin possible suivi par les amphiboles, compte tenu des lacunes de miscibilité.

- au cours de M1, il y a augmentation progressive de P et T (Q, M à W),
- la phase M2 débute (7) à des pressions et/ou à des températures supérieures à celles de la fin de M1,
- la fin de M2 (Z, α) est de basse pression mais aussi de basse température.

Sur la figure 10, les variations qualitatives de P et T obtenues sur l'amphibolite du Guernehué ont été partiellement calquées sur le chemin P-T calculé dans les micaschistes.

CHEMIN PRESSION-TEMPÉRATURE-TEMPS-DÉFORMATION POUR LES SÉRIES MÉTAMORPHIQUES DE LA VILAINE

La corrélation des déformations successives aux variations P-T au cours du temps a permis de proposer un chemin Pression-Température-temps-déformation (chemin PTtd) pour les micaschistes de la Vilaine (TRIBOULET et AUDREN 1985). Ce chemin est caractéristique d'un contexte géodynamique de collision continentale selon le processus de chevauchement → épaississement crustal → remontée → érosion (ENGLAND et RICHARDSON, 1977; SPEAR, SELVERSTONE, HICKMOTT, GROWLEY et HODGES, 1984).

Le chemin estimé pour les roches basiques complète le chemin calculé pour les roches acides et permet de reconstituer le chemin total suivi par les séries métamorphiques de la Vilaine (figure 10). Ce chemin total est très semblable au chemin théorique établi par Thompson et England pour la mise en place de corps anatectiques dans une croûte continentale enfouie tectoniquement lors d'une collision (THOMPSON et ENGLAND, 1984, figure 7); la mise en place de tels corps est achevée dans le cas où l'épaisseur de la croûte est doublée (modèle à deux couches).

Le chemin total étant enregistré dans le toit d'un dôme de granite d'anatexie d'âge Dévonien moyen (AUDREN, 1986) on peut considérer que les roches de la Vilaine ont subi un sous-charriage au cours du métamorphisme, c'est-à-dire qu'elles constituent une unité structurale chevauchée.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Claude Blémont pour la mise en forme du manuscrit.

Bibliographie

- AUDREN, C. (1971): Etude pétrographique et structurale des schistes cristallins de la Vilaine. Thèse de troisième cycle. Université de Rennes, 84 p.
- AUDREN, C. (1986): Evolution structurale de la Bretagne méridionale au Paléozoïque. Thèse d'état, Rennes, 365 p.

- BARD, J.-P. (1970): Compositions of hornblende during the hercynian progressive metamorphism of the Aracene metarmophic belt (SW Spain). *Contr. Min. Petr.*, 28: 117-134.
- BINNS, R. A. (1965a): Hornblendes from some basic hornfelses in the New England region, New South Wales. *Min. Mag.*, 34: 52-65.
- BINNS, R. A. (1965b): The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the Willyama Complex, Broken Hill district, New South Wales. Part I: hornblendes. *Min. Mag.*, 35: 306-326.
- BOYD, F. R. (1954): Amphiboles. *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 53: 108-111.
- BOYD, F. R. (1956): Amphiboles. *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 54: 115-119.
- ENGLAND, P. C. and RICHARDSON, S. W. (1977): The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments. *J. geol. Soc. London*, 134: 201-213.
- FABRIÈS, L. (1963): Les formations cristallines et métamorphiques du NE de la province de Séville (Espagne). Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Nancy.
- LEAKE, B. E. (1965): The relationship between composition of calciferous amphibole and grade of metamorphism. In «Controls of metamorphism», W. S. PITCHER and G. W. FLINN, J. WILEY and Sons, New York: 299-318.
- LEAKE, B. E. (1978): Nomenclature of amphiboles. *Min. Mag.*, 42: 533-563.
- PERCHUK, L. L. and RIABCHIKOV, I. D. (1976): Phase relations in mineral systems. Ed. Nedra (in russian).
- RAASE, P. (1974): Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contr. Min. Petr.*, 45: 231-236.
- SPEAR, F. S., SELVERSTONE, J., HICKMOTT, D., GROWLEY, P. and HODGES, K. V. (1984): P-T paths from garnet zoning: a new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes. *Geology*, 12: 87-90.
- THOMPSON, A. B. and ENGLAND, P. C. (1984): Pressure-Temperature-time paths of regional metamorphism of the continental crust. II: their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *J. Petrology*, 25: 929-955.
- TRIBOULET, C. et AUDREN, C. (1985a): Les métabasites de l'estuaire de la Vilaine (Bretagne méridionale, France): une série volcano-détritique issue d'une marge continentale active au Paléozoïque inférieur. *Hercynica*, I, 1; 55-63.
- TRIBOULET, C. and AUDREN, C. (1985b): Continuous reactions between biotite, garnet, staurolite kyanite/sillimanite/andalusite and P-T-time-deformation path in the mica schists from the estuary of the river Vilaine, South Brittany, France. *J. metamorphic Geol.*, 3: 91-105.
- TRIBOULET, C. et AUDREN, C. (en préparation): Controls of Pressure-Temperature-time-deformation path from amphibole zonation during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of river Vilaine, South Brittany, France).
- VITTEL, G. et FABRIÈS, J. (1982): Caractérisation de l'évolution polymétamorphique du Hoggar central (Sahara) basée sur l'analyse cristallogénétique d'amphiboles calciques. *Bull. Min.*, 105: 110-124.
- ZAKRUTKIN, V. V. (1968): Evolution des amphiboles pendant le métamorphisme. *Zap. Vses. Mineral. obsch.*, 96, 1: 13-23.

Manuscript reçu le 2 octobre 1985.