

Occurrences de cookéïte et pyrophyllite dans les schistes du Dauphinois (Isère, France) : conséquences sur la répartition du métamorphisme dans les zones externes alpines = Cookeite and pyrophyllite in the Dauphinois black shales (Isères, France) :

Autor(en): **Jullien, Michel / Goffé, Bruno**

Impl...

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **73 (1993)**

Heft 3

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-55579>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Occurrences de cookéïte et de pyrophyllite dans les schistes du Dauphinois (Isère, France): Conséquences sur la répartition du métamorphisme dans les zones externes alpines

Cookeite and pyrophyllite in the Dauphinois black shales (Isère, France): implications for the conditions of metamorphism in the Alpine external zones

par *Michel Jullien*¹ et *Bruno Goffé*¹

Abstract

The discovery of many new cookeite and pyrophyllite occurrences in the Aalenian black shales from the Dauphinois internal zone, French western Alps, points to Alpine metamorphic conditions between 1 and 5 kbar and from 270 to 340 °C for the external area. These conditions correspond to the culmination of a prograde metamorphic history which has never left the greenschist facies. The cookeite distribution strictly limited to the Aalenian schist suggests the original presence of lithium in the sediment.

Keywords: cookeite, pyrophyllite, lithium, Aalenian, Dauphinois, metamorphism, greenschist facies, French Alps.

Résumé

La découverte de nombreux gisements de cookéïte et de pyrophyllite dans les schistes noirs aaléniens de la zone dauphinoise interne des Alpes occidentales françaises apporte de nouvelles données sur le métamorphisme alpin des régions externes. L'étude des paragenèses permet la détermination des conditions du métamorphisme entre 1 et 5 kbar et de 270 à 340 °C. Ces conditions correspondent à la culmination d'une histoire métamorphique prograde n'ayant donc jamais quitté le faciès schiste vert. La distribution de la cookéïte limitée au seul Aalénien suggère la présence originelle du lithium dans le sédiment.

Introduction

Les fréquentes occurrences de cookéïte ($\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), chlorite alumineuse lithinifère di-trioctaédrique, dans les roches métamorphiques (GOFFÉ, 1977, 1980, 1982, 1984; SARTORI, 1988; THEYE, 1988; GOFFÉ et BOUYBAOUÈNE, 1993) et les récents travaux expérimentaux et théoriques sur ses conditions de stabilité (VIDAL et GOFFÉ, 1991), entre 1 et 14 kbar et 250 à 500 °C, permettent désormais de la considérer comme un minéral index du métamorphisme.

La découverte de cookéïte et de pyrophyllite dans les schistes noirs aaléniens du Dauphinois interne, au sud de la vallée de la Maurienne, offre

la possibilité nouvelle de caractériser et de quantifier les conditions du métamorphisme alpin qui a affecté les zones externes de la chaîne.

Sur la base d'une étude de la cristallinité de l'illite, APRAHAMIAN (1988) a caractérisé un métamorphisme faible à très faible dans cette région.

Les occurrences dauphinoises de cookéïte et de pyrophyllite

Une étude détaillée et systématique des séries du Lias-Dogger dauphinois a permis de découvrir de très nombreuses occurrences de cookéïte et de pyrophyllite sur une vaste étendue de terrains

¹Laboratoire de géologie, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, F-75231 Paris Cedex 05, France.

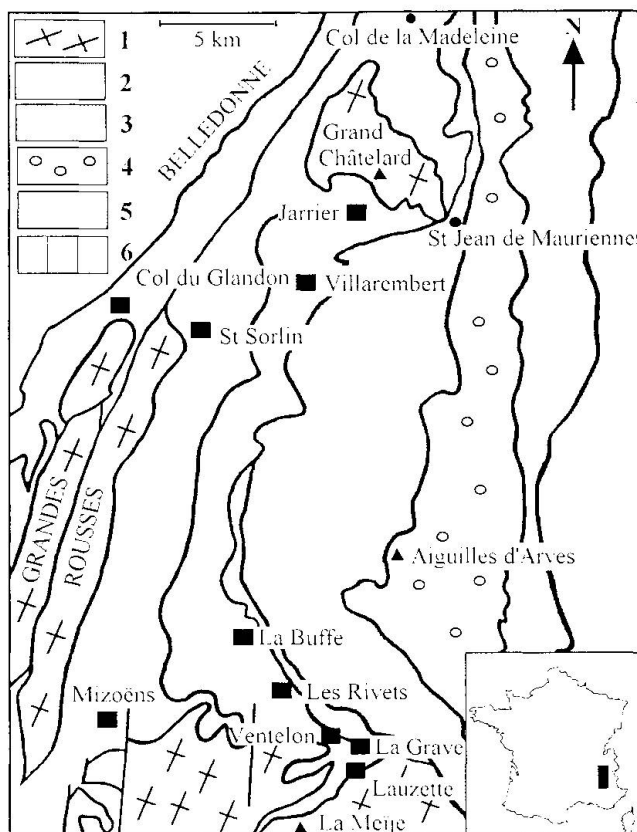


Fig. 1 Carte de répartition des occurrences de cookéite et de pyrophyllite.

Schéma structural (1/250000) établi d'après les cartes au 1/50 000 de La Grave (1976) et St Jean de Maurienne (1977), Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Orléans, France).

1, socles cristallophylliens; 2, Briançonnais; 3, Sub-briançonnais; 4, flysch des Aiguilles d'Arves; 5, Ultra-dauphinois; 6, Dauphinois; ■, occurrence de cookéite et de pyrophyllite.

schisteux depuis La Grave et jusqu'à St Jean de Maurienne (Fig. 1). Dans tous les cas, les gisements de cookéite sont strictement limités au seul Aalénien.

Les gisements dauphinois sont constitués par des schistes brun-noir luisants très riches en exsudats synschisteux de quartz et en veines laminées de calcite. Ce faciès typique permet de les distinguer facilement des différents niveaux schisteux environnants, liasiques en particulier, qui sont plus ternes et généralement plus carbonatés.

La minéralogie de ces schistes est homogène sur l'ensemble des gisements. Elle est caractérisée par une grande abondance de phyllosilicates, en association avec du quartz et de la calcite. Il s'agit principalement de la pyrophyllite, de la cookéite, des chlorites ferreuses et, en moindre quantité, de la muscovite, de la margarite et de la paragonite.

La pyrophyllite est très fréquente. Elle se présente en amas centimétriques, lamellaires ou fibreux, verdâtres et nacrés, en petites rosettes autour des exsudats de quartz ou en fuseaux dans la schistosité. La pyrophyllite fibreuse apparaît aussi dans des fentes.

Macroscopiquement l'identification de la cookéite est difficile du fait de son mélange intime avec les autres phyllosilicates blancs et les chlorites. Son aspect blanc nacré lumineux, en plaques diffus autour des quartz d'exsudation, permet néanmoins de soupçonner sa présence. Parmi les différents gisements, les plus remarquables sont ceux situés sous le village de Ventelon et aux alentours de Villarembert où la cookéite se présente en masses fibreuses centimétriques blanches et nacrées. La cookéite est le plus souvent associée aux exsudats synschisteux de quartz mais peut parfois apparaître dans des fentes de tensions. A Villarembert en particulier, elle s'observe dans plusieurs générations de fentes suggérant des cristallisations successives au cours de la déformation. La cookéite est alors cristallisée en lamelles disposées perpendiculairement aux épontes. Elle occupe la totalité de l'espace des fentes les plus fines (1 à 3 mm). Dans le cas des plus larges (0,5 à 1 cm), la pyrophyllite apparaît au cœur des fissures.

La paragonite est rare. Elle se présente fréquemment en petits cristaux lamellaires isolés ou en amas plus importants dans des exsudats comme à Jarrier. La paragonite avait déjà été signalée dans le Dauphinois par APRAHAMIAN (1988), accompagnée exceptionnellement par la pyrophyllite ou le chloritoïde.

La margarite est très rare, en très fines lamelles de 1 ou 2 μm d'épaisseur intimement mélangées avec les micas et la cookéite dans les grandes masses de phyllosilicates. C'est dans les échantillons du site de Ventelon qu'elle a été observée le plus souvent.

La cookéite du Dauphinois

PROPRIÉTÉS OPTIQUES ET PÉTROGRAPHIQUES DE LA COOKÉITE

Sous le microscope, la cookéite se présente en lamelles de 0,5 à 1 millimètre d'épaisseur regroupées le plus souvent en fuseaux orientés dans la schistosité ou en petites rosettes dans les ombres de pression. Dans les grandes masses de phyllosilicates (exsudations), elle existe aussi en très fines lamelles désorientées (quelques dizaines de micromètres) mélangées avec la pyrophyllite et les micas.

En lumière naturelle elle est incolore, transparente et non pléochroïque. En lumière polarisée analysée, la cookéite se caractérise surtout par un allongement négatif, ce qui permet de la distinguer des micas ou de la pyrophyllite. Ses teintes de biréfringence sont faibles. Elles s'étendent du gris à l'orangé, les plus courantes étant dans le jaune paille du premier ordre.

PROPRIÉTÉS CRISTALLOGRAPHIQUES ET IDENTIFICATION DE LA COOKÉITE

La cookéite est une chlorite di-trioctaédrique qui se construit par la superposition d'un feuillet dioctaédrique de type pyrophyllite et d'un feuillet tri-octaédrique de type brucite, formant ainsi une structure caractéristique d'environ 14 Å d'épaisseur (BAILEY, 1989).

Aux rayons X, elle se distingue facilement des chlorites tri-trioctaédriques ferromagnésiennes par la valeur (1.49–1.50 Å) de la bande de diffraction $d(060)$ qui est caractéristique de sa structure di-trioctaédrique alors que les chlorites purement trioctaédriques, comme le clinocllore par exemple, présentent des valeurs (1.54 Å) plus élevées.

Afin de faciliter la détermination de la cookéite dans les diagrammes de rayons X sur poudres, quand celle-ci est mélangée à d'autres chlorites, nous avons appliqué la méthode proposée par FRANSOLET et SCHREYER (1984) pour la sudoïte et utilisée par THEYE (1988) sur la cookéite. Cette méthode consiste à calculer le rapport R des intensités diffractées: $R = I_{003}/(I_{002} + I_{004})$. Ce rapport se situe aux alentours de 0,7 à 0,8 pour la sudoïte et de 0,8 à 1 pour la cookéite. Pour les chlorites ferromagnésiennes du Dauphinois, ce rapport est d'environ 0,5, valeur qui, par exemple, est caractéristique d'un clinocllore (FRANSOLET et SCHREYER, 1984). Cette méthode a été systématiquement utilisée pour déterminer la présence de cookéite.

Composition chimique de la cookéite et des phases minérales associées

Les analyses ont été réalisées sur une microsonde électronique (CAMECA SX 50, 15 kV et 5 nA) à l'université de Paris VI pour les majeurs, utilisant comme standard: Fe_2O_3 (Fe), $MnTiO_3$ (Mn), diopside (Mg, Si), orthoclase (K, Al), albite (Na), anorthite (Ca).

Le lithium a été dosé par microsonde ionique au CRPG de Nancy par E. Deloule avec la cookéite, la zinnwaldite et la lépidolite comme stan-

dard. Le dosage du lithium dans les cookéites a été effectué sur les gisements les plus importants et les plus représentatifs, Villarembert et Vente- lon. Pour les autres gisements, la teneur en Li a été estimée à partir des mesures faites à la micro-sonde électronique en posant que le nombre d'atomes de Li est égal à 1 puf, conformément à la formule idéale et aux valeurs réelles mesurées à Villarembert.

La moyenne des analyses obtenues (Tab. 1) conduit à une formule très proche de la formule idéale $LiAl_4(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$ de la cookéite (BRAMMAL et al., 1937).

ČERNÝ (1970) trouvait des variations du nombre d'atomes de Si de 2.9 à 3.2 par unité formulaire (puf) pour les cookéites de pegmatite. Sur les cookéites métamorphiques étudiées, des valeurs comparables (3.2 à 3.3) ont été obtenues. A Villarembert, des valeurs exceptionnelles de 3.4 puf ont parfois été obtenues et sont les plus élevées connues dans les cookéites.

Le nombre d'atomes d'aluminium qui varie entre 4.3 et 4.8 puf est toujours inférieur à la valeur idéale de 5. Les variations des teneurs en Si et Al sont couplées. Cette substitution Si–Al, qui n'apparaît pas totalement compensée en charge par des variations de l'ordre de 0.04 puf en Fe et Mg, substitution de type Tschermak, n'est pour l'instant pas encore élucidée et pourrait suggérer localement un mélange avec la pyrophyllite (GOFFÉ et BOUYBAOUÈNE, 1993).

Le nombre d'atomes de Li varie de 0.85 à Vente- lon à 1 puf à Villarembert pour des concentrations respectivement de 2.30 à 2.75 poids % de Li_2O . Ces variations sont indépendantes de la substitution Si–Al. De telles valeurs sont en accord avec celles connues par ailleurs dans les cookéites métamorphiques, entre 0.6 et 1 (GOFFÉ, 1977, 1980, 1982, 1984).

Dans les cookéites pegmatitiques, les taux d'occupation sont plus élevés et peuvent atteindre 1.7 puf (QUENSEL, 1937), soit une concentration de 4.33 poids % de Li_2O . Les cookéites de la pegmatite de Dobra Voda (ČERNÝ et al., 1971) ont été réanalysées ici avec les mêmes critères et sont présentées dans le tableau d'analyses afin de permettre les comparaisons. Ces taux élevés pourraient alors s'expliquer par une substitution limitée du Li dans le site tétraédrique de l'aluminium (ČERNÝ, 1970).

Dans les cookéites métamorphiques analysées, les taux d'occupation du Li ne dépassent jamais la valeur idéale de 1 puf et une substitution tétraédrique Al/Li, même limitée, est ici à exclure. Les très faibles quantités de Na et K sont probablement liées, dans la plupart des cas, à des intercroissances micacées.

Tab. 1 Analyses microsonde électronique et ionique.

ANALYSES																			
Minéral	Cook	Cook	Cook	Cook	Cook	Cook	Pheng	Pheng	Pheng	Pyr	Pyr	Pyr	Chlor	Chlor	Chlor	Chlor	Ctd	Parag	Parag
Occurr.	Dobra	Villa.	Jarr.	Grave	Lauz.	Vent.	Villa.	Vent.	Jarr.	Vent.	Villa.	Jarr.	Villa.	Vent.	Mad.	Jarr.	Mad.	Jarr.	Jarr.
SiO ₂	32.71	35.42	36.94	36.41	37.31	34.79	47.80	46.53	47.79	63.06	68.39	69.53	29.99	23.69	23.94	23.36	24.12	47.88	46.48
TiO ₂	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.34	0.09	0.00
Al ₂ O ₃	43.19	44.31	46.12	44.50	47.49	44.17	37.40	33.27	36.42	27.27	28.87	28.85	25.18	24.97	25.85	24.76	40.51	37.76	38.55
FeO	0.00	0.20	0.09	0.01	0.02	0.20	1.01	0.39	0.20	0.01	0.00	0.03	25.71	29.61	27.78	29.59	26.10	0.19	0.40
MgO	0.00	0.14	0.16	0.00	0.00	0.16	0.50	1.13	0.14	0.06	0.04	0.05	7.04	8.61	10.07	8.33	1.13	0.11	0.07
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.04	0.05	1.03	0.06	0.02	0.00	0.00
CaO	0.02	0.06	0.14	0.00	0.01	0.06	0.00	0.05	0.27	0.09	0.12	0.04	0.05	0.00	0.00	0.07	0.05	0.34	0.80
Na ₂ O	0.02	0.02	0.19	0.00	0.00	0.06	0.78	0.52	1.20	0.00	0.12	0.05	0.14	0.02	0.02	0.06	0.00	4.49	5.57
K ₂ O	0.07	0.02	0.07	0.00	0.00	0.02	8.54	8.77	7.08	0.04	0.05	0.03	0.08	0.00	0.02	0.00	0.03	3.60	1.29
Li ₂ O	3.87	2.75	[2.76]	[2.76]	[2.76]	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	79.88	82.92	83.72	80.92	84.85	81.82	96.03	90.70	93.15	90.57	97.59	98.62	88.25	86.95	88.71	86.26	92.30	94.46	93.16
FORMULES STRUCTURALES																			
Base	14	14	14	14	14	14	11	11	11	11	11	11	14	14	14	14	12	11	11
Si	3.060	3.196	3.210	3.260	3.201	3.184	3.101	3.212	3.160	3.971	3.949	4.019	3.079	2.567	2.525	2.557	2.345	3.100	3.030
Ti	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.025	0.000	0.000
Al	4.765	4.711	4.730	4.700	4.800	4.764	2.859	2.795	2.803	2.024	1.989	1.964	3.046	3.189	3.123	3.195	4.643	2.880	2.960
Fe	0.000	0.015	0.012	0.002	0.004	0.015	0.059	0.025	0.014	0.005	0.000	0.002	2.164	2.684	2.451	2.709	2.123	0.010	0.020
Mg	0.000	0.019	0.023	0.000	0.004	0.022	0.048	0.104	0.014	0.007	0.003	0.005	1.077	1.391	1.583	1.359	0.164	0.010	0.010
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.003	0.003	0.005	0.092	0.006	0.002	0.000	0.000
Ca	0.002	0.006	0.010	0.000	0.002	0.006	0.000	0.004	0.020	0.012	0.007	0.003	0.005	0.000	0.000	0.008	0.005	0.020	0.060
Na	0.004	0.003	0.032	0.000	0.000	0.011	0.097	0.097	0.153	0.000	0.017	0.005	0.028	0.004	0.004	0.013	0.000	0.570	0.700
K	0.009	0.002	0.010	0.000	0.000	0.018	0.706	0.750	0.598	0.063	0.003	0.002	0.010	0.000	0.003	0.000	0.004	0.280	0.110
Li	1.456	0.998	1.000	1.000	1.000	0.847	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Des analyses de cookéite d'autres gisements importants du Dauphinois (Jarrier, La Grave, La Lauzette) sont figurées dans le tableau 1. Ces cookéites dauphinoises présentent des compositions remarquablement constantes sur l'ensemble des gisements découverts, ce qui pourrait suggérer une conservation des caractéristiques chimiques du sédiment originel sur de grandes distances.

Les assemblages phyllosilicatés sont très finement mélangés. Des observations réalisées en microscopie électronique en transmission (JULLIEN, M. BARONNET, A. et GOFFÉ, B., en préparation) mettent en évidence un mélange mécanique très fin (inférieur au μm) qui se traduit par des microdiffractions composites qui semblent caractéristiques des associations micacées dans le métamorphisme de bas degré. Dans des contextes comparables, mais pour des pressions plus fortes (supérieures à 8–10 kbar), on observe une solution solide parfaite entre phengite, paragonite et margarite et des microdiffractions monophasées. L'extrême petite taille des cristaux de phyllosilicates a été un handicap certain pour l'obtention de bonnes analyses.

Les pyrophyllites présentent très souvent des totaux anhydres trop élevés qui restent inexplicables mais qui sont parfaitement reproductibles sur l'ensemble des analyses pour les divers

gisements. Les formules structurales sont néanmoins caractéristiques (Tab. 1), sans impureté notable, et très proches de la formule idéale $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

Les chlorites associées sont essentiellement ferreuses et présentent des X_{Mg} de 0.34 en moyenne. Elles sont très pures et ne contiennent que des traces d'alcalins et de calcium.

Les muscovites analysées présentent une substitution phengitique limitée se traduisant par un nombre d'atomes de Si qui varie de 3.08 à 3.13 puf. Les conditions analytiques (très petite taille des cristaux et donc faisceau focalisé) entraînent une perte d'alcalin (K et surtout Na) qui explique les totaux anhydres faibles (Tab. 1) ainsi que les sommes interfoliaires trop basses pour des micas (0.80 à 0.86 au lieu de 0.9 à 1). De telles analyses de phengites ne sont pas exceptionnelles et ont déjà été décrites (EL SHAZLY, A.K. et LIU, J.G., 1991; THEYE, T. et SEIDEL, E., 1991). Elles contiennent aussi en général 0.8 à 1.5 poids % de FeO et de MgO, soit 0.01 à 0.02 puf en substitution avec l'Al octaédrique. A Ventelon, les muscovites contiennent une certaine quantité de calcium, jusqu'à 1.5% de CaO, qui est probablement liée à des intercroissances de margarite.

La margarite apparaît exceptionnellement en très fines lamelles mélangées aux autres phyllosi-

licates. La petite taille des cristaux (1 à 2 micromètres) n'a pas permis l'obtention d'analyses précises à la microsonde, celles-ci étant polluées par la proximité des micas ou de la cookéite. Ces analyses présentent néanmoins de fortes teneurs en calcium (8 à 9% de CaO) qui, corrélées avec une augmentation importante de la concentration en aluminium (50 à 55% d' Al_2O_3), permettent de caractériser la margarite.

La paragonite, très fréquente à Jarrier, est le plus souvent mélangée avec les phengites ou la pyrophyllite. Les analyses sont ainsi légèrement déficitaires en Na_2O avec des concentrations de l'ordre de 4 à 6%. Dans d'autres sites, sa présence est localement suggérée par l'existence de teneurs en Na anormalement élevées (jusqu'à 3.5%) dans les muscovites (AHN et al., 1985).

Le métamorphisme

L'ORIGINE DU LITHIUM

Les occurrences les plus connues de cookéite, les pegmatites, ont donné à ce minéral et au lithium qui le détermine une forte connotation hydrothermale. Dans le cas des cookéites métamorphiques, le problème de l'origine du lithium se pose aussi.

La quantité moyenne estimée en volume de cookéite dans les schistes du Dauphinois est de 5 à 10%, ce qui correspond à une teneur d'environ 1600 à 3000 ppm de lithium. De telles valeurs ne sont pas exceptionnelles pour des sédiments argileux d'origine continentale comme le sont les schistes aaléniens. En effet, depuis la fin du Trias et jusqu'au début du Dogger, il existe une phase d'altération continentale généralisée des socles. Cette altération a entraîné le dépôt de grandes quantités de sédiments argileux lithinifères dans tout le domaine alpin (GOFFÉ, 1982), depuis les Alpes septentrionales (le Barrhorn en Suisse [SARTORI, 1988], la Vanoise...) et jusque dans les Alpes du Sud (Alpes ligures et Alpes apuanes) ainsi que dans les zones externes qui nous intéressent ici.

Les occurrences de cookéite, strictement limitées au seul niveau aalénien de la série Lias-Dogger, suggèrent que le lithium ait été un constituant originel du système. Le contenu minéralogique des fentes de tension et des schistes encaissants est identique. Cette observation va dans le sens de celles réalisées par GOFFÉ (1982) en Vanoise, et GOFFÉ et al. (1987), qui ont été interprétées en système clos et qui excluent toute origine hydrothermale. L'origine du lithium est donc à rechercher dans le sédiment lui-même. Dans le Dauphi-

nois, les migrations de Li, Al, Si ont donc été probablement limitées sur de courtes distances à l'échelle du gisement.

LES CONDITIONS DU MÉTAMORPHISME

Sur le dôme de La Mure, FISCHER et al. (1989) ont signalé de la cookéite dans des filons à carbonates et sulfures, dans le socle et sa couverture houillère. L'Aalénien de cette zone du Dauphinois externe est marneux et pas du tout métamorphique. Cette occurrence n'est pas comparable à celles décrites ici, purement métamorphique, dans le Dauphinois interne.

APRAHAMIAN en 1988, après des travaux sur la cristallinité de l'illite, a décrit dans le Dauphinois un métamorphisme de très bas degré et proposé une carte de répartition, classant la région étudiée dans l'anchizone, le faciès schiste vert typique de l'épizone étant limité au seul tégument des socles. La découverte de nombreuses occurrences de

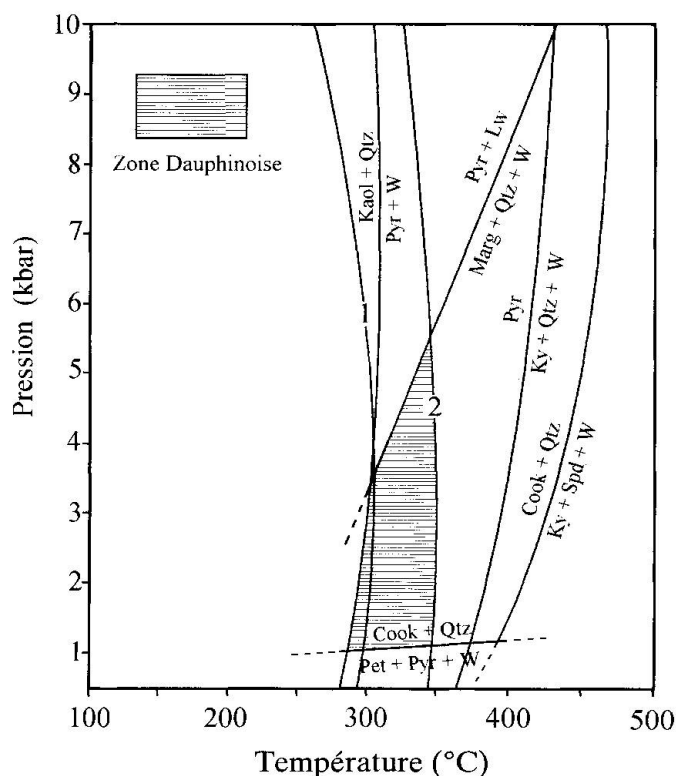


Fig. 2 Grille pétrogénétique et champ de stabilité estimé des paragenèses dauphinoises.

1: Courbe d'équilibre Fe-chlorite + Pyr =

Fe-chloritoïde + Qtz + W

2: Courbe d'équilibre Mg-chlorite + Pyr =

Mg-chloritoïde + Qtz + W

Kaol: kaolinite, Qtz: quartz, Pyr: pyrophyllite, W: eau, Lw: lawsonite, Marg: margarite, Ky: disthène, Spd: spodumène, Cook: cookéite, Pe: pétalite.

cookéite et de pyrophyllite et leur répartition indépendante de celle des socles remet en cause cette distribution du métamorphisme.

Des paragenèses comparables à celles décrites ici (hormis la cookéite et la margarite) ont été identifiées, dans les terrains aaléniens de la zone delphino-helvétique qui prolongent vers le nord la région étudiée. Il s'agit en particulier de la muscovite, de la paragonite, des chlorites ferromagnésiennes, de la pyrophyllite, associées au quartz et à la calcite, ainsi que le chloritoïde à proximité du Cormet de Roselend, près du lac du même nom, dans le Beaufortain, suggérant des températures de 315 à 355 °C pour des pressions de 2 à 4 kbar, caractéristiques d'un métamorphisme épizonal (LEIKINE et al., 1983; GÉLY et BASSIAS, 1990).

Les conditions de croissance de l'association cookéite-quartz correspondent strictement à des pressions de 1 à 15 kbar pour des températures comprises entre 250 et 500 °C (VIDAL et GOFFÉ, 1991). L'absence, même à l'état de reliques, de phases de haute pression telles que la carpholite, l'aragonite ou la lawsonite et la présence de calcite et de margarite (Fig. 2) impliquent en toute rigueur des pressions inférieures à 5–7 kbar.

Au nord des terrains étudiés, au col de la Madeleine, les schistes aaléniens contiennent du chloritoïde ($X_{Mg} = 0.072$) en association avec des chlorites ferreuses ($X_{Mg} = 0.270$), de la margarite, et de la kaolinite en reliques dans des quartz. La cookéite et la pyrophyllite sont absentes.

Les conditions P-T du métamorphisme ont été calculées à l'aide du programme GEOCALC de BROWN et al. (1988). La base de données thermodynamiques utilisée est celle de BERMAN (1988) complétée par les données de VIDAL et GOFFÉ (1991) pour le système $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ et de VIDAL et al. (en préparation) pour le chloritoïde ferreux.

Les paragenèses observées impliquent des minéraux ferromagnésiens substitués (chlorite et chloritoïde) pour lesquels on a pris en compte l'activité des pôles Fe et Mg. Les modèles d'activités employés sont explicités dans THEYE et al. (1992) pour le chloritoïde et dans VIDAL et al. (1992) pour les chlorites ferromagnésiennes dans lesquelles les lacunes possibles d'occupation des sites octaédriques ont été considérées.

Pour les minéraux ferromagnésiens, deux types de calcul ont été effectués, à partir du pôle purement ferreux et du pôle purement magnésien. Pour la réaction mettant en jeu la chlorite et le chloritoïde deux courbes ont ainsi été calculées (Fig. 2). Il existe entre ces deux courbes d'équilibre un écart d'environ 50 °C (Fig. 2) ne pouvant être entièrement expliqué par les incertitudes relatives aux données thermodynamiques (enthal-

pie). Il traduit probablement un écart à l'idéalité des solutions solides fer-magnésium dans la chlorite et le chloritoïde.

La grille pétrogénétique (Fig. 2) permet d'estimer les conditions du métamorphisme alpin qui a affecté la zone dauphinoise au sud du col de la Madeleine à des pressions inférieures à 4–5 kbar et des températures comprises entre environ 280 et 340 °C.

Le col de la Madeleine présente une paragenèse qui, avec le chloritoïde et la margarite, correspond à des températures plus élevées, supérieures à 340 °C mais strictement inférieures à 370–400 °C environ en l'absence de disthène, pour des pressions similaires.

Les conditions estimées correspondent à une évolution prograde du métamorphisme dans un faciès qui reste celui du schiste vert.

Conclusion

Les nombreux gisements de cookéite du Dauphinois constituent les premières occurrences métamorphiques de ce minéral dans le faciès schiste vert dans les Alpes occidentales. Ils montrent que la cookéite peut être un minéral commun des métapelites et confirment son caractère de minéral index du métamorphisme.

La répartition des gisements de cookéite-pyrophyllite dans l'ensemble des terrains aaléniens du Dauphinois n'est pas liée à la proximité des socles cristallins. Cette distribution correspond à l'histoire propre du métasédiment.

Les associations à cookéite-pyrophyllite-Fe-chlorite décrites ici ont permis la détermination des conditions P et T du métamorphisme alpin des séries liasiques dauphinoises. L'extension du faciès schiste vert dans ces régions est beaucoup plus importante que ne le laissaient présager les études antérieures. C'est un métamorphisme significatif qui évolue longitudinalement par rapport à la chaîne, en augmentant du sud vers le nord avec des températures de 270 à 360 °C pour des pressions comparables de 2 à 5 kbar.

Ces nouveaux gisements nous permettent de compléter les données encore partielles sur le métamorphisme qui a affecté les zones externes du système alpin.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'action d'accompagnement ECORS-1991. Nous remercions vivement C. Chopin et O. Vidal pour l'aide et les conseils qu'ils nous ont apportés. Ce manuscrit a bénéficié de la relecture critique de M. Frey.

Références

- AHN, J.H., PEACOR, D.R. et ESSÈNE, E.J. (1985): Coexisting paragonite-phengite in blueschist eclogite: a TEM study. *Amer. Mineral.*, 70, 1193–1204.
- APRAHAMIAN, J. (1988): Cartographie du métamorphisme faible à très faible dans les Alpes françaises par l'utilisation de la cristallinité de l'illite. *Geodynamica Acta* (Paris), 2, 1, 25–32.
- BAILEY, S.W. (1989): Chlorites: structures and crystal chemistry. *Reviews in Mineralogy*, 19, 347–403.
- BERMAN, R.G. (1988): Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$. *J. Petrol.*, 29, 445–522.
- BRAMMAL, A., LEECH, J.G.C. et BANNISTER, F.A. (1937): The paragenesis of cookeite and hydromuscovite associated with gold at Ogofan, Carmathenshire. *Min. Mag.*, 24, 507.
- BROWN, T.H., BERMAN, R.G. et PERKINS, E.H. (1988): GEOCALC: software for calculation and display of pressure-temperature-composition phase diagrams using IBM or compatible personal computer. *Computer and Geosciences*, 14, 279–289.
- ČERNÝ, P. (1970): Compositional variation in cookeite. *Can. Min.*, vol. 10, part. 4, 636–647.
- ČERNÝ, P., POVONDRA, P. et STANEK, J. (1971): Two cookeites from Czechoslovakia: A boron-rich variety and a IIb polytype. *Lithos*, 4, 7–15.
- EL-SHAZLY A.K. et LIU, J.G. (1991): Glaucofane chloritoid-bearing assemblages from NE Oman: petrologic significance and petrogenetic grid for high P metapelites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107, 180–201.
- FISCHER, W., GIBERGY, P. et GLASTRE, P. (1989): Découverte de cookéite ($\text{LiAl}_4(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) dans un filon à carbonates et sulfures du Dôme de La Mure (Isère, France). *Géologie Alpine*, Grenoble, 65, 39–44.
- FRANSOLET, A.M. et SCHREYER, W. (1984): Sudoite, ditriocahedral chlorite: a stable low-temperature phase in the system $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 409–417.
- GÉLY, J.P. et BASSIAS, Y. (1990): Le front pennique: implications structurales d'un métamorphisme transporté (Savoie, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, T. 310, Série II, p. 37–43.
- GOFFÉ, B. (1977): Présence de cookéite dans les bauxites métamorphiques du Dogger de la Vanoise (Savoie). *Bull. Soc. Franç. Minér. Cristall.* 100, 254–257.
- GOFFÉ, B. (1980): Magnésiocarpholite, cookéite et euclase dans les niveaux continentaux métamorphiques de la zone Briançonnaise. Données métamorphiques et nouvelles occurrences. *Bull. Soc. Franç. Minér. Cristall.* 103, 297–302.
- GOFFÉ, B. (1982): Définition du faciès Fe-Mg carpholite-chloritoïde, un marqueur du métamorphisme de HP-BT dans les métasédiments alumineux. Thèse d'Etat. de l'université de Paris VI, 2 vol., 82 fig., 212 p.
- GOFFÉ, B. (1984): Le faciès à carpholite-chloritoïde dans la couverture Briançonnaise des Alpes ligures: un témoin de l'évolution tectono-métamorphique régionale. *Mém. Soc. Géol. It.* 28, 461–479.
- GOFFÉ, B., MURPHY, W.M. et LAGACHE, M. (1987): Experimental transport of Si, Al and Mg in hydrothermal solutions: an application to vein mineralization during high-temperature/low-pressure metamorphism in French Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 97, 438–450.
- GOFFÉ, B. et BOUYBAOUËNE, M.L. (1993): Compositional variations in cookeite from the Alpine metapelites: a new example from the Gibraltar Arc, Northern Morocco. *Eur. J. Mineral.*, soumis.
- LEKINE, M., KIENAST, J.R., ELTCHANINOFF-LANCELOT, C. et TRIBOULET, S. (1983): Le métamorphisme polyphasé des unités dauphinoises entre Belledonne et Mont-Blanc (Alpes occidentales). Relation avec les épisodes de déformation. *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XXV, n° 4, p. 575–587.
- QUENSEL, P. (1937): Mineral from Varutrask pegmatite. VI. On the occurrence of cookeite. *Geol. Foren. Forhandl.*, 59, 262–268.
- SARTORI, M. (1988): L'unité du Barrhorn (zone pennique, Valais, Suisse). Thèse de doctorat de l'université de Lausanne, 150 p.
- THEYE, T. (1988): Aufsteigende Hochdruckmetamorphose in Sedimenten der Phyllit-Quartzit-Einheit Kretas und Peloponnes. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 68 fig, 224 p.
- THEYE, T. et SEIDEL, E. (1991): Petrology of low-grade/high-pressure metapelites from the External Hellenides (Crete, Peloponnese). A case study with attention to sodic minerals. *Eur. J. Mineral.*, 3, 343–366.
- THEYE, T., SEIDEL, E. et VIDAL, O. (1992): Carpholite, sudoite, and chloritoid in low-grade/high-pressure metapelites from Crete and the Peloponnese, Greece. *Eur. J. Mineral.*, 4, 487–507.
- VIDAL, O. et GOFFÉ, B. (1991): Cookeite experimental study and thermodynamical analysis of its compatibility relations in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 108, 72–81.
- VIDAL, O., GOFFÉ, B. et THEYE, T. (1992): Experimental study of the stability of sudoite and magnésiocarpholite and calculation of a new petrogenetic grid for the system $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *J. metamorphic Geol.*, 10, 603–614.

Manuscrit reçu le 4 avril 1993; manuscrit révisé accepté le 10 juin 1993.