

Contr. Mineral. and Petrol. 30, 296—313 (1971)
© by Springer-Verlag 1971

La lherzolite à amphibole du gisement de Causou (Ariège, France)

F. CONQUÉRÉ

Laboratoire de Minéralogie, Muséum d'Histoire Naturelle, Paris

61, Rue de Buffon

Reçu le 26 novembre 1970

The Amphibole Lherzolite from Causou (Ariège, France)

Abstract. The Causou outcrop consists mostly of a spinel-bearing lherzolite with irregular patches of amphibole lherzolite. The characteristic paragenesis of the latter is: forsterite + bronzite + Ti-rich K-bearing pargasite \pm diopside, with 10 to 15% amphibole in the rock.

Petrographic and chemical analysis of the two types of rocks and their constituent minerals lead to the conclusion that the spinel-lherzolite recrystallized locally as amphibole lherzolite in the presence of a gas phase containing water, and probably Ti and alkali elements as well, at approximately 7 to 8 Kb and 1100°C (for $P_{H_2O} = P_{total}$). Two hypothesis could account for this local recrystallization:

1. The amphibole lherzolite could represent a subsolidus recrystallization of the spinel lherzolite occurring in the stability field of plagioclase lherzolite at the time of the emplacement.

2. Or, in the same P - T conditions, the Ti-pargasite could precipitate from a liquid of nephelinite composition produced by limited partial melting of the spinel lherzolite.

In either case the original peridotite that produced the two existing types at Causou could be considered as an undifferentiated fragment of the upper mantle.

C'est Lacroix qui en 1894 signale pour la première fois, à proximité du village de Causou, un gisement « constitué en partie par un type spécial de lherzolite riche en hornblende... essentiellement constituée de péridot, de bronzite et de hornblende »; le diopside n'existe qu'en traces et le spinelle est absent. Lacroix interprète successivement cette roche (1894, 1901, 1917) comme un cas particulier dû à une concentration locale de l'amphibole généralement présente en très faible quantité dans les lherzolites des Pyrénées, puis comme un type intermédiaire entre la lherzolite à spinelle et la « péridotite à hornblende » d'Argein; enfin, s'appuyant sur la composition chimique il assimile la lherzolite à amphibole de Causou, au même titre que la péridotite d'Argein, aux cortlandites.

En réalité la lherzolite à amphibole de Causou diffère tant par son mode de gisement et sa structure que par sa composition minéralogique et chimique de la cortlandite d'Argein. Elle paraît donc constituer un type tout à fait exceptionnel dans la série ultrabasique des Pyrénées. Ce caractère nous a amené à en reprendre l'étude de façon détaillée.

La lherzolite de Causou qui affleure sur quelques milliers de mètres carrés fait intrusion dans les calcaires urgo-aptiens. La masse principale de l'affleurement est occupée par une lherzolite à spinelle semblable pour l'essentiel (grain, texture, composition minéralogique) aux lherzolites des autres gisements pyrénéens. Comme dans ces dernières, on peut y observer quelques lits centimétriques enrichis en diopside chromifère et en spinelle, généralement parallèles à la schistosité

ancienne qui, comme à Lherz (Lallemant, 1967) est ici bien visible. De même, de minces zones de brèches calcaro-lherzolitiques existent au contact des deux roches. La lherzolite à spinelle possède cependant un caractère particulier: elle contient localement quelques grands cristaux d'amphibole de couleur noire disséminés en très petit nombre et formant parfois des groupements de deux ou trois individus cristallins.

La lherzolite à amphibole proprement dite apparaît au sein de la lherzolite «normale» sous la forme de poches à limites très indécises, d'une dimension de l'ordre du mètre carré, dont nous n'avons pu observer que deux exemples dans le gisement. L'amphibole forme dans cette roche de nombreux cristaux semblables à ceux décrits dans la lherzolite «normale», fréquemment disposés en trainées orientées de cristaux allongés suivant l'axe C. L'olivine, le plus souvent altérée, forme un fond rougeâtre ou jaunâtre dans lequel on reconnaît de grandes plages de bronzite et quelques grains de petite taille de diopside chromifère. On peut très localement observer de minces zones, de quelques centimètres de puissance, constituées d'un agrégat de gros cristaux d'amphibole accompagnés de quelques grains de carbonates ou parcouru de veinules carbonatées. Ces amphibolites sont intercalées entre la lherzolite à amphibole et des niveaux de quelques centimètres d'épaisseur uniquement constitués de carbonates, qui paraissent former des sortes de cloisons dans la lherzolite à amphibole. Telles qu'elles se présentent sur le terrain ces concentrations de cristaux d'amphibole rappellent les *lherzites* décrites par Lacroix (1917) dans la lherzolite de l'étang de Lherz.

Etude au microscope

1. La lherzolite à spinelle (lherzolite «normale»)

C'est une roche à structure panxénomorphe, à gros grain (2 mm en moyenne), constituée essentiellement d'olivine et de pyroxènes; le spinelle est le minéral accessoire et les éléments mineurs sont représentés par de l'amphibole et des sulfures (pentlandite, pyrrhotine et chalcopyrite). La cataclase se manifeste par des macles mécaniques bien développées dans l'olivine et l'orthopyroxène, parfois par un net étirement de ces minéraux. Une matrice à grain fin, d'abondance très variable, occupe les interstices; elle est également constituée pour la plus grande part d'olivine et de pyroxènes.

L'*olivine* (environ 60% du volume de la roche) n'est jamais serpentinisée. Elle contient parfois des grains subautomorphes de spinelle, optiquement semblable à celui de la roche.

L'*orthopyroxène* (jusqu'à 30%) forme généralement de grandes plages, de taille semblable à celle des grains d'olivine, et montre fréquemment de très fines exsolutions de clinopyroxène. Il peut contenir des inclusions automorphes ou subautomorphes de spinelle et d'olivine.

Le *clinopyroxène* de couleur verdâtre, est toujours nettement moins abondant que l'orthopyroxène (de 10 à 15% environ) et forme en général des grains de plus petite taille. On n'y observe que rarement la présence d'exsolutions d'orthopyroxène. Dans la lherzolite «normale» type, c'est-à-dire dépourvue de grands cristaux d'amphibole, le diopside n'est pas transformé dans le cas le plus général. Cependant, très localement, on observe le remplacement partiel de ce minéral

par une amphibole brun pâle: le remplacement débute aux bords du cristal et se propage le long des clivages; l'amphibolisation est parfois accompagnée de l'apparition de très petites plages xénomorphes de plagioclase disséminées dans la masse du grain de pyroxène. Dans les cas de transformation plus poussée, le cristal est affecté par une forte corrosion qui va jusqu'à morceler la plage initiale en plusieurs petits grains noyés dans le ciment.

Le *spinelle* (jusqu'à 1% du volume de la roche) est en plages xénomorphes dépassant rarement 1 mm; il est, dans la lherzolite «normale» type, d'une couleur vert pomme prononcée. On notera que ce minéral n'apparaît plus que sous la forme de fins vermicules dans les zones où le diopside est transformé. Il est corrodé et acquiert une bordure de couleur brunâtre au contact de ces zones. Dans la matrice, qui présente une structure «en puzzle», un peu d'amphibole de couleur généralement jaune-orangé est associée aux petits grains d'olivine et de pyroxènes; elle y est disséminée en plages de formes quelconques, en «lambeaux», souvent bien clivés.

2. La lherzolite à amphibole

La structure est la même que celle de la lherzolite à spinelle; l'olivine et les pyroxènes montrent les effets d'une cataclase généralement plus accentuée, qui affecte également l'amphibole (macles mécaniques, cristaux ployés, etc...). En outre, la matrice occupe souvent un volume important de la roche. Il est difficile de déterminer avec précision la composition modale de la roche, les teneurs en minéraux essentiels variant très rapidement même à l'échelle de l'échantillon. L'examen d'un grand nombre de lames minces permet cependant de fixer la *composition moyenne* approximativement à: 60—70% olivine, environ 20% orthopyroxène, 10 à 15% amphibole et 2 à 5% clinopyroxène; le spinelle est beaucoup moins abondant que dans la lherzolite «normale», les sulfures sont entièrement altérés.

L'*olivine* est souvent soit envahie par de très fines lamelles d'hématite, soit partiellement iddingsitisée; elle peut contenir quelques grains de spinelle.

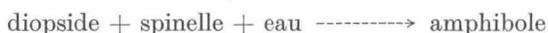
L'*orthopyroxène* est semblable à celui de la lherzolite à spinelle et possède les mêmes inclusions.

L'*amphibole* en grands cristaux à bords souvent rectilignes est pauvre en inclusions; elle peut toutefois contenir quelques grains de spinelle, d'olivine et d'orthopyroxène, très rarement des plages de diopside à «exolutions» de plagioclase. L'amphibole est modérément pléochroïque (jaune orangé clair à jaune pâle presque incolore); son angle d'extinction et le degré d'anisotropie sont peu élevés.

Le *clinopyroxène* se présente sous deux aspects. Dans le premier cas il forme des grains verdâtres interstitiels, de taille très inférieure à celle des minéraux précédents; on peut parfois y observer des exolutions très fines et très peu abondantes difficilement déterminables. Dans le second cas il forme des plages de taille variable, toujours transformées. Les transformations sont semblables à celles observées dans quelques-uns des clinopyroxènes de la lherzolite «normale». Elles débutent par l'apparition dans la masse du cristal de cavités parfois très abondantes, dans certains cas de forme automorphe, emplies soit d'une substance incolore de faible indice et de biréfringence très basse, soit de plagioclase. Dans un

stade plus avancé le diopside est remplacé par une amphibole brun pâle qui peut envahir la masse du cristal. Le remplacement peut aboutir à la formation de cristaux «mixtes» constitués d'une intercroissance de clinopyroxène incolore et d'amphibole. Plus rarement on observe des associations de type graphique constitués de deux clinopyroxènes dont l'un forme des lames orientées sur le réseau du second. Ces diverses associations peuvent se disposer en couronne autour de l'orthopyroxène ou bien remplacer partiellement celui-ci.

Le *spinelle*, très peu abondant est de couleur verdâtre très foncé, parfois presque opaque. La matrice a la structure et, pour l'essentiel, la composition minéralogique du ciment de la lherzolite «normale». Elle corrode fortement les minéraux précédents et ses divers caractères témoignent manifestement d'une recristallisation intense. On y signalera outre des plages poecilites de carbonates et exceptionnellement des paillettes de phlogopite, la présence de petits cristaux interstitiels de plagioclase se développant localement en grains maclés pouvant atteindre 1 mm. On complètera les observations faites sur les deux roches types du gisement de Causou en signalant qu'il existe des rapports très étroits dans l'espace entre la paragenèse de la péridotite normale, identique pour l'essentiel à celle des lherzolites à spinelle, et la paragenèse de la péridotite à amphibole caractérisée par l'assemblage: olivine + orthopyroxène + amphibole ± diopside. Outre la présence de cristaux d'amphibole disséminés dans la lherzolite à spinelle, on observe dans la lherzolite à amphibole le passage très rapide de l'une à l'autre des paragenèses à l'échelle de l'échantillon et même de la lame mince. En bref, il semble que les rapports observés entre les deux assemblages résultent d'une réaction qui peut s'écrire schématiquement:



et dont il reste à établir le bilan chimique et les conditions physiques de sa réalisation.

Composition chimique

1. Composition chimique globale

Dans le Tableau 1 nous avons joint aux résultats des analyses des deux types de lherzolite du gisement de Causou (anal. 1 et 2) trois nouvelles analyses de lherzolite à spinelle, choisies parce que dépourvues de serpentine, provenant d'autres gisements dans l'Ariège: les lherzolites de Vicdessos (anal. 3) et de Lherz (anal. 4) sont identiques, minéralogiquement, à la roche type définie par Lacroix. La lherzolite de Suc (anal. 5) possède en revanche quelques caractères particuliers. Il existe en effet dans cette roche des zones disposées en bandes millimétriques qui traversent la masse de la lherzolite et dans lesquelles le diopside chromifère et le spinelle vert-bouteille, se transforment de manière complexe pour donner naissance à de l'amphibole et du plagioclase. Le diopside subit des transformations analogues à celles que nous avons observées dans la lherzolite de Causou; le spinelle est fortement corrodé et opacifié et dans certains cas contient de nombreux grains opaques, probablement de magnétite. Le plagioclase apparaît sous la forme de plages xénomorphes, le plus souvent maclées, pouvant se prolonger en fines veinules interstitielles. De part et d'autre de ces zones les minéraux de la lherzolite sont parfaitement conservés.

Tableau 1

	1	2	3	4	5	Norme C.I.P.W.				
						1	2	3	4	5
SiO ₂	43,54	44,10	44,50	44,20	43,66					
TiO ₂	0,70	0,40	0,22	0,18	0,18	Or	1,11	—	—	—
Al ₂ O ₃	3,18	2,83	2,90	3,04	2,75	Ab	5,76	3,14	1,57	2,10
Cr ₂ O ₃	0,35	0,32	0,45	0,38	0,33	An	5,00	5,84	6,95	8,06
Fe ₂ O ₃	2,85	2,23	2,80	3,04	2,77	Di	11,76	10,28	8,48	5,68
FeO	5,68	6,64	4,70	4,80	5,60	Hy	5,50	12,32	21,18	20,92
NiO	0,25	0,42	0,40	0,30	0,30	Ol	64,46	63,28	56,71	56,53
MnO	0,14	0,10	0,10	0,10	0,14	Ilm.	1,37	0,76	0,46	0,46
MgO	38,30	38,96	39,52	39,43	40,20	Mgt	4,17	3,29	4,25	4,35
CaO	4,05	3,80	3,60	3,09	3,00	Chr.	0,47	0,42	0,62	0,52
Na ₂ O	0,74	0,39	0,22	0,25	0,26					
K ₂ O	0,20	0,09	tr.	tr.	tr.					
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—					
H ₂ O ⁺	0,50	0,40	1,00	1,15	1,40					
H ₂ O ⁻	0,10	0,17	0,06	0,15	0,13					
Total	100,58	100,85	100,47	100,11	100,72					

1 = Lherzolite à amphibole de Caussou (Ariège). 2 = Lherzolite à spinelle (lherzolite « normale ») de Caussou (Ariège). 3 = Lherzolite de Vicdessos (Ariège). 4 = Lherzolite de Lherz (Ariège). 5 = Lherzolite de Suc (Ariège).

Analyses Barbier, 1970 (Laboratoire de Minéralogie du Muséum).

Les points les plus remarquables révélés par les analyses sont:

- la quasi identité de composition des lherzolites à spinelle des divers gisements, du moins en ce qui concerne les éléments majeurs, la lherzolite à spinelle « normale » de Caussou étant sensiblement plus riche en titane et en alcalins;
- le fait que la lherzolite à amphibole de Caussou ne diffère nettement des lherzolites à spinelle que par des teneurs également plus élevées en alcalins et en titane¹.

2. Composition chimique des minéraux

Les minéraux essentiels de la lherzolite à amphibole ainsi que les pyroxènes des lherzolites de Caussou et de Vicdessos ont été analysés après séparation par les méthodes habituelles puis triage manuel sous la loupe binoculaire.

a) Les clinopyroxènes (Tableau 2)

Ils se groupent très étroitement dans le champ du diopside du diagramme de Poldevaart. La somme de MgSiO₃, CaSiO₃ et FeSiO₃ forme de 76 à 81% des constituants. Les teneurs en jadéite et molécule de Tschermak varient beaucoup

¹ Les analyses 1 et 3 ont été réalisées sur les mêmes échantillons (collection de minéralogie pu Muséum) dont les analyses effectuées par Raoult, furent publiées par Lacroix (1917, p. 383, anal. 2 et 5). La comparaison des analyses montrent d'importantes différences dans les résultats du dosage de l'alumine et du magnésium, les teneurs des autres éléments ne montrant que des variations négligeables. Dans les analyses publiées par Lacroix les teneurs en alumine atteignent des valeurs tout à fait incompatibles avec le mode et la composition chimique des minéraux des roches considérées (respectivement 6,22 et 6,95 pour les échantillons correspondant aux analyses 1 et 3 présentées ici).

Tableau 2

	CP 1	CP 2	CP 3	<i>Formule structurale</i>			
				1	2	3	
SiO ₂	51,04	51,10	51,48				
TiO ₂	0,72	0,70	0,40				
Al ₂ O ₃	4,70	7,00	5,60	Si	1,875	1,847	1,879
Cr ₂ O ₃	1,10	0,80	0,80	Al ^{IV}	0,125	0,153	0,121
Fe ₂ O ₃	1,58	1,02	1,70	Al ^{VI}	0,078	0,145	0,120
FeO	1,70	1,70	1,45	Ti	0,020	0,020	0,011
MnO	0,07	0,07	0,07	Cr	0,031	0,022	0,022
MgO	15,78	15,35	15,68	Fe ³⁺	0,044	0,028	0,046
CaO	20,60	20,50	20,75	Fe ²⁺	0,053	0,052	0,044
Na ₂ O	1,75	2,06	1,53	Mg	0,864	0,828	0,853
K ₂ O	tr.	0,06	tr.	Ca	0,811	0,793	0,811
P ₂ O ₅	—	—	—	Na	0,124	0,143	0,107
H ₂ O ⁺	0,52	0,30	0,40	K	—	—	—
H ₂ O ⁻	0,18	0,20	0,18				
Total	99,74	100,86	100,04	Total	4,025	4,031	4,014

CP 1 = Clinopyroxène de la lherzolite à amphibole de Caussou. CP 2 = Clinopyroxène de la lherzolite à spinelle (lherzolite «normale») de Caussou. CP 3 = Clinopyroxène de la lherzolite à spinelle de Vicdessos.

Analyses Barbier, 1970 (Laboratoire de Minéralogie du Muséum).

plus fortement de même que le rapport de ces deux composants. Cependant, dans le diagramme Al^{IV}/Al^{VI} de Aoki et Kushiro (1968), qui a le mérite d'éliminer les erreurs dues au dosage souvent peu précis des éléments mineurs, en particulier de Fe³⁺, les clinopyroxènes sont situés à proximité les uns des autres dans le champ intermédiaire entre faciès granulite et faciès élogite.

Le résultat le plus important de ces analyses est de montrer que le diopside chromifère qui apparaît en petits grains interstitiels dans de la lherzolite à amphibole de Caussou, se distingue nettement du clinopyroxène de la lherzolite «normale» du même gisement par des teneurs nettement moins élevées en aluminium et dans une moindre mesure en sodium.

Le calcul des paramètres α_c et β_c de O'Hara (1967b) permet d'attribuer ces différences de composition à des différences dans les conditions de cristallisation: d'après la grille «prévisionnelle» établie par cet auteur le clinopyroxène de la lherzolite à amphibole est en équilibre (dans la paragenèse olivine + orthopyroxène + amphibole \pm diopside) entre 7 et 8 kb de pression, à une température de 1100° C alors que le diopside de la lherzolite «normale» est en équilibre à 15 kb, à même température soit dans des conditions d'équilibre identiques à celles des clinopyroxènes de la lherzolite à spinelle de Vicdessos (anal. 3) et de la lherzolite à spinelle de Moun Caou (Pyrénées Atlantiques) étudiée par Rio (1968). Les conditions d'équilibre du diopside de la lherzolite à amphibole se rapprochent de celles indiquées par les clinopyroxènes des lherzolites de Moncaup (Monchoux et Besson, 1969) dont les curieuses variations (8 à 12 kb, 1100 à 1200° C) dans le même gisement sont difficiles à interpréter en l'absence d'une description détaillée des échantillons analysés.

Tableau 3

	OP1	OP2	OP3	Formule structurale			
				1	2	3	
SiO ₂	53,04	53,26	53,12				
TiO ₂	0,30	0,30	0,10				
Al ₂ O ₃	3,25	3,60	3,20				
Cr ₂ O ₃	0,18	0,36	0,20				
Fe ₂ O ₃	2,65	1,90	2,58				
FeO	4,82	5,68	4,97				
MnO	0,14	tr.	0,14				
MgO	34,50	34,60	34,50				
CaO	0,78	0,63	0,97				
Na ₂ O	0,15	0,10	0,10				
K ₂ O	—	—	—				
P ₂ O ₅	—	—	—				
H ₂ O ⁺	0,60	0,25	0,60				
H ₂ O ⁻	0,20	tr.	0,20				
Total	100,61	100,68	100,68				
				Si	1,850	1,846	1,854
				Al ^{IV}	0,134	0,148	0,132
				Al ^{VI}	—	—	—
				Ti	0,008	0,008	0,002
				Cr	0,004	0,010	0,006
				Fe ³⁺	0,069	0,050	0,068
				Fe ²⁺	0,140	0,165	0,145
				Mn	0,004	—	0,004
				Mg	1,794	1,788	1,795
				Ca	0,029	0,023	0,036
				Na	0,010	0,006	0,006
				Total	4,042	4,044	4,047
				100 mg/Mg + Fe ²⁺ + Fe ³⁺ + Mn:			
					89,3	89,3	89,3

OP1 = Orthopyroxène de la lherzolite de Caussou. OP2 = Orthopyroxène de la lherzolite à spinelle (lherzolite «normale») de Caussou. OP3 = Orthopyroxène de la lherzolite à spinelle de Vicdessos.

Analyses Barbier, 1970 (Laboratoire de Minéralogie du Muséum).

Enfin, on notera la plus grande richesse en titane des clinopyroxènes aussi bien dans la lherzolite à spinelle que dans la lherzolite à amphibole de Caussou comparée aux teneurs habituelles en cet élément des diopsides analysés dans les autres gisements pyrénéens et dans les gisements du même type décrits ailleurs dans le monde (Beni-Bouchera, Kornprobst, 1969; Lizzard, Green, 1964).

b) Les orthopyroxènes (Tableau 3).

Les trois orthopyroxènes analysés ont une composition remarquablement semblable tant en ce qui concerne les éléments mineurs que les éléments majeurs: ce sont des bronzites très proches de l'enstatite. On n'observe donc dans ces minéraux aucune des différences de composition constatées entre les clinopyroxènes de la lherzolite à amphibole et ceux des lherzolites à spinelle. On peut cependant noter que les teneurs en alumine de ces trois bronzites sont sensiblement inférieures à celles des orthopyroxènes des lherzolites de Moncaou et de Moun Caou.

c) L'amphibole (Tableau 4)

L'amphibole de la lherzolite de Caussou (AP1) a des caractères chimiques particuliers qui la distinguent nettement de l'amphibole interstitielle rose pâle à brun pâle normalement présente, généralement en traces, dans toutes les lherzolites à spinelle des Pyrénées et dont le type a pu être séparé de la lherzolite du Portet d'Aspet² (Haute Garonne, AP3). Dans cette roche l'amphibole est en effet une

² L'analyse publiée ici nous a été obligeamment communiquée par M. Muffat que nous remercions vivement.

Tableau 4

	AP1	AP2	AP3	Formule structurale (sur la base de 23 (O))			
				AP1	AP2	AP3	
SiO ₂	41,54	41,52	42,87				
TiO ₂	3,20	3,40	0,77				
Al ₂ O ₃	13,90	13,80	16,01				
Cr ₂ O ₃	0,80	0,32	1,07	Si	5,899	5,904	6,029
Fe ₂ O ₃	3,00	3,31	1,97	Al ^{IV}	2,101	2,096	1,971
FeO	2,80	3,55	2,80	Al ^{VI}	0,230	0,219	0,684
MnO	0,04	tr.	tr.	Ti	0,341	0,367	0,085
MgO	17,73	17,50	18,26	Cr	0,085	0,034	0,118
CaO	11,80	11,50	11,07	Fe ³⁺	0,324	0,350	0,211
Na ₂ O	3,10	3,25	3,52	Fe ²⁺	0,333	0,419	0,330
K ₂ O	1,05	0,87	0,05	Mg	3,756	3,708	3,830
P ₂ O ₅	—	—	—	Ca	1,793	1,751	1,666
H ₂ O ⁺	0,20	0,50	0,69	Na	0,854	0,897	0,955
H ₂ O ⁻	0,10	0,04	0,04	K	0,188	0,154	—
Total	99,26	99,56	99,12	Z	8,000	8,000	8,000
				Y	5,069	5,097	5,258
				X	2,835	2,802	2,621
				mg	0,85	0,83	0,88

AP1 = Amphibole de la lherzolite de Caussou. AP2 = Amphibole de la pseudo-lherzite de Caussou. Analyses Barbier, 1970 (Laboratoire de Minéralogie du Muséum). AP3 Amphibole de la lherzolite à spinelle du Portet d'Aspet (Haute-Garonne). Analyse Laboratoire de Pétrographie de la Faculté des Sciences de Paris.

pargasite sensu stricto dont le seul caractère particulier est une teneur élevée en chrome³.

L'amphibole de Caussou a un rapport mg: Mg/Mg+Fe²⁺+Fe³⁺ très voisin; elle est moins riche en alumine et en chrome que la pargasite précédente mais s'en distingue surtout par sa richesse en titane et en potassium. Ces deux caractères, ajoutés au fait que le calcul de la formule structurale sur la base de 23 (O) fait apparaître un excès de Al^{IV} par rapport au maximum théorique, rapprochent cette amphibole des hornblendes de type «kaersutite» dans lesquelles ces caractères chimiques sont spécifiques. On remarquera que cette amphibole, que nous définirons sous le terme de *pargasite titanifère*, ne contient qu'une très faible quantité d'eau de constitution, le fluor paraissant absent. Des essais répétés à des températures atteignant 1100° C permettent de penser, la méthode d'analyse ne pouvant être ici incriminée, que l'écart entre la teneur réelle en eau et celle qui correspond à la formule théorique est due à des caractères cristallographiques particuliers non encore déterminés.

C'est une amphibole de composition identique (AP2) qui constitue les minces niveaux d'amphibolites décrits plus haut dans la lherzolite à amphibole. Ceux-ci ne constituent donc que des zones de concentration de la pargasite titanifère de la lherzolite et ne doivent donc pas être confondus avec les filonnets de lherzites

³ Une étude à la microsonde effectuée par J. Babkine (communication personnelle) a montré qu'une amphibole du même type présente dans une lherzolite de Prades (Ariège) a une composition très voisine de celle du Portet d'Aspet seules, variant d'un cristal à l'autre, et parfois du simple au double, les teneurs en Cr et Ti (valeurs moyennes: TiO₂=0,70; Cr₂O₃=0,50).

Tableau 5. *Analyse de l'olivine de la lherzolite à amphibole de Caussou*

SiO ₂	40,76	<i>Formule structurale</i>	
TiO ₂	0,17	Si	1,007
Al ₂ O ₃	0,60	Al	0,018
Cr ₂ O ₃	0,14	Ti	0,003
Fe ₂ O ₃	3,08	Cr	0,003
FeO	6,30	^a Fe ²⁺	0,187
NiO	0,50	Ni	0,010
MnO	0,12	Mg	1,750
MgO	47,50		
Na ₂ O	—	Total	1,978
K ₂ O	—		
P ₂ O ₅	—		
H ₂ O ⁺	0,96		
H ₂ O ⁻	0,14		
Total	100,27		

^a Tout Fe en FeO.

Analyse Barbier (1970) (Laboratoire de Minéralogie du Muséum).

décrits par Lacroix. Ces derniers sont en effet essentiellement constituées de kaersutite souvent accompagnée de quantités variables de phlogopite titanifère.

d) Autres minéraux

L'*olivine* (Tableau 5) de la lherzolite à amphibole est une forstérite à 10% de fayalite et ne se distingue par aucun autre de ses caractères chimiques de la composition habituelle des forst  rites dans les roches ultrabasiq  es de type lherzolite.

Les *spinelles* des deux types de roches du gisement de Caussou n'ont pas été analysés mais la mesure de leur paramètre et de leur indice reportée sur le diagramme de Dear et al. (1962) indique:

1) que le spinelle de la lherzolite « normale » a la composition d'un *pl  onaste chromifère* ($a = 8,119 \text{   }$; $n = 1,788$);

2) que le spinelle de la lherzolite à amphibole est une *picotite* ($a = 8,164 \text{   }$; $n_{\text{moyen}} = 1,89$), les mesures d'indice indiquant en outre une certaine hétérogénéité de composition.

Discussion

On peut tirer des données pétrographiques et chimiques exposées plus haut la conclusion suivante: les rapports observés dans le gisement de Caussou entre la paragenèse de la lherzolite    spinelle et l'assemblage de la lherzolite à amphibole paraissent résulter d'une recrystallisation locale de la première par suite d'un abaissement de la pression, en présence d'une phase hydratée. La recrystallisation se traduit par la formation d'une amphibole aux dépens principalement du clinopyroxène et du spinelle primaires; elle laisse un faible résidu de spinelle enrichi en fer et en chrome tandis qu'apparaît une petite quantité de diopside stable dans les nouvelles conditions. Le bilan chimique indique que la recrystallisation ne se traduit que par une concentration du titane et des alcalins, particulièrement du potassium, dans la lherzolite à amphibole. Ces éléments sont pour l'essentiel contenus dans

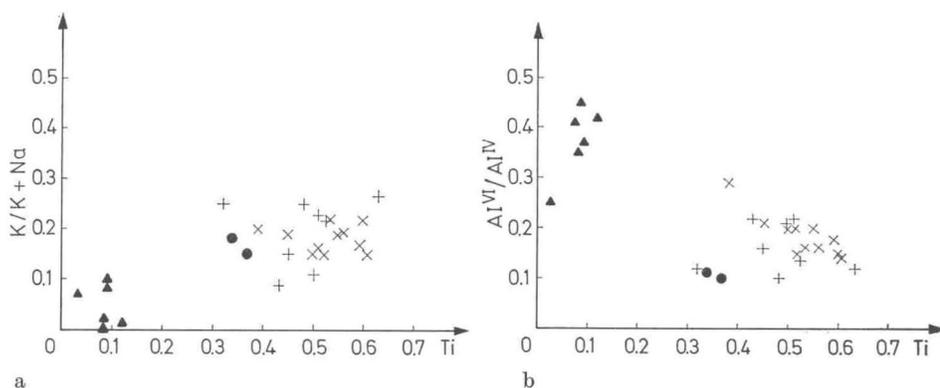


Fig. 1 a et b. Variations de $K/K + Na$ (a) et de Al^{VI}/Al^{IV} (b) en fonction de Ti dans les amphiboles des lherzolites (triangles noirs), des enclaves de wehrlites (croix obliques), des ariégites et des lherzites (croix droites) et de la lherzolite de Caussou (cercles noirs). Données: Aoki (1970), Best (1970), Conquére (inédites), Green (1964), Kuno (1967), MacKenzie (1960), Mottana et Edgar (1970), Prinz et Nehru (1969) et Varne (1970)

une pargasite titanifère dont certains des caractères cristallochimiques sont ceux des kaersutites observées dans les lherzites et les ariégites de Lherz (Mottana et Edgar, 1970; Conquére, données inédites). Ceci est bien visible en ce qui concerne les rapports $K/K + Na$ et Al^{VI}/Al^{IV} dont les valeurs en fonction de Ti ont été reportées dans les diagrammes de la Fig. 1: les points représentatifs de la pargasite titanifère de Caussou sont situés à proximité immédiate du champ délimité par la composition des amphiboles des ariégites et lherzites de Lherz et sont ainsi nettement séparés du champ défini par la composition des amphiboles analysées dans les lherzolites de Tinaquillo (Mac Kenzie, 1960), de Lizzard (Green, 1964) et de Saint Paul Rocks (Melson et al., 1967) ainsi que dans les enclaves d'Itinome Gata (Kuno, 1967) et du volcan de Kirsh (Varne, 1970). Dans ces gisements, la composition des amphiboles est en effet semblable pour l'essentiel à celle du Portet d'Aspet: ce sont des pargasites qui montrent, lorsque cet élément a été dosé, des teneurs variables mais toujours élevées en chrome, les variations de composition portant principalement sur Si-Al d'une part et Ca-Na d'autre part. En revanche, on peut voir sur les mêmes diagrammes que les kaersutites des enclaves de péridotites décrites dans certains basaltes alcalins (Prinz et Nehru, 1969; Aoki, 1970; Best, 1970), bien que présentes dans des roches dont la structure, la paragenèse (généralement des wehrlites) et la composition chimique (voisine de celles des cortlandites) sont nettement distinctes de celles de la lherzolite de Caussou, tombent dans le champ des amphiboles des ariégites et donc très près des points représentatifs de la pargasite titanifère. Il semble ainsi difficile de tirer de ces observations des conclusions quant aux conditions de cristallisation respectives des groupes d'amphibole mis en évidence. L'hypothèse que les valeurs élevées du rapport Al^{VI}/Al^{IV} dans les pargasites des lherzolites traduiraient des conditions de cristallisation à pression relativement forte, comme cela semble être le cas général pour les amphiboles calciques (Fabriès, 1966), est contredite ici par le fait que l'amphibole du faciès recristallisé de Lizzard a un rapport Al^{VI}/Al^{IV}

beaucoup plus élevé que celui de la pargasite titanifère alors que les paramètres α_c et β_c des clinopyroxènes des deux roches indiquent des conditions de pression identiques au moment de la recristallisation (voir in O'Hara, 1967 b).

Ces diagrammes ont donc, dans l'immédiat, pour principal mérite de souligner le caractère exceptionnel de la lherzolite de Caussou, comparée aux lherzolites à amphibole décrites jusqu'à aujourd'hui. Les hypothèses avancées par les auteurs concernant les conditions de formation des pargasites dans ces roches: recristallisation topochimique ou amphibole primaire du manteau supérieur, ne sont donc pas applicables au cas étudié ici.

Force est alors d'envisager, pour tenter d'expliquer la concentration du titane et des alcalins dans la lherzolite de Caussou, l'éventualité soit d'un mécanisme spécial de recristallisation soit d'une composition chimique particulière de la lherzolite originelle, ces deux possibilités pouvant évidemment concourir.

Il semble qu'on puisse admettre avant toute discussion:

1. que la recristallisation s'est effectuée dans des conditions de température et de pression totale voisines de celles indiquées par le clinopyroxène de la lherzolite à amphibole, soit environ: 7—8 kb à 1100° C;

2. que l'eau nécessaire à la formation de la pargasite titanifère était présente sous la forme d'une phase séparée, gazeuse, à la température envisagée. C'est à dire que la recristallisation se serait effectuée dans des conditions de pression d'eau voisine de la pression totale. Dans l'alternative ($p_{H_2O} < p$ totale) il faudrait en effet supposer que l'eau était contenue dans une phase minérale présente dans la lherzolite originelle. Or, le seul minéral hydraté observé dans les lherzolites à spinelle est la pargasite, toujours en très faible quantité. La recristallisation se serait donc effectuée dans des conditions de très faible pression d'eau et il serait alors difficile d'expliquer la rareté des lherzolites à amphibole du type Caussou dans les séries lherzolitiques.

A partir de ces postulats on peut, en ce qui concerne le mécanisme de la recristallisation, envisager deux hypothèses:

A. La formation de la lherzolite à amphibole résulte de réactions de subsolidus

Les réactions possibles au sein de la lherzolite à spinelle peuvent être représentées dans un diagramme pression-température montrant les divers assemblages en équilibre dans le système $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (CMASH). Le diagramme proposé par O'Hara (1967 a, Fig. 1—4) a été modifié en fonction des données nouvelles apportées par Kushiro et al. (1968) sur le solidus de la lherzolite à spinelle dans des conditions $p_{H_2O} = p$ totale et par Gilbert (1968) et Kushiro (1968) sur le domaine de stabilité de la pargasite dans les mêmes conditions⁴ (Fig. 2).

Dans les conditions de cristallisation indiquées par les paramètres α_c et β_c du diopside de la lherzolite à amphibole on voit que la pargasite n'est pas stable. Le diagramme montre en effet que la lherzolite à spinelle recristallise dans le champ de stabilité de l'assemblage: forstérite + diopside + enstatite + anorthite (assemblage II), qui en présence de vapeur d'eau est situé au-dessus de la limite supérieure de stabilité thermique de la pargasite à la pression de 7—8 kb. Or,

⁴ Le champ de stabilité de la pargasite pure coexistant avec un clinopyroxène (Gilbert, 1968) est peu différent, du moins à haute pression, du champ de stabilité de la pargasite dans la lherzolite naturelle (Kushiro, 1968).

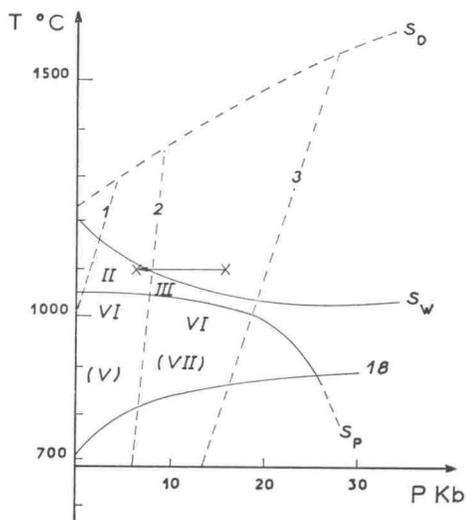


Fig. 2. Partie du diagramme pression-température des équilibres dans le système C.M.A.S.H. d'après O'Hara (1967a) modifié à partir des travaux de Kushiro et al. (1968) sur le solidus d'une lherzolite à spinelle pour $p_{H_2O} = P_T$ (courbe S_W) et en utilisant les travaux de Boyd (1959), de Gilbert (1968) et de Kushiro (1968) sur la limite supérieure de stabilité de la pargasite (courbe S_P). La courbe S_D représente le solidus à sec de la lherzolite. Pour les chiffres en caractères romains et arabes voir dans le texte et dans O'Hara (1967a, Fig. 1—4). Les deux croix indiquent les conditions d'équilibre des clinopyroxènes dans la lherzolite à spinelle (lherzolite « normale ») et dans la lherzolite à amphibole, calculées à partir des paramètres α_c et β_c (O'Hara, 1967b)

la composition minéralogique de la lherzolite à amphibole correspond à l'assemblage: forstérite + enstatite + amphibole \pm diopside qui est stable en présence de vapeur et à la pression considérée, au-dessous d'environ 1050° C (assemblage VI du diagramme). Cette contradiction peut être résolue si, tenu compte de l'écart thermique relativement faible entre les conditions fixées par la composition du clinopyroxène et les conditions de stabilité de l'assemblage VI, on considère *en premier lieu* que les données fournies par les paramètres α_c et β_c ne doivent pas être considérées comme absolues. Elles correspondent en effet à un calcul théorique qui ne fait pas intervenir tous les éléments présents (Cr, Ti, etc....) et ne tient pas compte des crypto-exsolutions qui presque nécessairement se produisent au cours des réactions de subsolidus. La composition globale des clinopyroxènes tend donc à indiquer des conditions d'équilibre supérieures aux conditions réelles. On peut aussi penser, mais ceci est beaucoup plus discutable, que la présence d'une importante quantité de titane dans la pargasite de Caussou élargit son champ de stabilité vers des températures supérieures à celles fixées à partir de la pargasite pure, comme cela a été observé pour d'autres amphiboles (Leake, 1965).

L'hypothèse envisagée peut alors ainsi se résumer: la lherzolite à spinelle « primaire », en équilibre à 15 kb et 1100° C, entre au cours de sa mise en place dans des niveaux supérieurs (dans la partie la plus supérieure du manteau ou

dans la croûte inférieure) dans le champ de stabilité des lherzolites à plagioclase comme d'ailleurs l'atteste la présence d'exsolutions en plagioclase dans certains des cristaux de diopside de la lherzolite « normale ». Elle recrystallise alors localement, en présence de vapeur d'eau ($p_{H_2O} = p$ totale) sous la forme d'un nouvel assemblage représenté par celui de la lherzolite à amphibole. La présence de plagioclase interstitiel parmi les minéraux de la matrice paraît indiquer un retour, postérieurement à la recrystallisation, à des conditions de pression d'eau inférieure à la pression totale soit aux conditions de stabilité de l'assemblage: forstérite + enstatite + diopside + anorthite + amphibole [assemblage (V) du diagramme]. Ces nouvelles conditions pourraient résulter d'un départ de l'eau, d'une « déshydratation », pour des raisons qu'il nous est difficile de connaître, probablement au cours de la mise en place dans des niveaux supérieurs. Ainsi définies, les conditions de la recrystallisation de la lherzolite de Caussou seraient en tous points comparables à celles invoquées par Green dans le cas de Lizard: dans ce massif la lherzolite à spinelle (équilibrée à environ 1200° C et 16 kb, in O'Hara, 1967 b) aurait localement recrystallisé sous la forme d'une lherzolite à plagioclase (faciès anhydre) ou sous la forme d'une péridotite à amphibole (faciès hydraté) dans les conditions de stabilité du faciès granulite encaissant c'est à dire par abaissement de la température et de la pression. Effectivement, le calcul des paramètres α_c et β_c du clinopyroxène (in O'Hara, 1967 b) indique des conditions de recrystallisation identiques (température et pression totale) à celles qui contrôlent l'assemblage de la lherzolite à amphibole de Caussou. Cependant, malgré la présence de 30% de pargasite dans le faciès à amphibole de Lizard, il n'existe aucune différence chimique notable entre celui-ci et la lherzolite à spinelle primaire. Dans le cas étudié à Caussou il faut donc supposer:

1. soit que la phase gazeuse hydratée était, préalablement à la recrystallisation de la roche, enrichie en titane et alcalins, peut être par lessivage préférentiel de ces éléments dans les minéraux de la lherzolite à spinelle originelle suivant un processus comparable à celui du « zone refining » (Harris, 1957) ou à celui proposé par Green et Ringwood (1967 a) sous le nom de « wall-rock reaction »;
2. soit que la recrystallisation résulte d'un mécanisme différent que nous envisagerons maintenant.

B. La formation de la lherzolite à amphibole résulte de fusions partielles locales de la lherzolite à spinelle

On peut constater sur le diagramme de la Fig. 4 que le point représentant les conditions de recrystallisation de la lherzolite à spinelle est situé, dans le champ de stabilité des lherzolites à plagioclase, à proximité immédiate de la courbe du solidus de la lherzolite à spinelle de Kushiro et al. (1968) pour $p_{H_2O} = p$ totale. Autrement dit, en présence de vapeur d'eau, une très légère augmentation de la température suffit pour que la lherzolite à spinelle subisse un début de fusion partielle. Dans l'exemple étudié on peut ainsi émettre l'hypothèse d'une fusion partielle locale de la lherzolite « normale » donnant naissance, à une pression d'eau de 7—8 kb, à un liquide à partir duquel pourra cristalliser l'amphibole. Il faut pour cela que deux conditions principales soient remplies:

1. Le liquide basaltique produit par la fusion partielle doit avoir une composition sous-saturée.

En effet, les travaux expérimentaux (Boyd, 1959) ainsi que toutes les observations portant sur la nature des roches éruptives contenant de la pargasite, montrent que celle-ci n'est stable que dans un milieu sous-saturé.

Bultitude et Green (1968) puis Green (1969) ont émis l'hypothèse qu'une lherzolite de composition «pyrolitique» (Green et Ringwood, 1967b) pouvait directement donner naissance, par fusion partielle dans des conditions «hydratées» (p_{H_2O} inférieure à p totale), entre 18 et 27 kb, à des liquides basaltiques sous-saturés, la composition de ces liquides variant de celle d'une néphéline méilitique à celle d'un basalte alcalin pour un degré croissant de fusion. Cette hypothèse est basée sur l'observation que l'orthopyroxène apparaît en phase primaire au liquidus de ces compositions dans les conditions envisagées. Bien que cette possibilité soit encore fortement controversée, et que soit mis en doute même le contrôle précis des conditions dans lesquelles Bultitude et Green ont effectué leurs expériences (O'Hara, 1968; Kushiro, 1969), on ne peut manquer de noter la concordance des conclusions de ces auteurs avec l'hypothèse que nous avons formulée. Aussi admettons nous, en extrapolant les résultats de ces expériences que dans des conditions $p_{H_2O} = p$ totale = 7—8 kb, au-dessus du solidus, la lherzolite à spinelle a pu donner naissance à un liquide de composition basaltique, sous-saturé, formé principalement ainsi qu'on peut le déduire des observations au microscope, aux dépens du clinopyroxène et du spinelle «primaires» de la roche.

Des volumes respectivement occupés dans la lherzolite «normale» et dans la lherzolite à amphibole par le diopside et le spinelle d'une part et par la pargasite titanifère d'autre part, on peut déduire que la composition de cette dernière représenterait alors pour l'essentiel, la composition du liquide issu de la fusion partielle, soit la composition d'une néphéline peut être même d'une néphéline méilitique à olivine (1,55% larnite normative dans l'amphibole). Ceci implique une fusion incongruente du pyroxène et du spinelle qui a eu pour résultat d'enrichir le liquide formé en alumine, alcalins et titane.

2. L'amphibole doit être stable au liquidus du liquide issu de la fusion partielle.

Si un liquide de composition «néphéline» est le liquide en équilibre au-dessus du solidus avec les minéraux résiduels de la lherzolite à spinelle, essentiellement la forstérite et la bronzite, et si la phase principale qui cristallise au liquidus de cette composition est la pargasite titanifère, on doit admettre que ce minéral est stable à la température minimale fixée par le début de la fusion. Or, on voit sur le diagramme (Fig. 2) que la courbe supérieure de stabilité de la pargasite est située au-dessous du solidus $p_{H_2O} = p$ totale de la lherzolite à spinelle soit, à fortiori, que l'amphibole de Caussou ne peut être stable à la température du basalte produit. On doit cependant rappeler que Yoder et Tolley (1962) ont montré qu'une amphibole apparaît en phase primaire au liquidus d'un basalte alcalin, au-dessus de 10 kb de pression d'eau, entre 1 050 et 1 100° C; de même, pour Green et Ringwood (1967b), l'amphibole qui cristallise à partir de verres basaltiques sous-saturés serait stable à 1 100° C entre 10 et 20 kb, dans des conditions de pression d'eau très inférieure à la pression totale. Ces observations appuient

ainsi l'hypothèse que la présence du titane dans la pargasite de Caussou augmenterait son champ de stabilité vers les hautes températures. En extrapolant aux conditions de pression envisagées ici et à la composition fortement sous-saturée du liquide produit, on peut donc penser que la pargasite titanifère de Caussou est stable à une température un peu supérieure à 1100   C soit approximativement à la température du début de la fusion de la lherzolite    spinelle.

En conclusion, les deux conditions posées plus haut supposées satisfaites, on peut ainsi résumer l'hypothèse discutée: la pargasite titanifère se forme directement à partir d'un liquide à composition de n  ph  linite, résultant de la fusion partielle locale, de faible degré, de la lherzolite    spinelle. La fusion laisse un faible résidu de spinelle enrichi en fer et chrome alors qu'un diopside stable dans les nouvelles conditions cristallise en petite quantité, probablement par réaction entre les solides et le liquide. D'autre part, si on considère les rapports existant dans l'espace entre l'assemblage de la lherzolite «normale» et la paragenèse de la lherzolite à amphibole on peut supposer que la pargasite titanifère a cristallisé sur place à partir d'un magma hydraté interstitiel, c'est à dire avant ségrégation notable du liquide produit⁵. La concentration du titane et des alcalins dans le liquide donnant naissance à l'amphibole peut s'expliquer à la fois par la fusion incongruente des minéraux de la lherzolite normale et, comme dans l'hypothèse précédente, par l'enrichissement préalable en ces éléments de la phase gazeuse hydratée contrôlant la fusion. Cependant l'amorce d'une ségrégation du magma interstitiel peut également concourir à la concentration observée; l'existence des concentrations locales de pargasite titanifère dans la masse de la lherzolite à amphibole témoignant dans ce sens si on les interprète comme résultant d'un phénomène de «filtre-presse» accompagnant des déformations locales contemporaines de l'anatexis.

Conclusions

Recristallisation de subsolidus ou cristallisation directe de l'amphibole à partir du liquide provenant de la fusion partielle de faible degré d'une lherzolite    spinelle: on ne peut dans l'état actuel trancher entre l'une ou l'autre de ces deux hypothèses. On soulignera cependant que les données sur lesquelles s'appuient le second des processus invoqués sont encore particulièrement fragiles.

Il reste que les caractères exceptionnels du gisement de Caussou doivent r  sultier de la réunion exceptionnelle d'un certain nombre de conditions. On comptera parmi celles-ci la concentration locale d'une phase gazeuse hydratée probablement enrichie au préalable en titane et alcalins et «piégée» localement, sous l'effet probable d'un contrôle tectonique particulier, dans la masse lherzolitique en cours de mise en place, la recristallisation qui en résulte s'opérant dans

⁵ On notera à ce sujet que le processus proposé ici sur un plan très local se rapproche de l'hypothèse avancée par Lambert et Wyllie (1968) sur un plan beaucoup plus général pour tenter d'expliquer l'existence entre 50 et 100 km de profondeur de la «low velocity zone» de Gutenberg: celle-ci résulterait pour ces auteurs de la présence d'une couche de minéraux anhydres contenant un magma hydraté interstitiel, comprise entre deux couches cristallines dans lesquelles l'eau serait contenue dans des minéraux hydratés: une couche supérieure à amphibole et une couche inférieure dans laquelle l'eau entrerait dans le réseau des clinopyroxènes.

des conditions compatibles avec la stabilité d'une pargasite titanifère. Une autre de ces conditions pourrait résider dans la composition chimique particulière de la lherzolite originelle. A l'appui de cette hypothèse on rappellera que la lherzolite « normale » de Caussou se distingue des lherzolites à spinelle des autres gisements, dans les Pyrénées mais aussi dans les massifs de Lizard et de Beni-Bouchera, par une teneur relativement élevée en titane, en sodium et en potassium, due en partie à l'abondance relative de ces éléments dans le clinopyroxène. Ces caractères seront à plus forte raison ceux de la lherzolite « primitive » si on admet toutefois que les éléments actuellement concentrés dans la lherzolite à amphibole étaient à l'origine contenus dans la masse lherzolitique dont une partie affleure à Caussou. On peut alors penser, si on considère que le titane et les alcalins sont les premiers éléments extraits d'une roche ultrabasique lorsque celle-ci est soumise à une fusion partielle, que la roche qui a donné naissance aux types observés dans le gisement de Caussou représente un fragment peu ou pas différencié du manteau supérieur. Cependant, la composition de ce matériau ne peut être calculée en l'absence d'une connaissance précise des volumes respectivement occupés par la lherzolite « normale » et par la lherzolite à amphibole et il est en outre bien évident que seule l'étude comparative des autres gisements de lherzolites et des roches qui leurs sont associées dans les Pyrénées permettrait soit d'infirmer soit de confirmer cette hypothèse.

Résumé

Le gisement de Caussou est occupé par une lherzolite à spinelle, qui en constitue la masse principale, dans laquelle apparaissent des zones de lherzolite à amphibole caractérisées par l'assemblage: forstérite + bronzite + pargasite riche en titane et en potassium \pm diopside, l'amphibole formant des 10 à 15% du volume de la roche. L'étude pétrographique et la composition chimique des deux types de roches et des minéraux constituants, permettent de conclure que la lherzolite à amphibole résulte d'une recristallisation locale de la lherzolite à spinelle, en présence d'une phase gazeuse hydratée, probablement enrichie en titane et alcalins, dans des conditions qu'on peut estimer approximativement à 7—8 kilobars ($p_{H_2O} = p$ totale), à 1100° C. Deux hypothèses sont envisagées concernant le mécanisme de la recristallisation:

1) La formation de la lherzolite à amphibole résulte de réactions de subsolidus dans la lherzolite à spinelle au cours de sa mise en place dans des niveaux correspondant au domaine de stabilité des lherzolites à plagioclase;

2) Dans les mêmes conditions de pression et de température, la pargasite titanifère cristalliserait directement à partir d'un liquide à composition de néphéline produit par une fusion partielle de faible degré de la lherzolite à spinelle.

Quelle que soit l'hypothèse retenue, on peut supposer que la lherzolite originelle qui a donné naissance aux deux types de roche observés à Caussou représente un fragment peu ou pas différencié du manteau supérieur.

Remerciements. Je tiens à remercier ici le Professeur J. Fabriès et le Dr. J. Kornprobst pour les discussions et les critiques qui m'ont été d'une grande aide au cours de l'élaboration de ce travail.

Références

- Aoki, K.: Petrology of kaersutite — bearing ultramafic and mafic inclusions in Iki Island. Japan. Contr. Mineral. and Petrol. **25**, 270—281 (1970).
- Kushiro: Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel. Contr. Mineral. and Petrol **18**, 326—337 (1968).
- Best, M. G.: Kaersutite — peridotite inclusions and kindred megacrysts in basanitic lavas, Grand Canyon, Arizona. Contr. Mineral. and Petrol. **27**, 25—44 (1970).
- Boyd, F. R.: Hydrothermal investigations of amphiboles. Researches in geochemistry (P. H. Abelson, ed.), p. 377—396. London: Wiley and Sons, 1959.
- Bultitude, R. J., Green, D. H.: Experimental study at high pressures on the origin of olivine nephelinite and olivine melilite nephelinite magmas. Earth. Planetary Sci. Letters **3**, 325—337 (1968).
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J.: Rock forming minerals. London: Longmans 1962.
- Fabriès, J.: Nature des hornblendes et types de m  tamorphisme. I.M.A. and proceedings of the 5th general meeting, 204—211, Cambridge, 1966.
- Gilbert, M. C.: Reconnaissance study of the stability of amphiboles at high pressure. Carnegie Inst. Wash. Year Bk **67**, 167—170 (1968).
- Green, D. H.: The petrogenesis of the high — temperature intrusion in the Lizard area, Cornwall. J. Petrol. **5**, 134—188 (1964).
- The origin of basaltic and nephelinitic magmas in the earth's mantle. Tectonophysics **7**, 409—422 (1969).
- Ringwood, A. E.: An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochim. Cosmochim. Acta **31**, 767—833 (1967 a).
- — The genesis of basaltic magmas. Contr. Mineral. and Petrol. **15**, 103—190 (1967 b).
- Harris, P. G.: Zone refining and the origin of potassic basalts. Geochim. Cosmochim. Acta **12**, 195—208 (1957).
- Kornprobst, J.: Le massif ultrabasique des Beni-Bouchera (Rif Interne, Maroc): Etude des péridotites de haute température et de haute pression, et des pyrox  nolites,    grenat ou sans grenat, qui leur sont associées. Contr. Mineral. and Petrol. **23**, 283—322 (1969).
- Kuno, H.: Mafic and ultramafic nodules from Itinome-Gata, Japan. Ultramafic and related rocks, p. 337—342. London: Wiley and Sons, 1967.
- Kushiro, I.: Stability of amphibole and phlogopite in the upper mantle. Carnegie Inst. Wash. Year BK **68**, 245—247 (1968 a).
- Discussion of the paper: The origin of basaltic and nephelinitic magmas in the earth's mantle, by D. H. Green. Tectonophysics **7**, 427—436 (1969).
- Syono, I., Akimoto, S.: Melting of a natural lherzolite nodule at high pressures and high water pressures. J. Geophys. Res. **73**, 6023—6030 (1968 b).
- Lacroix, A.: Etude minéralogique de la lherzolite des Pyrénées et de ses phénomènes de contact. Nouvelles Archives du Muséum, Paris **6**, 209—308 (1894).
- Les roches basiques accompagnant les lherzolites et les ophites des Pyrénées. Compt. Rend. VIII   Congrès Géologique international 1900, Paris.
- Les p  riodites des Pyrénées et les autres roches intrusives non feldpathiques qui les accompagnent. Compt. Rend. **165**, 381—387 (1917).
- Lallemant, H. G. A.: Structural and petrofabric analysis of an «alpine-type» péridotite: the lherzolite of the French Pyrénées. Leidse Geol. Mededel. **42**, 1—57 (1967).
- Leake, B. E.: The relationship between composition of calciferous amphibole and grade of metamorphisms. In: Controls of metamorphism. (Pitcher and Flinn, ed.) London: Oliver & Boyd, 1965.
- Mac Kenzie, D. B., 1960: High temperature alpine — type péridotite from Venezuela. Bull. Soc. Amer. **71**, 303—318 (1960).
- Melson, W. G., Jarosewich, E., Bowen, V. T., Thompson, G.: St Peter and St Paul Rocks: a high temperature mantle derived intrusion. Science **155**, 1531—1535 (1967).
- Monchoux, P., Besson, M.: Sur les compositions chimiques des minéraux des lherzolites pyr  n  ennes et leur signification génétique. Bull. Soc. Franc. Mineral Crist. **92**, 289 (1969).
- Mottana, A., Edgar, A. D.: The significance of amphibole compositions in the genesis of eclogites. Lithos **3**, 37—49 (1970).

- O'Hara, M. J.: Mineral facies in ultrabasic rocks. Ultramafic and related rocks, p. 7—18. (Wyllie, ed.) London: Wiley and Sons, 1967a.
- Mineral paragenesis in ultrabasic rocks. Ultramafic and related rocks, p. 393—403. (Wyllie, ed.) London: Wiley and Sons 1967b.
- The bearing of phase equilibria studies in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth Sci. Rev.* **4**, 69—133 (1968).
- Prinz, M., Nehru, C. E.: Comments on „Kaersutite from San Carlos, Arizona, with comments on the paragenesis of this mineral“, by B. Mason. *Mineral. Mag.* **37**, 333—337 (1969).
- Rio, M.: Quelques précisions sur la composition minéralogique de la lherzolite de Moun Caou (Basses-Pyrénées). *Bull. Soc. Franc. Minéral. Crist.* **91**, 298—299 (1968).
- Varne, R.: Hornblende lherzolite and the upper mantle. *Contr. Mineral. and Petrol.* **27**, 45—51 (1970).
- Yoder, H. S., Tilley, C. E.: Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *J. Petrol.* **3**, 342—532 (1962).

Conquéré, F.
Muséum National d'Histoire Naturelle
61, rue de Buffon
F-75, Paris 5e, France