

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOUHAOUÈNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

Soraya BOUMAZA-BENYAHIA*, Khadidja OUZEGANE* et Jean-Robert KIENAST**

RÉSUMÉ

La région d'Ihouhaouène (In Ouzzal, Nord Ouest Hoggar, Algérie) est très originale par la présence de nombreux massifs de carbonatites qui affleurent systématiquement associées à des fénites au contact de granulites. Plus particulièrement, le complexe carbonatitique du centre 3 se distingue des complexes habituellement rencontrés dans le monde, qui sont de type annulaire, par sa forme linéaire en relation avec sa mise en place le long de grandes zones de cisaillement. Ces carbonatites et leurs fénites se caractérisent par l'absence de feldspathoïdes et par l'abondance de wollastonite coexistant avec calcite et quartz ; c'est à dire qu'au contraire des carbonatites décrites dans la littérature internationale, celles-ci sont saturées en silice dans la région d'Ihouhaouène. On peut distinguer divers types de carbonatites par leur mise en place successive ou leur aspect plus ou moins pegmatitique ou bréchique, et deux types de fénites, rouges riches en feldspath potassique et clinopyroxène et blanches riches en wollastonite. Elles sont remarquables par une grande diversité minéralogique marquée par la présence de minéraux comme le clinopyroxène, le feldspath potassique, la calcite, le grenat, la wollastonite, l'apatite, la monazite, l'allanite, l'amphibole, le sphène et le quartz. Les clinopyroxènes sont généralement des diopsides (X_{Mg} : 0,55 à 0,88) à l'exception des clinopyroxènes des fénites blanches qui sont des hédénbergites (X_{Mg} : 0,38 à 0,40). Autour des clinopyroxènes et des wollastonites se développent des grenats secondaires qui sont principalement des solutions solides entre le grossulaire (20 à 66%) et l'andradite (30 à 80%) dans les brèches feldspathiques et dans les fénites blanches. Les amphiboles qui sont aussi secondaires montrent une grande évolution depuis le pôle pargasite jusqu'à l'actinote en relation avec une baisse de la température au cours de leur cristallisation. Le trait le plus remarquable de ce complexe est la présence de minéraux riches en terres rares comme la monazite (REE de 64 à 67%), l'apatite (REE jusqu'à 9%) et l'allanite (REE de 14 à 25%). Les apatites constituent la phase minérale la plus représentée et la plus diversifiée. Elles sont surtout de couleur rose associées à la calcite et au pyroxène dans les carbonatites bréchiques I. Ce sont les apatites les plus enrichies en terres rares et en silice. Les plus appauvries en ces éléments se développent dans les carbonatites pegmatitiques II

* Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire, U.S.T.H.B., B.P. 32, Dar El Beida 16111, Alger, Algérie.

** Laboratoire de Géosciences Marines, UFR des Sciences Physiques de la Terre, Université Paris 7-Denis Diderot, UMR 7097, I.P.G.P., 4 place Jussieu, tour 14, 5^{ème} étage, Paris Cedex 05, France.

- Manuscrit déposé le 19 Juin 2006, accepté après révision le 06 Septembre 2006.

caractérisées par leur richesse en micro inclusions de monazites. Des substitutions de type $P+Ca \rightleftharpoons REE+Si$ expliquent les teneurs exceptionnellement élevées en terres rares de ces apatites. Les monazites montrent, quant à elles, des substitutions de type $Si+Th \rightleftharpoons P+REE$ et du calcium par les terres rares. L'allanite, essentiellement en couronne autour du clinopyroxène et de l'apatite aussi bien dans les carbonatites que dans les fénites, montre une grande variation de sa composition en relation avec la substitution $Ca \rightleftharpoons REE+Th$.

Mots clefs - Carbonatite – Fénite – Apatite – Monazite - Terres Rares – Paléoproterozoïque - In Ouzzal - Hoggar.

MINERALOGY OF PALEOPROTEROZOIC CARBONATITES AND FENITES FROM IHOUHAOUENE (IN OUZZAL, NORTH WESTERN HOGGAR, ALGERIA): AN EXAMPLE OF SYNGRANULITIC LINEAR SATURATED CARBONATIC COMPLEX

ABSTRACT

Ihouhaouene area (In Ouzzal granulitic terrane, NW Hoggar, Algeria) is exceptional by a numerous carbonatite massifs exposure that are systematically associated to the fenites at their direct contact with the granulites. The special interest of the Ihouhaouene fenite-carbonatite complex, and particularly the centre 3, lies in its linear shape instead of usual annular complex founded in continental cratonic regions. Most carbonatites of the world are found in association with feldspathoid-bearing syenite and alkaline ultramafic as well as undersaturated rocks. Carbonatites of our study are linear intrusions along shear zones and are associated with SiO_2 -saturated fenites with particular assemblage as wollastonite-calcite-quartz. In the field a relative chronology comprising several stages can be established for the emplacement of the carbonatite complex. Two carbonatites generations are distinguished, the first generation of carbonatite breccia (with pink apatite) corresponds to the intrusion (width: max 100 m; length: max 500 m) which crosscut or are parallel to the foliation in the white and the red fenite. The second generation of pegmatitic carbonatites intruded the early suite as dykes of smaller size (max width: 3m, max length: 40m). All these rocks, carbonatites as well as fenites show an extreme mineralogical diversity containing clinopyroxene, k. Feldspar, calcite, garnet, wollastonite, apatite, monazite, allanite, amphibole, sphene and minor quartz. Clinopyroxene is generally a diopside (X_{Mg} : 0.55-0.88) in carbonatites and red fenite while in white fenite it's an heddenbergite (X_{Mg} : 0.38-0.44). Secondary garnet systematically surrounds clinopyroxene and wollastonite, it's a solid solution between grossular (Gro_{20-66}) and andradite (Adr_{30-80}) in feldspathic breccia and white fenite. Secondary amphibole also occurs around clinopyroxene and apatite and lies between pargasite and actinolite end member in relation with decreasing temperature during their crystallization. These rocks are characterized by minerals as apatite, monazite and allanite that are very rich in REE and in lesser extent in Th. Substitutions of the type $P+Ca \rightleftharpoons REE+Si$ can occur for the exceptionally high rare earth elements of these apatites specially from those of first generation of carbonatites (REE: 9%). They contain many micro inclusions such as monazite (REE: 64-67%) which shows substitutions $Si+Th \rightleftharpoons P+REE$ and $Ca \rightleftharpoons REE$. Allanite, a thorium-rich mineral (REE: 14-25%), occurs around clinopyroxene or apatite, the variability of elements is explained by $Ca \rightleftharpoons REE+Th$ substitution.

Keywords - Carbonatite - Fenite - Apatite - Monazite - Rare Earth Elements - Paleoproterozoïc - In Ouzzal - Hoggar

I- INTRODUCTION

Les carbonatites d'Ihouhaouène (terrane de l'In Ouzzal, Nord Ouest Hoggar), présentent des caractères particuliers par rapport aux carbonatites mondiales. Elles se caractérisent par l'absence de feldspathoïdes, la présence de la wollastonite, qui coexiste avec la calcite et le quartz, et un grand nombre de minéraux remarquables par leur variabilité chimique en relation avec les substitutions qui impliquent les éléments majeurs, les terres rares ainsi que Th, U, F et Cl. Ces complexes se distinguent aussi par la forme de leur gisement linéaire en relation avec leur mise en place le long de grandes zones de cisaillement (Ouzegane, 1987; Bernards-Griffiths et al., 1988; Ouzegane et al., 1988; Fourcade et al., 1996). Ce mode de gisement se rencontre aussi dans les carbonatites du Protérozoïque mises en place dans de nombreux complexes en U.R.S.S. (Lapin et Plashko, 1988). D'autres types de carbonatites les plus abondantes sont associées à des roches alcalines à feldspathoïdes et montrent des structures circulaires (Verhulst et al., 2000). Les plus anciennes carbonatites connues sont archéennes (Larsen et al., 1983) mais la majorité sont comme celles du rift africain très récentes.

Les compositions chimiques des carbonatites et des fénites du complexe d'Ihouhaouène sont caractérisées par des teneurs élevées en terres rares légères, thorium, uranium, fluor, baryum et strontium mais relativement faibles en Nb, Ta, Hf, Zr et Ti (Ouzegane, 1987; Ouzegane et al., 1988; Bernard-Griffiths et al., 1988; Fourcade et al., 1996). La mise en place des carbonatites dans la région d'Ihouhaouène a été datée à 1994 Ma, à partir de la méthode U/Pb sur zircon (Bernard-Griffiths et al., 1988), ce qui confirme les premiers travaux d'Allègre et Caby (1972) qui obtiennent un âge de 2090 Ma sur une fluoroapatite riche en thorium par la méthode U-Th-Pb. Leur mise en place est contemporaine du fonctionnement des shear zones ductiles dans les conditions du faciès granulite (Ouzegane et al., 2003).

II. LES DEUX TYPES DE CARBONATITES : ANNULAIRES ET LINÉAIRES

Les carbonatites sont des roches magmatiques essentiellement formées de carbonates de calcium et de magnésium généralement caractérisées par un enrichissement en strontium, baryum et manganèse (Deans, 1966). Ces roches présentent une minéralogie très diversifiée sous forme de carbonates (bastnaesite, parisite, sahamalite), de phosphates (apatite, monazite, britholite), de silicates et oxydes riches en terres rares. La plupart des carbonatites sont liées à des complexes alcalins et représentent les intrusions les plus tardives dans ces complexes. On peut distinguer deux types de carbonatites, les annulaires et les linéaires (les plus fréquentes et les mieux étudiées, les plus classiques étant les annulaires).

- Les carbonatites annulaires se rencontrent en association avec des roches alcalines variées du point de vue pétrographique (ijolite, syénite néphélinique, turjaïte), magmatique, géochimique et structural, soit sous forme de massifs circulaires intrusifs (fig. 1A, Lapin et Plashko, 1988) avec une auréole de fénites autour, soit sous forme de dykes ou de filons ou même sous forme de coulées volcaniques. Ces complexes sont situés sur les plates-formes continentales stables (tabl. I). Beaucoup d'entre eux se trouvent en bordure de ces plates-formes et sont associés aux grandes fractures liées à ces zones en extension, comme le rift Est africain (Bell et Blenkinsop, 1987a).

- Les carbonatites de forme linéaire, se distinguent des carbonatites annulaires par leur morphologie, leur disposition structurale, leur profondeur de mise en place ainsi que par les roches associées (tabl. I). La géologie de la zone Tatar (Russie) est un bon exemple d'un complexe carbonatitique linéaire (fig. 1B; Lapin et Plashko., 1988). Ces complexes sont orientés le long des éléments structuraux principaux de la

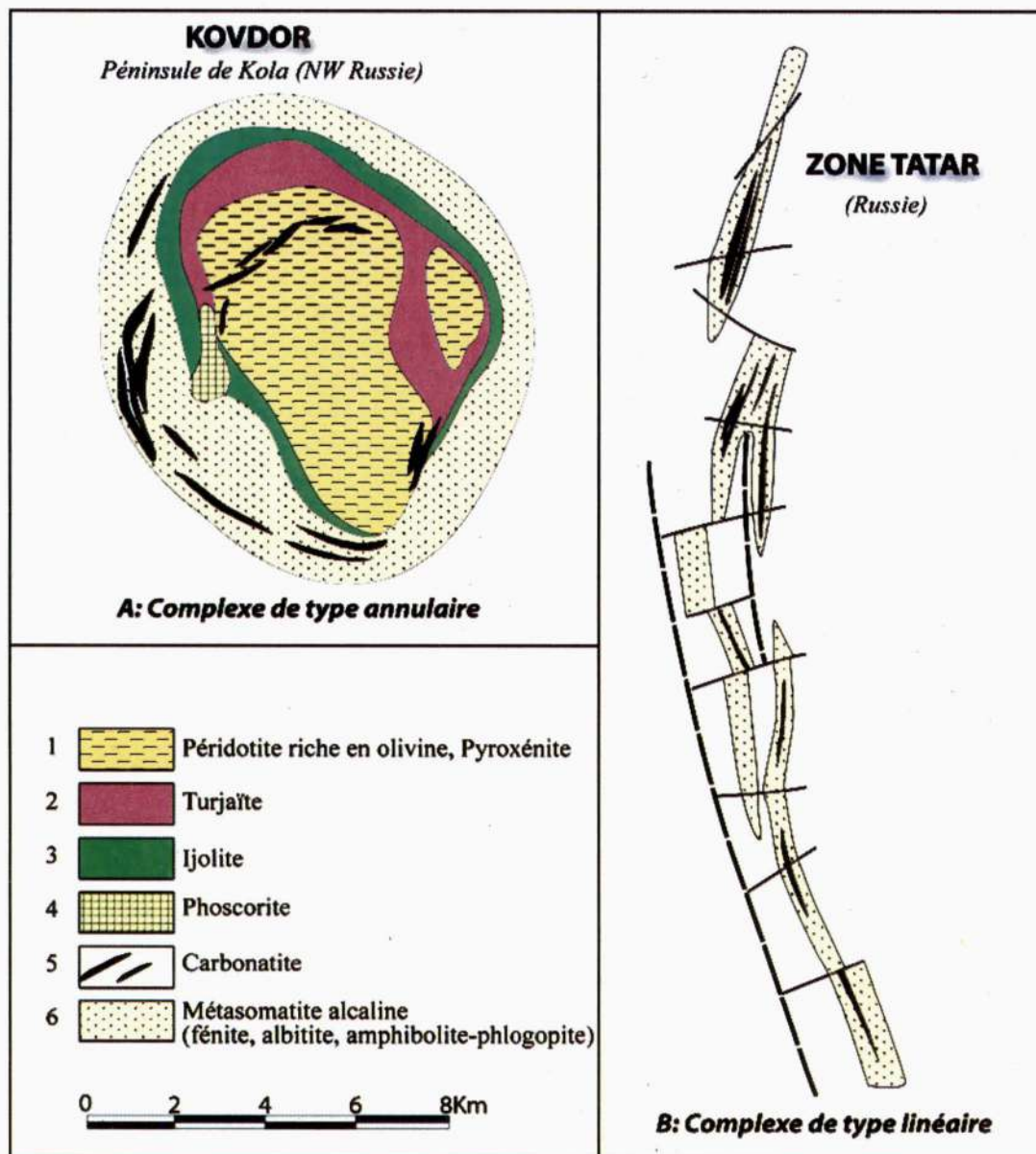


Fig.1

Fig.1 - Les différents types de complexes carbonatitiques (Lapin et Plashko, 1988).

Various types of carbonatitic complexes (Lapin et Plashko, 1988).

A. Complexe de type annulaire du Kovdor (NW Russie) (*Annular complex type of Kovdor area (NW Russia)*).

B. Complexe de type linéaire de la zone Tatar (Russie) (*Linear complex type of the Tatar zone (Russia)*).

1. Péridotite riche en olivine et pyroxénite (*Peridotite rich in olivine and pyroxenite*); 2. Turjaïte : roche à méllilite-néphéline-phlogopite-diopside (*Turjaïte rock with melilite-nepheline-phlogopite-diopside*); 3. Ijolite : roche à néphéline-pyroxène (*Ijolite rock with nepheline-pyroxene*); 4. Phoscorite : roche à forstérite-phlogopite-magnétite-clinohumite-apatite-calcite (*Phoscorite rock with forsterite-phlogopite-magnetite-clinohumite-apatite-calcite*); 5. Carbonatite (*Carbonatite*); 6. Métasomatite alcaline (fénite, albitite, amphibolite-phlogopite) (*Alkaline metasomatite, fenite, albitite, amphibolite-phlogopite*).

Tableau I - Comparaison entre les carbonatites linéaires et les carbonatites annulaires.**Comparison between the linear and the annular carbonatites.**

Les deux types de carbonatites		
	Carbonatites linéaires	Carbonatites annulaires
Contexte et mise en place	<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur de mise en place moyenne à importante. - Zones de carbonatites et fénites sur plusieurs kilomètres. - Concordance tectonique avec l'encaissant. - Carbonatites syn à tardi-orogéniques. - Carbonatites toujours anciennes (Protérozoïques). 	<ul style="list-style-type: none"> - Profondeur et mise en place superficielle. - Carbonatites et fénites en complexes annulaires d'extension allant de 1-2 km à 40-50 km de diamètre. - Discordance très nette avec l'encaissant. - Carbonatites dans les zones cratoniques stables. - Carbonatites le plus souvent récentes.
Caractéristiques Thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Accordance thermique avec l'encaissant ; pas d'auréole de contact importante. - Dissipation rapide de l'énergie le long des shear zones, flux thermiques rapides. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande anomalie thermique avec l'encaissant, avec auréole de contact. - Dissipation lente de l'énergie, flux thermiques lents.
Géochimie	<ul style="list-style-type: none"> - Absence d'activités magmatiques alcalines, absence de roches et minéraux sous saturés (en particulier de feldspathoïdes). - Grande abondance des terres rares, thorium, strontium, phosphore. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les roches magmatiques peuvent être très différenciées depuis les ultrabasiques jusqu'aux syénites à néphéline. - Moins grande abondance des terres rares.

région. Ils se trouvent le long des zones de failles profondes et s'accompagnent de métasomatites alcalines (les fénites et albitites) aussi bien sodiques que potassiques. Ces carbonatites ne sont donc pas directement liées à des roches magmatiques. De plus, les carbonatites de forme linéaire ont une composition minéralogique plus simple et une composition chimique spécifique qui se caractérise par un enrichissement en phosphate, niobium, cérium, strontium, baryum, manganèse et en zirconium. Leurs rapports isotopiques en carbone (-5,0‰), en oxygène (+9,3‰) et en strontium (+0,7020) indiquent que leur source est mantellique. A l'origine de ces carbonatites, on imagine volontiers des fluides mantelliques. Par contre, la composition des métasomatites qui les entourent dépend de la nature des roches encaissantes. Les complexes carbonatitiques de type linéaire, présentent un rubanement, une foliation et une orientation structurale subparallèle aux roches encaissantes. Les carbonatites linéaires syn à post orogéniques se mettent en place à une profondeur généralement moyenne à élevée sur de longues distances et sont essentiellement protérozoïques. Au contraire, les carbonatites annulaires sont post orogéniques et leur âge essentiellement créacé à actuel (le long du rift africain). Leur extension est réduite et elles se mettent en place à faible profondeur. De plus, une auréole de contact est toujours présente autour de ces complexes annulaires ce qui n'est pas le cas des complexes linéaires.

III. MODE DE GISEMENT ET PÉTROGRAPHIE DES CARBONATITES ET FÉNITES D'ITHOUHAOUÈNE (CENTRE 3)

La région d'Ihouhaouène se caractérise par un important développement de fénites qui affleurent à quelques kilomètres du massif granitique d'Ihouhaouène au Nord-Est du terrane de l'In Ouzal (NW Hoggar; fig. 2A) recoupé par différentes générations de carbonatites. Les complexes du Nord d'Ihouhaouène sont localisés autour de trois centres 1, 2 et 3 (fig. 2A). D'après

Ouzegane et *al.* (2003), les fénites présentent des structures planaires conformes avec la foliation des granulites encaissantes. Les linéations minérales horizontales sont portées par les plans de foliation verticaux des fénites. L'obliquité des directions de ces foliations avec les zones de cisaillement permet de retrouver des mouvements conjugués aussi bien senestres de direction NE-SW que dextres de direction ENE-WSW, compatibles avec un raccourcissement de même direction (NW-SE) que celui déduit pour les granulites encaissantes. La mise en place de la première génération de carbonatites est donc contemporaine du fonctionnement des cisaillements transcurants. La foliation des fénites des domaines les plus déformés est impliquée dans les plis en fourreaux qui accommodent les déplacements horizontaux. Ces plis bien étudiés dans les zones mylonitiques, sont attribués à une intense déformation à forte composante cisailante.

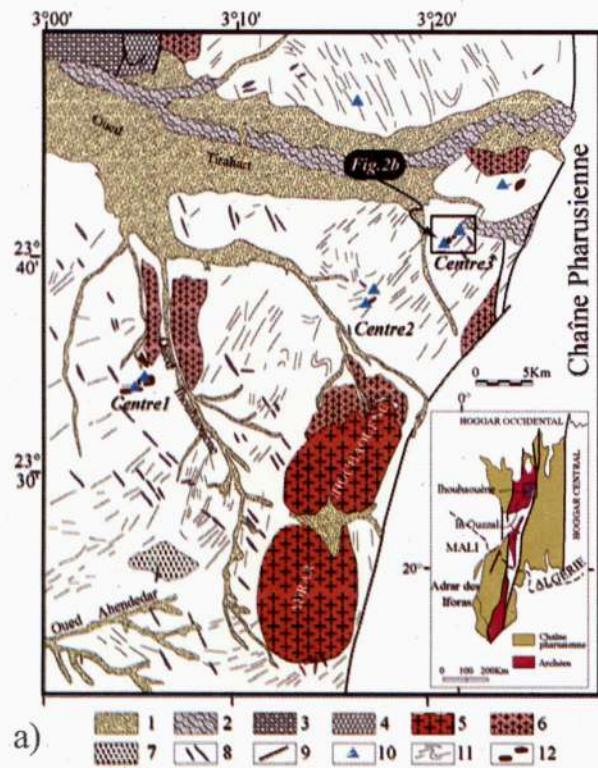
Les centres 1 et 2 ont déjà fait l'objet d'articles importants et cette publication porte essentiellement sur le centre 3 (fig. 2B) qui est le moins étudié et se situe le plus au Nord, près du grand erg de Tirahart. Dans tous les centres, les carbonatites apparaissent en veines d'épaisseur (0.5 à 300m) et de longueur variée (1 m à 2 km) recoupant nettement les fénites. Les carbonatites de première génération sont toujours bréchiques avec des éléments de fénites et un ciment carbonaté essentiellement à calcite (50 à 70%), apatite (1 à 22%), clinopyroxène (5 à 25%), feldspath potassique (0,1 à 10%), auquel peut s'ajouter wollastonite (1 à 5%), quartz (<0,8%), allanite (0,7 à 8%), sphène (<2%), grenat (<6%) et amphibole (<0,5%). Les intrusions tardives de carbonatites apparaissent en plusieurs points en petites veines pegmatitiques enrichies en apatites de très grande taille. Une première étude de ces gisements, essentiellement le centre 1 et 2 potentiellement riches en terres rares, a été faite par Ouzegane (1987); Ouzegane et *al.*, (1988); Bernard-Griffiths et *al.* (1988); Carpena et *al.*, (1988) et Fourcade et *al.*, (1996).

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOUHOUÈNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

Dans le centre 3, objet de cet article, les carbonatites forment une grande bande d'environ 2km de long pour un maximum de 300m de large (fig. 2B). Ces carbonatites sont au coeur de la bande et développent autour d'elle un ensemble de roches remarquables qui sont les fénites. Ces dernières correspondent à la transformation des granulites encaissantes par un métasomatisme alcalin lié à la migration de fluides carbonatitiques mantelliques, riches en terres rares légères, K, Sr, Th le long de méga-shear zones (Fourcade et al., 1996).

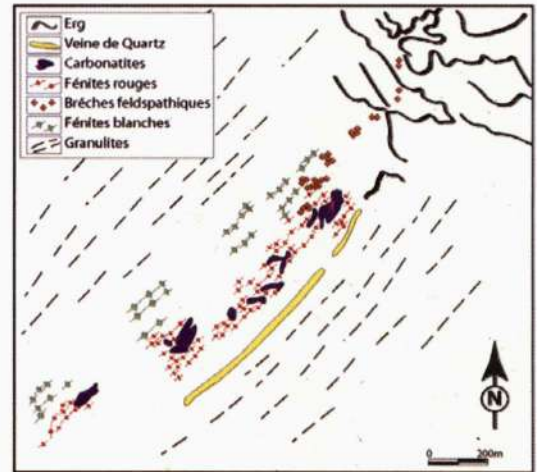
Deux types de fénites sont observés; les fénites rouges, qui sont toujours en contact direct avec les

carbonatites et les fénites blanches au contact de granulites (fig. 2B). Les minéraux présents dans les fénites sont les mêmes que ceux présents dans les carbonatites mais avec des proportions différentes comme le feldspath potassique (48 à 80%), clinopyroxène (15 à 40%), apatite (0.5 à 3%), wollastonite (5 à 6%), grenat (1 à 5%), sphène (1%), calcite (0,1 à 2%), quartz (<3%) et allanite (1%). On y trouve aussi des brèches à ciment feldspathique très riches en wollastonite (20 à 30%) qui font l'originalité de cette région. Des veines tardives de carbonatites à apatite-monazite recoupent les carbonatites bréchiques ainsi que les fénites rouges.



a) 1. Alluvions (*Alluvia*); 2. Erg (*Erg*); 3. Conglomérats du Cambrien (*Cambrian conglomerates*); 4. Andésites (*Andesites*); 5. Granite alcalin post Pharusien (*Post panafrican alkaline granite*); 6. Granite alcalin d'âge inconnu (*Alkaline granite of unknown age*); 7. Granodiorites (*Granodiorites*); 8. Dykes doléritiques et acides (*Doleritic and acid dykes*); 9. Failles (*Faults*); 10. Carbonatites (*Carbonatites*); 11. Granulites (*Granulites*); 12. Syénites (=Fénites) (*Syenites (=Fenites)*).

b - Carte géologique du complexe carbonatitique linéaire du centre 3 de la région d'Ihouhaouène montrant la distribution des carbonatites, des fénites rouges et blanches et leur concordance avec leur encaissant granulitique (d'après Fourcade et al., 1996) (*Geological map of the linear carbonatitic complex of the center 3 from Ihouhaouene area, showing the distribution of carbonatites, the red and the white fenites parallel to granulitic foliation (according to Fourcade et al., 1996)*).



b) Fig. 2 : a - Localisation des différents centres de carbonatites cartographiés dans la région d'Ihouhaouène (NW Hoggar) (d'après Ouzegane et al., 1988) (*Localization of the various carbonatite centers cartographed in the Ihouhaouene area (North Western Hoggar (according to Ouzegane et al., 1988))*);

1. Alluvions (*Alluvia*); 2. Erg (*Erg*); 3. Conglomérats du Cambrien (*Cambrian conglomerates*); 4. Andésites (*Andesites*); 5. Granite alcalin post Pharusien (*Post panafrican alkaline granite*); 6.

Granite alcalin d'âge inconnu (*Alkaline granite of unknown age*); 7. Granodiorites (*Granodiorites*); 8. Dykes doléritiques et acides (*Doleritic and acid dykes*); 9. Failles (*Faults*); 10. Carbonatites (*Carbonatites*); 11. Granulites (*Granulites*); 12. Syénites (=Fénites) (*Syenites (=Fenites)*).

b - Carte géologique du complexe carbonatitique linéaire du centre 3 de la région d'Ihouhaouène montrant la distribution des carbonatites, des fénites rouges et blanches et leur concordance avec leur encaissant granulitique (d'après Fourcade et al., 1996) (*Geological map of the linear carbonatitic complex of the center 3 from Ihouhaouene area, showing the distribution of carbonatites, the red and the white fenites parallel to granulitic foliation (according to Fourcade et al., 1996)*).

III.1. Les fénites rouges

Elles sont les plus abondantes et se caractérisent par une forte proportion de feldspath potassique rose et de pyroxène vert (fig. 3A). Ce sont des roches à grain moyen à grossier à texture litée faiblement orientée. Ce litage s'observe à toutes les échelles (centimétrique à métrique) et se présente comme une alternance de lits clairs essentiellement feldspathiques et de lits à dominante pyroxénique (fig. 3B). Le feldspath potassique se présente sous forme de microcline ou de perthites souvent déformées (fig. 3D); le clinopyroxène est toujours en gros cristal (fig. 3B). Il existe également de l'apatite et de l'allanite en couronne autour du clinopyroxène (fig. 3C) et quelquefois dans les fissures des minéraux. Ces fénites rouges se distinguent par la présence du quartz qui se présente sous forme de grains xénomorphes interstitiels (fig. 3D).

III.2. Les fénites blanches

Elles sont abondantes et se concentrent essentiellement à l'extérieur du complexe carbonatitique en contact avec les granulites encaissantes. Elles se composent de wollastonite, de pyroxène, de quartz, de calcite, d'apatite et de grenats coronitiques.

Ce sont des roches à teinte claire (fig. 3E) avec une alternance de lits clairs essentiellement composés de perthites et d'apatite (fig. 3G) et de lits sombres caractérisés par la présence de wollastonite et de clinopyroxène systématiquement entourés par des grenats secondaires (fig. 3F et H). On peut également trouver du sphène et du quartz (fig. 3H) et quelques rares calcites. Elles montrent une texture granoblastique et sont composées essentiellement de perthites et de microcline. Les clinopyroxènes sont verts et peuvent atteindre

Fig. 3 - Photos d'affleurements et au microscope des fénites du centre 3

Photographs of outcrops and under the microscope of fenites from center 3

A : Affleurement d'une fénite rouge montrant des lits sombres à clinopyroxène et des niveaux roses essentiellement à feldspath potassique (*Outcrop of a red fenite showing dark bands with clinopyroxene and the pink potassic feldspar levels*).

B : Détail d'une fénite rouge montrant le caractère rubané avec des amas sombres à clinopyroxène et des niveaux plus clairs à tendance rose à feldspath potassique (*Detail of a red fenite showing dark clinopyroxene clusters and the potassic feldspar in clearer levels*).

C : Fénite rouge au microscope en lumière naturelle montrant une apatite (Ap) et un clinopyroxène (Cpx) entourés par de l'allanite (Aln) (*Red fenite in natural light under microscope showing an apatite (Ap) and clinopyroxene (Cpx) surrounded by allanite (Aln)*).

D : Fénite rouge au microscope en lumière polarisée-analysée montrant des perthites déformées (Kfs), du quartz interstitiel (Qtz) et du clinopyroxène (Cpx) (*Red fenite in polarized-analyzed light under microscope showing deformations in perthites (Kfs), interstitial quartz (Qtz) and clinopyroxene (Cpx)*).

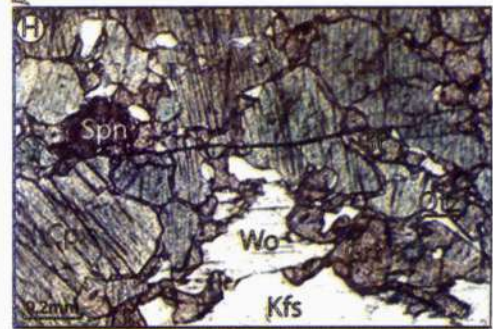
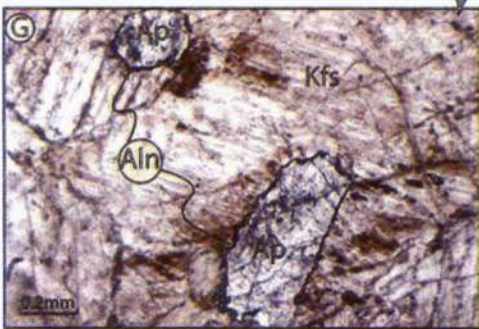
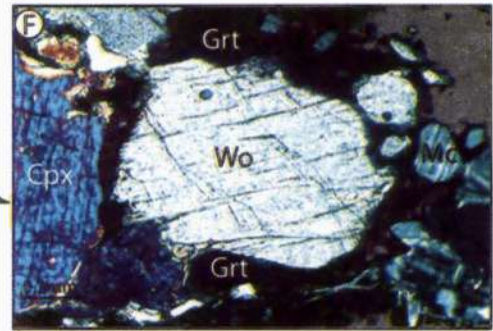
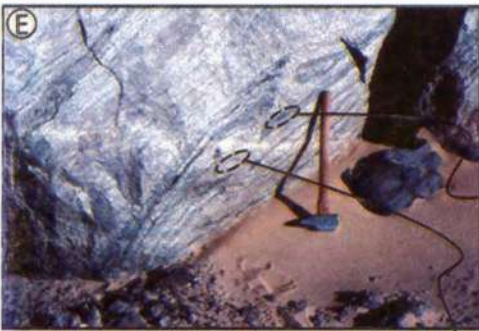
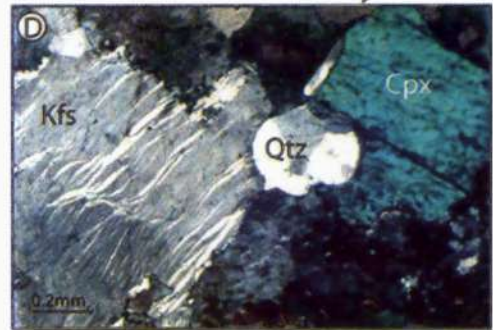
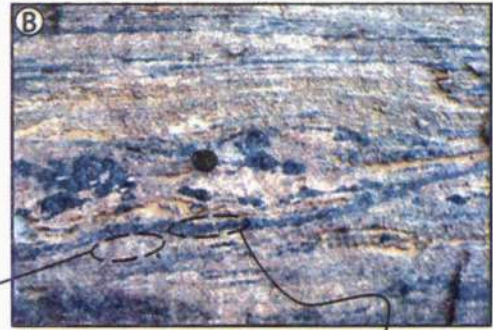
E : Affleurement d'une fénite blanche montrant la prédominance de lits clairs à feldspath potassique et des lits plus fins sombres à clinopyroxène (*Outcrop of a white fenite showing the prevalence of lights bands with potassic feldspar and the dark finer ones with clinopyroxene*).

F : Détail d'une réaction au microscope en lumière polarisée-analysée d'un niveau sombre, montrant un grenat coronitique (Grt) autour de la wollastonite (Wo) et du clinopyroxène (Cpx) d'une fénite blanche. Mc : microcline (*Detail of a reaction in polarized-analyzed light under microscope, showing a corona of garnet (Grt) around wollastonite (Wo) and clinopyroxene (Cpx) in white fenite. Mc : microcline*).

G : Détail d'un niveau clair d'une fénite blanche au microscope en lumière naturelle montrant des perthites (Kfs) et des apatites (Ap) entourées d'allanite (Aln) (*Detail of a clear level of a white fenite in natural light under microscope, showing the perthites (Kfs) and the apatites (Ap) surrounded by allanite (Aln)*).

H : Détail d'un niveau sombre d'une fénite blanche au microscope en lumière naturelle à clinopyroxène (Cpx), wollastonite (Wo) et quartz (Qtz) entourés de grenats (Grt) coronitiques. On y trouve également du sphène (Spn) et du feldspath potassique (Kfs) (*Detail of a dark level of a white fenite in natural light under microscope, with clinopyroxene (Cpx), wollastonite (Wo) and quartz (Qtz) surrounded by garnets (Grt) coronas. Sphene (Spn) and potassic feldspar is also observed (Kfs)*).

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'ITHOUHAOUËNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.



15% de la roche. L'apatite est un minéral essentiel souvent entouré d'allanite (fig. 3G). Il y a aussi du sphène abondant ainsi que de la calcite et du quartz qui remplissent les interstices des minéraux. Le grenat est un minéral tardif, il est en couronne autour du clinopyroxène et de la wollastonite (fig. 3H).

III.3. Les brèches à ciment feldspathique

Elles montrent des fragments de fénites blanches et des amas à pyroxène-grossulaire cimentés par une matrice composée de feldspath potassique (fig. 4A).

Ces brèches sont observées sur les bordures Nord-Est du complexe (fig. 2B). Ce sont des roches à teinte grise ou blanche qui sont constituées de blocs, de fragments et débris de diverses variétés de fénites dans une matrice composée de feldspath potassique.

III.4. Les carbonatites de type I bréchiques à apatite rose

Elles forment l'essentiel des affleurements, des veines pouvant atteindre 70 m d'épaisseur pour 500m de longueur. Elles sont caractérisées par une auréole réactionnelle (jusqu'à 10cm) de clinopyroxène, qui isole les enclaves de fénites de la matrice carbonatée et d'apatite rose (fig. 4B, 4D).

Les carbonatites ont des structures à grain moyen à grossier, régulier ou irrégulier. Elles sont composées d'une matrice carbonatée calcitique grise, rose ou gris-verdâtre dans laquelle sont noyés des agrégats et des grains isolés de pyroxène, de feldspath potassique et d'apatite. Ces roches sont hétérogènes et contiennent de nombreuses enclaves millimétriques à métriques de fénites (fig. 4B, 4D).

Dans ces carbonatites, on peut distinguer, par enrichissement de certains minéraux, plusieurs variétés :

Fig. 4 : Photos d'affleurements et au microscope de brèches feldspathiques, de carbonatites I et de carbonatites pegmatitiques.

Photographs of outcrops and under the microscope of feldspathic breccia, carbonatites I and pegmatitic carbonatites.

A : Affleurement d'une brèche feldspathique montrant des éléments de fénites blanches et un ciment feldspathique. (*Outcrop of a feldspathic breccia showing elements of white fenites and feldspathic cement*).

B : Affleurement d'une carbonatite I bréchique qui recoupe nettement les fénites et qui les enclave (*Outcrop of a brecciated carbonatite I which recuts clearly the fenites and which enclosed them*).

C : Détail au microscope en lumière naturelle d'une carbonatite I montrant des calcites (Cal) déformées et des allanites (Aln) autour des clinopyroxènes (Cpx) (*Detail in natural light under microscope of a carbonatite I showing deformed calcites (Cal) and allanites (Aln) around clinopyroxenes (Cpx)*).

D : Contact en déséquilibre entre une enclave fénitique et une carbonatite montrant une couronne de clinopyroxène (Cpx) (*Disequilibrium contact between a fenitic enclave and carbonatite showing clinopyroxene corona (Cpx)*).

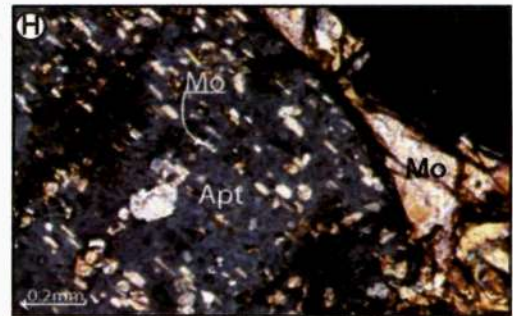
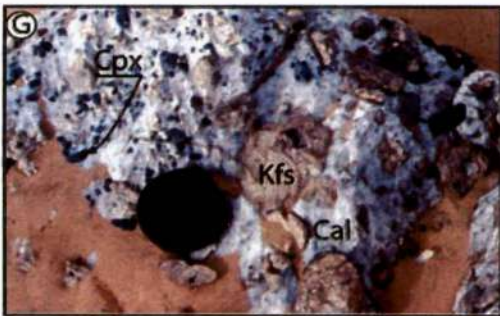
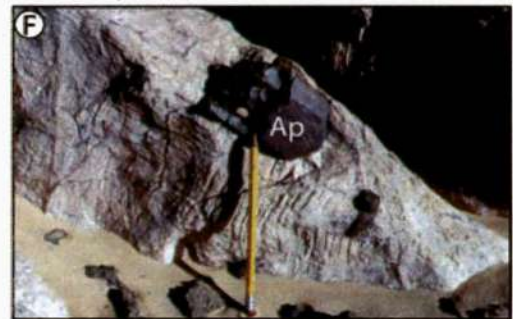
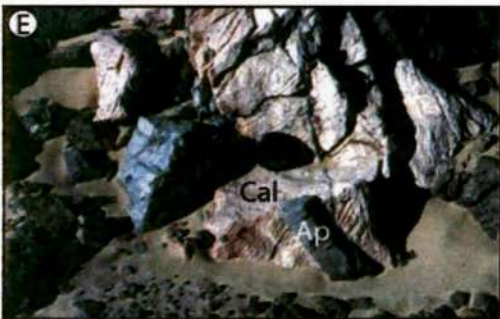
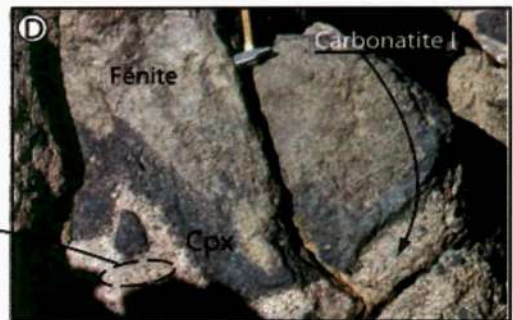
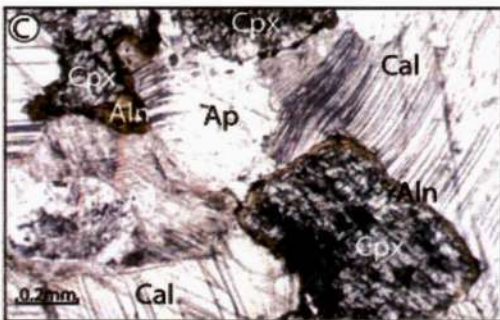
E : Affleurement d'une carbonatite II pegmatitique à calcite (Cal) et apatite verte (Ap) en grands cristaux (*Outcrop of a pegmatitic carbonatite II with calcite (Cal) and green apatite (Ap) as large crystals*).

F : Affleurement d'une carbonatite II pegmatitique rose à apatite et monazite (*Outcrop of a pegmatitic carbonatite II with pink apatite and monazite*).

G : Affleurement d'une carbonatite II à gros cristaux de calcite (Cal) de feldspath potassique (Kfs) et de clinopyroxène (Cpx) (*Outcrop of a carbonatite II with large crystals of calcite (Cal), potassic feldspar (Kfs) and clinopyroxene (Cpx)*).

H : Détail au microscope en lumière polarisée-analysée d'une apatite (Ap) montrant une couronne de monazite (Mo) et des inclusions de monazite et de quartz alignées suivant des plans préférentiels (*Detail in polarized-analyzed light under microscope of an apatite (Ap) showing crown and inclusions of monazite (Mo) and aligned quartz along the preferential plans*).

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'ITHOUHAOUÈNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.



- Les carbonatites à wollastonite qui sont des roches leucocratiques à grain moyen à fin à matrice calcitique. On y trouve du clinopyroxène vert, du feldspath potassique, de la wollastonite, du quartz, du grenat, du sphène et de l'apatite dont la taille peut atteindre 1cm.

- Les carbonatites à pyroxène qui sont des roches à grain moyen avec une matrice calcitique rose, verte ou grise. Les grains de la calcite peuvent atteindre 3mm avec un clivage souvent déformé (fig. 4C); ils sont souvent entourés d'allanite (fig. 4C). Autour des clinopyroxènes, il existe des amas d'amphibole à grain fin. Du feldspath potassique, du grenat coronitique et de l'apatite (dont la longueur maximale est de 3mm) peuvent s'y ajouter. Autour des grains d'apatite et de clinopyroxène se forme très souvent de l'allanite (fig. 4C).

III.5. Les carbonatites de type II pegmatitiques à apatite verte ou rose

Elles se présentent en veines recoupant nettement les carbonatites I bréchiques et se composent, dans la majorité des cas, de grands cristaux de calcite et d'apatite verte (fig. 4E) ou rose (fig. 4F). Les apatites sont remarquables par la présence de micro-inclusions de monazite (26% du volume de l'apatite) associées à de la calcite et au quartz (fig. 4H).

Les carbonatites II sont des roches généralement claires, massives et sont en filons (1 à 2m de large) à l'intérieur des carbonatites I ou des fénites rouges. Les carbonatites II ont un grain plus grossier et sont plus homogènes que les carbonatites I. La matrice calcitique de ces roches est à grain moyen; on y trouve dispersés de gros cristaux d'apatite pouvant atteindre 30cm de long, mais aussi du pyroxène et du feldspath potassique (fig. 4G). Ces cristaux d'apatite contiennent des inclusions de quartz, de calcite et de monazite. La calcite compose environ 40% de la roche et les feldspaths potassiques moins de

10%, en amas irréguliers souvent associés à du quartz.

III.6. Les carbonatites de type III tardives

Elles sont en filons très étroits (au maximum 10cm d'épaisseur) recoupant les carbonatites I et II et ne sont composées que de calcite.

IV. COMPOSITION CHIMIQUE DES MINÉRAUX DES CARBONATITES ET DES FÉNITES D'HOUHAOUÈNE

L'étude à la microsonde (Camebax, Paris VI-VII-IPGP) des minéraux, aussi bien des fénites que des carbonatites, a révélé deux grands types de minéraux :

- des minéraux pauvres en éléments traces (dont les terres rares) comme le clinopyroxène, l'amphibole, le feldspath potassique, la wollastonite, le grenat et la calcite.

- et, des minéraux riches en éléments traces (dont les terres rares) comme l'apatite, la monazite, l'allanite et à un degré moindre le sphène.

IV.1. Les minéraux pauvres en terres rares

IV.1.1. Le clinopyroxène

Les compositions des clinopyroxènes de carbonatites sont tout à fait comparables à celles des clinopyroxènes de fénites (tableau II, fig. 5).

Globalement, ils sont de type diopside à l'exception des clinopyroxènes des fénites blanches qui sont de type hédenbergite (fig. 5A) et dans ce dernier cas, ils s'entourent de grenat (fig. 3F, 3H).

Les teneurs en ferrosilite des clinopyroxènes des carbonatites et des fénites sont très variées (tableau II).

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'ITHOUHAOUËNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

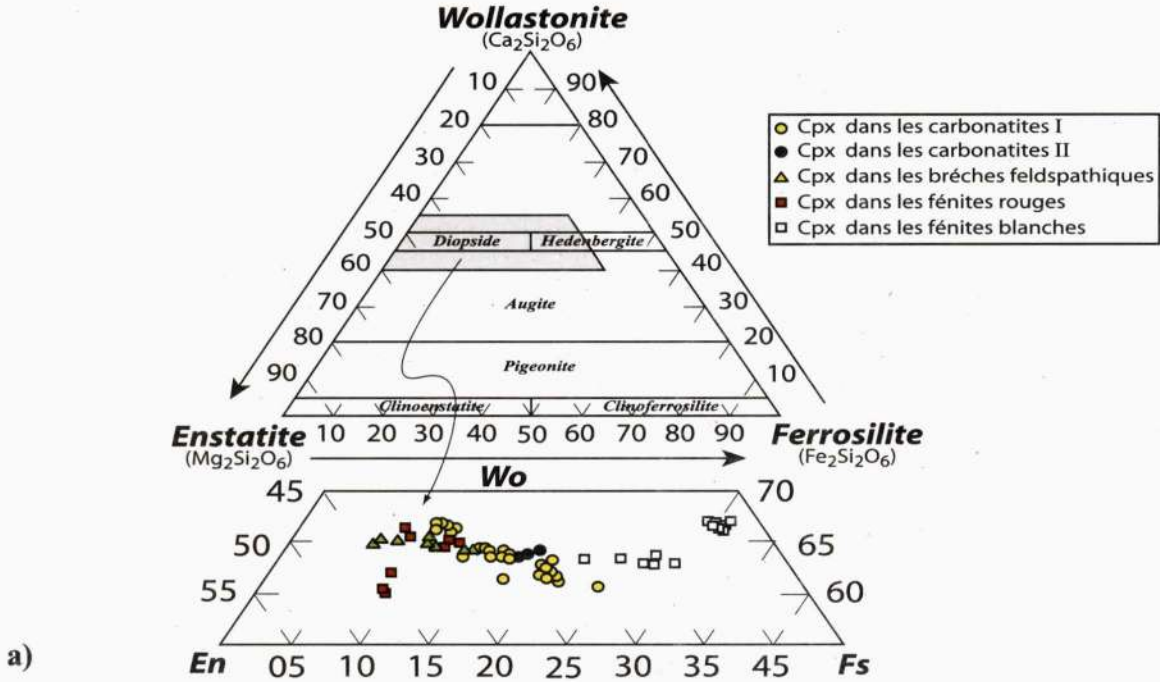


Fig.5a

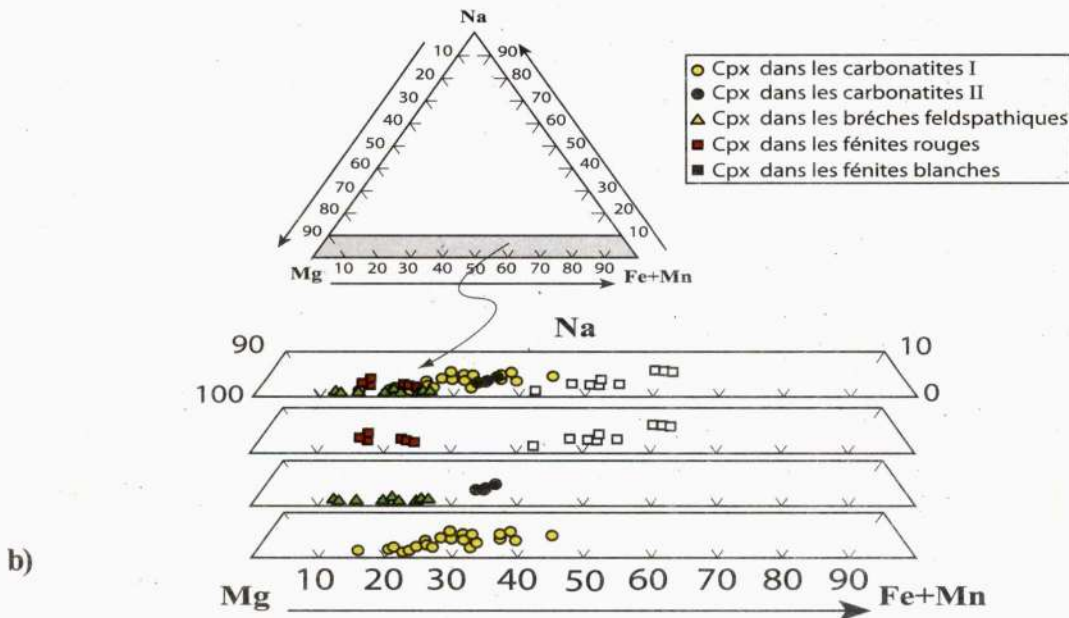


Fig. 5 : Projection des clinopyroxènes des carbonatites et des fénites dans le diagramme wollastonite - enstatite - ferrosilite (a) et dans le diagramme Na (acmite) - Mg (diopside) - Fe+Mn (hedenbergite) (b).

Plot of clinopyroxenes from carbonatites and fenites in the diagram wollastonite- enstatite - ferrosilite (a) and in the diagram Na (acmite) - Mg (diopside) - Fe+Mn (hedenbergite) (b).

Dans le diagramme Na - Mg - Fe+Mn représentant les pôles acmite - diopside - hédénbergite (fig. 5B), les variations du rapport Fe+Mn/Mg ont été mises en évidence avec les clinopyroxènes les plus ferrifères appartenant aux fénites blanches et les plus pauvres étant ceux des brèches feldspathiques ainsi que des fénites rouges. Cette variation chimique existe sans enrichissement en sodium. Cette absence d'enrichissement en sodium est typique des magmas basiques alcalins peu différenciés (Brooks et *al.*, 1982).

Ces clinopyroxènes se caractérisent également par des teneurs en alumine qui varient dans un large intervalle. Elles sont comprises entre 0,217 et 6,05% pour les carbonatites I, entre 1,75 et 3,15% pour les carbonatites II, entre 0,117 et 0,365% pour les brèches feldspathiques et entre 0,102 et 0,977% pour les fénites (tableau II).

Les teneurs en titane sont très faibles. De telles teneurs pourraient expliquer une faible température de cristallisation de magma ainsi qu'une faible fugacité d'oxygène (Verhoogen, 1962).

Tableau II - Composition chimique et formules structurales des clinopyroxènes.

Chemical composition and structural formulae of clinopyroxenes.

Clinopyroxènes										
Type de Roches	Carbonatitel			Brèche Felds.		Fénite Rouge		Fénite blanche		
N°échantillon N° analyse	Inh640 4018	In 688 512	3,15 1066	Inh730 5062	Inh742B 5004	3,35 68	3,35 87	3,24 28	3,24 33	Inh686 478
SiO ₂	46,81	50,84	53,78	52,82	54,33	52,90	52,43	49,86	49,49	51,31
TiO ₂	0,24	0,11	0,00	0,04	0,00	0,00	0,05	0,07	0,04	0,35
Al ₂ O ₃	6,05	2,12	0,36	0,28	0,23	0,47	0,71	0,89	0,74	3,09
Cr ₂ O ₃	0,03	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,00	2,68	0,00	0,80	0,17	1,57	3,13	2,08	3,32	0,00
FeO	12,54	8,76	4,82	7,37	3,51	6,83	3,87	16,35	15,26	15,65
MnO	0,28	0,23	0,00	1,00	0,46	0,65	0,63	0,96	1,00	0,51
MgO	8,79	11,16	14,51	12,96	15,85	13,03	13,90	5,65	5,86	7,30
CaO	22,64	22,99	24,66	24,31	25,19	23,97	24,29	22,44	22,54	21,56
Na ₂ O	0,68	0,54	0,19	0,27	0,15	0,40	0,50	0,74	0,78	0,41
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,04
Total	98,06	99,50	98,32	99,90	99,89	99,81	99,53	99,08	99,02	100,27
Si	1,830	1,930	2,011	1,983	1,996	1,982	1,957	1,976	1,962	1,966
Ti	0,007	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,010
Al	0,278	0,094	0,015	0,020	0,009	0,021	0,031	0,042	0,034	0,138
Cr	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,000	0,076	0,000	0,022	0,004	0,044	0,088	0,062	0,099	0,000
Fe ²⁺	0,409	0,278	0,150	0,231	0,107	0,021	0,020	0,542	0,506	0,501
Mn	0,009	0,007	0,000	0,031	0,014	0,214	0,121	0,032	0,033	0,016
Mg	0,512	0,631	0,808	0,725	0,867	0,728	0,774	0,333	0,346	0,417
Ca	0,948	0,935	0,988	0,978	0,991	0,962	0,971	0,953	0,957	0,885
Na	0,051	0,040	0,014	0,019	0,010	0,029	0,036	0,057	0,060	0,031
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001
Total	4,048	4,000	3,988	4,007	4,002	4,001	4,000	4,001	3,999	3,970
Wollasonite	39,20	0,434	49,30	48,10	49,30	50,01	51,52	51,22	51,95	43,00
Ferrosilite	20,90	0,143	7,50	13,10	6,10	37,81	41,02	17,92	18,78	25,90
Enstatite	25,60	0,315	40,40	36,20	43,30	12,18	7,46	30,85	29,27	20,80
X _{Mg}	0,550	0,688	0,843	0,734	0,877	0,773	0,865	0,381	0,406	0,446

IV.1.2. La wollastonite

La wollastonite est généralement rare dans les complexes alcalins. Sa présence avec le quartz et la calcite dans les carbonatites de l'In Ouzzal est exceptionnelle (fig. 3F, 3H) et montre bien le caractère saturé en silice de ce gisement de carbonatites.

La wollastonite présente une composition relativement homogène et il n'existe pas de différence chimique entre les wollastonites des fénites et celles des carbonatites (tableau III).

IV.1.3. L'amphibole

C'est une phase secondaire des roches étudiées. Il s'agit presque toujours d'une amphibole calcique (tableau IV, fig.6). Les teneurs en CaO des amphiboles aussi bien des carbonatites que des fénites sont quasiment semblables. Par contre, celles en K_2O , sont nettement plus élevées (0,04-1,71%) dans les carbonatites que dans les fénites (0,05-0,99%). Pour caractériser la composition chimique d'une manière générale des amphiboles des différentes générations de carbonatites et des fénites étudiées, l'utilisation

Tableau III - Composition chimique et formules structurales des wollastonites

Chemical composition and structural formulae of wollastonites

Wollastonites			
Type de Roches	Fénite blanche		Brèche Felds.
N°échantillon N° analyse	3,24 17	3,24 27	Inh 742B 50
SiO ₂	50,67	51,34	51,50
TiO ₂	0,00	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	1,38	0,54	0,28
FeO	0,00	0,00	0,000
MnO	0,59	0,58	0,12
MgO	0,03	0,03	0,02
CaO	47,57	47,61	48,29
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00
Total	100,24	100,11	100,12
Si	1,969	1,989	1,992
Ti	0,000	0,001	0,000
Al	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,040	0,016	0,008
Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000
Mn	0,020	0,019	0,003
Mg	0,002	0,002	0,001
Ca	1,980	1,976	2,001
Na	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000
Total	4,011	4,003	4,002

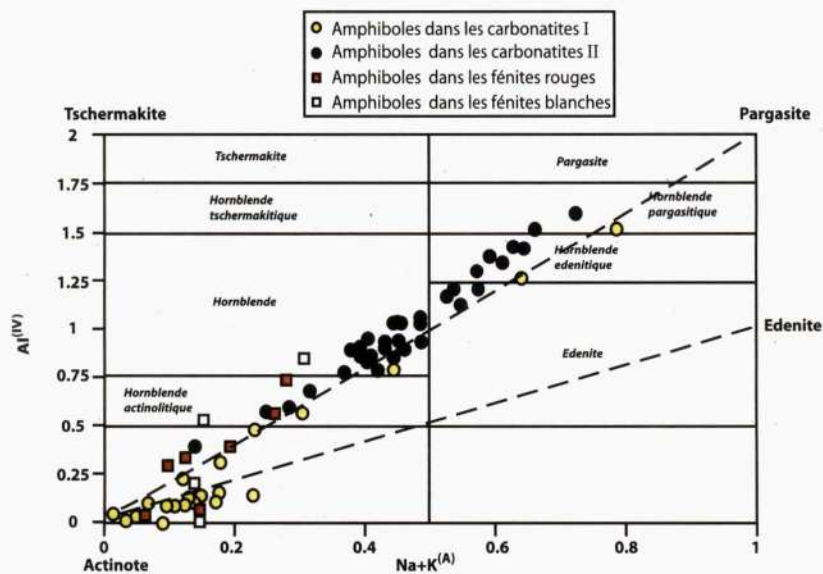


Fig.6 - Position des amphiboles des carbonatites et des fénites dans le diagramme $Al^{(IV)}$ en fonction de $Na+K^{(A)}$
The amphiboles of carbonatites position and the fenites in diagram $Al^{(IV)}$ versus $Na+K^{(A)}$.

Tableau IV - Composition chimique et formules structurales des amphiboles
Chemical composition and structural formulae of amphiboles.

Amphibole	CarbonatiteI			CarbonatiteII		Fénite rouge		Fénite blanche		
Type de Roches										
N°échantillon	3,34	640	3.19	3,30	3,30	697	697	Inh686	Inh686	Inh686
N° analyse	9035	3011	6001	414	428	5025	5027	467	468	470
SiO ₂	44,50	50,94	55,52	49,65	41,47	53,47	55,11	51,68	48,26	51,85
TiO ₂	0,32	0,12	0,08	0,16	0,40	0,07	0,00	0,07	0,18	0,06
Al ₂ O ₃	8,39	3,58	0,83	4,88	10,16	0,58	0,38	3,87	6,43	1,97
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	2,83	0,67	0,00	1,36	4,62	0,00	0,00	1,99	2,02	0,00
FeO	13,87	13,73	6,28	13,78	17,47	7,92	6,67	10,29	12,54	16,88
MnO	0,25	0,25	0,11	0,37	0,49	0,86	1,19	0,55	0,54	1,47
MgO	11,88	14,20	19,86	13,64	8,28	17,63	17,23	15,71	13,25	11,66
CaO	12,01	12,35	12,49	12,09	11,76	15,60	16,11	12,50	12,15	11,26
Na ₂ O	1,51	0,69	0,53	0,79	1,29	0,36	0,49	0,31	0,41	0,51
K ₂ O	1,04	0,19	0,26	0,47	1,71	0,37	0,05	0,35	0,99	0,46
H ₂ O	1,78	2,03	1,62	1,87	1,66	1,67	2,08	1,92	1,85	1,95
Total	98,82	98,75	98,63	99,50	100,19	99,51	99,36	99,64	99,12	98,19
Cl	0,06	0,00	0,02	0,06	0,48	0,03	0,00	0,10	0,21	0,00
F	0,38	0,00	1,02	0,30	0,35	0,84	0,03	0,27	0,25	0,09
Si	6,733	7,522	7,900	7,321	6,397	7,728	7,876	7,475	7,151	7,798
Ti	0,036	0,013	0,008	0,018	0,046	0,008	0,000	0,008	0,020	0,007
Al ^{IV}	1,266	0,478	0,100	0,678	1,602	0,098	0,064	0,524	0,848	0,201
Al ^{VI}	0,228	0,144	0,039	0,170	0,246	0,000	0,000	0,135	0,274	0,149
Cr	0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,323	0,074	0,000	0,151	0,537	0,000	0,000	0,217	0,226	0,000
Fe ²⁺	1,755	1,695	0,747	1,700	2,253	0,956	0,797	1,244	1,554	2,122
Mn	0,031	0,031	0,013	0,045	0,063	0,105	0,144	0,066	0,068	0,187
Mg	2,678	3,123	4,211	2,998	1,920	3,797	3,670	3,387	2,926	2,625
Ca	1,946	1,953	1,904	1,910	1,944	2,305	2,079	1,938	1,929	1,915
Na	0,442	0,196	0,072	0,227	0,386	0,101	0,136	0,089	0,120	0,048
K	0,200	0,036	0,047	0,088	0,337	0,067	0,009	0,064	0,187	0,089
Total	15,638	15,265	15,041	15,309	15,732	15,178	14,775	15,147	15,303	15,141
F	0,182	0,000	0,460	0,140	0,168	0,383	0,013	0,123	0,118	0,043
Cl	0,016	0,000	0,004	0,015	0,126	0,006	0,000	0,023	0,051	0,000
OH	1,801	2,000	1,537	1,843	1,704	1,610	1,987	1,853	1,829	1,956
X _{Mg}	0,600	0,644	0,847	0,632	0,451	0,781	0,796	0,721	0,643	0,531

du diagramme de la figure 6 est fondée sur le rapport entre l'alumine en site tétraédrique et les alcalins en site A (Leake, 1978). Ce diagramme a l'inconvénient de ne pas faire intervenir le rapport X_{Mg} ($Mg / Mg + Fe$), mais il a l'avantage de mettre en évidence la lignée pargasitique en fonction des rapports entre les substitutions tchermakitiques et édénitiques.

Ces amphiboles se caractérisent par des teneurs très variées en alumine (Al^{IV}). Il apparaît

aussi que les amphiboles des carbonatites I et des fénites sont généralement des actinolites ou des actino-hornblendes, celles des carbonatites II sont des Mg-hornblendes ou des hornblendes. Ce diagramme montre une grande évolution allant du pôle actinote vers le pôle pargasite qui traduit probablement une cristallisation à températures variables commençant à haute température avec les pargasites et se terminant avec les actinotes à basse température.

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOUHAOUËNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

IV.1.4. Le feldspath potassique

Le feldspath potassique est un constituant essentiel dans les fénites (fig. 3E). Il domine largement par rapport aux autres minéraux avec une proportion variable de 40 à 80% du volume de la roche. Dans les carbonatites, il se trouve aussi en proportions variables (jusqu'à 30% du volume de la roche). Les feldspaths des fénites sont des feldspaths perthitiques (fig. 3C). Ils cristallisent en lamelles très fines de feldspath sodique (albite) (Ab_{96-97}) et coexistent en intercroissance avec un feldspath potassique de composition intermédiaire entre Or_{74} et Or_{93} . Dans ces roches, les feldspaths existent aussi sous forme de microcline de composition plus potassique Or_{94-97} (fig. 3F). Ces phases sont

également moins enrichies en anorthite (moins de 1%) que celles des carbonatites II et des carbonatites I (qui peuvent atteindre 8,5%). Dans les carbonatites, les feldspaths sont semblables à ceux des fénites. Ils se présentent sous forme de microcline ou de perthites avec une composition d'albite qui varie entre Ab_{88} et Ab_{99} et une composition d'orthose qui varie entre Or_{81} et Or_{97} (fig. 7, tableau V)

IV.1.5. Le grenat

Le grenat des brèches feldspathiques et des fénites du centre 3 se développe en couronne autour des minéraux primaires essentiellement autour du clinopyroxène et parfois autour de la

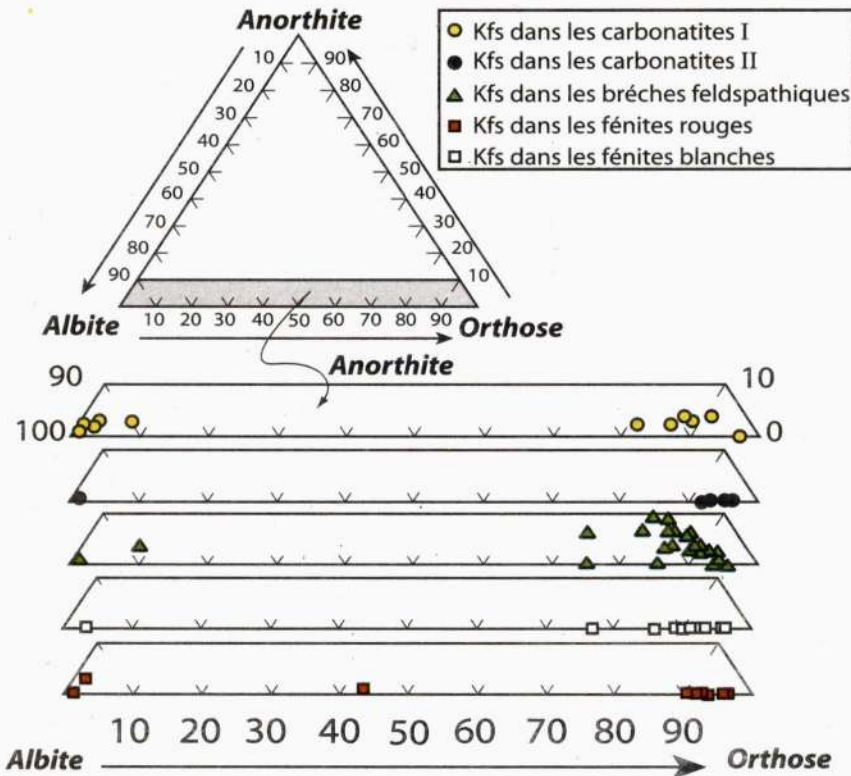


Fig. 7 - Projection des feldspaths potassiques des carbonatites et des fénites dans le diagramme orthoclase - albite - anorthite.

Plot of potassic feldspars of carbonatites and fenites in the diagram orthoclase - albite - anorthite.

Tableau V - Composition chimique et formules structurales des feldspaths.

Chemical composition and structural formulae of feldspars.

Feldspaths		Carbonatite				Fénite			
Type Roche									
N°échantillon	3,19	3,15	Inh730	3,34	3,24	3,35	3,24	3,35	
N° analyse	232	1050	220	9053	32	51	7	67	
SiO ₂	63,70	64,60	67,47	69,57	64,37	63,53	67,62	68,00	
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	
Al ₂ O ₃	19,12	18,90	20,21	20,03	19,36	18,66	19,61	20,15	
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fe ₂ O ₃	0,11	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
FeO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	
MnO	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MgO	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	
CaO	0,01	0,00	0,38	0,15	0,02	0,00	0,06	0,15	
BaO	1,12	0,00	0,10	0,00	2,07	1,34	0,00	0,51	
SrO	0,00	0,00	0,64	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	
Na ₂ O	1,81	0,32	10,53	11,51	2,39	0,46	11,61	11,71	
K ₂ O	13,56	15,95	1,44	0,06	11,97	15,19	0,57	0,12	
Total	99,48	99,77	100,78	101,41	100,19	99,18	99,95	100,63	
Si	2,958	2,986	2,955	2,991	2,964	2,977	2,974	2,966	
Ti	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	
Al	1,046	1,029	1,042	1,014	1,051	1,030	1,016	1,036	
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe ³⁺	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Mn	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	
Ca	0,000	0,000	0,017	0,007	0,001	0,000	0,003	0,007	
Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	
Ba	0,020	0,000	0,001	0,000	0,037	0,025	0,000	0,009	
Sr	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	
Na	0,163	0,028	0,894	0,959	0,213	0,042	0,989	0,990	
K	0,803	0,940	0,080	0,003	0,703	0,908	0,032	0,007	
Total	4,999	4,984	5,010	4,980	4,970	4,970	5,028	5,015	
Orthose	81,35	97,05	7,978	0,34	73,70	93,14	3,10	0,650	
Albite	16,51	2,95	88,473	98,92	22,32	4,33	96,64	97,810	
Anorthite	2,14	0,00	3,548	0,73	0,08	0,00	0,26	0,680	

wollastonite (fig. 3F, 3H), de la calcite et du feldspath potassique. Il existe, aussi, rarement en grains isolés dans la matrice feldspathique des brèches feldspathiques. Ce type de grenat a été observé par Ouzegane (1987) dans les centres 1 et 2 du complexe carbonatitique d'Ihouhaouène et par Nash (1972) dans les syénites néphéliniques et les sovites du complexe d'Iron Hill au Colorado. Projetés dans le diagramme grossulaire - andradite - almandin+spessartine+pyrope, les grenats du centre 3 sont principalement des solutions solides entre le grossulaire (20 à 66%) et l'andradite

(30 à 80 %, fig.8). Les grenats appartenant aux fénites sont nettement plus riches en Fe₂O₃ (24%) et plus pauvres en Al₂O₃ (4 %) que ceux des brèches feldspathiques (10-14 %; tableau IV) ce qui traduit une substitution de Al par Fe³⁺ dans les sites octaédriques du grenat.

Ces grenats sont comparables aux grenats du centre 1 et 2 étudiés par Ouzegane (1987). Selon la classification de Deer et al. (1982), nos grenats sont des mélanites (Fe³⁺ > Ti) et d'après les suggestions de Nash (1972) les mélanites cristallisent à partir de fluides métasomatiques.

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOUHOUËNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

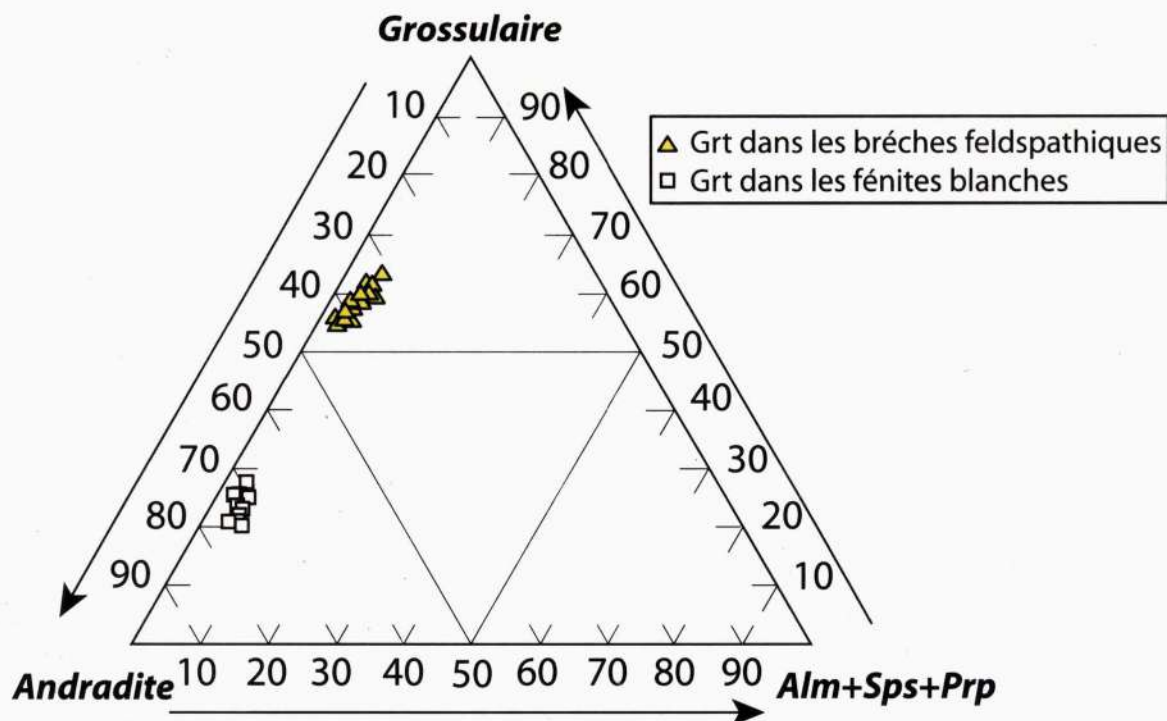


Fig. 8 - Projection des grenats des carbonatites et des fénites dans le diagramme grossulaire – almandin+spessartine+pyrope – andradite.

Plot of garnets of carbonatites and fénites in the diagram grossular - almandine +spessartine+pyrope - andradite.

IV.1.6. La calcite

Elle est assez riche en strontium (0,5-1,48%) et typique des calcites de carbonatites (tableau VII).

IV.2. Les minéraux riches en terres rares

Les minéraux phosphatés contenus dans les carbonatites sont importants au point de former des concentrations économiquement intéressantes. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons essentiellement à l'étude des apatites, des monazites, des allanites et des sphènes.

IV.2.1. Les apatites

L'apatite correspond à la phase minérale la plus représentée et la plus diversifiée dans le complexe carbonatitique (fig. 4E, 4F).

Dans les carbonatites I, elle est surtout de couleur rose, bien cristallisée et de forme prismatique. Elle constitue 5 à 15% du volume de la roche et elle est associée à la calcite et au pyroxène.

Dans les carbonatites II, elle existe en de très beaux cristaux, le plus souvent, de couleur verte et parfois rose pouvant atteindre 1m de long dans les veines tardives en association avec la calcite. Ces apatites sont dispersées de façon irrégulière. La variété de l'apatite rose est caractérisée par sa richesse en inclusions de monazite ainsi que d'autres minéraux comme le quartz et la calcite (fig. 4H). D'après les travaux d'Ouzegane (1987), il existe, également, des micro-inclusions de thorite (ThSiO_4), de célite (CeSiO_4) et de bastnaesite ($\text{Ce}(\text{CO}_3)(\text{OH},\text{F})$).

Dans les fénites, l'apatite est en grain moyen à grossier. Dans les fénites blanches, elle est consi-

Tableau VI - Composition chimique et formules structurales des grenats
 Chemical composition and structural formulae of garnets.

Grenats					
Type de Roches	Fénite blanche		Brèche Feldspathique		
N°échantillon N° analyse	Inh 3,24 6	Inh 3,24 56	Inh 730 5040	Inh 730 5065	Inh 730 303
SiO ₂	35,91	36,33	36,84	37,11	37,73
TiO ₂	0,57	0,57	0,90	1,01	1,47
Al ₂ O ₃	4,14	4,68	12,01	12,01	13,65
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00
Fe ₂ O ₃	24,39	23,71	13,59	12,79	10,10
FeO	0,90	0,83	0,66	1,39	1,67
MnO	0,40	0,00	0,40	0,39	0,35
MgO	0,10	0,00	0,07	0,06	0,12
CaO	32,87	33,66	35,06	34,43	35,07
Na ₂ O	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06
Total	99,29	99,78	99,56	99,35	100,23
Si	2,992	3,000	2,944	2,968	2,965
Ti	0,035	0,035	0,054	0,060	0,086
Al ^{IV}	0,007	0,000	0,056	0,032	0,034
Al ^{VI}	0,399	0,455	1,074	1,099	1,229
Cr	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000
Fe ³⁺	1,529	1,473	0,817	0,769	0,597
Fe ²⁺	0,062	0,057	0,044	0,092	0,109
Mn	0,028	0,000	0,026	0,026	0,023
Mg	0,012	0,000	0,008	0,006	0,014
Ca	2,934	2,977	3,001	2,950	2,952
Na	0,001	0,000	0,003	0,001	0,002
K	0,000	0,000	0,001	0,000	0,005
Total	7,999	7,999	8,030	8,017	8,021
Grossulaire	21,08	25,31	57,63	57,94	66,35
Andradite	75,51	72,80	39,80	37,53	28,89
Ouvarovite	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00
Almandin	2,07	1,89	1,44	3,02	3,54
Spessartine	0,93	0,00	0,87	0,86	0,75
Pyrope	0,41	0,00	0,26	0,22	0,47

dérée comme un minéral essentiel (jusqu'à 3%). Par contre dans les fénites rouges, elle est représentée comme un minéral accessoire (<0.5 %).

Du point de vue chimique, une distinction apparaît entre les carbonatites I, les carbonatites II et les fénites (tableau VIII). Ainsi, une variation importante de la composition est observée dans les apatites des carbonatites I et ce, au sein même du même minéral, alors que la composition est pratiquement constante dans les carbonatites II. Cette hétérogénéité chimique

est, également, mise en évidence dans les apatites des fénites blanches et moins dans les fénites rouges qui sont comparables aux apatites roses des carbonatites I (tableau VIII). Ces variations s'expliquent par le fait que les apatites des carbonatites I sont plus riches en terres rares et en silice que celles des carbonatites II.

Les apatites des carbonatites II les moins riches en terres rares sont celles qui contiennent des monazites, lesquelles concentrent essentiellement ces éléments.

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOUHOUËNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

Tableau VII - Composition chimique et formules structurales des calcites

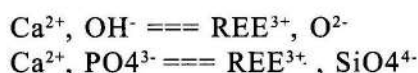
Chemical composition and structural formulae of calcites.

Calcite						
Type de Roches	CarbonatiteII				CarbonatiteI	
N°échantillon N° analyse	3,31 1	3,20 29	3,20 31	3,19 34	3,25 8050	3,25 8052
SiO ₂	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	0,47	0,26	0,24	0,49	0,49	0,43
MnO	0,40	0,13	0,08	0,21	0,14	0,15
MgO	0,23	0,28	0,20	0,49	0,35	0,18
CaO	54,09	54,84	54,60	53,16	52,12	53,56
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SrO	0,50	1,30	1,26	1,48	1,31	0,96
CO ₂	43,45	44,16	43,85	43,31	42,23	42,99
Total	99,14	101,00	100,28	99,14	96,65	98,28
Si	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe	0,006	0,003	0,003	0,006	0,007	0,006
Mn	0,005	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
Mg	0,005	0,007	0,004	0,012	0,009	0,004
Ca	0,976	0,974	0,976	0,963	0,968	0,977
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sr	0,004	0,012	0,012	0,014	0,013	0,009
Total	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	0,999

Dans toutes les apatites analysées, les teneurs varient entre 35,14 et 42,02% de P₂O₅, entre 47,09 et 55,99% de CaO, entre 0,086 et 3,80% de SiO₂, entre 2,58 et 4,89% de F et enfin, entre 0 et 0,22% de Cl. Les teneurs en silicium s'étendent entre 0,086 et 2,441% pour l'apatite des carbonatites I, de 0,216 et 1,769% pour l'apatite des carbonatites II et de 0,387 de 3,799% pour l'apatite des fénites. Pour le calcium, les variations sont de l'ordre de 3% dans l'apatite des carbonatites I et de 1% dans l'apatite des carbonatites II et des fénites rouges. Par contre, l'apatite des fénites blanches montre une importante hétérogénéité chimique en calcium (de 47,09 à 53,17%) (tableau VIII). En ce qui concerne le thorium, il est en faible quantité dans les apatites ; Il en est de même pour les autres éléments comme le strontium, le magnésium, le fer, l'aluminium et l'uranium. Par contre, pour ce qui est du fluor et du chlore, les concentrations sont importantes avec une

prédominance du fluor par rapport au chlore dans les apatites fluorées du centre 3 comme le montre le tableau VIII. On constate une richesse en chlore (> à 0,1%) dans les apatites des carbonatites I puis les apatites des carbonatites II à monazites par rapport aux autres carbonatites II et aux fénites qui sont les moins chlorées.

Par leur chimisme, les apatites sont des phosphocalciques fluorées (Ca₁₀(PO₄)₆F₂). Leur formule implique des substitutions nombreuses et variées. Les plus fréquentes sont :



Dans les apatites du complexe carbonatitique du centre 3, il existe une corrélation négative pour la substitution du calcium par les terres rares (fig. 9a).

Tableau VIII - Composition chimique et formules structurales des apatites
Chemical composition and structural formulae of apatites.

Apatite		CarbonatiteI		CarbonatiteII		Fénite blanche	
Type de Roches							
N°échantillon	3,34	3,34	3,31	3,33	3,24	3,24	
N° analyse	7027	101	7023	7029	1	8	
P ₂ O ₅	35,14	36,38	40,25	35,63	35,15	40,52	
SiO ₂	2,30	2,44	0,22	1,77	3,80	1,27	
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fe ₂ O ₃	0,01	0,00	0,01	0,00	0,59	0,11	
MnO	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	
MgO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	
CaO	51,20	51,00	55,01	52,36	47,09	52,48	
BaO	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	
SrO	0,74	0,66	0,40	0,89	0,30	0,72	
Na ₂ O	0,08	0,00	0,03	0,18	0,01	0,00	
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
H ₂ O	0,00	0,00	0,02	0,00	0,28	0,25	
SO ₃	0,49	0,00	0,12	0,59	0,32	0,22	
Y ₂ O ₃	0,01	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	
La ₂ O ₃	1,03	1,61	0,00	0,99	2,61	0,27	
Ce ₂ O ₃	2,50	2,33	0,12	2,10	4,23	0,97	
Pr ₂ O ₃	0,16	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	
Nd ₂ O ₃	0,57	0,99	0,16	0,44	1,35	0,68	
Sm ₂ O ₃	0,12	0,30	0,06	0,11	0,39	0,00	
ThO ₂	0,16	0,17	0,05	0,06	0,00	0,00	
UO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cl	0,02	0,011	0,03	0,03	0,03	0,00	
F	4,14	3,581	3,62	4,14	2,89	3,17	
Total	98,64	100,06	100,14	99,30	99,05	100,65	
P	2,697	2,745	2,931	2,711	2,681	2,925	
Si	0,208	0,217	0,019	0,159	0,342	0,108	
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,007	
Mn	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	
Mg	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	
Ca	4,972	4,870	5,070	5,042	4,546	4,793	
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Sr	0,039	0,034	0,020	0,046	0,015	0,035	
S	0,033	0,000	0,008	0,040	0,021	0,013	
Na	0,014	0,000	0,005	0,031	0,000	0,000	
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Y	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	
La	0,034	0,052	0,000	0,033	0,086	0,008	
Ce	0,083	0,076	0,004	0,069	0,139	0,030	
Pr	0,005	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	
Nd	0,018	0,031	0,005	0,014	0,043	0,020	
Sm	0,003	0,009	0,001	0,003	0,012	0,000	
Th	0,003	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	
U	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Total	8,111	8,065	8,066	8,150	7,931	7,943	
Cl	0,002	0,001	0,004	0,005	0,005	0,000	
F	1,185	1,009	0,985	1,175	0,824	0,855	
OH	0,000	0,000	0,011	0,000	0,170	0,144	

Les teneurs en terres rares les plus élevées se concentrent dans les apatites des fénites blanches et des carbonatites I et, les plus faibles se trouvent être dans les apatites des carbonatites II.

La substitution du calcium divalent Ca^{2+} par les terres rares trivalents REE^{3+} est compensée par le remplacement du phosphore P^{5+} par le silicium Si^{4+} (fig. 9b). Les apatites les plus riches en silice appartiennent aux fénites blanches puis à celles des carbonatites I. La variation la plus importante en silice et en phosphore est observée nettement dans les apatites des fénites blanches qui sont des apatites à britholite. Ces deux substitutions $\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}$ et $\text{P} \rightleftharpoons \text{Si}$ sont contrôlées par la substitution couplée $\text{P}+\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}+\text{Si}$ (fig. 9c).

IV.2.2. Les monazites

La monazite se trouve, en général, en inclusion dans les apatites des carbonatites tardives, ou elle forme plus de 20% du volume de l'apatite associée à des cristaux de quartz et de calcite (fig. 4H); elle est peu fréquente dans les carbonatites I. Deux types de monazites existent :

- Une monazite dont la taille est égale à 100 microns, de forme prismatique ou irrégulière, en inclusion dans l'apatite ou en couronne plus ou moins continue autour de celle-ci (fig. 4H).

Fig. 9 - a. Substitution du calcium par les terres rares et l'yttrium dans les apatites des carbonatites et des fénites.

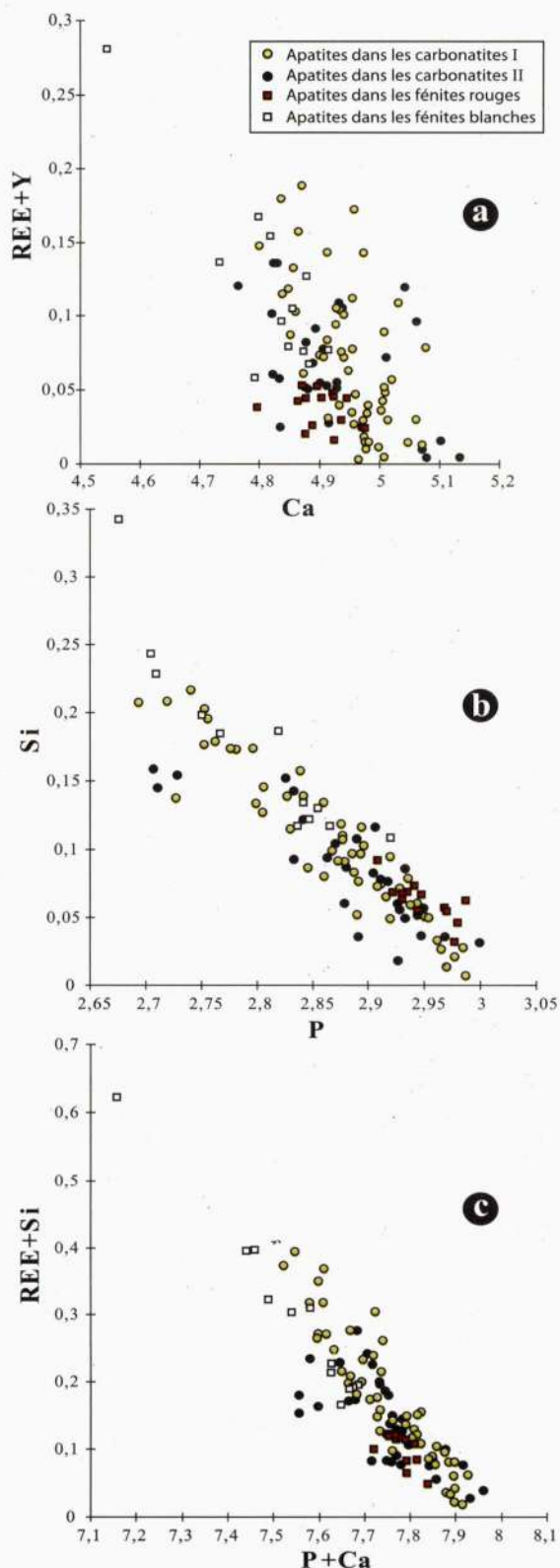
Calcium substitution by rare earth elements and yttrium in apatites from carbonatites and fenites.

b. Substitution du phosphore par la silice dans les apatites des carbonatites et des fénites.

Phosphorus substitution by silica in apatites from carbonatites and fenites.

c. Substitution couplée $\text{P}+\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}+\text{Si}$ dans les apatites des carbonatites et des fénites.

Coupled substitution $\text{P}+\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}+\text{Si}$ in apatites from carbonatites and fenites.



- Une monazite dont la taille est inférieure à 10 microns sous forme de très beaux cristaux automorphes.

Dans les monazites, les substitutions sont nombreuses. Elles montrent les corrélations suivantes : la teneur en silice augmente avec celle du thorium, la teneur en phosphore augmente avec la diminution des terres rares et, la teneur en terres rares augmente lorsque celle en calcium diminue (tableau IX). Ces corrélations s'expliquent par plusieurs substitutions de type :

Tableau IX - Composition chimique et formules structurales des monazites.

Chemical composition and structural formulae of monazites.

Monazite	CarbonatiteII			
Type de Roches				
N°échantillon N° analyse	3,33 165	3,33 174	693 4	693 15
P ₂ O ₅	29,16	28,39	29,74	7,78
SiO ₂	0,82	0,96	0,97	2,45
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,23	0,25	0,27	1,72
SrO	0,12	0,00	0,22	0,31
SO ₃	0,32	0,78	0,46	0,73
Y ₂ O ₃	0,00	0,00	0,05	0,08
La ₂ O ₃	16,53	18,05	28,09	7,92
Ce ₂ O ₃	33,60	34,95	31,64	33,57
Pr ₂ O ₃	3,40	3,38	1,61	2,46
Nd ₂ O ₃	12,10	10,36	5,57	8,94
Sm ₂ O ₃	0,98	0,58	0,52	1,04
ThO ₂	0,00	0,00	0,04	2,64
UO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	97,27	97,69	99,18	9,64
P	1,958	1,905	1,947	1,815
Si	0,065	0,075	0,075	0,189
Al	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,019	0,020	0,022	0,142
Sr	0,005	0,000	0,009	0,013
S	0,019	0,046	0,026	0,042
Y	0,000	0,000	0,002	0,003
La	0,483	0,527	0,801	0,510
Ce	0,975	1,014	0,895	0,948
Pr	0,098	0,097	0,045	0,069
Nd	0,342	0,293	0,153	0,246
Sm	0,026	0,015	0,013	0,027
Th	0,000	0,000	0,000	0,046
U	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	3,990	3,992	3,988	4,050



Dans le site tétraédrique, le silicium remplace le phosphore qui est associé avec le soufre. Ceci est bien visible dans le diagramme du phosphore en fonction de la silice (fig. 10a) dans lequel on distingue une corrélation négative très nette entre ces deux éléments.

A cette substitution s'ajoute le remplacement des terres rares par le thorium (fig. 10b) par des mécanismes de compensation de charge. A partir de ces deux substitutions, on a une double substitution :

$\text{Si}^{4+} + \text{Th}^{4+} === \text{P}^{5+} + \text{REE}^{3+}$ (fig. 10c) et le remplacement du calcium par les terres rares (fig. 10d).

D'autre part, le pourcentage atomique de La+Ce+Pr forme plus de 60% de la somme des terres rares dans les monazites. Ce qui implique que cette phase est essentiellement de terres rares légères et présente des teneurs très faibles en terres rares lourdes. L'élément le plus élevé et le plus constant est le cérium qui varie entre 31 et 35%, alors que le lanthane montre une variation très large de 14 à 28% et le néodyme une variation de 5 à 13%.

IV.2.3. Les allanites

L'allanite est un minéral de cristallisation secondaire (fig.3A, 4C). Habituellement, elle n'est pas observée dans les carbonatites, mais, dans le complexe carbonatitique du centre 3, l'allanite se trouve aussi bien dans les fénites que dans les carbonatites ce qui constitue une originalité, explicable par la chimie saturée en silice du milieu.

Ainsi, cette allanite se forme essentiellement autour du clinopyroxène et de l'apatite (fig. 3G). Elle se présente, aussi, mais rarement en

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'ITHOUHAOUÈNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYNGRANULITIQUE.

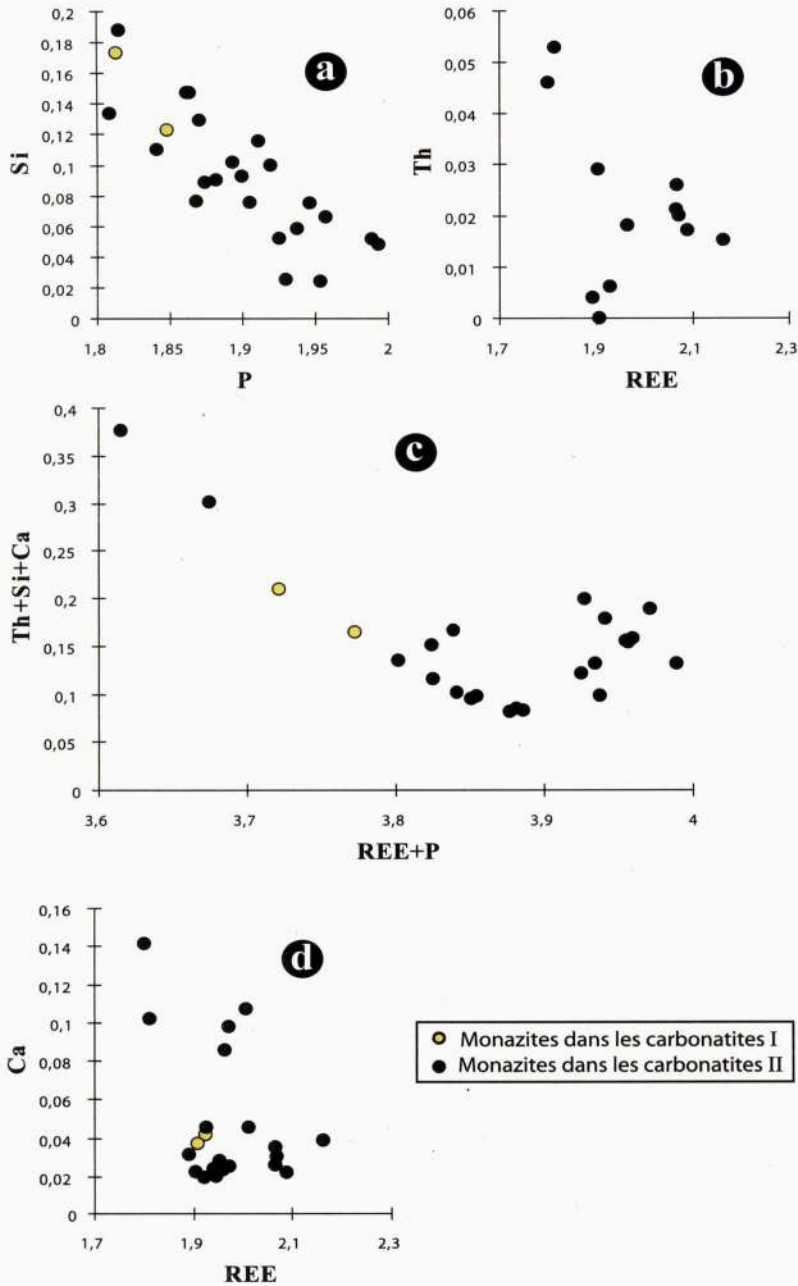


Fig. 10 : - a. Corrélation négative du phosphore et de la silice dans les monazites des carbonatites (**Negative correlation of phosphorus and silica in monazite of carbonatites**).

- b. Corrélation négative des terres rares et du thorium dans les monazites des carbonatites (**Negative correlation of rare earth elements and thorium in monazite of carbonatites**).

- c. Substitution globale REE+P == Th+Si+Ca dans les monazites des carbonatites (**Substitution REE+P == Th+Si+Ca in monazite from carbonatites**).

- d. Corrélation négative des terres rares et du calcium dans les monazites des carbonatites (**Negative correlation of rare earth elements and calcium in monazite of carbonatites**).

inclusion dans ces minéraux ou dans le feldspath potassique et la calcite.

Dans ces allanites, les terres rares trivalentes et le thorium ont tendance à se substituer au calcium divalent (fig.11, tableau X). Les allanites des carbonatites I ont des teneurs en terres rares qui varient dans un large intervalle en fonction des minéraux adjacents. Celles qui sont en inclusions dans la calcite sont les plus enrichies en terres rares, comparées à celles qui se trouvent au contact du clinopyroxène avec les teneurs les plus faibles.

IV.2.4. Les sphènes

Le sphène (Ca Ti (SiO₄)(O,OH,F)) est un minéral accessoire bien cristallisé présent aussi bien dans les fénites (fig.3H) que dans les carbonatites. Il représente en moyenne 1% de la roche totale. Il se présente sous forme de cristaux dispersés dans la matrice ou en association avec les minéraux réactionnels comme le grenat.

Dans la formule du sphène, une partie du titane et du CaO peut être partiellement remplacée par d'autres éléments tels que le Fe, Al, Na et les terres rares. Les sphènes des fénites sont plus riches en calcium et en silice que les sphènes des carbonatites (tableau XI).

CONCLUSION

Le complexe carbonatitique de la région d'Ihouhaouène est constitué de carbonatites entourées par des roches de lithologie fénitique. Ce type de complexe n'est pas très courant selon les critères d'une lignée magmatique de carbonatites (Barker, 1989).

Habituellement, les carbonatites plutoniques sont associées à des roches alcalines. Cette caractéristique n'est pas présente dans le complexe d'Ihouhaouène. Mais la possibilité d'un magma silicaté non exposé est actuellement

probable (Fourcade et *al.*, 1996). Durant la formation des carbonatites et des fénites, une activité élevée de SiO₂ est présente. Cette constatation est argumentée dans le centre 3, par la

Tableau X - Composition chimique et formules structurales des allanites

Chemical composition and structural formulae of allanites.

Allanite	Carbonatite			
	Type de Roches			
N°échantillon	3,15	641	3,34	3,34
N° analyse	1074	24	110	126
SiO ₂	29,50	33,52	28,23	33,52
TiO ₂	0,00	0,28	0,39	0,10
Al ₂ O ₃	7,58	17,41	10,35	18,69
Fe ₂ O ₃	13,90	0,00	11,09	0,00
FeO	8,68	13,01	6,87	13,21
MnO	0,00	0,20	0,21	0,06
MgO	1,09	1,05	0,61	0,38
CaO	9,74	13,49	14,64	15,83
H ₂ O	1,36	0,00	1,41	1,59
Y ₂ O ₃	0,00	0,00	0,06	0,10
La ₂ O ₃	11,20	6,32	7,44	4,91
Ce ₂ O ₃	13,83	9,76	10,23	5,71
Pr ₂ O ₃	0,00	0,00	1,00	0,44
Nd ₂ O ₃	0,00	2,50	3,45	2,10
Sm ₂ O ₃	0,00	0,19	0,10	0,23
ThO ₂	0,00	0,07	0,11	0,03
UO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	97,09	97,79	96,32	96,98
Cl	0,02	0,00	0,01	0,00
F	0,19	0,00	0,12	0,10
Si	3,042	3,041	2,876	3,074
Ti	0,000	0,019	0,030	0,007
Al ^{IV}	0,000	0,000	0,123	0,000
Al ^{VI}	0,920	1,861	1,119	2,020
Fe ³⁺	1,079	0,390	0,850	0,000
Fe ²⁺	0,748	0,597	0,585	1,013
Mn	0,000	0,015	0,018	0,004
Mg	0,168	0,142	0,093	0,051
Ca	1,076	1,311	1,598	1,555
Y	0,000	0,000	0,003	0,004
La	0,426	0,212	0,279	0,165
Ce	0,522	0,325	0,381	0,191
Pr	0,000	0,000	0,037	0,014
Nd	0,000	0,081	0,125	0,068
Sm	0,000	0,006	0,003	0,007
Th	0,000	0,020	0,002	0,000
U	0,000	0,000	0,000	0,00
Total	7,982	8,020	8,122	8,173
F	0,063	0,000	0,037	0,027
Cl	0,003	0,000	0,001	0,000
OH	0,934	0,000	0,960	0,972

MINÉRALOGIE DES CARBONATITES ET DES FÉNITES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA RÉGION D'HOuhaouÈNE (IN OUZZAL, NORD OUEST HOGGAR, ALGÉRIE) : UN EXEMPLE DE COMPLEXE CARBONATITIQUE LINÉAIRE SATURÉ EN SILICE SYN GRANULITIQUE.

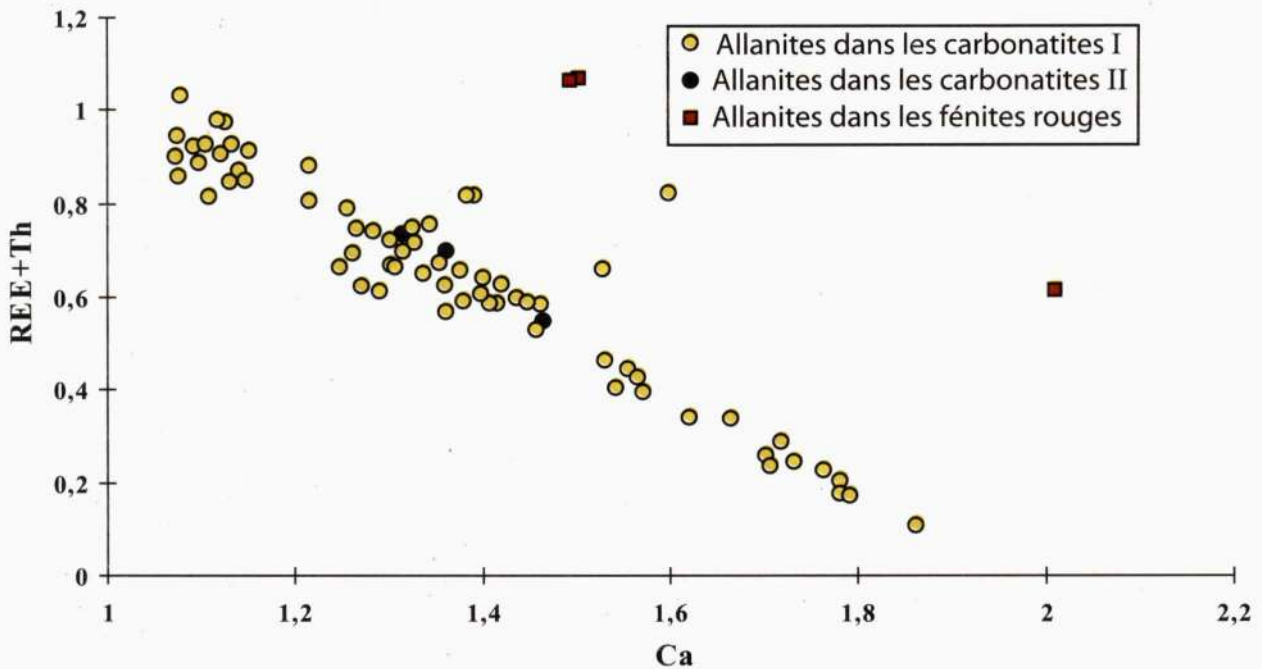


Fig. 11 - Substitution $\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}+\text{Th}$ dans les allanites des carbonatites I et II et des fénites rouges.

Substitution $\text{Ca} \rightleftharpoons \text{REE}+\text{Th}$ in the allanites from carbonatites I and II and red fenites.

présence d'allanite, de wollastonite, d'amphibole qui évolue depuis la pargasite vers les hornblendes actinolitiques et bien sûr du quartz interstitiel aussi bien dans les carbonatites que dans les fénites.

Les carbonatites et les fénites de cette région sont caractérisées par des signatures isotopiques élevées en Sr et Nd. Cette caractéristique n'est pas connue dans les magmas asthénosphériques de type océanique mais plutôt caractéristique des magmas lithosphériques ou se trouve du matériel métasomatisé riche en terres rares légères (Wyllie et *al.*, 1990). La contribution d'une source lithosphérique pour des compositions isotopiques spécifiques est argumentée par plusieurs explications (Fourcade et *al.*, 1996) :

- une contamination crustale affectant les magmas carbonatitiques,

- une source mantellique subcontinentale ancienne,

- une contribution d'un phénomène métasomatique avec une participation crustale. La migration ascendante des fluides le long de la croûte suivant les zones de faiblesse structurale peut redistribuer les éléments qui sont dissous dans ces fluides spécialement les terres rares légères, le strontium, le thorium et le potassium. Des phases omniprésentes dans les roches crustales fénitisées sont aptes à épuiser un certain nombre d'éléments, comme par exemple le sphène pour les éléments du type Ti, Nb, Ta et le feldspath potassique pour les éléments comme le Sr, Ba et Rb.

Les signatures isotopiques aussi bien des fénites que des carbonatites sont l'un des caractères les plus particuliers du complexe d'Ihouhaouène (Fourcade et *al.*, 1996). Ainsi, la

Tableau XI - Composition chimique et formules structurales des sphènes
Chemical composition and structural formulae of sphenes

Sphènes	CarbonatiteI				CarbonatiteII	
Type de Roches						
N°échantillon N° analyse	3,19 40	3,19 43	3,19 45	3,19 47	3,30b 33	3,30b 35
SiO ₂	29,20	29,20	29,03	29,60	30,19	30,24
ZrO ₂	0,32	0,35	0,36	0,16	0,40	0,36
TiO ₂	32,27	32,56	31,92	32,85	34,06	33,46
Al ₂ O ₃	3,54	3,60	3,47	3,16	2,83	3,05
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	1,88	1,89	1,89	1,97	1,87	1,98
FeO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,04	0,04	0,02	0,04	0,05	0,08
MgO	0,11	0,11	0,11	0,09	0,03	0,04
CaO	25,88	26,93	26,55	26,43	28,56	28,21
SrO	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
Y ₂ O ₃	0,30	0,45	0,35	0,35	0,14	0,16
La ₂ O ₃	0,48	0,55	0,52	0,55	0,15	0,13
Ce ₂ O ₃	1,43	1,27	1,26	1,58	0,00	0,05
Nd ₂ O ₃	1,67	1,56	1,39	1,66	0,43	0,62
Sm ₂ O ₃	0,32	0,43	0,34	0,52	0,15	0,14
ThO ₂	0,09	0,11	0,11	0,01	0,19	0,04
Nb ₂ O ₅	0,07	0,02	0,18	0,09	0,68	0,70
Ta ₂ O ₅	0,25	0,12	0,00	0,00	0,00	0,20
Total	98,98	100,35	98,72	99,86	100,73	100,31
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	1,10	1,16	1,21	0,79	1,01	0,87
Si	3,994	3,949	3,984	4,005	3,994	4,013
Ti	3,319	3,312	3,294	3,343	3,389	3,339
Zr	0,021	0,022	0,023	0,010	0,025	0,023
Al ^{IV}	0,005	0,050	0,015	0,000	0,005	0,000
Al ^{VI}	0,564	0,523	0,544	0,504	0,435	0,476
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,193	0,192	0,195	0,201	0,185	0,197
Mn	0,004	0,004	0,002	0,004	0,005	0,008
Mg	0,022	0,022	0,021	0,018	0,005	0,008
Ca	3,793	3,904	3,903	3,832	4,049	4,011
Sr	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Y	0,022	0,032	0,025	0,025	0,009	0,010
La	0,024	0,027	0,026	0,027	0,007	0,006
Ce	0,071	0,063	0,063	0,078	0,000	0,002
Nd	0,081	0,075	0,068	0,080	0,020	0,029
Sm	0,014	0,019	0,016	0,024	0,007	0,006
Th	0,002	0,003	0,003	0,000	0,005	0,001
Nb	0,005	0,001	0,011	0,005	0,040	0,042
Ta	0,009	0,004	0,000	0,000	0,000	0,007
Total	12,144	12,203	12,194	12,156	12,180	12,178
F	0,474	0,498	0,526	0,338	0,422	0,366
Cl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

composition isotopique des carbonatites en terme d'ENd (= -6.3- 0.9) et de ISr (0.7093-0.7104), ainsi que celles de clinopyroxènes métasomatiques en d¹⁸O (= 6.9 à 8‰) indiquent que les fluides dont elles dérivent ont subi une intense interaction avec la croûte durant leur remontée (Fourcade et al., 1996). La composition isotopique du carbone (d¹³C = -3.5 à 9.7‰) suggère que ces fluides proviennent probablement du manteau, suite au dégazage de magmas mantelliques à grande profondeur. L'implication de la croûte semble avoir eu lieu via des processus métasomatiques. La migration de fluides à travers la croûte le long de méga-shears zones pourrait avoir redistribué les éléments dissous dans ces fluides (à partir des orthogneiss à composition de TTG, qui constitue l'essentiel de la croûte profonde), particulièrement les terres rares légères, K, Sr, Th (Fourcade et al., 1996).

La mise en place de carbonatites syngrenulitiques, avec un chimisme très particulier, constitue une originalité dans le terrane de l'In Ouzzal par rapport aux autres gisements dans le monde où les carbonatites sont en général post orogéniques ou liées à un rifting. D'après Ouzegane et al., (2003) la phase de décompression (de 10 à 5 kbar, à très haute température > 1000 °C) enregistrée par les granulites de l'In Ouzzal correspond au stade de relaxation des contraintes et au rééquilibrage isostatique suite à l'érosion thermique de la lithosphère et à la remontée de l'asthénosphère. C'est au début de ce stade d'exhumation des granulites qu'il y a mise en place des carbonatites à la faveur des shears zones. Celles-ci constituent des zones privilégiées canalisant la circulation de fluides mantelliques juvéniles à CO₂ mais aussi riches en terres rares.

Remerciements :

Nous tenons à remercier les professeurs D.E. Aissa et M. Megartsi pour les suggestions pertinentes et leur compétente revue. Ce travail est une contribution aux projets TASSILI 05 MDU 653, intitulé "Imagerie tridimensionnelle et évolution spacio-temporelle du

Hoggar" et CNEPRU intitulé "géodynamique des terrains métamorphiques du Hoggar".

Bibliographie

- ALLÈGRE, C. J. ET CABY, R. 1972. Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 275D, 2085-2098.
- BARKER, D. S. 1989. Field relations of carbonatites. In : Carbonatites, Genesis and Evolution (ed. Bell, K.), 38-69. *Unwin Hyman, London*.
- BELL, K. AND BLENKINSOP, J. 1987a. Nd and Sr isotopic compositions of East African carbonatites : implications for mantle heterogeneity. *Geology*, 15, 99-102.
- BERNARD-GRIFFITHS, J., PEUCAT, J. J., FOURCADE, S., KIENAST, J. R. AND OUZEGANE, K. 1988. Origin and evolution of 2Ga-old carbonatite complex (Ihouhouene, Ahaggar, Algeria) : Nd and Sr isotopic evidence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, 339-348.
- BROOKS, C. K., ENGELL, J., LARSEN, L. M. AND PEDERSEN, A. K. 1982. Mineralogy of the Werner Bjerge alkaline complex, East Greenland. *Meddr. Gronland, Geosciences*, 7, 35 p.
- CARPENA, J., KIENAST, J. R., OUZEGANE, K. AND JEHANNO, C. 1988. Apatites from In Ouzzal carbonatites (NW Hoggar): the final thermal history of an Archean basement. *Geol. Soc. Am. Bull.*, V 100, 1237-1248.
- DEANS, T. 1966. Economic mineralogy of african carbonatites. 385-413, in Tuttle F. et Gittins J. (eds), *Carbonatites, Interscience, New York*.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. AND ZUSSMAN, J. 1982. Rock-forming minerals, vol 1A. *Orthosilicates*, 2nd edn. *Longman House; England*, 919 pp.
- FOURCADE, S., KIENAST, J. R. AND OUZEGANE, K. 1996. Metasomatic effects related to channelled fluid streaming through deep crust : fenites and associated carbonatites (In Ouzzal Proterozoic granulites, Hoggar, Algeria). *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 763-781.

- LAPIN, A. V. AND PLASHKO, V. V. 1988. Rock-association and morphological types of carbonatite and their geotectonic environment. *International Geology Reviews*, 7, 390-396.
- LARSEN, L. M., REX, D. C. AND SECHER, K. 1983. The age of carbonatites, kimberlites and lamprophyres from southern West Greenland : recurrent alkaline magmatism during 2500 M. y. *Lithos*, 16 : 215-221.
- LEAKE, 1978. Nomenclature of amphiboles. *American Miner.* 63: 1023-1053.
- NASH, W. P. 1972. Mineralogy and petrology of the Iron Hill carbonatite complex, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83 : 1361-1382.
- OUZEGANE, KH. 1987. Les granulites Al-Mg et les carbonatites dans la série de l'In Ouzzal (NW Hoggar, Algérie). Nature et évolution de la croûte continentale profonde pendant l'Archéen. *Thèse de Doctorat d'Etat. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6*, pp.433.
- OUZEGANE, K., FOURCADE, S., KIENAST, J. R. AND JAVOY, M. 1988. New carbonatite complexes in the Archean In Ouzzal nucleus (Ahaggar, Algeria) : mineralogical and geochemical data. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98, 277-292.
- OUZEGANE, K, KIENAST, J.R. BENDAOU, A. AND DRARENI, A. 2003. A review of Archaean and Paleoproterozoic evolution of the In Ouzzal granulitic terrane (Western Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 37, 207-227.
- VERHULST, A., BALAGANSKAYA, E., KIRNARSKY, Y. AND DEMAÏFFE, D. 2000. Petrological and geochemical (trace elements and Sr-Nd isotopes) characteristics of the Paleozoic Kovdor ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion (Kola Peninsula, NW Russia). *Lithos* 51, 1-25
- VERHOOGEN, J. 1962. Distribution of titanium between silicates and oxides in igneous rocks. *Am. J. Sci.* 260, 211-220.
- WYLLIE, P. J., BAKER, M. B. AND WHITE, B. S. 1990. Experimental boundaries for the origin and evolution of carbonatites. *Lithos*, 26, 3-19.