

Sur l'ilménite mangano-magnésienne de Campo-Formoso, Bahia, Brésil.

Hassan BOUKILI et André NOVIKOFF

حسن بوكيلي وأندري نوفيكونف

ملخص

حول الالمينيت المنغانو - مغنيزية لكامبو - فورموزو، ولاية باهيا، البرازيل. وجدت الالمينيت في عينة كلوريت خضراء غليظة الحبات، تخترق الصخور الجذ قاعدية، وتتواجد في المستوى الثالث التمدن بالكروميت في منجم پدرينياس، الموجود قرب كامبو - فورموزو في ولاية باهيا بالبرازيل (10° جنوبا و 40° 20' غربا). يظهر التحليل بالمسبار الدقيق الالكتروني أن الالمينيت منغانيزية ومغنيزية. زيادة على ذلك توجد نطاقية كيميائية مميزة على حاشية الحبات، بزيادة في أكسيد الحديد FeO بينما تبقى أكاسيد الحديد Fe₂O₃ والتيتان والمغنيزيوم مستقرة. تُظهر بعض بلورات الالمينيت توأمة متعددة، وأظهر تحليل دقيق أن تركيبها مرتبط بكمية أكاسيد المنغنيز والمغنيزيوم، ذلك أن هذه التوأم تختلف عن بعضها بمقادير متكاثرة من أكسيد المنغنيز ومتضائلة من أكسيد المغنيزيوم. هذه النتائج ليست الا تقريبية ولا تشكل قاعدة عامة، بالمقابل، ما يثير الانتباه هو تغير مقدار الحديد Fe₂O₃.

RESUME

L'ilménite a été trouvée dans un échantillon de chlorite verte pegmatitique qui traverse les roches ultrabasiques et situé à hauteur du troisième niveau minéralisé en chromite de la mine de Pedrinhas située à proximité de Campo-Formoso dans l'état de Bahia au Brésil à la latitude 10°28' Sud et la longitude 40°20' Ouest. L'analyse à la microsonde électronique, de telle ilménite, montre qu'elle est manganésifère et magnésienne. De plus, elle révèle une zonation chimique marquée, sur les bords des grains, par une augmentation de MnO et une diminution de FeO ; alors que TiO₂, MgO et Fe₂O₃ varient peu. Certains cristaux d'ilménite présentent des macles polysynthétiques. Une tentative d'analyse ponctuelle de ces macles, nous a permis de dire que la composition de ces macles est régie par les teneurs en MnO et MgO. C'est à dire que les macles sont différentes les unes des autres par des teneurs en MnO croissantes. Ceci n'est qu'approximatif et ne constitue pas une règle générale. En revanche ce qui est remarquable, c'est la variation de Fe₂O₃.

ABSTRACT

On the mangano-magnesian ilmenite of Campo-Formoso, Bahia, Brazil. Ilmenite was found in a green chlorite specimen crossing ultramafic rocks at the third chromitic level in the Pedrinhas mine near Campo-Formoso in Bahia state, Brazil (latitude 10°28' South, longitude 40°20' West). The microprobe analysis reveals that this ilmenite contains manganese and magnesium. In addition, it shows a chemical zonation at the edge of the grains marked by an increase of MnO and a decrease of FeO, whereas TiO₂, MgO and Fe₂O₃ show a little change. A few crystals of ilmenite show polysynthetic twins. A point analysis of these twins has been attempted. This analysis seems to show that the chemical composition of the twins is characterized by a higher content of MnO and a lower content of MgO. These remarks are only tentative and are not characteristic of the twins. However, what is significant is the variation of Fe₂O₃.

INTRODUCTION

L'ilménite magnésienne, contenant 5 à 22% MgO, est rare et rencontrée en petites quantités seulement dans les kimberlites. Les ilménites trouvées dans les roches acides et basiques contiennent moins de 5% MgO avec une majo-

rité contenant moins de 1% (MITCHELL, 1973, 1977). Les ilménites rencontrées dans les carbonatites de Jacupiranga au Brésil contiennent 1,9 à 25,8% MgO (MITCHELL, 1978) et se distinguent des autres ilménites par leur teneur élevée en MnO (16 à 20%) et des teneurs également élevées en Nb₂O₅, comprises entre 1,1 et 3,4% (CASPAR et WYLLIE, 1983). Enfin, les

ilménites trouvées dans les roches métamorphiques du faciès granulite ont des teneurs en MnO et MgO de 1% (DEER et *al.* 1965).

CADRE GEOLOGIQUE

La géologie régionale de Campo-Formoso est caractérisée par la présence de trois groupes appelés : Caraiba, Jacobina et Una (INDA et BARBOSA, 1978). De nombreux pointements granitiques dont le plus important est celui de Campo-Formoso, daté de 1900 ± 13 MA, ce qui correspond à l'évènement transamazonien (TORQUATO et *al.*, 1978).

Le massif ultrabasique de Campo-Formoso affleure sur une longueur d'environ 20 km, sa largeur très irrégulière, atteint par endroits 1 km. Le gisement de chromite est du type stratiforme, il se caractérise par une succession de strates métriques de serpentinite riche en chromite séparées par des bancs de serpentinite stérile. L'étude de telles roches a permis de suivre l'apparition d'une série de minéraux liés à différentes phases de l'altération hydrothermale, puis supergène, phases que nous allons énumérer dans l'ordre de leur apparition (BOUKILI et *al.*, 1983 ; BOUKILI, 1984).

L'altération hydrothermale est caractérisée par :

+ une phase de serpentinitisation qui a transformé tous les minéraux primaires (olivine et pyroxènes) en lizardite et chrysotile. Les chromites sont peu ou pas altérées;

+ une phase de chloritisation caractérisée par l'apparition de clinochlore chromifère, le chrome y est sous forme trivalent dans les octaèdres (CALAS et *al.*, 1984). Ce clinochlore se situe autour des spinelles et dans les microfissures recoupant les serpentines. A ce stade d'altération la chromite montre des franges altérées à aspect piqueté, il s'agit de la "ferritchromite" de BEESON et JACKSON (1969). Cette "ferritchromite" est caractérisée chimiquement par un appauvrissement en Al_2O_3 , MgO et parfois en Cr_2O_3 , et un enrichissement en fer par rapport à la chromite. Nous avons montré que l'altération de la chromite en "ferritchromite" s'est faite préférentiellement au moment de la chloritisation (BOUKILI, 1984) ;

+ une phase de carbonatation et de stéatitisation.

Les minéraux cités plus haut sont plus ou moins transformés en magnésite, talc, hydroxycarbonates de magnésium et de chrome (stichtite avec barbertomite très minoritaire, BOUKILI et *al.*, 1984) et plus rarement en dolomite, opale C.T. et quartz. La stichtite se forme au contact des chromites qui, bien que très divisées, paraissent peu ou pas altérées. Ceci tend à montrer que la "ferritchromite" a été déstabilisée au profit de la stichtite. Du clinochlore chromifère, d'aspect vermiculaire, est néoformé avec les carbonates.

L'altération météorique s'attaque en premier à la stichtite qui s'altère et se pseudomorphose en smectite riche en chrome (volkonskoïte). Serpentine et chlorite s'altèrent à leur tour en formant des nontronites chromifères dont la composition chimique est influencée par les minéraux voisins. Près de la surface du sol, les smectites sont détruites et remplacées par de la kaolinite et de la goethite. Les chromites, par leur bordure de "ferritchromite", montrent des phénomènes soit d'oxydation en goethite soit de dissolution.

ANALYSES PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

Au microscope optique, les cristaux d'ilménite sont très disséminés dans une matrice constituée essentiellement de chlorite et paraissent inclus dans celle-ci. La chlorite pénètre les golfes de corrosion affectant les grains d'ilménite. En se basant sur ces faits, on peut dire que l'ilménite est antérieure à la chlorite. En lumière réfléchie, l'ilménite possède un pouvoir réflecteur assez élevé et un pléochroïsme faible mais marqué dans l'huile. En plus certains cristaux présentent des macles polysynthétiques bien distinctes en lumière polarisée et analysée. Ces macles peuvent être uni ou pluridirectionnelles.

Des concentrations d'ilménite ont été obtenues par séparation préalable dans des liqueurs denses, puis finale par séparation magnétique.

L'analyse par diffraction de rayons X de cette ilménite montre un très faible déplacement de raies vers les grands angles (tableau I) ce qui nous a conduit à calculer les paramètres de la maille cristalline, dans le système hexagonal, à l'aide du programme de calcul de TOURNARIE (1969). Ce qui donne $a_c = 5,096$ Å et $c_c = 14,094$ Å, alors que l'ilménite synthétique

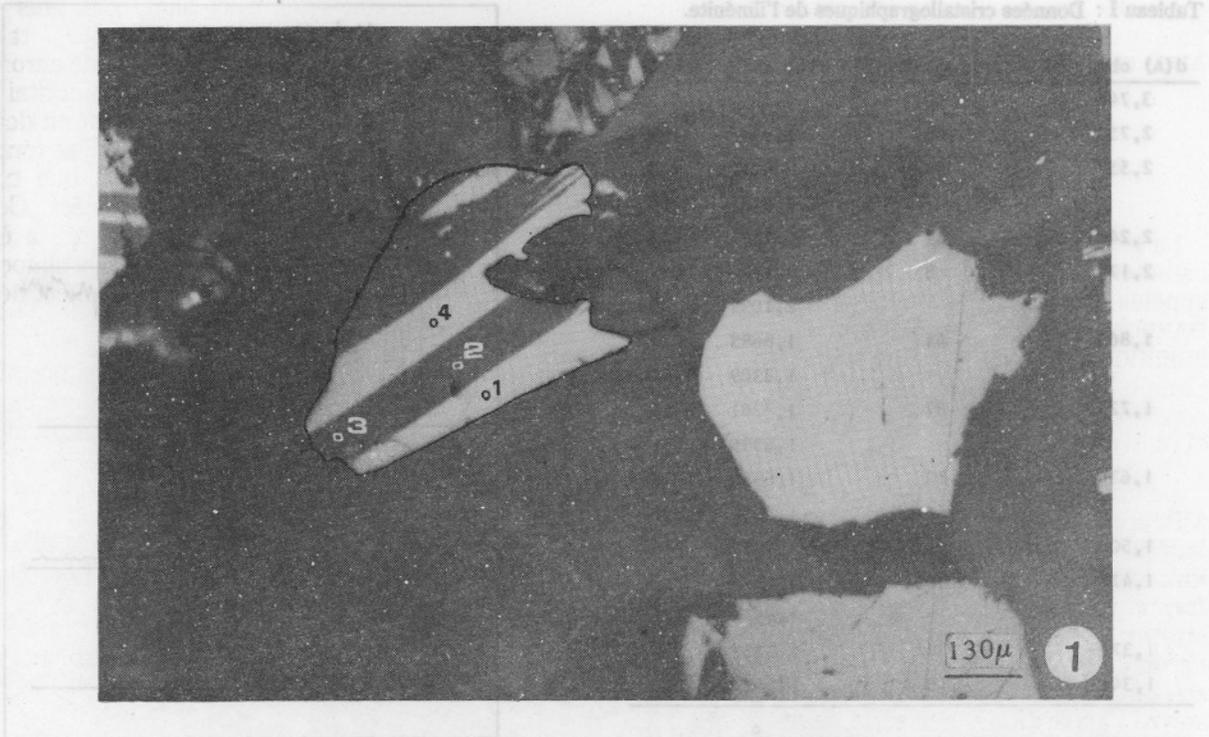


Photo 1 : ilménite maclée, avec localisation des points analysés à la microsonde électronique (voir tableau III).

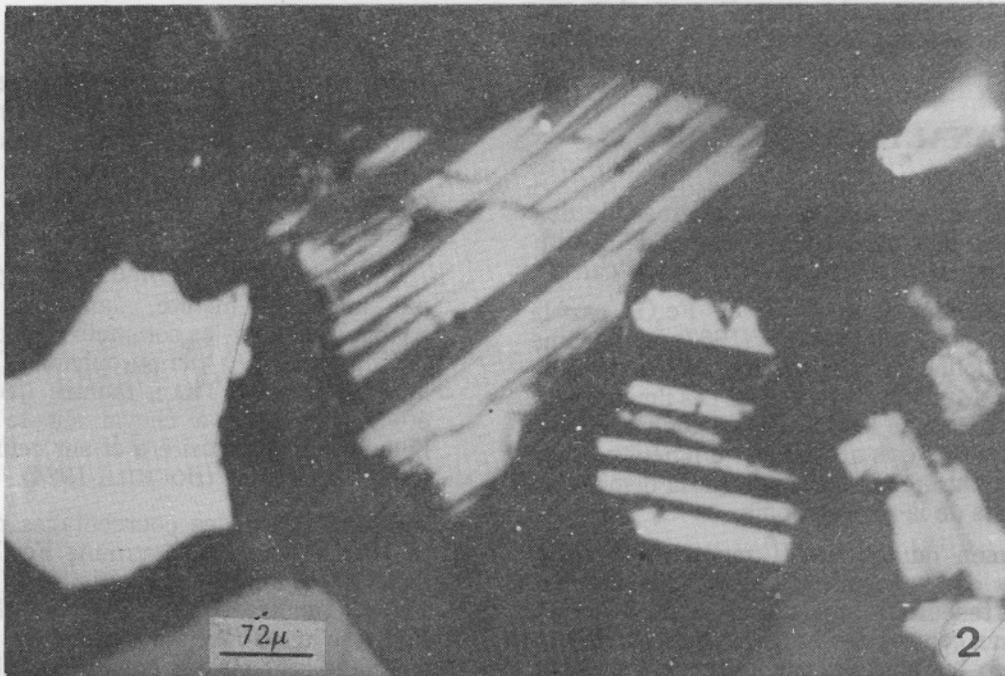


Photo 2 : Sur cette photo, on peut remarquer la disposition partielle des macles sombres au profit des macles claires (plus riche en Fe_2O_3). A noter aussi que l'ilménite maclée (photo 1) et l'ilménite à macles discontinues (photo 2) ont la même orientation.

Tableau I : Données cristallographiques de l'ilménite.

d(A) observée	I/I ₁ (estimée)	d(A) ASTM	hkl
3,746	25	3,737	012
2,758	100	2,754	104
2,552	37	2,544	110
		2,349	006
2,243	21	2,237	113
2,175	8	2,1772	021
		2,1032	202
1,865	41	1,8683	024
		1,8309	107
1,729	87	1,7261	116
		1,6535	211
1,636	12	1,6354	018
		1,6206	122
1,508	35	1,5057	214
1,472	30	1,4686	300
		1,4342	125
1,376	8	1,3757	208
1,341	16	1,3421	1010

(Fe TiO₃) possède a₀ = 5,0884 Å et c₀ = 14,0932 Å. On peut dire que dans notre cas, l'introduction du manganèse et du magnésium dans le réseau cristallin de l'ilménite fait augmenter légèrement le paramètre a₀, alors que leur influence sur le paramètre c₀ est minime voire nulle.

ANALYSES CHIMIQUES

Les résultats d'analyse à la microsonde des centres et des bords des cristaux d'ilménite figurent dans le tableau II. Nous avons calculé les pourcentages en FeO et Fe₂O₃ par la méthode de CARMICHAEL (1967). Ce même tableau donne la composition moléculaire en MgTiO₃, MnTiO₃ et Fe₂O₃ des ces ilménites. Le tableau III donne les résultats d'analyses ponctuelles d'un cristal maclé d'ilménite. Ces analyses ont été réalisées suivant la disposition des points de la photographie.

L'examen du tableau II montre que cette ilménite est manganésifère et magnésienne avec des teneurs en MgO variant entre 2,39% et 5,58% aux centres des grains et entre 2,96% et 5,22% aux bords. Alors que les teneurs en MnO changent de 0,62% à 8,86% aux centres et de 2,55% à 12,08% aux bords. De plus, les bords de ces cristaux montrent un appauvrissement

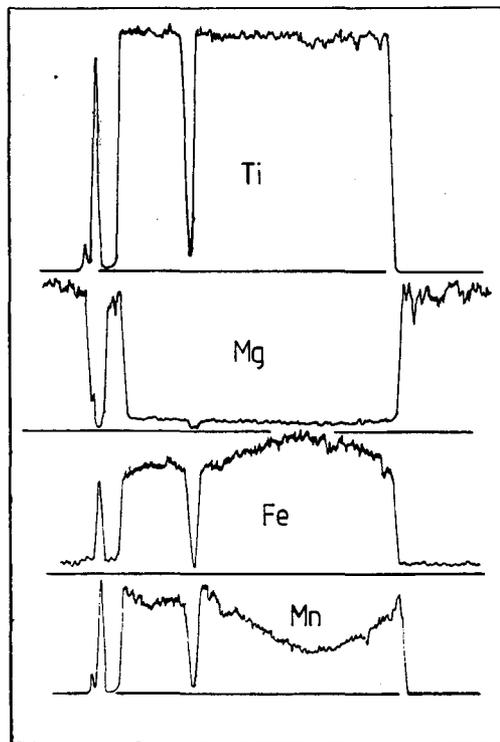


Figure 1 - traversées à la microsonde d'un grain d'ilménite montrant une zonation Fe-Mn.

en fer ferreux et une augmentation en MnO. La traversée à la microsonde d'un grain d'ilménite (fig. 1) illustre bien ce phénomène de compensation du fer par le manganèse sur le bord du cristal ; alors que le titane et le magnésium fluctuent légèrement autour d'un palier.

La projection des atomes Fe²⁺, Mn²⁺ et Mg, par maille d'ilménite, dans un diagramme triangulaire dont les sommets sont occupés par l'ilménite (FeTiO₃), la pyrophanite (MnTiO₃) et la geikielite (MgTiO₃), montre que l'ilménite étudiée se situe à cheval sur le champ de l'ilménite manganésifère et sur celui de l'ilménite magnésienne (BOUKILI, 1984).

La projection des pourcentages molaires du tableau II dans le diagramme Fe₂O₃ - FeTiO₃ - MgTiO₃ représenté par la figure 2 (MITCHELL, 1978), montre que l'ilménite de Campo-Formoso se trouve en dehors du champ des ilménites rencontrées dans les kimberlites, de celui des carbonatites de Jacupiranga et celui des ilménites dans les lamprophyres, granites, basaltes et carbonatites.

Tableau II : Composition de l'ilménite de Campo-Formoso

	1		2		3		4		5	
	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B
MgO	3,89	4,26	3,47	4,77	5,58	5,12	2,39	4,56	2,82	3,23
TiO ₂	52,6	52,63	54,15	53,29	51,69	52,48	53,84	53,21	52,56	51,48
MnO	5,76	6,4	8,44	11,26	8,86	12,08	3,67	9,35	0,62	2,55
FeO *	35,17	33,81	34,18	28,54	27,81	26,17	40,71	32,92	42,02	37,96
Fe ₂ O ₃ *	1,47	2,08	0,16	2,17	5,08	3,86	—	1,75	1,96	4,82
SiO ₂	0,54	0,47	0,19	0,44	0,21	0,29	0,36	0,77	0,35	—
	99,42	99,65	100,78	100,47	99,22	100	100,97	100,81	100,33	100,04
Pourcentages molaires										
MgTiO ₃	14,27	15,56	12,63	17,19	20,29	18,52	8,75	15,84	10,36	11,87
MnTiO ₃	12	13,27	17,45	23,06	18,31	24,84	7,63	18,46	1,29	5,33
FeTiO ₃	72,37	69,26	69,77	57,72	56,74	53,11	83,62	64,16	86,53	78,32
Fe ₂ O ₃	1,36	1,91	0,15	2,03	4,66	3,53	—	1,54	1,82	4,48
	6		7		8		9		10	
	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B
MgO	3,88	3,34	3,55	2,96	4,19	3,62	5,14	5,03	3,31	5,22
TiO ₂	51,63	53,18	53,93	52,6	51,61	51,49	51,87	51,9	53	52,16
MnO	4,13	10,96	5,78	8,17	5,53	9,03	8,55	10,64	2,72	7,27
FeO	35,66	31,42	35,22	33,6	33,49	30,71	28,82	26,93	39,26	30,89
Fe ₂ O ₃	4,83	1,34	1,82	0,9	5,06	5,15	5,63	5,49	2,03	4,23
SiO ₂	0,27	0,55	0,58	0,73	0,12	—	—	—	0,21	0,55
	100,4	100,79	100,88	98,96	100	100	100,01	99,99	100,53	100,32
Pourcentages molaires										
MgTiO ₃	14,13	12,13	13,13	11,09	15,29	13,27	18,62	18,25	12,08	18,81
MnTiO ₃	8,55	22,62	12,14	17,40	11,48	18,81	17,61	21,93	5,64	14,89
FeTiO ₃	72,88	64,02	73,03	70,66	68,57	63,16	58,61	54,79	80,41	62,45
Fe ₂ O ₃	4,43	1,23	1,7	0,85	4,66	4,76	5,16	5,03	1,87	3,85

* FeO et Fe₂O₃ calculés par la méthode de CARMICHAEL (1967)

C, B centre et bord du même grain d'ilménite.

Par contre dans le diagramme MnTiO₃-FeTiO₃-MgTiO₃ (fig. 3) d'après MITCHELL (1978) le champ délimité par la composition molaire des ilménites étudiées couvre partiellement le champ (A) c'est-à-dire celui des ilménites rencontrées dans les lamprophyres, granites, basaltes et carbonatites.

L'examen du tableau III montre qu'il y a une variation de composition d'une macle à une autre, c'est le cas des macles (1) et (3) au bord du grain et des analyses (2) et (4) au voisinage du centre. Des points (1), (3) et de (2), (4), on constate qu'il y'a une diminution de MgO et une augmentation de MnO, alors que TiO₂ et FeO augmentent légèrement au bord (analyses 1 et 3) et diminuent faiblement au centre (analyses 2

Tableau III : Analyses ponctuelles d'un cristal maclé d'ilménite; localisation des points sur la photo

	1	2	3	4
MgO	7,42	4,14	4,58	3,82
TiO ₂	51,24	53,66	54	52,09
MnO	5,15	2,86	6,48	4,52
FeO	27,74	37,91	34,14	35,37
Fe ₂ O ₃	8,36	—	0,86	4,1
SiO ₂	0,09	0,68	0,26	0,02
	100	99,25	100,32	99,98
pourcentages molaires				
MgTiO ₃	26,48	15,31	16,57	14,19
MnTiO ₃	10,44	6,01	13,32	9,4
FeTiO ₃	55,54	78,67	69,32	72,69
Fe ₂ O ₃	7,54	—	0,79	3,79

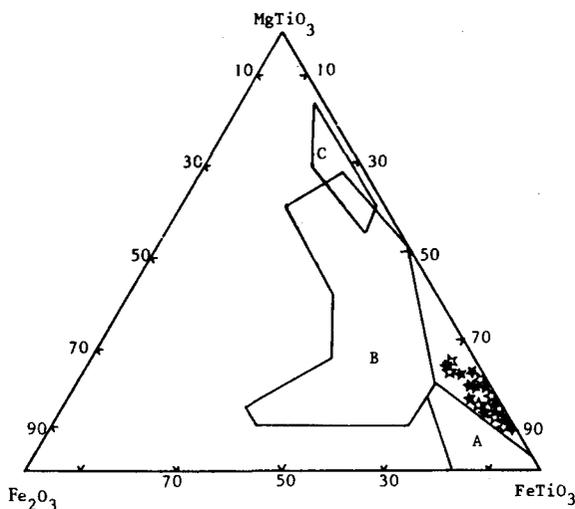


Figure 2 - Composition des ilménites exprimée en pourcentages moléculaires de Fe_2O_3 - FeTiO_3 - MgTiO_3 . (A) ilménites des lamprophyres, granites, basaltes et carbonatites, (B) ilménites des kimberlites, (C) ilménites des carbonatites de Jacupiranga MITCHELL (1978). Etoiles pleines, centres et étoiles vides bords des grains d'ilménites étudiés.

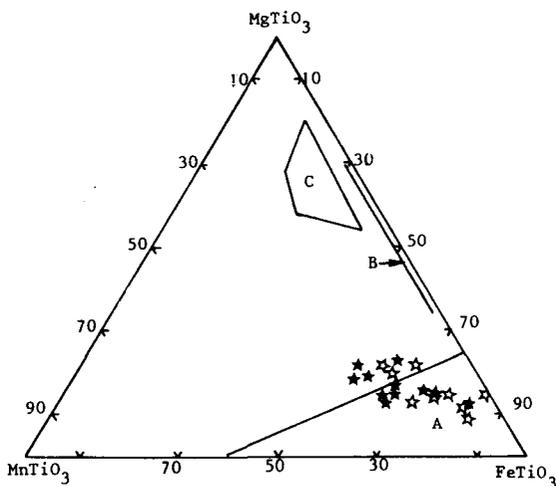


Figure 3 - Composition des ilménites exprimée en pourcentages moléculaires de MnTiO_3 - FeTiO_3 - FeTiO_3 . Source de données, Fig.1

et 4). Ce qui est frappant c'est la teneur en Fe_2O_3 qui est assez élevée dans certains individus maclés (1 et 4) alors qu'elle est très faible voire nulle dans la macle (2,3) où l'on retrouve la zonation fer-manganèse déjà évoquée.

DISCUSSION

Nous avons vu que la composition molaire de l'ilménite de Campo-Formoso est différente de celle des ilménites rencontrées dans les kimberlites. MITCHELL (1973, 1977) et BOCTOR et BOYD (1980) estiment que la teneur élevée en chrome (0,1 - 2,5% Cr_2O_3) est typique des ilménites trouvées dans les kimberlites. Dans notre cas la teneur basse en chrome (0-0,1% Cr_2O_3) BOUKILI (1984), exclue l'association ilménite de Campo-Formoso kimberlites. La zonation Fe-Mn décelée sur les bords des grains d'ilménite pourrait être expliquée par un phénomène de métasomatisme qui a entraîné un enrichissement en MnO et une déplétion en FeO. Ce phénomène de métasomatose a été évoqué par BOCTOR et BOYD (1980) pour expliquer l'enrichissement en MgO et l'appauvrissement en FeO des bords des ilménites trouvées dans les kimberlites. Par contre la fugacité d'oxygène, mise en cause par HAGGERTY *et al.*, (1979 in BOCTOR et BOYD, 1980) est à exclure, car on n'observe pas une variation dans un seul sens de Fe_2O_3 du centre vers le bord des grains (tab. II). Cependant, l'alternance de macles plus ou moins riches en Fe_2O_3 pourrait être expliquée par l'intermittence de la fugacité d'oxygène.

Enfin, l'estimation de la température et de la pression de formation de l'ilménite étudiée, par la méthode de WECHSLER et PREWITT (1984), utilisant les paramètres cristallographiques a_0 et c_0 , ou par la méthode de BUDDINGTON et LINDSLEY (1964) ne peut être réalisée vue la teneur relativement élevée en MnO et MgO de l'ilménite de Campo-Formoso alors que ces auteurs ont utilisé des ilménites pures (FeTiO_3).

En conclusion, on peut dire que l'ilménite étudiée est rare et a été trouvée dans un système intrusif (pegmatite) indépendant ou peu dépendant du système ultrabasique chromifère ; mais sans doute liée au granite de Campo-Formoso qui est relativement proche et constitue le plus grand massif de la région.

REFERENCES

- BOCTOR N.Z. et BOYD F.R. (1980) — Oxide minerals in the Liphobong Kimberlite, Lesotho. *Am. Min.*, 65, p. 631-638.
- BOUKILI H., NOVIKOFF A., BESNUS Y., SOUBIES F. et QUEIROZ C. (1983) Pétrologie des produits de l'altération des roches ultrabasiques à chromite de Campo-Formoso. Etat de Bahia - Brésil. *Coll. Intern. C.N.R.S., Paris, Sci. Géol. Mém.*, 72, p.19-28 Strasbourg.
- BOUKILI H. (1984) - *Pétrologie, minéralogie et géochimie des altérations des roches ultrabasiques à chromite de Campo-Formoso, Bahia, Brésil*. Thèse 3° Cycle, Strasbourg, 130 p.
- BOUKILI H., - NOVIKOFF A. et FRANCA J. (1984) - Minéralogie et Géochimie des chlorites et hydroxycarbonates chromifères de Campo-Formoso, Bahia, Brésil. *Cah. O.R.S.T.O.M.*, Sér. Géol. vol XIV, 2, p.141-152.
- BUDDINGTON A.F. et LINDSLEY D.H. (1964) - Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *J.Petrol.*, 5, p. 310-357.
- CALAS G., MANCEAU A, NOVIKOFF A. et BOUKILI H. (1984). Comportement du chrome dans les minéraux d'altération du gisement de Campo-Formoso (Bahia-Brésil). *Bull. Minéral.* 107, p755-766
- CARMICHAEL. I.S.E. (1967) - The iron - titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Cont. Mineral. Petrol.*, 14, p.36-64.
- DEER W.A., HOWIE R.A. et ZUSSMAN J. (1965) - *Rock-forming minerals: non silicates*. Longmans, Green and co LTD. Ed., London, 5,371 p.
- CASPAR J.C et WYLLIE P.J. (1983) - Ilmenite (High Mg, Nn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil. *Am.min*, 68, p.960-971
- INDA. H.A.V. et BARBOSA J.F. (1978) - Mapa geológico do estado da Bahia, C.P.M., Governo do Estado Bahia, Brésil, 137p.
- MITCHELL R.H. (1973) - Magnesian ilmenite and its role in kimberlite petrogenesis. *J. Petrol.*, 81, p.301-311
- MITCHELL R.H. (1977) - Geochemistry of magnesian ilmenite from kimberlites in southern Africa and Lesotho. *Lithos*, 10, p.29-37
- MITCHELL R.M. (1978) - Manganoan magnesian ilmenite and titanian clinohumite from the Jacupiranga carbonatite Sao Paulo, Brasil. *Am. Min*, 63, p.544-547
- TORQUATO J.R., OLIVEIRA M.A.F. et BARTELS R.L. (1978) - Idade radiométrica do granito de Campo-Formoso (Ba). Uma (Idade mínima para o grupo Jacobina). *Rev. Bras. Geoc.*, 8, p.171-179
- TOURNARIE M. (1969) - Programme d'affinement statistique, version K par regression non linéaire. *J. Phys.* 10, p. 737
- WECHSLER B.A. et PREWITT C.T. (1984) - Crystal structure of ilmenite (FeTiO₃) at high temperature and at high pressure. *Am. Min.*, 69, p.176-185

Article reçu le 7 Juillet 1986

Adresse des auteurs

Hassan BOUKILI :

E.N.S, Département de Géologie, Bd. Victor Hugo,
Casablanca

André NOVIKOFF :

O.R.S.T.O.M.,

actuellement à l'Institut de Géologie ;
1, Rue Blessig 67084 Strasbourg. France