

CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DU SKARN DE LA MINE DE FER D'AÏN-SEDMA (CAP BOUGAROUN, NORD-EST ALGÉRIEN)

Youcef BOUFTOUHA*

RÉSUMÉ

Le skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma résulte de la transformation métasomatique des lentilles de marbre dolomitique par percolation de solutions hydrothermales post-magmatiques. Ces lentilles de marbre sont intercalées dans les paragneiss granulitiques du socle kabyle, formant l'encaissant du granite miocène du Cap Bougaroun. Ce skarn est caractérisé par une colonne métasomatique comportant une zone externe à clinopyroxènes (diopside puis ferrosalite) et une zone interne à grenat (andraditique). Le résultat du bilan chimique de ce skarn met en évidence une transformation métasomatique du marbre, essentiellement par apport de Si, Fe et Mn. Les structures de croissance et les différentes substitutions chimiques fossilisées dans les minéraux du skarn témoignent d'une évolution polyphasée, principalement contrôlée par le facteur température dont la décroissance contrôle l'altération des premiers minéraux et les variations de certains paramètres intensifs tels que f_{CO_2} , f_{O_2} et f_{S_2} .

La minéralogie primaire du skarn a été affectée par une phase d'altération hydrothermale plus ou moins tardive par rapport à son développement. Cette phase d'altération hydrothermale est principalement caractérisée par une phase de sulfuration, une phase d'oxydation et une phase d'hydroxylation. La phase de sulfuration a engendré la déstabilisation des pyroxènes ferrifères en une association à andradite-pyrite- quartz et calcite. La phase d'oxydation est marquée par la décomposition du grenat andraditique en oxydes de fer quartz et/ou calcite-quartz et l'oxydation des sulfures de fer. La phase d'hydroxylation est principalement marquée par une altération des pyroxènes en amphibole et/ou ilvaïte, suivie par un phénomène de chloritisation des amphiboles.

Mots clés - Percolation - Bilan chimique - Si-Fe-Mn - Evolution polyphasée - Température - Altération hydrothermale

PETROGRAPHICAL, MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS SKARN OF IRON AIN-SEDMA MINE (CAP BOUGAROUN NORTH-EAST ALGERIA)

ABSTRACT

The Ain-Sedma iron mine's skarn is the product metasomatic transformation of dolomitic marble lenses by post-magmatic hydrotherals solutions. These lenses are insered between granulitic paragneisses of kabylian basement, which forms hostroks of Cap Bougaroun granit.

* Université de Constantine, Institut des Sciences de la Terre,
Département de Géologie *Route d'Ain-El-Bey 25000 Constantine*
- Manuscrit déposé le 11 Janvier 1998, accepté après révision le 02 Octobre 1999

This skarn is characterised by one metasomatic column involving external area of clinopyroxene (diopside then ferrosalite) and one internal area of garnet (andraditic). Chemical balance resulting from this skarn place's marble in position metasomatic's transformation essentially, by a contribution of Si, Fe and Mn. The growing structures and different chemical substitutions fossilised in the skarn's minerals intnesses of polyphased evolution mainly, controled by the temperature factor whose decrease the checking alteration of first minerals and variation of some parameters as f_{CO_2} , f_{O_2} and f_{S_2} .

Skarn's primary mineralogy was affected by one hydrothermal alteration phase more or less late in regard to this development. The hydrothermal alteration phase is mainly characterised by the sulfuration, oxidation and hydroxylation phases. The sulfuration phase g nerats the iron-pyroxenes destabilisation in association to andradite-pyrite-quartz and calcite. The oxidation phase is characterised by the decomposition of andraditic garnet in iron oxide-quartz and/or calcite-quartz and pyrite in iron oxide. The hydroxylation phase is mainly characterised by replacement of pyroxenes by amphiboles and/or ilvaïte, followed by amphibole chloritisation.

Key word - Percolation - Chemical balance - Si-Fe-Mn - Polyphased evolution - Temperature - Hydrothermal alteration

PRESENTATION GEOLOGIQUE DU MASSIF GRANITIQUE DU CAP BOUGAROUN

Le massif granitique du Cap-Bougaroun dont fait partie le secteur étudié occupe la partie nord de la Kabylie de collo (fig. 1). Le granite miocène du Cap Bougaroun est encaissé d'une part, dans les formations du socle kabyle, représentées dans la région du Cap Bougaroun, par des paragneiss granulitiques à intercalations de lentilles de marbre et auxquels sont associées des péridotites serpentinisées et d'autre part, dans les formations gréso-p littiques d'âge Oligo-Miocène (Bouillin et Kornprobst, 1974). D'après Mahdjoub (1991), le socle du Cap-Bougaroun montre une structure en blocs faillés, emballés dans le granite miocène.

La mise en place du granite miocène du Cap Bougaroun a induit un métamorphisme de contact dans les formations sédimentaires encaissantes. Les conditions de pression et de température de ce métamorphisme de contact sont de l'ordre de 2 Kbar et 600 C (Bouillin, 1977 et Ouabadi, 1994).

Par ailleurs, la mise en place de ce granite est accompagnée par une intense circulation de solutions hydrothermales. La percolation des lentilles

de marbre par ces solutions hydrothermales post-magmatiques a engendré leur transformation en skarn.

GEOLOGIE DU SITE DE LA MINE DE FER D'AÏN SEDMA

Le site de la mine de fer d'Aïn Sedma est situé dans la partie orientale du massif granitique du Cap Bougaroun à environ 11Km à l'Ouest de la ville de Collo. Il est représenté par un bloc de paragneiss granulitique à intercalations de lentilles de marbre dolomitique, emballé dans le granite miocène et isolé du reste du socle du Cap Bougaroun. Cette situation se retrouve plus au Nord de la mine d'Aïn Sedma, notamment au niveau des localités de Azem et de Chaabet-El-Mordj où sont développées également des occurrences de skarns aux dépens des lentilles de marbre, intercalées dans les blocs de gneiss. L'ensemble granite-socle est travers  par des filons de rhyolite (fig. 2).

Au niveau de la mine de fer d'Aïn-Sedma, les lentilles de marbre intercalées dans les paragneiss granulitiques sont en grande partie transformées en skarn suite à leur percolation par des solutions hydrothermales post-magmatiques.

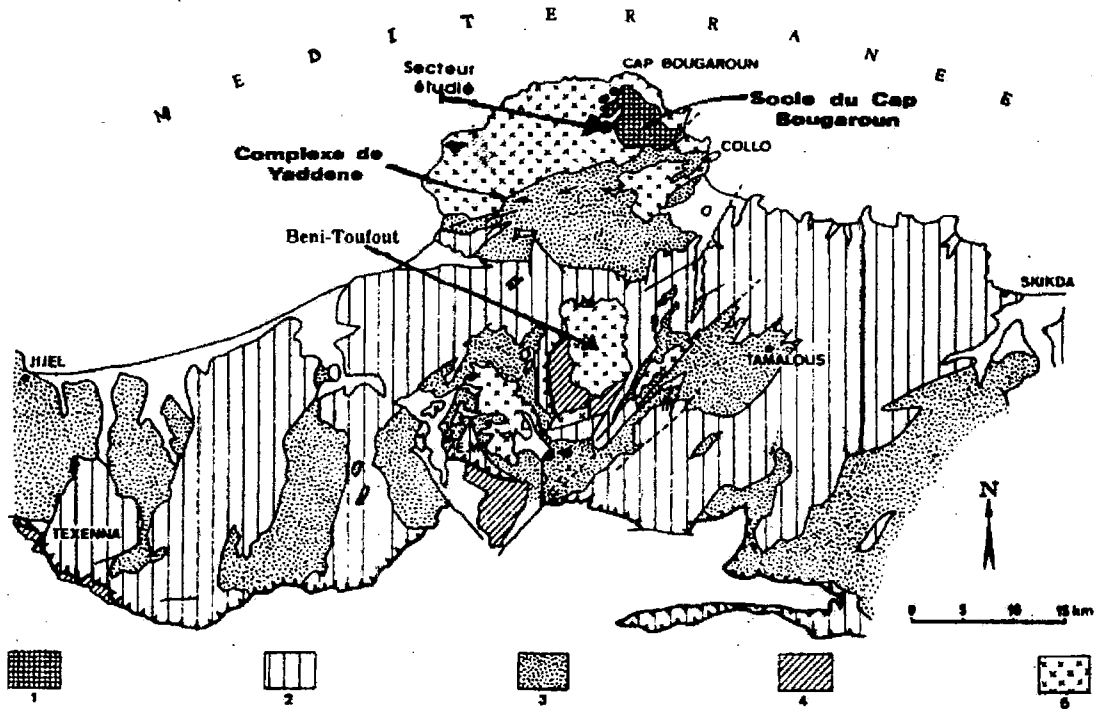


Fig. 1 - Position du massif granitique du Cap-Bougaroun dans le cadre géologique de la Kabylie de Collo (Bouillin et Kornprobst, 1974)

Granitic Cap Bougaroun massif position in Kabylie of Collo geological context (Bouillin and Kornprobst 1974)

1- Socle du Cap-Bougaroun (*Cap Bougaroun's basement*), 2- Socle de Petite Kabylie (*Little Kabylie's basement*), 3- Terrains sédimentaires: Oligo-Miocène Kabyle, flyschs alloctones et olistostromes, Miocène post-nappes (*Sedimentary field : Oligo-Miocene Kabyle, alloctone's flysch and olistostrome, Miocene post-nappe*), 4- Mésozoïque épimétamorphique (*Mesozoic epimetamorphic*), 5- Granites et microgranites miocène (*Granits and miocene microgranits*).

La skarnification affecte également les parties de paragneiss granulitiques contiguës aux masses de skarns sur marbr.

Les roches granitiques affleurant dans le secteur sont essentiellement représentées par un faciès de microgranite et une association de microgranite-rhyolite.

Les caractères pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des roches granitiques du massif du Cap Bougaroun ont fait l'objet d'une étude détaillée par Ouabadi (1987-1994). Selon cet auteur, les différents faciès de granite et de microgranite miocènes du massif du Cap

Bougaroun sont des monzogranites de la lignée calco-alcaline peralumineuse.

L'ensemble de ces faciès granitiques ne montre aucune modification métasomatique post-magmatique au niveau des assemblages minéralogiques primaires tels que les phénomènes de feldspathisation potassique, albitisation, greisénisation et/ou enrichissement des micas en chlore et fluor. Les seules modifications observées sont liées au phénomène d'altération hydrothermale tardive, caractérisées par une séricitisation et kaolinitisation des feldspaths, une chloritisation de la biotite et une pinnitisation de la cordiérite.

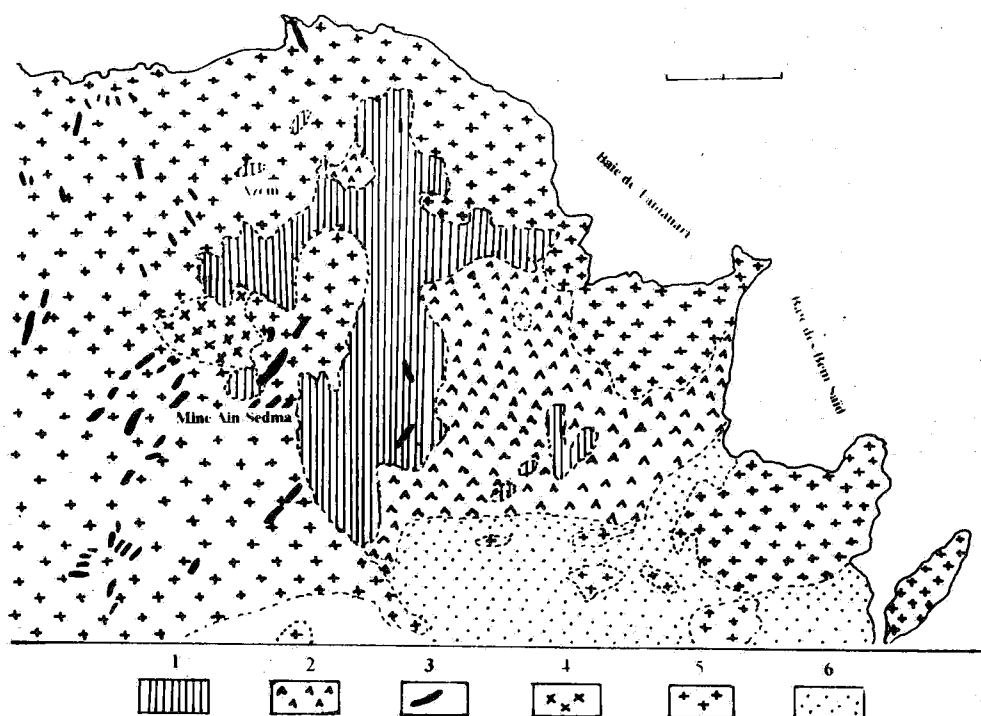


Fig. 2 - Carte géologique de la région de la mine de fer d'Aïn-Sedma (Roubault, 1934).

Geological map of Iron Aïn Sedma mine (Roubault, 1934)

1 : Paragneiss granilitiques (*Granulitic paragneiss*); 2 : roches ultrabasiques (*Ultrabasic rocks*); 3 : filons de rhyolite; (*Rhyolite vein*) 4 : Complexe de granite-rhyolite (*Granite-rhyolite complex*); 5 : granite et microgranite (*Granite and microgranite*); 6 : formations sédimentaires (*Sedimentary formation*).

PETROGRAPHIE DU SKARN PRIMAIRE

La colonne métasomatique du skarn primaire de la mine de fer d'Aïn-Sedma comporte deux zones métasomatiques, une à clinopyroxène qu'on peut subdiviser en une sous-zone à diopside et une sous-zone à ferrosalite et une zone à grenat.

La zonation métasomatique primaire du skarn peut-être schématisée comme suit (fig. 3) :

-Le marbre dolomitique, protolithe du skarn se présente en bancs d'épaisseur métrique, de couleur blanchâtre à gris-bleuté et de texture saccharoïde. Il est composé essentiellement de dolomite-calcite. Les minéraux accessoires, accompagnant la dolomite et la calcite sont souvent représentés par de l'olivine (forstérite) en cristaux globuleux, de la

phlogopite en paillettes rectangulaires, du grenat alumineux (grossulaire) en cristaux automorphes, de l'hornblende et des sulfures (pyrite).

- Zone à clino pyroxène :

a) *Zone à diopside*: de couleur claire et de granulométrie réduite, elle forme de fins liserés d'ordre millimétrique, rarement centimétrique au contact du marbre. De petites veinules enracinées dans la diopsidite sillonnent le marbre.

b) *zone à ferrosalite*: de couleur vert-sombre et d'étendue assez importante (plusieurs décimètres) se particularise par la taille très importante des cristaux de pyroxènes (2 à 5cm de long ou même plus). Ces cristaux de pyroxènes, en grosses baguettes fibreuses, généralement alignées perpendiculairement au front métasomatique

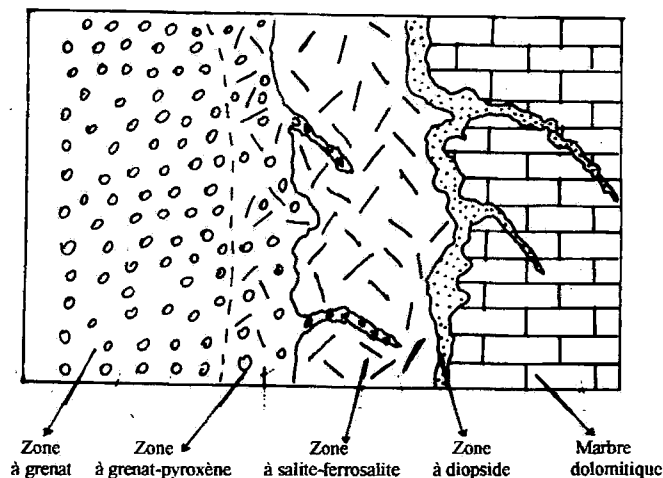


Fig. 3 : Schéma de la colonne métasomatique du skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma
Metasomatic skarn cotumm skech of iron Aïn Sedma mine

avec la zone à diopside développent souvent une structure en peigne. Un front net, marqué par le contraste de couleur et de granulométrie sépare cette zone de la zone à diopside.

L'observation microscopique révèle que les pyroxènes de cette zone, qu'ils soient en grosses baguettes fibreuses ou en cristaux tabulaires présentent un spectaculaire zoning, marqué par un cœur de couleur blanchâtre et une bordure de couleur vert-jaunâtre (Photos en annexe).

- **Zone à grenat** est largement développée forme d'importantes masses de grenatite. Elle est séparée de la zone à pyroxènes par une zone de passage formée par une grenato-pyroxénite où le développement du grenat aux dépens des pyroxènes ferrifères est bien visible. En effet, ces derniers restent en reliques dans le grenat. De petites veinules de grenat enracinées dans la grenatite pénètrent dans la zone à pyroxène. Cette zone de passage entre grenat et pyroxène est relayée à l'amont par une grenatite massive, formée exclusivement de cristaux de grenats généralement automorphes et zonés. Les masses de grenatites laissent apparaître de nombreuses petites cavités géodiques où se développent des

cristaux automorphes de grenat de taille relativement importante (visibles à l'œil nu).

COMPOSITION CHIMIQUE DES MINÉRAUX PRIMAIRES

Pyroxènes (analyses en annexe)

Les pyroxènes analysés font partie de la série diopside-hédenbergite. Leur chimisme permet de distinguer trois populations (fig. 4) :

- Une première population, caractérisée par une composition proche du pôle diopside, représentant les pyroxènes de la zone externe de la colonne métasomatique. Cette population laisse apparaître un net enrichissement en Fe et Mn de l'amont vers l'aval : $Di_{90}Hd_7Jh_3$ (côté marbre) à $Di_{66}Hd_{19}Jh_{15}$ (côté pyroxénite). Cet enrichissement progressif en Fe et Mn dans les parties externes de la colonne métasomatique fait sentir un important apport près de la source.

- Une deuxième population, plus riche en Fe et Mn, représentant la bordure des pyroxènes zonés de la zone à ferrosalite, caractérisée par une composition variant entre $Di_{53}Hd_{37}Jh_{10}$ à $Di_{43}Hd_{47}Jh_{10}$;

- Une troisième population, dont la composition est dominée par le pôle johansénitique : $Di_{13} Hd_{42} Jh_{45}$ caractérisant la composition des coeurs des pyroxènes zonés.

Le passage d'une population de pyroxènes à une autre se fait d'une manière discontinue et par saut brusque de composition chimique (fig. 4). Ce brusque changement de composition chimique est bien illustré par la limite de croissance brutale entre les deux générations de pyroxènes formant le cœur et la bordure des cristaux zonés.

Ces discontinuités de composition chimique sont assez caractéristiques de la métasomatose de percolation (Kerrick, 1977 et Guy, 1979).

Les profils de variation de la composition chimique de ces pyroxènes obtenus par traversée à la microsonde électronique de sections zonées (fig. 5), traduisant les différentes substitutions chimiques entre Mg-Fe-Mn au cours du processus métasomatique caractérisent parfaitement les variations des paramètres physico-chimiques lors de la formation de cette zone.

Grenats (analyses en annexe)

Ils appartiennent à la série grossulaire / andradite et leur teneur en andradite est de 75% à 100%. Leur teneur en composante pyralspite (dominée par la spessartine) varie entre 1,5 et 10% (fig. 6).

Les grenats du skarn du Cap Bougaroun sont marqués par une variation de composition chimique à laquelle semblent être liées des anomalies optiques, caractérisées par des macles en secteurs et des macles en lamelles parallèles aux bords du cristal.

Les profils de variation chimique obtenus par traversée à la microsonde électronique sur des sections zonées de grenats montrent d'une part, une parfaite correspondance entre la variation de composition chimique et les anomalies optiques. En effet, les parties isotropes de ces grenats correspondent à une composition proche du pôle andradite, alors que les parties anisotropes correspondent à une composition intermédiaire. La biréfringence est d'autant plus prononcée dans les parties externes de ces grenats où la

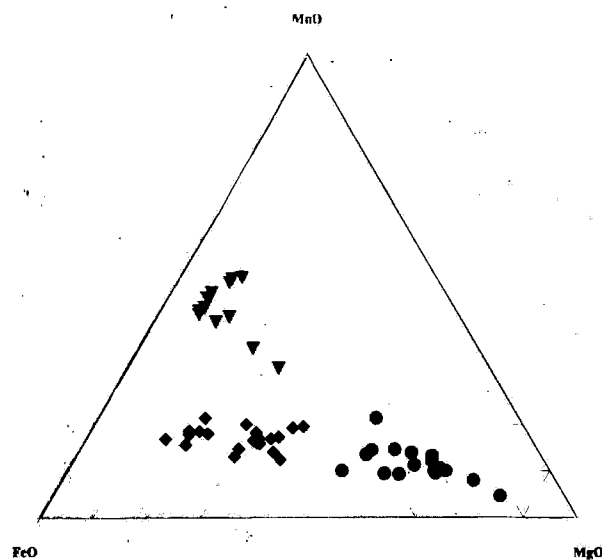


Fig. 4 - Position des pyroxènes du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma dans le triangle MgO - FeO - MnO

Pyroxenes Skarn position of Iron Ain Sedma mine in MgO - MnO - FeO

● : Pyroxènes de la zone à diopside (*Pyroxenes of diopside zone*); ◆ : bordure des cristaux zonés (*Border of crystal zoned*); ▼ : cœur des cristaux zonés (*Heart of zone cristal*)

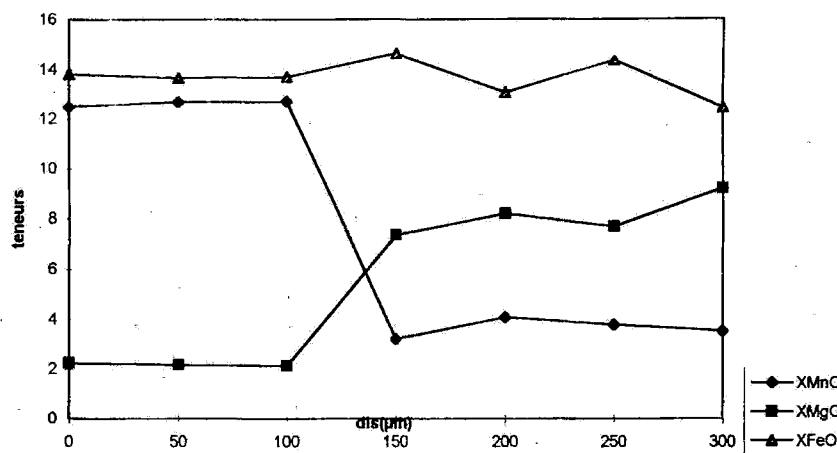


Fig. 5 - Profils de variation chimique dans un pyroxène zoné (cœur-bordure).
Chemical variation profiles in zoned pyroxene (Border - Heart)

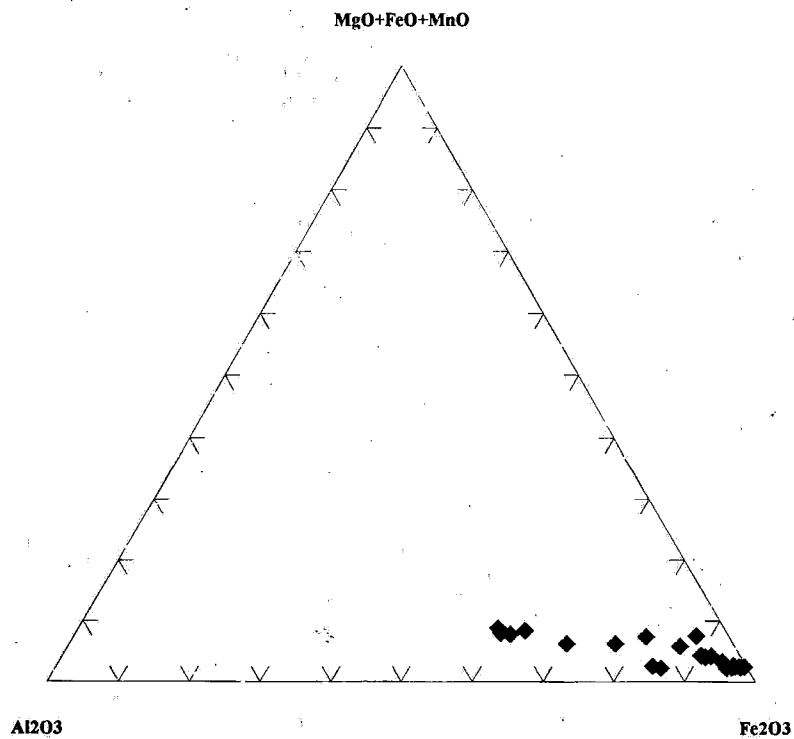


Fig. 6 - Position des grenats du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma dans le diagramme $Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MgO + FeO + MnO$
Garnet skarn position of Iron Aïn Sedma mine in the $Al_2O_3 - Fe_2O_3 - MgO + FeO + MnO$ diagram

variation de composition chimique est plus accentuée (fig. 7).

Par ailleurs, ces profils laissent apparaître que le fer ferrique et l'aluminium sont les éléments chimiques principalement affectés par la substitution dans ces grenats. Ces deux éléments montrent une parfaite corrélation négative.

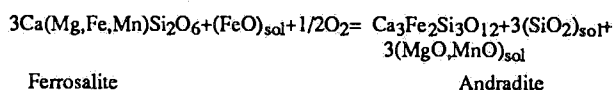
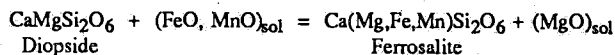
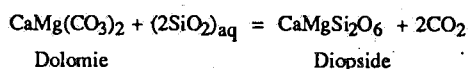
Dimanche (1969), estime que le phénomène de l'isotropie et de l'anisotropie dans le grenat "ferro-grossulaire" proviendrait du caractère tantôt désordonné, tantôt ordonné de l'arrangement des ions Ca et Fe^{2+} en site X et des ions Al et du Fe^{3+} en site Y, (formule générale des grenats $X_3Y_2[(SiO_4)_3]$). Pour Verkaeren (1971), la zonation Fe^{3+}/Al dans les grenats serait liée à de brusques variations du contexte physico-chimique, sans doute liées à l'évolution d'un paramètre tel que la fugacité de l'oxygène.

Selon Fraga *et al.*, (1982), la relation d'ordre à courte distance entre calcium et aluminium serait à l'origine de la biréfringence des grenats. D'après ces auteurs, la relation d'ordre à courte distance entre calcium et aluminium augmente l'ordre de répartition des cations dans la structure

du minéral, et diminue la symétrie, ce qui fait qu'on passe d'une symétrie cubique d'où isotropisme, à une symétrie inférieure d'où anisotropisme.

REACTIONS METASOMATIQUES

Les différentes réactions métasomatiques impliquées dans la formation de la minéralogie primaire du skarn sur marbre dolomitique de la mine de fer d'A/n Sedma peuvent être résumées comme suit :



BILAN CHIMIQUE

L'évaluation des transferts de matière impliqués dans les processus métasomatiques peut être réalisée en comparant chaque zone de la colonne métasomatique avec le protolithe (Guy, 1979; Van Marcke De Lummen, 1983). Pour cela, il faut

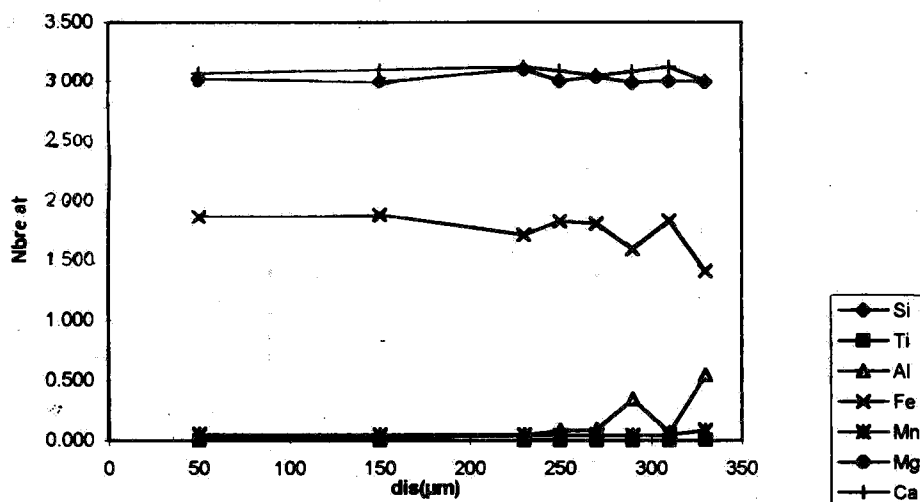


Fig. 7 - Coupe dans un grenat zoné du skarn de la mine de fer d'Ain Sedma (cœur-bordure)
Section in zoned garnet skarn of Iron AIn Sedma mine (Border - Heart)

disposer d'un point de comparaison identique dans chaque zone. Comme point de comparaison on peut prendre par exemple un élément qui n'est pas affecté par les transferts de matière, c'est à dire qui ne soit ni apporté ni emporté dans toute la colonne métasomatique. Un autre point de comparaison utilisable sera un volume unitaire de roche mais pour cela, les transformations d'une zone à l'autre doivent se faire à volume constant. Cette dernière hypothèse est admise par certains auteurs (Korzhinskii, 1968; Guy, 1979; Van Marcke De Lummen, 1983; Vander Auwera, 1988,...), mais d'autres (Burt, 1972; Fonteilles, 1978), considèrent que ce paramètre peut évoluer (augmentation ou diminution) au cours de la transformation métasomatique.

Dans ce qui suit, nous allons effectuer un bilan chimique en considérant comme vraie l'hypothèse du volume constant.

Les calculs se font en comparant le nombre de moles de chaque oxyde présent par unité de volume dans les différentes zones du skarn avec le nombre de moles de l'oxyde correspondant présent dans le protolithe (dans notre cas marbre dolomitique).

Le nombre de moles par unité de volume s'obtient à partir de la formule suivante (Van Marcke De Lummen, 1983) :

$\% \text{ oxyde} / \text{P.M. oxyde} \times d \times 1000 = \text{nombre de millimoles de l'oxyde dans un cm}^3 \text{ de roche.}$

Avec :

$\% \text{ oxyde} = \text{pourcentage en poids de l'oxyde,}$
 $\text{P.M. oxyde} = \text{poids moléculaire de l'oxyde}$
 $d = \text{densité de la roche constituant la zone.}$
 $d = \text{poids de l'échantillon} / \text{volume total}$

Avec :

$\text{volume total} = V_{\text{roche}} + V_{\text{pores}}$ pour tenir compte d'éventuelles variations de porosité.

Ensuite, à partir des teneurs en millimoles des différents oxydes, le pourcentage de gain ou de perte par rapport au protolithe (roche non transformée) peut être calculé dans chaque zone (cf. tableau 1).

Les analyses en roche totale à la fluorescence-X et les mesures de densité des roches représentant le marbre et les zones de skarns de la mine de fer d'Aïn Sedma ont été effectuées au laboratoire de géochimie de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Le bilan chimique obtenu fournit les renseignements suivants (fig. 8) :

La silice, le fer et le manganèse sont les éléments déterminants dans la formation de la colonne métasomatique du skarn sur marbre dolomitique. La silice est fortement apportée dans les premières

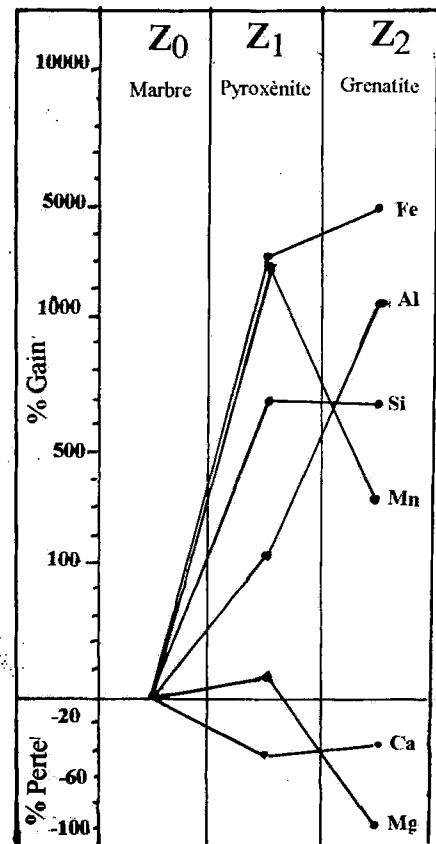


Fig. 8 - Bilan chimique à volume constant du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma

Chemical balance sheet et constant volume skarn of iron Aïn Sedma mine

Tableau 1 - Bilan chimique à volume constant du skarn sur marbre dolomitique d'Aïn Sedma
Chemical balance sheet and constant volume skarn dolomitic marble of Ain Sedma

Pourcentage en poids des oxydes			
N° éch.	Marbre (Z0)	Pyroxénite (Z1)	Grenatite (Z2)
	AS8a d = 3.186	AS8c d = 2.734	AZ2a d = 3.21
SiO2	7.14	48.87	47.93
TiO2	0.0	0.0	0.0
Al2O3	0.03	0.06	0.34
FeOtot	0.55	15.05	23.58
MnO	0.16	4.10	0.59
MgO	5.34	5.28	0.17
CaO	47.06	22.59	26.39
Na2O	0.09	0.13	0.0
K2O	0.03	0.0	0.0
P2O5	0.0	0.03	0.3
Pf	39.12	3.85	3.0
Proportions millimolaires des oxydes			
SiO2	118.84	813.41	797.76
TiO2	0.0	0.0	0.0
Al2O3	0.29	0.58	3.33
FeOtot	3.44	94.24	147.66
MnO	2.25	57.79	8.31
MgO	132.5	131.01	4.21
CaO	838.26	402.81	470.57
Na2O	1.45	2.09	0.0
K2O	0.31	0.0	0.0
P2O5	0.0	0.21	2.11
Pf	889.09	87.5	68.18
Nombre de millimoles à volume constant.			
SiO2	118.84	947.62	936.57
TiO2	0.0	0.0	0.0
Al2O3	0.29	0.67	3.9
FeOtot	3.44	109.78	173.35
MnO	2.25	67.32	9.75
MgO	132.5	152.62	4.94
CaO	838.26	469.27	552.44
Na2O	1.45	2.43	0.0
K2O	0.31	0.0	0.0
P2O5	0.0	0.24	2.47
Pf	889.09	109.93	80.04
Pourcentage de gain ou de perte par rapport au marbre dolomitique			
SiO2		697	688
Al2O3		131	1245
FeOtot		3092	4939
MnO		2993	333
MgO		15	-96
CaO		-44	-34
Pf		-87	-91

zones, mais néanmoins elle diminue très légèrement dans la zone à grenat. Pour le fer, il reste constamment apporté dans les différentes zones métasomatiques. Le manganèse fortement apporté dans la zone à pyroxène subit ensuite une chute dans la zone à grenat.

Le magnésium, relativement constant dans la zone à pyroxène, est fortement lessivé dans la zone à grenat.

L'aluminium semble enregistrer une augmentation progressive à travers la colonne métasomatique.

Le calcium semble être l'élément le moins affecté de la colonne métasomatique. Il ne semble subir qu'un léger lessivage dans les zones du skarn.

BILAN DES ELEMENTS EN TRACES

Le comportement des éléments en traces au cours des processus métasomatiques est susceptible d'apporter des indications sur la composition et l'origine du fluide. En effet, leur comportement au sein de la colonne métasomatique est déterminé à la fois par leur concentration dans le fluide et par leur capacité de se substituer aux éléments majeurs entrant dans la composition des différentes phases minérales de la colonne métasomatique.

A cet effet, certains éléments en trace ont été dosés à la fluorescence-X dans le marbre et le skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma. L'inconvénient rencontré dans le dosage de ces éléments par fluorescence-X réside dans les très faibles teneurs que présentent certains éléments, souvent voisines des limites de détection ou même en dessous (voir tableau ci-dessous).

Pour contourner cet handicap, seuls certains éléments ont été pris en considération dans notre évaluation.

Tableau 2 - Teneurs (en ppm) des éléments en traces du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma

Element trace (in PPM) grade of iron Ain Sedma mine

	Marbre dolomitique AS8a	Pyroxénite AS8c	Grenatite AZ2
Ni	- ppm	- ppm	10.8 ppm
Cu	-	39.1	13.5
Zn	24.8	369.0	8.4
Pb	8.6	41.6	79.3
Sr	474.0	18.9	24.0
Ga	2.5	2.5	8.4
Ba	17.4	18.5	19.3
Y	2.4	1.9	4.3
Sn	3.9	4.9	6.3
W	-	30.2	112
Rb	2.6	5.3	4.7
Zr	18.7	18.5	18.4
Hf	-	-	-
La	-	-	-

Les résultats d'analyses laissent apparaître que les teneurs obtenues sont très faibles. Cependant, quelques observations peuvent être tirées:

Une certaine augmentation des micro-teneurs de Cu, Zn et Pb s'observe dans la zone à pyroxène.

Ces éléments remplacent vraisemblablement le Fe dans cette zone. Dans la zone à grenat on note surtout une augmentation des micro-teneurs de W. En parallèle à cet enrichissement relatif en ces éléments, le Sr se substituant au Ca est fortement lessivé dans ces zones de skarn.

Le comportement de ces éléments en traces dans la colonne métasomatique du skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma laissent apparaître que le faible contenu métallogénique est vraisemblablement lié à un problème d'apport des éléments métalliques par les fluides et non à la fixation de ces éléments.

ALTERATION HYDROTHERMALE TARDIVE

Le processus d'altération hydrothermale tardive du skarn primaire de la mine de fer d'Aïn Sedma est principalement caractérisé par

une phase d'hydroxylation des silicates, une phase de sulfuration et une phase d'oxydation.

L'épisode de sulfuration au cours duquel apparaissent des sulfures (pyrite, blende et chalcoppyrite), une deuxième génération de grenat andraditique, de la calcite et du quartz par déstabilisation du pyroxène ferrifère, semble être précoce. En effet, cette association minérale à sulfures-andradite-quartz et calcite reste stable avec le pyroxène ferrifère primaire.

Le grenat andraditique néoformé au cours de la phase de sulfuration se présente en petits cristaux isolés dans les parties de la pyroxénite ferrifère où apparaissent les sulfures. Il est de même pour le quartz et la calcite, qui combinent les vides entre les cristaux de pyroxène.

Cette phase de sulfuration est suivie par une phase d'oxydation entraînant le remplacement de la pyrite par la magnétite et la déstabilisation de l'andradite en magnétite + quartz dans la zone interne et en calcite-quartz au front avec la pyroxénite.

La phase d'hydroxylation est essentiellement caractérisée par l'altération des pyroxènes en amphiboles et/ou en ilvaïte pour les pyroxènes ferrifères et le grenat métamorphique alumineux en épidote.

La nature et la composition des phases minérales néoformées au cours de la phase d'altération hydrothermale tardive est contrôlée par le chimisme des zones primaires. En effet, les pyroxènes ferrifères sont soit remplacés par de la ferro-trémolite riche en manganèse, soit par de l'ilvaïte, alors que le diopside dans la zone externe est remplacé par la trémolite.

Cette phase d'hydroxylation se termine par un phénomène de chloritisation des amphiboles et de l'épidote.

CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES DE FORMATION DU SKARN DE LA MINE DE FER D'AÏN SEDMA

Système de zones primaires

A partir des données fournies par la littérature, nous essayerons de donner des indications sur les valeurs des principaux paramètres qui semblent avoir contrôlé la formation du skarn tels que : T , P_f , f_{O_2} , X_{CO_2} , f_{s_2} .

Pression

La pression induite par la mise en place du granite miocène du Cap Bougaroun dans l'encaissant est estimée à 2 Kbar (Bouillin, 1977 et Ouabadi, 1994).

Dans le cadre de la métasomatose d'infiltration, l'hypothèse de la circulation d'un fluide implique l'existence d'un gradient de pression et de surpression du fluide issu de la cristallisation de l'intrusion par rapport à la pression fluide de l'encaissant (Fontelles, 1978). Selon cet auteur, ceci implique l'existence dans les pores de la roche, d'un fluide sous une pression suffisamment proche de la pression solide).

Dans le cas du skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma, l'occurrence d'une porosité importante et de cavités géodiques observées dans la grenatite témoigne d'une cristallisation du grenat dans des cavités ouvertes. Ceci implique l'existence, dans ces géodes, d'un fluide sous une pression suffisamment proche de la pression solide.

De ce fait, une évaluation de $P_f = P_s = 2$ Kbar serait une bonne approximation pour la formation du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma.

Température

La colonne métasomatique du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma est formée essentielle-

ment par une zone externe à pyroxène de composition diopsidique du côté marbre, suivie par une composition de salite-ferrosalite manganisifère et une zone interne à grenat de composition andraditique.

La stabilité du pôle pur diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ a été étudiée expérimentalement par Slaughter, Kerrick et Wall (1975). Le résultat obtenu situe la stabilité du diopside à $P_f = 2$ Kbar entre 425°C et 510°C pour des X_{CO_2} non négligeables.

A partir de ces travaux expérimentaux, Soler (1977), a refait des calculs thermodynamiques pour l'équivalent ferrifère et a déduit les conditions de stabilité des termes intermédiaires (salite). Selon cet auteur, la stabilité des termes intermédiaires se situe entre 420°C et 500°C pour des fugacités de CO_2 non négligeables (voir fig. 9).

Les travaux de Taylor et Liou (1978), concernant la stabilité du grenat de composition andraditique donnent une limite inférieure de 400°C .

Sur la base de ces données, une pression fluide de 2 Kbar et une gamme de température comprise entre 400°C comme limite inférieure et 510°C comme limite supérieure seraient une bonne approximation pour la formation du skarn primaire.

f_{O_2}

Au niveau du contact de la zone à grenat et de la zone à pyroxènes, l'équilibre hedenbergite-andradite donne à 2 Kbar et une température comprise entre 450°C et 550°C , une f_{O_2} égale à 10^{-22} à 10^{-30} bar. f_{O_2} est au-dessus de cette valeur dans la zone à grenat et au-dessous dans la zone à pyroxène (Gustafson, 1974).

Selon, Burt (1972), f_{O_2} dans la zone à pyroxène est généralement inférieure à cette valeur (10^{-22} à 10^{-30} bar).

De ce fait on peut retenir pour le skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma une fugacité en oxygène inférieure à 10^{-22} à 10^{-30} bar dans la zone à pyroxène et une fugacité en oxygène supérieure à 10^{-22} à 10^{-30} bar dans la zone à grenat.

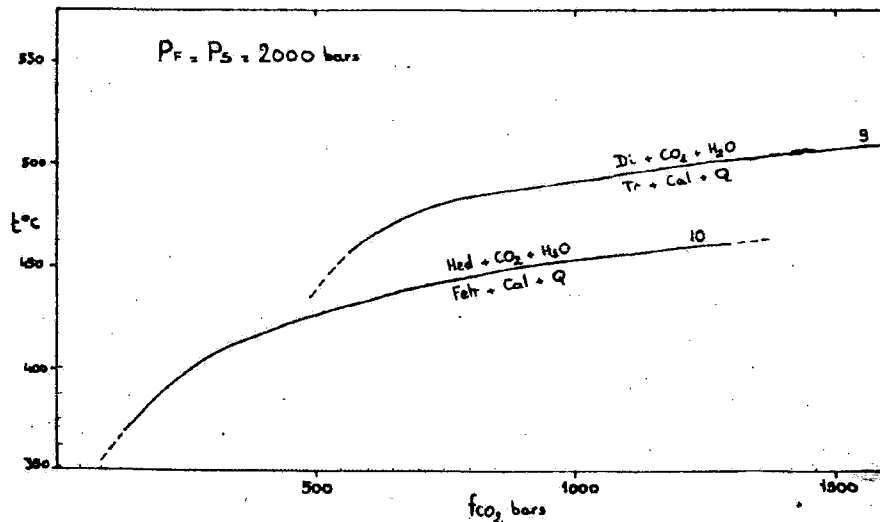


Fig. 9 - Stabilité des clinopyroxènes dans le diagramme $T - f_{\text{CO}_2}$ (Soler, 1977)

Clinopyroxene stability in $T - f_{\text{CO}_2}$ (Soler, 1977)

- Equilibre (Equilibrium) (9) : Slaughter et al., 1975
- Equilibre (Equilibrium) (10) : Soler, 1977

X_{CO_2}

Les travaux de Taylor et Liou (1978), sur les skarns formés sur marbre indiquent les valeurs suivantes :

- dans le marbre $X_{CO_2} > 0,24$
- dans la zone à salite $0,2 < X_{CO_2} < 1$
- dans la zone à grenat andraditique $X_{CO_2} = 0,13$
- pour le grenat à 50 mole % de grossulaire $X_{CO_2} = 0,05$

Ces données laissent apparaître que les fractions molaires de CO_2 augmentent des zones internes vers les zones externes, contrairement aux fugacités en oxygène qui, varient en sens inverse.

Une des caractéristiques essentielles des skarns est leur évolution polyphasée : le paramètre majeur de cette évolution est la température dont la décroissance contrôle l'altération des premiers minéraux et les variations de certains paramètres intensifs (Guy, 1979). Cette évolution

polyphasée est parfaitement illustrée par les structures de croissance des pyroxènes et grenats dans le skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma.

En résumé, sur la base de ces données et de celles fournies par le bilan chimique concernant les paramètres physico-chimiques, les différentes étapes de la formation de la minéralogie primaire du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma peuvent être reconstituées comme suit :

Une $P_f = P_s = 2$ Kbar, une température de l'ordre de $500^\circ C$, des X_{CO_2} non négligeables, des fugacités en oxygène inférieures à 10^{-22} à 10^{-30} bar et une activité de silice importante, semblent bien être les conditions physico-chimiques qui ont favorisé le développement d'un pyroxène de composition diopsidique ou proche, directement sur le marbre, plutôt que la formation de forstérite et/ou de trémolite dont les conditions de stabilité de la première nécessitent une température plus élevée pour une activité en silice moindre et la seconde une température plus basse et une activité en silice élevée (fig. 10).

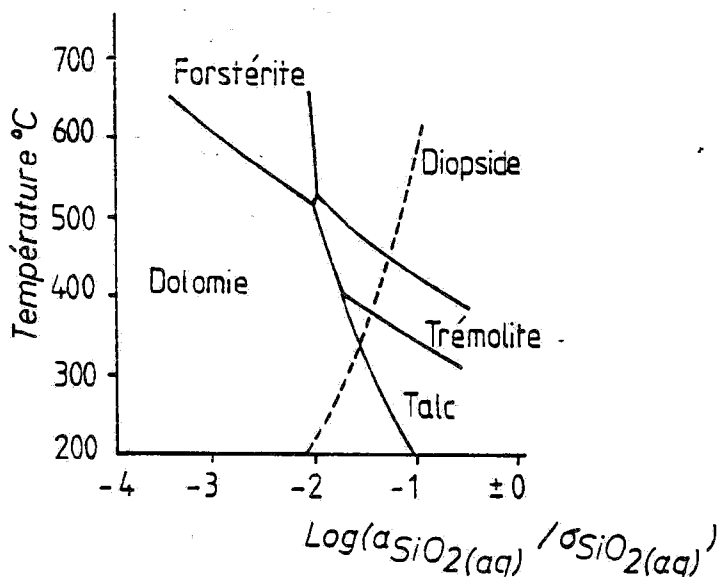


Fig. 10 - Diagramme T - a_{SiO_2} (avec $X_{CO_2} = 0.1$) d'après Bucher-Nurminen, 1981 (In Vander Auwera, 1988)

T - a_{SiO_2} (with $X_{CO_2} = 0.1$) from Bucher-Nurminen, 1981 (In Vander Auwera, 1988)

Par baisse de température et de X_{CO_2} et pour une activité croissante du fer et du manganèse, le diopside est déstabilisé au profit d'un pyroxène mangano-ferrifère (cœur des cristaux zonés). Ensuite, la décroissance de température et de X_{CO_2} entraîne le remplacement du pyroxène mangano-ferrifère par un pyroxène de composition salitique pauvre en manganèse (bordure des cristaux zonés).

Enfin à plus basse température dont la limite inférieure est fixée à $400^\circ C$, un $X_{CO_2} \leq 0,13$ (limite imposée par la stabilité de l'andradite) et des fugacités en oxygène supérieures à 10^{-22} à 10^{-30} bar, le pyroxène ferrifère est remplacé par le grenat andraditique.

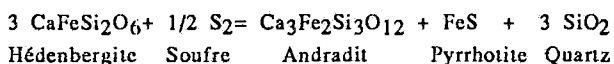
Altération hydrothermale du système des zones primaires

En maintenant la pression à 2 Kbar, la stabilité des différents assemblages minéralogiques secondaires résultant de la phase d'altération hydrothermale permet l'estimation de certains paramètres physico-chimiques qui ont contrôlé cette phase.

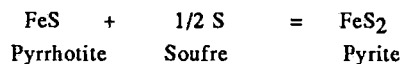
L'association minérale à pyrite-andradite-quartz et calcite, développée au dépens du pyroxène ferrifère au cours de la phase de sulfuration permet une estimation de la température et la fugacité en soufre lors de cette phase.

L'assemblage andradite-sulfure-quartz, résultant de la transformation de l'hédenbergite en présence de soufre a été étudiée par Burt (1972).

La transformation de l'hédenbergite en présence de soufre s'opère suivant la réaction :



Si la fugacité du soufre augmente dans le milieu de transformation de l'hédenbergite, on observera la formation de la pyrite :



Par ailleurs, l'étude qualitative de plusieurs cas naturels (Burt, 1972) montre qu'aux basses températures (inférieures à $350^\circ C$) l'hédenbergite en présence de soufre est directement déstabilisée en andradite-pyrite-quartz, sans que la pyrrhotite apparaisse. Ce dernier cas est bien représenté dans le skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma.

Les résultats des travaux expérimentaux portant sur la réaction de déstabilisation de l'hédenbergite en présence de soufre de Gamble (1982) et Burton *et al.*, (1982) concordent avec ceux proposés par Burt (1972).

Selon les résultats expérimentaux, le domaine de stabilité de l'association andradite-pyrite-pyrrhotite à 2 Kbar est comme suit :

- à $600^\circ C$ l'andradite se déstabilise avant que n'apparaisse la pyrite.
- à partir de $288^\circ C$ (Burton *et al.*, 1982) l'hédenbergite réagit avec le soufre pour donner andradite, pyrite et quartz, sans qu'il soit possible de former la pyrrhotite.

Par ailleurs, les travaux expérimentaux de ces derniers auteurs laissent apparaître que les teneurs en composante johansénnite et diopside du pyroxène jouent un rôle sur les conditions de l'équilibre précédent. L'augmentation de la teneur en composante johansénnite du pyroxène augmente la température ou la fugacité de soufre (Burton *et al.*, 1982). Il est de même pour la teneur en diopside mais de manière moins prononcée (Gamble, 1982).

D'après ces données et puisque les pyroxènes ferrifères du skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma sont riches en composante johansénnite et diopside, une température comprise entre $288^\circ C < T < 350^\circ C$ et des fugacités non négligeables en soufre seraient une bonne approximation pour la phase de sulfuration du skarn de la mine de fer d'Aïn-Sedma.

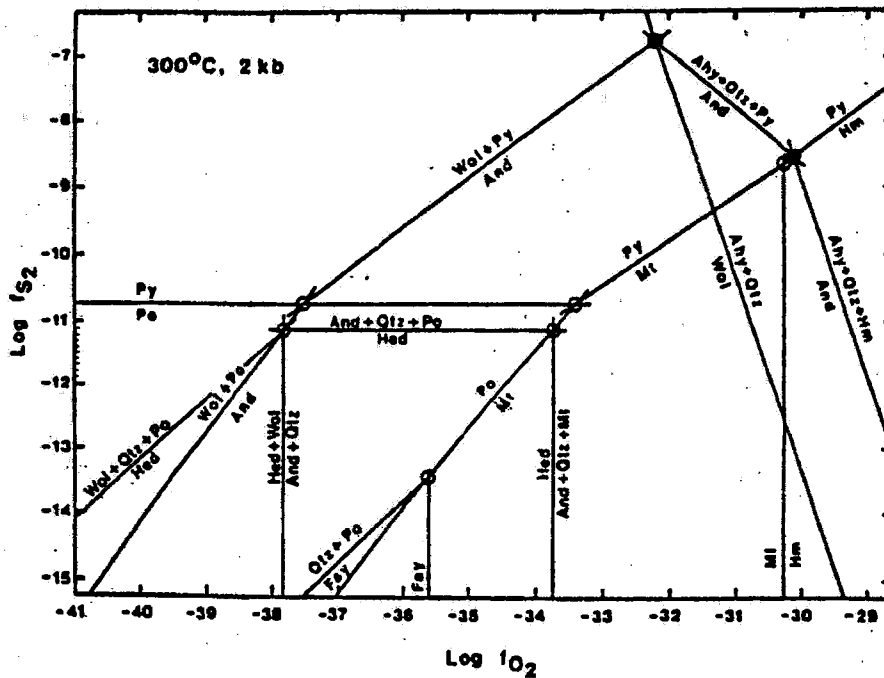


Fig. 11 - Diagramme $\log f_{O_2}$ - $\log f_{S_2}$ dans le système Ca-Fe-Si-O-S (Gamble, 1982)
Log f - log f_{S_2} diagram in Ca-Fe-Si-O-S system (Gamble, 1982)

Cette phase de sulfuration est suivie par une phase d'oxydation au cours de laquelle la pyrite est remplacée par de la magnétite et l'andradite par magnétite-quartz, et plus rarement par calcite-quartz-oxydes de fer. La magnétite est à son tour remplacée par de l'hématite.

Cette phase d'oxydation semble être principalement contrôlée par une augmentation des fugacités en oxygène.

L'estimation des différents paramètres contrôlant la phase de sulfuration et d'oxydation peuvent être tirés du diagramme $\log f_{O_2}$ - $\log f_{S_2}$ construit dans le système Ca - Fe- Si - O - S à température et pression fixées à 300°C et 2Kbar par Gamble (1982) (fig. 11).

D'après ce diagramme $\log f_{S_2}$ lors de la phase de sulfuration peut être fixée entre $-11,1 < \log f_{S_2} < -10,8$ et $\log f_{O_2}$ à $-37,9 < \log f_{O_2} < -33,8$. La fugacité de CO_2 lors de ces phases de sulfuration et d'oxydation peut être déduite des conditions de stabilité de l'andradite.

D'après les travaux de Taylor et Liou (1978), le domaine de stabilité de l'andradite à basse température est compris entre $0,05 < X_{CO_2} < 0,15$.

Pour la phase d'hydroxylation, les données fournies par les travaux de Soler (1977) concernant l'équilibre :

$Hed + CO_2 + H_2O = Fetr + Cal + Q$ permettent de fixer la stabilité de l'association Fetr+Cal+Q

à des températures comprises entre 350°C et 450°C pour une pression fluide de 2 Kbar.

CONCLUSION

A partir des données pétrographiques, minéralogiques et géochimiques du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma, nous essayerons de mener une réflexion sur l'origine des fluides responsables de la formation de ce skarn.

Dans les environnements magmatiques, les solutions hydrothermales peuvent avoir comme origine : une source magmatique, une source mixte (mélange de fluides d'origine magmatique et de fluides d'origine externe) ou une source externe (fluides d'origine métamorphique ou d'infiltration réchauffés par l'intrusion magmatique).

Contrairement aux skarns associés aux granites métallogènes ou spécialisés, caractérisés par des concentrations élevées en éléments hygromagmatophiles tels que Sn, W, Mo, Ta..., le skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma montre un faible contenu géochimique en ces éléments.

Le granite miocène du Cap Bougaroun auquel est associé le skarn de la mine d'Aïn Sedma est un granite géochimiquement peu évolué (Ouabadi, 1994), mis en place dans un encaissant formé de paragneiss et de roches ultrabasiques riches en Fe, Al, Mg et Mn.

L'influence de l'encaissant sur la composition chimique des fluides responsables de la formation du skarn de la mine de fer d'Aïn Sedma, notamment son enrichissement en fer, aluminium et manganèse semble être parfaitement illustré par les caractères minéralogiques et géochimiques de ce dernier.

Ces observations laissent suggérer que le rôle de la mise en place du granite miocène du Cap Bougaroun s'est limité à une source de chaleur pour le réchauffement de fluides d'origine externe dont le contenu géochimique semble directement hérité de l'encaissant.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUILLIN, J. PET KORNPROBST Les associations ultrabasiques de Petite Kabylie. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), XVI, n° 2.
- BOUILLIN, J. P., 1977. Géologie alpine de la Kabylie dans les régions de Collo et d'El-Milia (Algérie). *Thèse doct. Univ. P. et M. Curie*, 511 p.
- BURT, D. M., 1972. Mineralogy and geochemistry of Ca-Fe-Si skarns deposits. *Ph. D. thesis Harvard Univ.*
- BURTON, J. C., TAYLOR L. A. ET P-MING CHOU 1982. The fO_2 - T and fS_2 - T stability relations of hedenbergite and hedenbergite-johansinite solid solutions. *Econ. Geol.* 77, pp. 764-783.
- DIMANCHE, F., 1969. Les skarns amphibolitiques à magnétite de Ginévro (île d'Elbe, Italie). *Thèse de doctorat, Univ. de Liège, Fac. des Sciences.*
- FONTEILLES, M., 1978. Les mécanismes de la métasomatose. *Bull. Minéral.*, 101, pp. 166-194.
- FRAGA, H., GALI, S., ET FONT ALTABA, M., 1982. Sector zoning as a growth phenomenon and its influence in the optical properties of crystals. The case of Grossularite-andradite garnets. *Estudios Geol.* 38, pp. 173-178.
- GAMBLE, R. P., 1982. An experimental study of sulfidation reactions involving andradite and hedenbergite. *Econ. Geol.*, 77, pp. 784-794.
- GUSTAFSON, W. I., 1974. The stability of andradite, hedenbergite and related minerals in system Ca-Fe-Si-O-H. *Journ. of Petrol.*, Vol. 15, Part 3, pp. 455-496.

- GUY, B., 1979.** Pétrologie et géochimie isotopique (S, C, O) des skarns à scheelite de Costabone Pyrénées - orientales France. *Thèse de doc. Ing, ENSM - Paris*, 238p.
- KERRICK, D. M., 1977.** The genesis of zoned skarns in the Sierra Nevada, California. *Journal of Petrology* Vol. 18 Par 1 pp. 144-181.
- KORZHINSKII, D. S., 1968.** Theory of metasomatic zoning. *Mineral. Deposita.*, 3, pp. 222-231.
- MAHDJOUR, Y., 1991.** Cinématique des déformations et évolution P, T anté-alpines et alpines en Petite Kabylie (Algérie nord orientale). Un modèle d'évolution du domaine tellien interne. *Thèse d'Etat USTHB Alger*, 186p.
- OUABADI, A., 1987.** Etude pétrologique du complexe magmatique du Nord de la Kabylie de Collo. *Thèse de Magister USTHB Alger*, 169p.
- OUABADI, A., 1994.** Pétrologie, géochimie et origine des granitoïdes peralumineux à cordiérite (Cap Bougaroun, Beni-Toufout et Filfila) Algérie nord orientale. *Thèse Doct. Univ. Rennes I, France*, 257p.
- ROUBAULT, M., 1934 b.** La Kabylie de Collo, étude géologique. *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, Alger*, 2^e série, N° 10, 1 vol., 272 p.
- SLAUGHTER, J., KERRICK, D. M. ET WALL, V. J., 1975.** Experimental and thermodynamic study of equilibria in the system $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$. *Ann. Jour. Sci.*, Vol. 275, pp. 143-162.
- SOLER, P., 1977.** Pétrographie, thermochimie et métallogénie du gisement de scheelite de Salau (pyrénées ariégeoises, France). *Thèse Ing. Doct. Ecole des Mines de Paris*, 220 p.
- TAYLOR, B. E. ET LIU, J. G., 1978.** The low temperatures stability of andradite in C-O-H fluids. *Am. Mineral.*, 63, pp. 378-393.
- VANDER RAUWERA, J., 1988.** Pétrologie et géochimie (Terres rares, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) des skarns ferrifères et tungstifères de Traversella (Ivrea, Italie). *Thèse Univ. Cath. de Louvain, Belgique*. 474 p.
- VAN MARCKE DE LUMMEN, G., 1983.** Pétrologie et géochimie du site tungstifère de Costabonne (Pyrénées orientales, France). *Thèse E.N. S.M. de Saint-Etienne. et Univer. Cath. Louvain*. 293p.
- VERKAEREN, J., 1971.** Les grenats biréfringents des skarns à magnétite de San Leone (Sardaigne SW). *Bull. Soc. Minéral. Cristallogr.*, 94, pp. 492-499.

Composition chimique des pyroxènes du skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma

ECHAN Num	AS18 fb116	AS18 fb117	AS18 fb118	AS18 fb120	AS18 fb121	AS18 fb122	AS18 fb124	AS18 fb125	AS18 fb68
SiO ₂	50.05	50.37	49.73	48.73	49.02	48.78	51.11	50.64	54.11
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.84	0.7	0.91	0.02	0.01	0.04	0.78	0.92	0.34
FeO	12.12	12.15	9.96	10.5	9.84	10.68	9.68	11.05	4.45
MnO	3.75	4.38	4.43	14.13	14.03	13.82	4.59	4.06	2.32
MgO	7.83	7.51	8.65	2.77	3.19	2.74	9.27	8.48	16.29
CaO	23.64	23.68	22.95	23.05	23.17	23.31	23.57	23.87	23.62
Na ₂ O	0.22	0.19	0.22	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.05
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.47	98.98	96.85	99.29	99.28	99.37	99.21	99.02	101.18
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes									
Si	1.97	1.98	1.97	1.98	1.99	1.98		1.97	1.97
Al	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02
Fe ₂	0.40	0.40	0.33	0.36	0.33	0.36	0.31	0.36	0.12
Mn	0.13	0.15	0.15	0.49	0.48	0.48	0.15	0.13	0.07
Mg	0.46	0.44	0.51	0.17	0.19	0.17	0.53	0.49	0.88
Ca	1.00	1.00	0.98	1.00	1.01	1.01	0.98	1.00	0.92
Na	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FM	0.53	0.55	0.48	0.83	0.81	0.83	0.46	0.50	0.18
WO	50.34	50.30	49.61	49.82	49.96	50.25	49.46	50.25	45.78
EN	23.20	22.20	26.02	8.33	9.57	8.22	27.07	24.84	43.93
FS	26.46	27.50	24.38	41.85	40.47	41.53	23.47	24.91	10.29

ECHAN Num	AS18 fb69	AS18 fb70	AS18 fb71	AS18 fb82	AS18 fb84	AS18 fb85	AS18 fb88	AS8 fb144	AS8 fb145
SiO ₂	53.26	52.91	53.48	53.25	54.07	53.73	51.56	52.03	51.07
TiO ₂	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00
Al ₂ O ₃	0.21	0.3	0.64	0.45	0.33	0.35	0.05	2.06	0.23
FeO	4.52	5.43	3.26	5.68	4.5	4.44	11.83	6.56	9.84
MnO	2.97	3.19	1.74	3.15	2.09	1.99	4.13	2	8.04
MgO	14.9	14.3	16.52	12.72	14.39	14.31	8.47	12.61	7.15
CaO	25.16	25.05	25.32	25.07	25.14	25.13	24.32	24.94	23.61
Na ₂ O	0.05	0.09	0.08	0.1	0.09	0	0.04	0.14	0.05
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.6	0.00	0	0.00
Total	101.07	101.28	101.05	100.43	100.61	100.55	100.4	100.5	99.99
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes									
Si	1.95	1.94	1.94	1.99	1.99	1.98	1.99	1.94	1.99
Al	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	0.07	0.01
Fe ₂	0.14	0.17	0.10	0.18	0.14	0.14	0.38	0.20	0.32
Mn	0.09	0.10	0.05	0.10	0.07	0.08	0.14	0.06	0.27
Mg	0.82	0.78	0.89	0.71	0.79	0.79	0.49	0.70	0.42
Ca	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99
Na	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	3.97	4.00	4.00	4.00
FM	0.22	0.25	0.15	0.28	0.21	0.20	0.51	0.28	0.59
WO	48.80	48.45	48.48	50.45	49.95	50.18	50.04	50.71	49.61
EN	40.05	38.48	44.01	35.62	39.78	39.76	24.25	35.67	20.90
FS	11.35	13.07	7.51	13.93	10.26	10.06	25.72	13.63	29.49

Composition chimique des pyroxènes du skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma (suite)

ECHAN	AS8	AS8	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18
Num	fb146	fb148	fb89	fb90	fb91	fb92	fb93	fb96	fb97
SiO ₂	52.74	50.1	52.29	52.86	52.13	53.67	53.64	52.86	54.43
TiO ₂	0.03	0.05	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	1.34	0.05	0.95	0.46	0.33	0.38	0.49	0.14	0.28
FeO	5.91	10.81	8.71	6.85	7.26	4.46	4.27	6.02	2.34
MnO	1.95	9.39	2.25	3.22	3.03	2.59	2.24	4.86	0.92
MgO	13.04	5.54	11.62	12.19	12.19	14.35	14.71	11.84	16.38
CaO	24.89	23.92	23.77	23.9	23.14	25.01	23.86	24.48	25.57
Na ₂ O	0.18	0.02	0.2	0.06	0.1	0.05	0.06	0.05	0.03
K ₂ O	0	0	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
Total	100.08	99.88	99.82	99.4	98.18	100.51	99.27	100.3	99.93
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes									
Si	1.96	1.98	1.98	2.00	2.00	1.98	2.00	1.99	1.99
Al	0.04	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01
Fe ₂	0.18	0.36	0.28	0.22	0.23	0.14	0.13	0.19	0.07
Mn	0.08	0.32	0.07	0.10	0.10	0.08	0.07	0.16	0.03
Mg	0.72	0.33	0.66	0.69	0.70	0.79	0.82	0.67	0.89
Ca	0.99	1.01	0.96	0.97	0.95	0.99	0.95	0.99	1.00
Na	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FM	0.25	0.67	0.35	0.32	0.32	0.22	0.20	0.34	0.10
WO	50.60	50.37	49.00	49.02	48.05	49.52	48.27	49.48	50.22
EN	36.89	16.23	33.33	34.79	35.22	39.53	41.41	33.28	44.76
FS	12.51	33.40	17.68	16.19	16.74	10.95	10.33	17.26	5.02

ECHAN	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18	AS18
Num	fb99	fb10	fb11	fb12	fb13	fb16	fb17	fb19	fb20
SiO ₂	53.57	50.68	49.41	49.31	49.5	51.06	50.7	49.23	47.28
TiO ₂	0.00	0.24	0.01	0.02	0.17	0.02	0.03	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	0.35	1.13	0.03	0.04	0.04	1.28	0.94	0.03	0.07
FeO	5.25	14.15	13.69	13.65	13.82	12.35	13.24	12.64	11.44
MnO	2.42	3.22	12.71	12.68	12.5	3.13	4.19	14.03	11.51
MgO	13.76	7.35	2.13	2.16	2.25	9.73	8.06	2.26	3.65
CaO	24.81	23.72	23.27	23.23	23.29	23.48	23.54	23.28	22.09
Na ₂ O	0.03	0.28	0	0.01	0.02	0.27	0.27	0	0
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.19	100.77	101.25	101.1	101.59	101.32	100.97	101.47	96.06
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes									
Si	1.99	1.96	1.98	1.98	1.98	1.93	1.95	1.97	1.97
Al	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00
Fe ₂	0.18	0.46	0.46	0.46	0.46	0.39	0.43	0.42	0.40
Mn	0.08	0.11	0.43	0.43	0.42	0.10	0.14	0.48	0.41
Mg	0.78	0.42	0.13	0.13	0.13	0.55	0.46	0.14	0.23
Ca	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	0.95	0.97	1.00	0.99
Na	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FM	0.24	0.57	0.88	0.87	0.87	0.47	0.55	0.87	0.76
WO	49.65	49.90	49.55	49.52	49.46	47.79	48.64	49.13	48.88
EN	38.32	21.51	6.31	6.41	6.65	27.56	23.17	6.64	11.24
FS	12.03	28.59	44.15	44.06	43.89	24.66	28.20	44.23	39.89

CATACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DU SKARN DE LA MINE DE FER

Composition chimique des pyroxènes du skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma (suite)

ECHAN Num	AS18 fb22	AS18 fb23	AS18 fb24	AS18 fb25	AS18 fb26	AS18 fb27	AS18 fb28	AS18 fb29
SiO ₂	49.58	50.07	49.48	50.27	49.34	48.54	48.26	48.67
TiO ₂	0	0.09	0.05	0.06	0.02	0.08	0.07	0.07
Al ₂ O ₃	0.03	1.2	1.05	0.8	0.22	1.3	1.63	1.3
FeO	12.75	12.83	15.78	13.57	17.55	16.07	16.15	16.41
MnO	11.88	4.27	4.75	5.26	4.21	5.87	4.88	4.84
MgO	3.25	8.22	5.91	7.51	5.23	5.54	5.45	4.85
CaO	23.2	23.63	23.3	23.22	23.48	23.04	23.19	23
Na ₂ O	0	0.21	0.27	0.16	0.13	0.24	0.25	0.25
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100.49	100.52	100.59	100.85	100.18	100.68	99.89	99.39
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes								
Si	1.99	1.93	1.94	1.94	1.95	1.90	1.91	1.94
Al	0.00	0.05	0.05	0.04	0.01	0.06	0.08	0.06
Fe ₂	0.43	0.41	0.52	0.44	0.58	0.53	0.53	0.55
Mn	0.40	0.14	0.16	0.17	0.14	0.20	0.16	0.16
Mg	0.19	0.47	0.35	0.43	0.31	0.32	0.32	0.29
Ca	1.00	0.98	0.98	0.96	1.00	0.97	0.98	0.98
Na	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FM	0.81	0.54	0.66	0.59	0.70	0.69	0.68	0.71
WO	49.46	48.77	48.95	47.96	49.14	48.07	49.09	49.59
EN	9.64	23.60	17.28	21.58	15.23	16.08	16.05	14.55
FS	40.90	27.63	33.77	30.46	35.63	35.85	34.85	35.86

ECHAN Num	AS18 fb30	AS18 fb31	AS18 fb4	AS18 fb5	AS18 fb6	AS18 fb7	AS18 fb8	AS18 fb9
SiO ₂	49.2	48.52	49.28	49.28	48.19	51.32	50.95	51.23
TiO ₂	0.04	0.04	0.01	0.01	0	0.02	0.01	0
Al ₂ O ₃	0.7	0.27	0.02	0.02	0.01	1.12	0.71	0.97
FeO	17	18.65	12.89	13.11	12.96	12.45	14.36	13.06
MnO	4.79	4.61	13.49	12.74	13.6	3.52	3.79	4.07
MgO	5.08	4.13	2.26	2.29	2.16	9.2	7.66	8.2
CaO	23.25	22.95	23.29	23.13	22.89	23.76	23.56	23.69
Na ₂ O	0.18	0.04	0.01	0.01	0	0.24	0.26	0.24
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.24	99.21	101.23	100.59	98.81	101.63	101.32	101.46
Formule structurale calculée sur base de 6 oxygènes								
Si	1.95	1.96	1.97	1.99	1.96	1.94	1.96	1.98
Al	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.04
Fe ₂	0.56	0.63	0.43	0.44	0.44	0.39	0.46	0.42
Mn	0.16	0.16	0.46	0.44	0.47	0.11	0.12	0.13
Mg	0.30	0.25	0.14	0.14	0.13	0.52	0.44	0.47
Ca	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.96	0.97	0.97
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
Total cat	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
FM	0.71	0.76	0.87	0.86	0.87	0.49	0.57	0.54
WO	49.08	48.94	49.39	49.61	48.95	48.43	48.63	48.83
EN	14.92	12.25	6.67	6.83	6.43	26.09	22.06	23.52
FS	36.00	38.81	43.95	43.55	44.62	25.48	29.32	27.65

Composition chimique des grenats du skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma

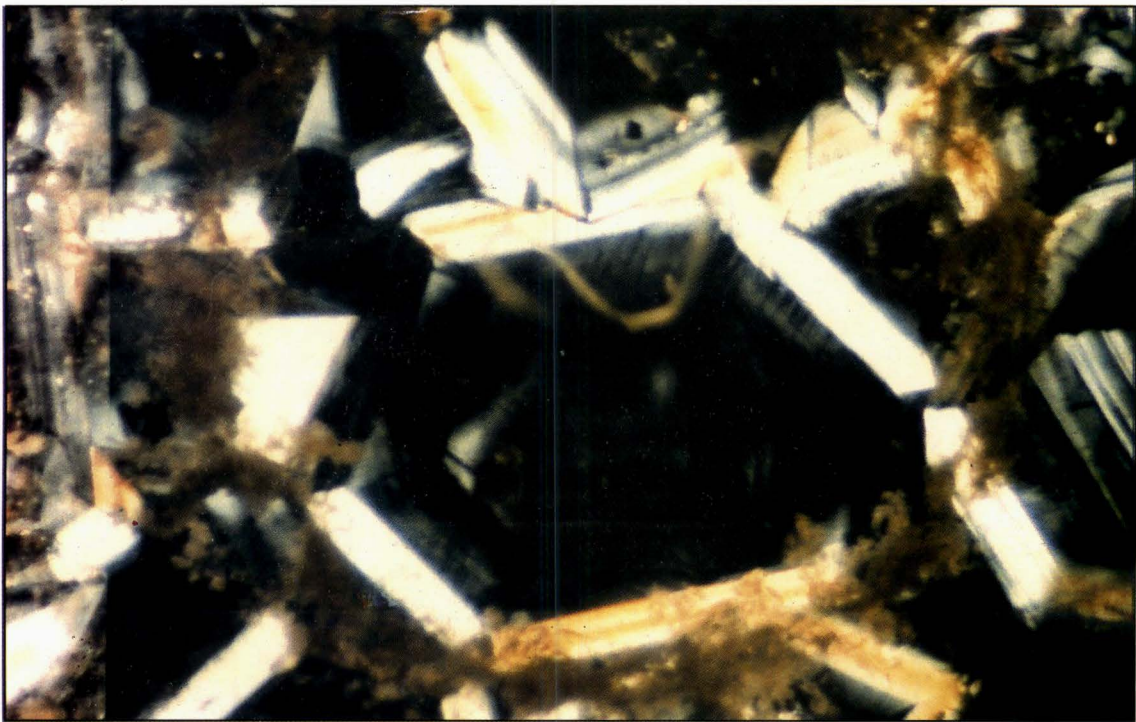
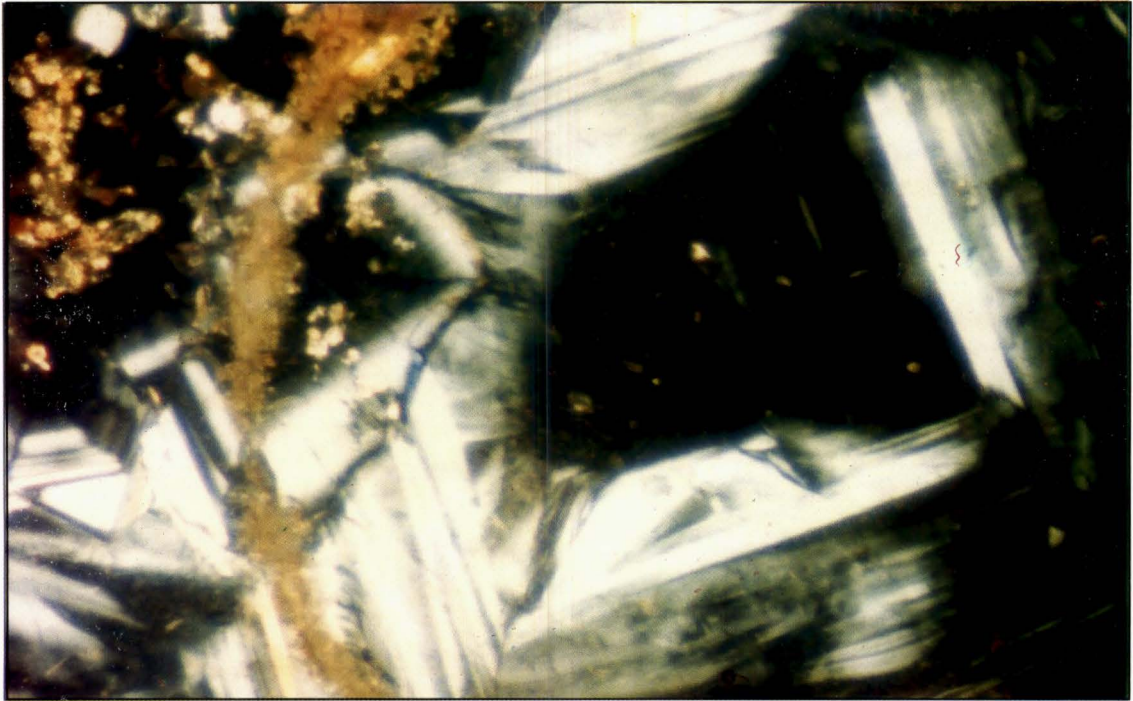
ECHAN Num	AS18 yg71	AS18 yg72	AS18 yg73	AS18 yg74	AS18 yg75	AS18 yg76	AS18 yg77	AS18 yg78	AS18 yg79
SiO2	35.62	35.63	35.36	36.06	35.61	35.05	34.93	34.07	33.98
TiO2	0.07	0.07	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
Al2O3	8.74	9.22	8.12	9.18	8.78	4.79	3.46	1.46	1.17
Fe2O3	17.47	17.33	18.12	17.01	20.28	22.25	23.97	26.63	26.08
MnO	2.22	2.31	2.4	2.53	1.79	1.79	2.17	1.15	1.19
MgO	0	0	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02
CaO	32.84	32.64	32.38	32.21	32.68	32.4	31.32	32.18	32.2
Na2O	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	96.76	97.2	96.42	97.05	97.18	96.29	95.88	95.53	94.65
TSi	2.97	2.954	2.968	2.993	2.986	2.994	3.022	2.985	3.004
AlVI	0.828	0.854	0.77	0.89	0.655	0.476	0.353	0.135	0.122
Fe3	1.04	1.026	1.086	1.008	1.214	1.357	1.481	1.666	1.646
Ti	0.004	0.004	0.001	0.002	0.001	0.00	0.00	0.00	0.001
Fe2	0.055	0.054	0.057	0.053	0.064	0.072	0.078	0.088	0.087
Mg	0.00	0.00	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.005	0.003
Mn	0.157	0.162	0.171	0.178	0.127	0.13	0.159	0.085	0.089
Ca	2.916	2.899	2.912	2.884	2.936	2.965	2.903	3.021	3.05
Na	0.00	0.00	0.002	0.003	0.00	0.00	0.002	0.00	0.00
Total cat	8	8	8	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Alm	1.752	1.735	1.821	1.714	2.044	2.258	2.481	2.744	2.687
And	55.538	54.437	58.456	53.047	64.901	74.043	80.769	92.48	93.075
Gross	37.667	38.621	34.203	39.358	28.912	19.571	11.557	1.945	1.396
Pyrope	0.00	0.00	0.04	0.04	0.08	0.04	0.082	0.163	0.082
Spess	5.013	5.207	5.429	5.738	4.062	4.089	5.057	2.668	2.76

ECHAN Num	AS18 yg80	AS18 yg81	AZ2 fb51	AZ2 fb52	AZ2 fb53	AZ2 fb54	AZ2 fb55	AZ2 fb56
SiO2	34.05	34	34.26	34.89	35.24	34.52	35.3	34.24
TiO2	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
Al2O3	1.58	1.21	0.63	3.46	0.87	0.84	0.44	0.27
Fe2O3	26.11	26.57	27.8	24.27	27.8	27.86	25.87	28.53
MnO	1.24	1.19	0.68	0.62	0.65	0.62	0.64	0.69
MgO	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.00
CaO	32.09	32.12	33.33	33.62	33.02	33.14	33.2	33.04
Na2O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	95.09	95.15	96.7	96.88	97.61	97.03	95.49	96.79
Si	2.994	2.992	2.973	2.977	3.028	2.984	3.089	2.977
AlVI	0.157	0.118	0.038	0.324	0.088	0.069	0.045	0.005
Fe3	1.639	1.67	1.722	1.478	1.705	1.719	1.616	1.771
Ti	0.00	0.001	0.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Fe2	0.086	0.088	0.091	0.078	0.09	0.091	0.085	0.093
Mg	0.003	0.004	0.00	0.00	0.001	0.005	0.004	0.00
Mn	0.092	0.089	0.05	0.045	0.047	0.045	0.047	0.051
Ca	3.023	3.029	3.099	3.073	3.039	3.069	3.113	3.078
Na	0.00	0.002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total cat	8	8	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12	12	12
Alm	2.666	2.74	0.00	2.438	2.828	0.00	0.00	0.48
And	91.252	93.337	96.56	81.947	95.023	95.5	97.41	95.9
Gross	3.089	0.985	1.86	14.213	0.621	2.87	0.96	2.00
Pyrope	0.082	0.123	0.00	0.00	0.04	0.16	0.13	0.16
Spess	2.862	2.763	1.57	1.402	1.488	1.46	1.49	1.45

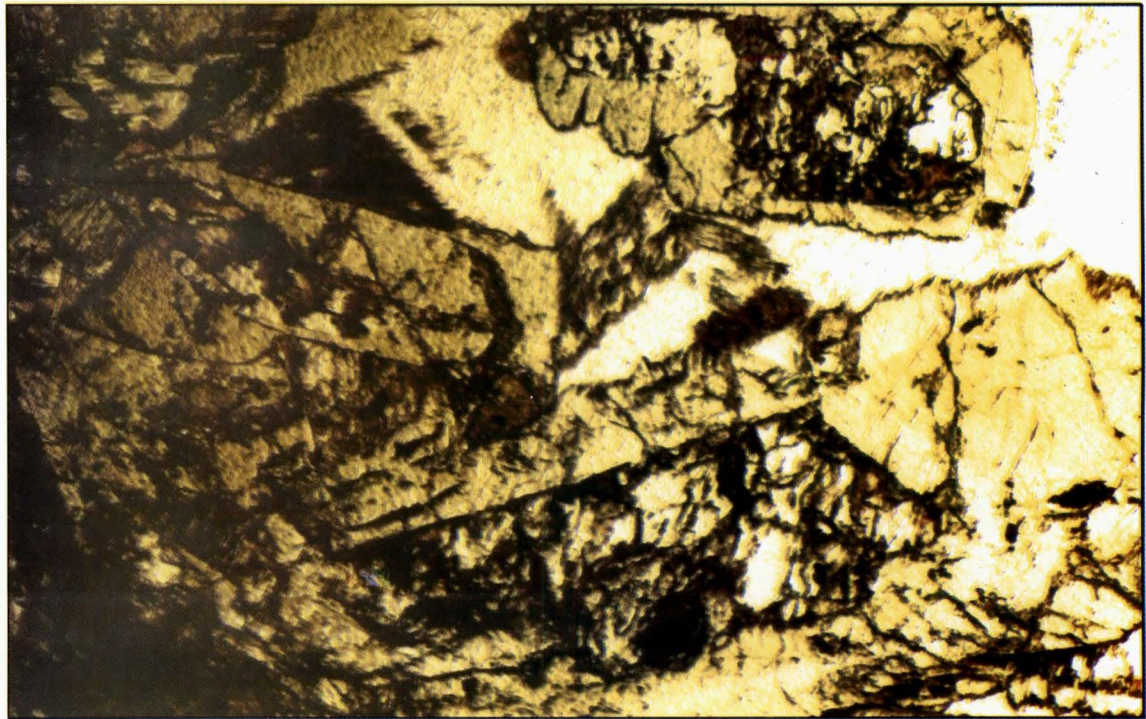
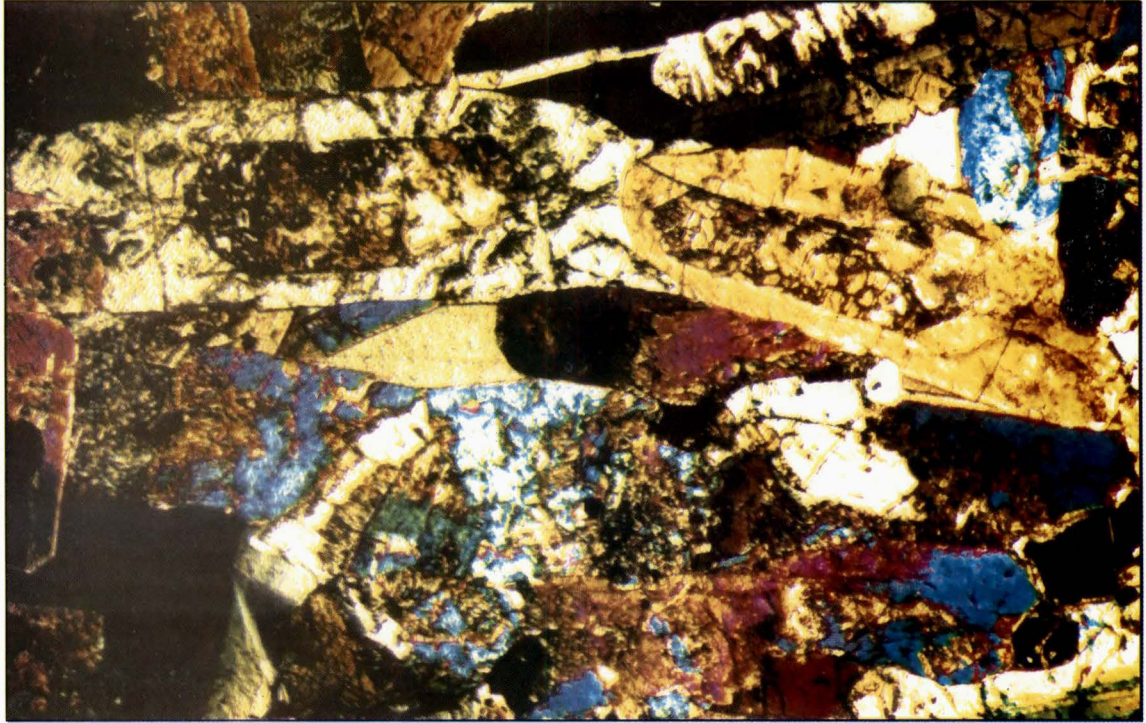
Composition chimique des grenats du skarn de la mine de fer d'Ain-Sedma (suite)

ECHAN Num	AZ2 fb57	AZ2 fb58	AZ2 fb59	AZ2 fb60	AZ2 fb62	AZ2 fb63
SiO2	34.77	38.32	42.53	33.83	34.25	34.38
TiO2	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	0.02
Al2O3	0.3	0.09	0.79	3.74	0.52	0.83
Fe2O3	28.62	28.47	24.75	23.96	27.8	27.4
MnO	0.73	0.69	0.63	0.69	0.62	0.64
MgO	0.01	0.04	0.24	0.03	0.15	0.13
CaO	33.02	33.23	20.46	33.62	33.23	33.14
Na2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Total	97.45	100.84	89.43	95.89	96.61	96.54
Si	3.002	3.191	4.008	2.913	2.973	2.983
AlVI	0.031	0.009	0.088	0.292	0.027	0.068
Fe3	1.764	1.693	1.665	1.473	1.723	1.697
Ti	0.00	0.00	0.002	0.001	0.002	0.001
Fe2	0.093	0.089	0.088	0.078	0.091	0.089
Mg	0.001	0.005	0.034	0.004	0.019	0.017
Mn	0.053	0.049	0.05	0.05	0.046	0.047
Ca	3.055	2.965	2.066	3.102	3.091	3.081
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
Total cat	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12
Alm	0.00	0.32	0.47	2.401	0.1	0.00
And	97.78	98.68	98.53	83.382	81.97	98.07
Gross	3.84	0.00	0.00	12.541	16.22	0.00
Pyrope	0.13	0.00	0.04	0.119	0.12	0.13
Spess	1.55	1.62	1.71	1.556	1.59	1.6

Planches



Photos illustrant des cristaux zonés de pyroxène du skarn de la mine d'Aïn-Sedma



Photos illustrant des cristaux zonés de grenats du skarn de la mine d'Aïn-Sedma