

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

Youcef BOUFTOUHA*, Daniel GARCIA, Bernard GUY** et Jean VERKAEREN*****

RESUME

Dans l'aurole de contact du granite miocène des Beni-Toufout (Kabylie de Collo (NE algérien), les skarns résultent de la transformation métasomatique de matériaux variés : marbre dolomitique, cornéenne calc-silicatée, cornéenne pélitique et quartzite.

Les données pétrographiques de ces skarns montrent que sur roches carbonatées, la zonation métasomatique primaire est représentée par une zone externe à pyroxène et une zone interne à grenat. Sur roches mixtes (calcaro-pélitiques) et silico-alumineuses, la zonation métasomatique comporte une zone externe à scapolite, suivie par une zone à idocrase et une zone interne à grenat. Sur quartzites, se développe une colonne à wollastonite.

Le bilan chimique du skarn développé sur marbre dolomitique met en évidence un net enrichissement en métaux rares, notamment Sn et W du skarn par rapport à son protolithe.

Les données minéralogiques des scapolites des skarns des Beni-Toufout, laissent apparaître deux compositions chimiques : une composition proche du pôle meionite, développée dans les parties proches du contact avec le granite et une composition proche du pôle marialite, développée à distance du granite.

La minéralogie primaire de ces skarns a été soumise à une intense altération hydrothermale tardive au cours de laquelle, les grenats et l'idocrase ont été remplacés par de l'épidote et/ou par de l'épidote-calcite-quartz, les pyroxènes par de la chlorite et la scapolite par de l'albite et par de l'épidote. Le remplacement des minéraux primaires par des minéraux secondaires s'est accompagné par l'apparition de dépôts de sulfures et de grains de scheelite.

Mots clés : Granite des Beni Toufout - Langhien - Skarns - Scapolite - Scheelite - Sn-W - Zonations métasomatiques.

* Laboratoire de Génie Géologique, Université de Jijel, BP. 98, Ouled-Aïssa, 18000 – Jijel, Algérie ; bouftouha@yahoo.fr.

** Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SPIN ; 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex – France.

*** Département de Géologie et Géographie, Place L. Pasteur 3, 1348, Louvain-la-Neuve, Belgique.

- *Manuscrit déposé le 13 Décembre 2005, accepté après révision le 10 Mai 2008.*

THE SCAPOLITE SKARN OF THE CONTACT AUREOLE OF BENI TOUFOUT MIOCENE GRANITE (KABYLIE OF COLLO-NORTH-EASTERN OF ALGERIA) : PETROGRAPHICAL, MINERALOGICAL, GEOCHEMICAL STUDY AND METALLOGENIC INTEREST.

ABSTRACT

In the Beni Toufout area (Kabylie de Collo, NE Algeria), skarns occur within the metamorphic aureole of a Miocene (Langhian) granite. These skarns were metasomatically overprinted on to various protoliths: dolomitic marble, calc-silicate and pelitic hornfels, and quartzites.

At the prograde stage, a metasomatic zoning was produced, according to the different protoliths. (i) On dolomitic marble, zoning comprises a diopside external zone and a garnet (grossular-andradite) internal zone. Isocon construction shows that the skarnification process resulted in a net increase in rare metal contents (in particular, Sn and W). (ii) On calc-silicate and pelitic hornfels, zoning comprises a scapolite external zone, a vesuvianite intermediate zone and garnet internal zone. Within the scapolite zone, scapolite is close to meionite end-member on the granite side and close to the marialite end-member outwards. (iii) On quartzites, a single wollastonite metasomatic column was developed.

At the retrograde stage, garnet and vesuvianite were replaced by epidote \pm calcite \pm quartz assemblages, clinopyroxene by chlorite and scapolite by albite or epidote, according to the prevalent end-member. Sulfides and a few scheelite were coevally deposited.

Key words - Beni Toufout granite - Langhian - Skarn - Scapolite - Scheelite - Sn-W - Metasomatic zoning.

I - INTRODUCTION

Les différents travaux portant sur les dépôts de skarns (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1993; Kwak, 1987; Bowman, 1998; Newberry, 1998), rapportent que la minéralogie des skarns reste la clef pour leur identification, leur définition et leur classification. Elle est également, un bon critère pour la caractérisation de leur typologie, de leur aspect métallogénique et de leur évolution.

Les minéraux utiles dans l'étude des skarns sont ceux qui comme le grenat, le pyroxène et l'amphibole, sont présents dans tous les types de skarns et montrent de larges variations de leur composition chimique. D'autres minéraux, relativement moins fréquents, comme la scapolite, l'idocrase, l'apatite et l'amphibole alumi-

neuse, pouvant contenir des teneurs non négligeables en chlore et autres éléments volatils peuvent donner d'importantes indications sur la composition chimique des fluides et les conditions de formation des skarns.

En particulier, la scapolite est un minéral capable d'incorporer dans sa structure de gros anions tels que Cl⁻, CO₃²⁻ et SO₄²⁻. Selon certains auteurs (Mora et Valley, 1989; Meinert, 1993, 1995, 1997, 1998; Meinert *et al.*, 1997 et 1999; Pan, 1998), la fixation de ces volatils par la scapolite, fait d'elle une puissante sonde pour contrôler la composition chimique des fluides hydrothermaux. Elle est particulièrement utile pour les analyses des isotopes stables et comme traceur géochimique de la source et de l'évolution des fluides minéralisateurs dans les dépôts

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

de skarns. Par ailleurs, la scapolite est potentiellement utile comme géothermomètre et géobaromètre (Orville, 1975; Goldsmith et Newton, 1977; Baker et Newton, 1994).

La présente note a pour objectif l'étude pétrographique, minéralogique et géochimique des skarns de l'aurole de contact du granite miocène des Beni-Toufout, afin d'en caractériser la typologie et le potentiel métallogénique. Ces skarns étant riches en scapolites, ce minéral fera l'objet d'une étude spécifique, appuyée sur les résultats des auteurs qui viennent d'être cités.

II - PRESENTATION GEOLOGIQUE DU MASSIF GRANITIQUE DES BENI-TOUFOUT

Le massif granitique des Beni-Toufout, situé dans le NE algérien, occupe la partie centrale de la Kabylie de Collo. Il est représenté par une intrusion granitique de forme quadrangulaire, allongée sensiblement nord-sud. Cette intrusion granitique affleure dans une fenêtre tectonique ouverte sous les formations cristallophylliennes du socle kabyle et les terrains sédimentaires mésozoïques, engagées structurellement sous ce dernier (fig.1). L'intrusion granitique des Beni-Toufout est traversée par des filons de microgra-

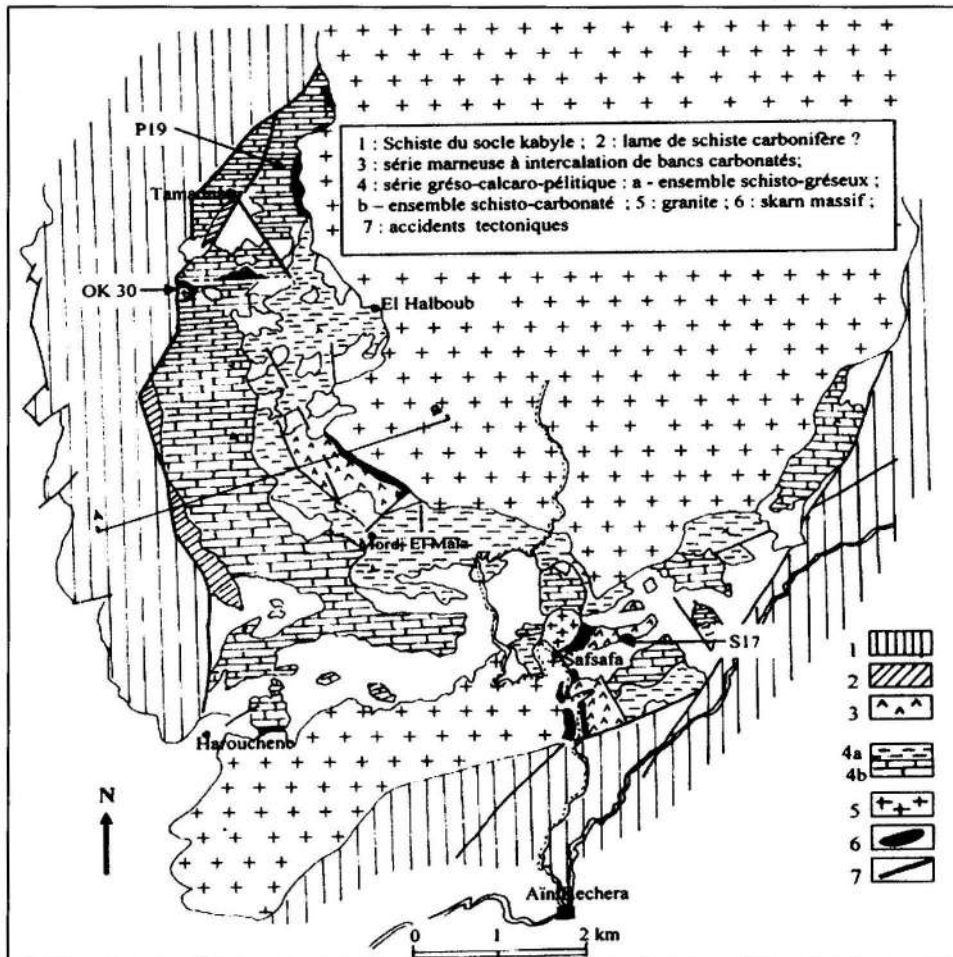


Fig. 1 - Carte géologique simplifiée de la fenêtre des Beni-Toufout (d'après J.P. Bouillin, 1977; modifiée par Y. Bouftouha, 2000).

Simplified geological map of the Beni-Toufout window (according to J.P. Bouillin, 1977, modified by Y. Bouftouha, 2000).

nite et de rares filons et filonnets d'aprites et d'aplo-pegmatites à tourmaline.

De la partie sud de cette intrusion granitique, émergent une apophyse de granodiorite allongé sensiblement NE-SW, entre l'ancien village minier de Boudoukha et la Mechtat Safsafa (fig. 1). Cette apophyse est en grande partie encaissée dans les formations du socle kabyle; l'encaissant sédimentaire n'apparaît que dans la partie nord de cette dernière.

La granodiorite de Boudoukha se distingue du granite des Beni-Toufout d'une part, par un développement plus important du faciès aplitique et pegmatitique et d'autre part, par la présence de filons de quartz à minéralisation sulfurée polymétallique.

Les faciès aplitiques et pegmatitiques associés à la granodiorite de Boudoukha montrent une richesse remarquable en tourmaline.

Par ailleurs, un petit pointement de microgranodiorite affleure dans le lit de l'oued Di-El-Kaouene dans la partie occidentale du granite des Beni-Toufout (Bouftouha, 1989).

Le centre du massif des Beni-Toufout est occupé par le corps granitique, et sa périphérie par des terrains sédimentaires formant une demi auréole à l'ouest et au sud du granite, qui les métamorphose, et par du socle kabyle dans la partie nord. Ces terrains sédimentaires plongent en moyenne vers le socle kabyle, avec lequel ils sont de tous côtés en rapport par des contacts mécaniques inclinés, eux aussi, vers l'extérieur du massif (fig. 2).

Ces terrains sédimentaires constituant avec le granite le cœur du massif des Beni-Toufout, sont remontés structuralement par rapport au socle kabyle et apparaissent en fenêtre sous ce dernier (Bouillin, 1977). La mise en place des granites de la Kabylie de Collo est postérieure à

la tectonique tangentielle qui a engendré cet empilement d'unités géologiques (Bouillin, 1979).

Les datations radiochronologiques par la méthode K/Ar, ont donné un âge langhien (14 à 16 Ma) pour les roches granitiques de la Kabylie de Collo (Penven et Zimmermann, 1986).

L'encaissant sédimentaire du granite des Beni-Toufout est représenté par une série à dominante marneuse admettant en intercalation des bancs carbonatés (série d'affinité tellienne) et une série grésocalcaro-pélimitique à caractère flysch. Cette dernière, occupe la totalité de la partie occidentale de la fenêtre des Beni-Toufout et arrive dans la partie sud jusqu'au contact avec la granodiorite de Boudoukha. Elle fait également une timide apparition dans la partie est et nord du granite.

La série grésocalcaro-pélimitique comporte trois ensembles lithologiques : un ensemble schisto-gréseux à la base, un ensemble médian formé par une alternance de marnes et de schiste gréseux et un ensemble sommital formé par une alternance de calcaire gréseux à silex et de schiste. Ces niveaux de calcaires à silex ont livré au niveau de la localité Rarel Hanèche, $x = 829.7$; $y = 392.8$ (feuille d'Aïn Kechera) des Calpionelles et des *Globochaete* (Bouillin, 1977). Cet auteur attribue un âge Thitonique à Néocomien pour cette série. Par ailleurs, selon cet auteur, cette série grésocalcaro-pélimitique montre une grande analogie avec la série des flyschs des Achaïches affleurant dans la partie sud d'El Milia.

Les formations sédimentaires encaissantes du granite des Beni-Toufout sont marquées par des plissements et des schistosités engendrés par la phase tectonique finie lutétienne et la phase miocène (Bouillin, 1977). Selon cet auteur, au niveau de la fenêtre des Beni-Toufout, les formations sédimentaires, sur lesquelles le socle

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

kabyle est charrié sur une flèche nord-sud d'environ 30 km portent l'emprunte de deux directions de plissement et de deux plans de schistosité.

La coupe géologique établie dans la partie sud-ouest de la fenêtre des Beni-Toufout schématise la disposition structurale des différentes unités géologiques formant l'encaissant du granite miocène des Beni-Toufout (fig. 2).

III - LE GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT

Le granite miocène des Beni-Toufout se caractérise par une association minérale primaire comportant : quartz, orthose perthitique, plagioclases zonés normalement (An_{40} à An_{10}), biotite rouge (£ 16% modal), cordiérite (£ 3%), localement muscovite ou grenat, apatite, zircon,

rutile, ilménite et souvent tourmaline (Ouabadi, 1994). De par ce contenu pétrographique, le granite des Beni-Toufout s'apparente à un monzogranite (contenu en feldspath potassique et en plagioclase sensiblement équivalent), et/ou, à une granodiorite (prédominance de plagioclase).

Sur le plan géochimique (Ouabadi, 1994), ce granite montre des teneurs en SiO_2 comprises entre 64% et 69%, des teneurs moyennes en Al_2O_3 de l'ordre de 15%, un rapport K_2O/Na_2O toujours supérieur à 1, des teneurs moyennes en CaO de l'ordre de 2.5%, un rapport $Al_2O_3/CaO+K_2O+Na_2O$ toujours supérieur à 1.1, de faibles teneurs en Fe_2O_3 , MgO et TiO_2 et des teneurs en corindon normatif comprises entre 1.5 et 3.29%. Ces caractéristiques géochimiques placent ce granite dans la lignée des granites peralumineux à affinité calco-alcaline.

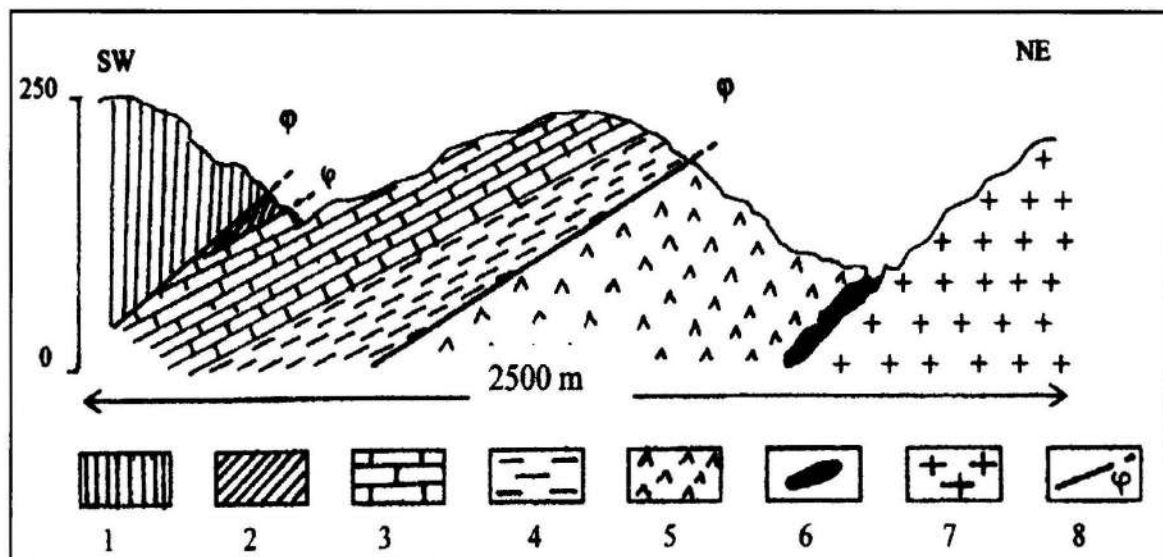


Fig. 2 - Coupe géologique schématique dans la partie sud-ouest de la fenêtre des Beni-Toufout

Schematic geological cross-section of the southwestern part of the Beni-Toufout window

1 : socle kabyle (*kabylie basement*); 2 : schiste carbonifère (*Carboniferous schist*); 3 : ensemble schisto-gréso-carbonaté (*complex of sandstones, pelitic rocks and carbonates*); 4 : ensemble schisto-gréseux et marno-gréseux de la base de la série type flysch (*lower part of the flysch series: alternating pelite-sandstone and marl-sandstone beds*); 5 : série marneuse à intercalation de bancs carbonatés (*marl serie with alternating limestone beds*); 6 : skarn (*skarn*); 7 : granite miocène (*Miocene granite*); 8 : contact anormal (*thrust plane*).

Sur le plan de l'évolution magmatique et comparativement aux granites à tourmaline et topaze du Filfila (Bouabssa *et al.*, 2005; Bourefis 2007), les granites des Beni-Toufout et du Cap Bougaroun (Ouabadi, 1994; Bouftouha, 2000), s'en distinguent par un faible fractionnement magmatique de leur contenu géochimique. Ce faible fractionnement magmatique est bien illustré par les couples Mg/Ti et Ti/Zr (fig. 3).

En effet, les couples Mg/Ti et Ti/Zr, ayant un comportement similaire lors de l'évolution magmatique, montrent un bon fractionnement dans le granite du Filfila, traduisant ainsi, une nette évolution par cristallisation fractionnée (corrélation linéaire passant par l'origine); alors que dans les granites des Beni-Toufout et du Cap Bougaroun (Kabylie de Collo), ces éléments sont très peu fractionnés (nuage de points). Les

seuls termes différenciés des granites de la Kabylie de Collo, qui montrent des caractères proches des termes différencié du Filfila sont représentés par des filons d'aplite à tourmaline.

Sur le plan métallogénique et comparative-ment aux faciès évolués du granite du Filfila, caractérisés par un enrichissement en F, P, Li, B, Rb, Sn, W, Nb, Ta, Cs et terres rares (Bouabssa *et al.*, 2005 et Bourefis, 2007), les granites à biotite et cordiérite de la Kabylie de Collo ne montrent aucun enrichissement de ces métaux.

Le faible fractionnement magmatique du contenu géochimique des granites de la Kabylie de Collo semble ne pas avoir joué en faveur d'une libération et d'une lixiviation du stock métal contenu dans le magma parental.

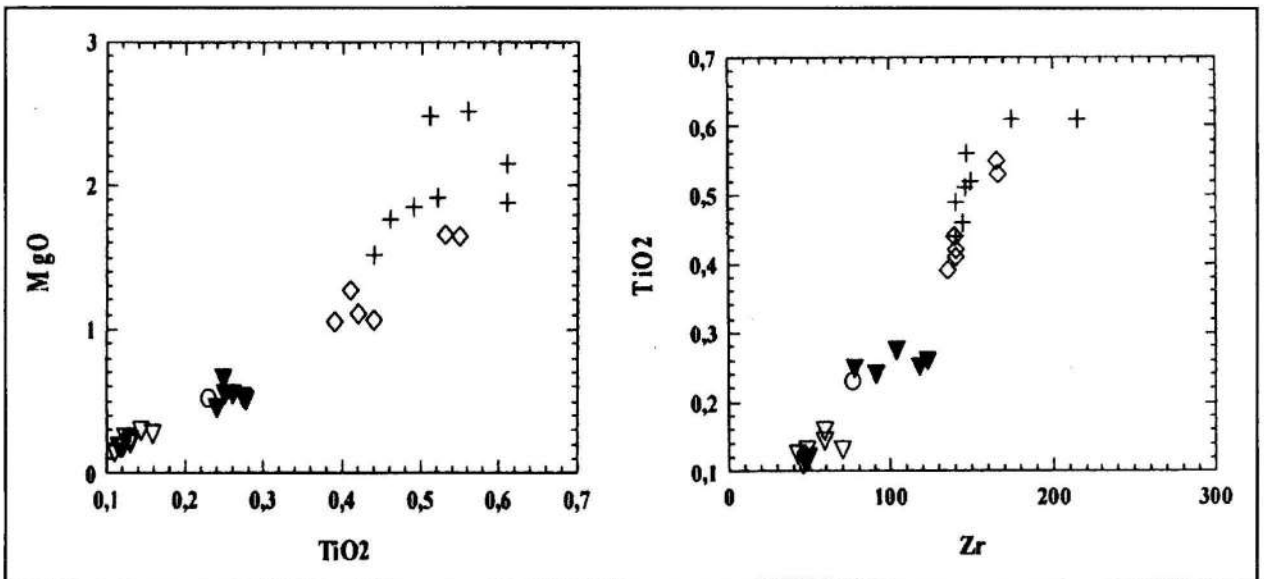


Fig. 3 - Diagrammes caractérisant le fractionnement magmatique des couples MgO/TiO₂ et Zr/TiO₂ dans les granites de la Kabylie de Collo et du Filfila.

Diagrams illustrating the magmatic fractionation of the couples MgO/TiO₂ and TiO₂ / Zr in the Miocene granites of the Collo Kabylia and Filfila.

▽ : granite à tourmaline du Filfila (*Filfila tourmaline granite*); ▼ : granite à cordiérite du Filfila (*Filfila cordierite granite*); ○ : aplite des Beni-Toufout (*Beni-Toufout aplite*); + : granite à cordiérite des Beni-Toufout (*Beni-Toufout cordierite granite*); ◇ : granite à cordiérite du Cap Bougaroun (*Cap Bougaroun cordierite granite*).

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

IV – ASSEMBLAGES MINERALOGIQUES DU METAMORPHISME DE CONTACT

Les différents assemblages minéralogiques engendrés par l'effet thermique du granite sur les différents termes lithologiques des séries sédimentaires encaissantes peuvent être résumés comme suit :

IV- 1 - Cornéennes pélitiques :

a) Assemblages minéralogiques

Suivant la position dans l'aurole de contact et allant des zones externes vers les zones internes, les différents assemblages minéralogiques du métamorphisme de contact qui ont pu être observés sont :

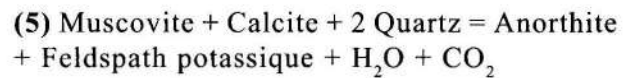
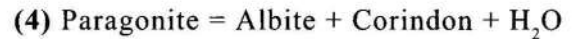
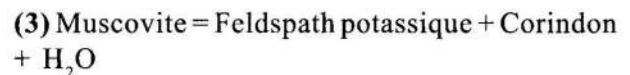
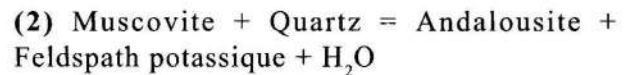
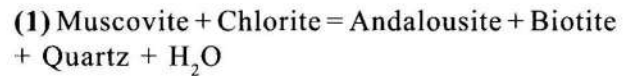
- Muscovite + Chlorite ± Quartz
- Biotite + Muscovite + Feldspath potassique + Plagioclase ± Andalousite ± Quartz;
- Biotite + Feldspath potassique + Plagioclase + Corindon;
- Biotite + Feldspath potassique + Plagioclase + Andalousite + Corindon;
- Biotite + Feldspath potassique + Plagioclase + Andalousite + Quartz;
- Biotite + Feldspath potassique + Plagioclase ± Quartz

Les minéraux accessoires des cornéennes pélitiques sont représentés par : ilménite, rutil, zircon, apatite, tourmaline et sulfures.

b) Réactions métamorphiques

En s'appuyant sur les données de la littérature se rapportant aux transformations métamorphi-

ques des roches pélitiques dans les auroles de contact (Greenwood, 1967; Winkler, 1979; Kerrick, 1974; Holdaway, 1971; Hewitt, 1973; Pattison, 1992, 2001; Pattison *et al.*, 1999, 2002, 2005), les assemblages minéralogiques observés dans les différents niveaux des cornéennes pélitiques et les relations texturales entre les minéraux permettent l'écriture des principales réactions métamorphiques qui ont pu se dérouler dans l'aurole métamorphique du granite miocène des Beni-Toufout:



IV - 2 - Cornéennes calc-silicatées

a) Assemblages minéralogiques

Dans les parties éloignées du granite, la roche gréso-calcaréo-pélitique est caractérisée par une matrice inidentifiable optiquement, et dans laquelle sont noyées des dragées de quartz.

Près du granite, les assemblages minéralogiques des niveaux de cornéennes calc-silicatées sont essentiellement formés de pyroxène, de feldspaths et de wollastonite. Les assemblages minéralogiques caractéristiques de ces niveaux de cornéennes calc-silicatées sont :

- Clinopyroxène - Feldspath potassique ± Quartz
- Clinopyroxène - Plagioclase - Feldspath potassique;

- Clinopyroxène - Plagioclase - Feldspath potassique - Wollastonite;

- Clinopyroxène - Feldspath potassique - Plagioclase - Wollastonite - Calcite.

- Clinopyroxène - Feldspath potassique - Plagioclase - Calcite

- Wollastonite - Quartz

- Wollastonite - Calcite.

Comme minéraux accessoires on a essentiellement de l'apatite, du sphène et des sulfures (pyrrhotite).

Dans ces niveaux, la wollastonite en grosses baguettes prismatiques forme de véritables petits lits de wollastonite d'ordre millimétrique à centimétrique et même décimétrique. Par ailleurs, autour des anciens nodules de silex, transformés en quartz, la wollastonite montre une croissance en peigne.

b) Réactions métamorphiques

Les principales réactions métamorphiques à l'origine des assemblages minéralogiques des cornéennes calco-silicatées et à silicates calciques peuvent s'écrire:

(6) Muscovite + Calcite + 2 Quartz = Plagioclase + Feldspath potassique + H₂O + CO₂

(7) Biotite + 3 Calcite + 6 Quartz = 3 Clinopyroxène + Feldspath potassique + H₂O + 3 CO₂

(8) Calcite + Quartz = Wollastonite + CO₂

IV-3- Les calcaires cristallins

Sous l'effet thermique du granite, les bancs de calcaire dolomitique intercalés dans la série marneuse ont donné une association minérale à

calcite dolomite auxquelles, s'ajoutent accessoirement de la forstérite, de la phlogopite, des spinelles de type MgAl₂O₄, des minéraux de la famille de l'ilménite MgTiO₃ (géikélite) et de la molybdénite (identification au microscope électronique à balayage).

V- CONDITIONS DU METAMORPHISME DE CONTACT

Les assemblages minéralogiques les plus caractéristiques des cornéennes pélitiques de l'auréole de contact du granite miocène des Beni-Toufout peuvent être décrits dans le système KMAH (K₂O - MgO(FeO) - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O).

Les deux réactions, caractérisant la transformation de la muscovite + quartz en andalousite + feldspath potassique et la muscovite en feldspath potassique + corindon près du granite sont deux réactions caractéristiques d'un métamorphisme de haute température et basse pression (Holdaway, 1971; Chatterjee et Johannes, 1974).

En se basant sur les travaux récents de Pattison et *al.* (2002), portant sur la stabilité des assemblages minéralogiques des roches pélitiques dans les auréoles de contact et en tenant compte de la révision de la stabilité du point triple des silicates d'alumine, estimée par Holdaway (1971) et Holdaway et Mukhopadhyay (1993) à 3.8 kbar et 500°C et révisée par Pattison (1992) à 4.5 kbar et 550°C, les assemblages minéralogiques à andalousite + feldspath potassique et corindon + feldspath potassique indiquent les niveaux de pression et de température les plus élevés dans l'auréole de contact du granite miocène des Beni-Toufout. D'après Pattison et Vogel (2005), la transformation de la muscovite + quartz en andalousite + feldspath potassique se passe à une température de 620°C et une pression de 3 kbar. Ces valeurs peuvent être retenues comme limite supérieure du métamorphisme près du granite miocène des Beni-Toufout.

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

VI - LES SKARNS ASSOCIES AU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT

Les skarns associés au granite miocène des Beni-Toufout résultent de la transformation métasomatique de matériaux variés : marbre dolomitique, cornéennes calc-silicatées, cornéennes pélitiques et quartzites.

La percolation est marquée par la structuration des colonnes métasomatiques de ces skarns en zones emboîtées, minéralogiquement distinctes, avec des limites (ou fronts métasomatiques) souvent très tranchées et une tendance à la réduction du nombre de phases par zone métasomatique.

Les skarns développés sur marbre dolomitique se particularisent par l'extrême extension des zones métasomatiques, dépassant largement la dizaine de mètres et la réduction du nombre de phases minérales par zone métasomatique (zones pratiquement monominérale). Pour les skarns développés sur roches mixtes et silico-alumineuses (pélitiques et granite), le caractère distinctif reste leur morphologie en veines sécantes sur l'ancien litage et/ou la schistosité.

VI - 1 - Skarn sur marbre dolomitique

a) Pétrographie

Le skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout affleure dans la partie sud et sud-est de la masse granitique. L'affleurement le plus important se trouve au nord de la Mechtat Safsafa, au contact de l'apophyse du granodiorite de Boudoukha. La colonne métasomatique de ce skarn comporte une zone interne à grenat, développée juste au contact de la granodiorite de Boudoukha, suivie par une zone externe à pyroxène arrivant jusqu'au contact du marbre. La zone à grenat, représentée par une importante masse de grenatite affleure largement; par contre, la zone à pyroxène reste moins développée.

b) Minéralogie

- Les pyroxènes

Les pyroxènes du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout appartiennent à la série diopside-hédenbergite, ils sont très proches du pôle diopside.

Cependant, la variation de la teneur en fer et manganèse dans ces pyroxènes permet de distinguer une certaine évolution de leur composition de l'amont vers l'aval de la colonne métasomatique. En effet, du côté de la grenatite, ces pyroxènes laissent apparaître un léger enrichissement en fer (11.5 à 15.5 Fe at. %) et en manganèse (0.5 à 0.8 Mn at. %), alors que du côté marbre, leur composition est celle du diopside presque pur (5 à 9 Fe at. %), avec des teneurs en Mn très faibles (0 à 0.5 Mn at. %) (tabl. I).

Tableau I - Analyses chimiques et formule structurale des pyroxènes du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout (Analyses à la microsonde électronique au Laboratoire de Minéralogie de l'Université Catholique de Louvain-La-Neuve - Belgique et à l'Université de Jussieu -Paris VI- France)

Chemical analysis and structural formula of the pyroxene skarn on dolomitic marble of Beni-Toufout

Ech	S5	EM2	EM2	EM2	EM2
N°	L15	Fb34	Fb35	Fb36	Fb37
SiO ₂	54.61	53.79	54.03	53.33	53.45
TiO ₂	0.02	0.05	0.03	0.31	0.22
Al ₂ O ₃	0.73	0.38	0.45	2.21	1.34
FeO	2.83	5.19	4.23	2.22	3.04
MnO	0.02	0.27	0.28	0.16	0.21
MgO	16.11	16.01	16.01	17.39	17.18
CaO	25.35	25.47	25.54	25.68	25.69
Na ₂ O	0.32	0.21	0.1	0.14	0.08
Total	99.99	101.39	100.67	101.44	101.21
Formule structurale calculée à base de 6 oxygènes					
Si	1.99	1.95	1.97	1.91	1.92
Al	0.01	0.02	0.02	0.09	0.06
Fe ²⁺	0.09	0.13	0.13	0.07	0.07
Mn	0.0	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.88	0.86	0.87	0.93	0.92
Ca	0.99	0.99	1.00	0.98	0.99
Na	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
FM	0.09	0.14	0.14	0.07	0.08
WO	50.71	48.97	49.75	49.64	49.28
EN	44.84	42.83	43.39	46.77	45.85
FS	4.45	8.20	6.86	3.59	4.87

- *Les grenats*

L'analyse minéralogique des grenats formant la masse de grenatite montre que ces derniers appartiennent à la série grossulaire-andradite et ont des teneurs en andradite variant de 70% à 100%. Leur teneur en composante pyralspite est très faible, de l'ordre de 1 % à 2 % (tabl. II).

L'observation microscopique des échantillons de grenatite permet de distinguer deux générations de grenats. Une première génération formant le corps de la roche, exprimée en plages de couleur jaune-verdâtre et contenant un résidu de granules d'opacités. Ces plages parfaitement isotropes montrent du côté des vides une bordure zonée et biréfringente. Une deuxième génération

développée dans les vides de la roche, représentée par des cristaux automorphes, de taille relativement importante. Ces cristaux offrent des sections limpides, zonées et présentant des anomalies optiques, marquées par une biréfringence en secteur (macule de type pyrénéite) et une biréfringence en lamelles parallèles à la bordure des cristaux (fig. 4).

Les profils géochimiques réalisés sur des sections zonées de ces grenats, montrent une parfaite correspondance entre la variation de la composition chimique et les anomalies optiques.

Par ailleurs, ces profils laissent apparaître que la variation de composition chimique dans ces grenats tardifs est principalement liée à un

Tableau II - Composition chimique et formule structurale des grenats du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout (analyses à la microsonde électronique - Université Jussieu-Paris VI, France)

Chemical composition and structural formula of the garnet skarn on the dolomitic marble of Beni-Toufout

Ech	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9
N°	Yg36	Yg37	Yg44	Yg56	Yg58	Yg60	Yg62	Yg63	Yg64	Yg65
SiO ₂	34.31	33.77	35.2	36.32	36.81	35.91	37.08	36.46	35.69	34.81
TiO ₂	0.02	0.00	0.1	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
Al ₂ O ₃	0.33	0.26	1.31	6.04	7.44	3.01	9.61	7.51	2.66	0.13
Fe ₂ O ₃	26.80	26.40	25.55	20.16	18.56	23.42	16.26	18.82	23.79	26.90
FeO	1.27	1.25	1.21	0.95	0.88	1.11	0.77	0.89	1.13	1.28
MnO	0.26	0.32	0.18	0.17	0.24	0.21	0.34	0.27	0.18	0.23
MgO	0.14	0.13	0.09	0.01	0.02	0.06	0.01	0.00	0.07	0.08
CaO	32.35	32.35	32.49	33.56	33.97	33.30	33.59	33.10	33.10	32.51
Total	95.48	94.48	96.14	97.21	97.94	97.02	97.66	97.05	96.67	95.95
Si	3.016	2.999	3.056	3.042	3.039	3.058	3.041	3.042	3.056	3.046
Al ^{vi}	0.034	0.026	0.134	0.596	0.723	0.302	0.928	0.738	0.268	0.013
Ti	0.001	0.000	0.007	0.00	0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
Fe ³⁺	1.771	1.762	1.668	1.27	1.152	1.499	1.002	1.181	1.532	1.770
Fe ²⁺	0.093	0.093	0.088	0.067	0.061	0.079	0.053	0.062	0.081	0.093
Mn	0.019	0.024	0.013	0.012	0.017	0.015	0.024	0.019	0.013	0.017
Mg	0.018	0.017	0.012	0.001	0.002	0.008	0.001	0.000	0.009	0.001
Ca	3.047	3.078	3.022	3.012	3.005	3.039	2.951	2.959	3.037	3.048
Total cations	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Oxygènes	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Alm	0.91	0.18	2.80	2.16	1.97	2.52	1.74	2.05	2.57	2.30
And	98.34	98.66	92.23	68.06	61.39	83.24	51.92	61.54	84.91	54.28
Gross	1.76	1.35	4.17	29.35	36.01	13.52	45.51	35.79	11.82	42.59
Pyrope	0.61	0.57	0.37	0.04	0.08	0.24	0.04	0.00	0.29	0.05
Spess	0.64	0.78	0.42	0.39	0.54	0.48	0.78	0.63	0.42	0.78

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

remplacement dans le site octaédrique du Fe^{3+} par Al (Bouftouha, 2002). En effet, le diagramme de la figure 5 illustre parfaitement le remplacement dans le site octaédrique du Fe^{3+} par Al (corrélation négative entre le Fe_{tot} (sous forme de Fe^{3+}) et Al.

Fig. 4 - Observation microscopique (lumière polarisée) d'une section d'un grenat zoné du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout.

Microscopic observation (polarized light) to section of a zoned garnet skarn on dolomitic marble from Beni-Toufout.

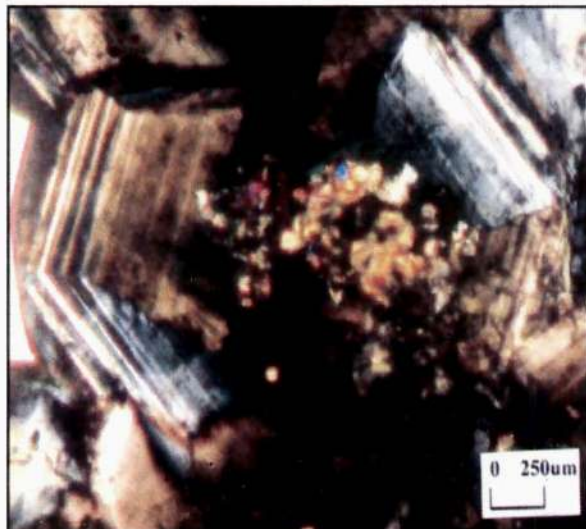


Fig. 5 - Corrélation négative entre le Fe_{tot}/Al dans un grenat zoné du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout

Negative correlation between Fe_{tot}/Al in a zoned garnet skarn on dolomitic marble from Beni-Toufout

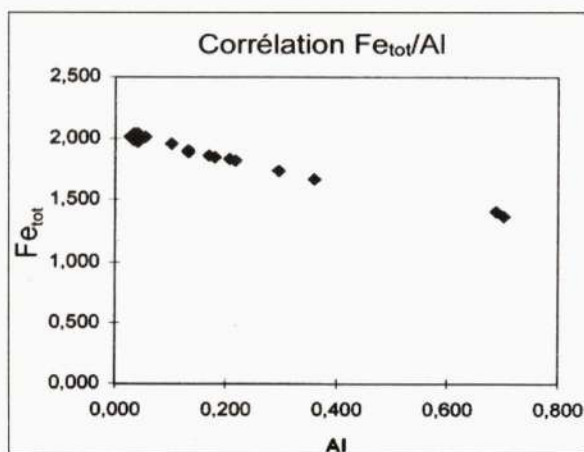
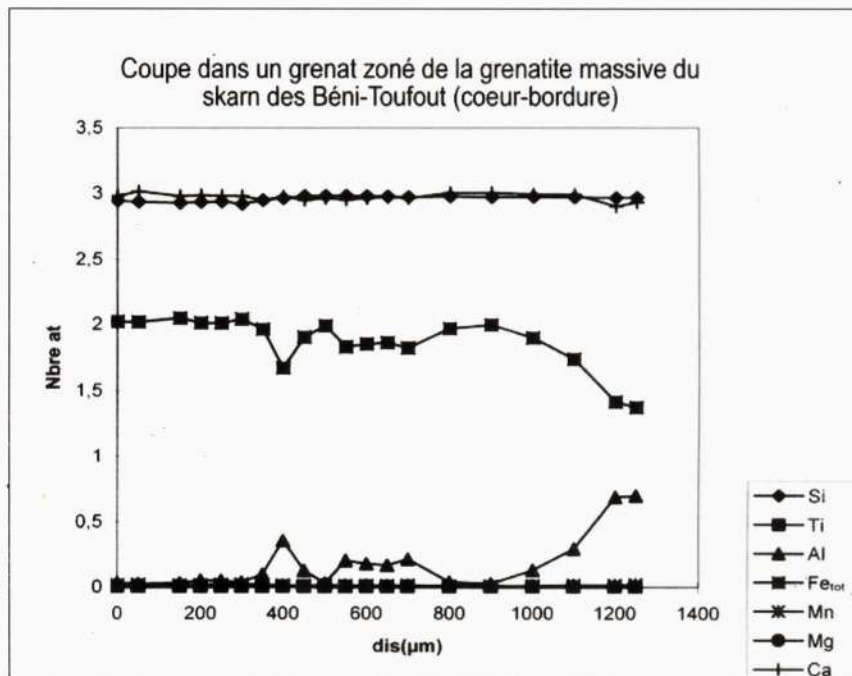


Fig. 6 - Profils de variation chimique dans un grenat zoné du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout

Profiles of chemical variation in a zoned garnet skarn on the dolomitic marble from Beni-Toufout



VI - 2 - Skarns sur cornéennes calc-silicatées et pélitiques

a) Pétrographie

Les skarns sur cornéennes calc-silicatées et pélitiques se particularisent par leur morphologie dominée par des veines. Ces skarns sont représentés par une colonne métasomatique comportant une zone externe à scapolite, suivie par une zone à idocrase et une zone interne à grenat.

Les assemblages minéralogiques métamorphiques aux dépens desquels se développe la scapolite sont représentés par des feldspaths et du clinopyroxène \pm calcite \pm wollastonite. Dans les alternances schisto-carbonatées, les lits de cornéennes calc-silicatées sont préférentiellement remplacés par la scapolite et les lits à biotite sont remplacés par du clinopyroxène, qui reste exprimé sous forme de rubanements dans les plages de scapolite soulignant ainsi l'ancien litage de la roche.

Dans cette colonne, la zone à idocrase est souvent absente et ne subsiste que sous forme de reliques dans les plages de grenat. Ces derniers, sont comme ceux du skarn sur marbre dolomitique, représentés par deux générations : une génération primaire, caractérisée par une composition proche du pôle pur généralement, en plages xénomorphes, parfaitement isotrope englobant poeciliquement des reliques des autres phases minérales et une génération tardive développée aux dépens de la première génération et dans les vides de la roche.

Cette deuxième génération se caractérise par de grands cristaux automorphes à subautomorphes, zonés et montrant une biréfringence en lamelles parallèles à la bordure des grains (fig.7)

b) Minéralogie

- Scapolites

Les analyses chimiques des scapolites des skarns des Beni-Toufout, laissent apparaître

que la composition de ces dernières varie entre deux termes : un terme proche du pôle méionite et l'autre proche du pôle marialite (tabl. III). La formule structurale des scapolites analysées a été calculée sur la base de 12 atomes de (Al+Si).

A ce propos, il est à signaler que les analyses chimiques des scapolites des skarns des Beni-Toufout (réalisées à la microsonde électronique au Laboratoire de Minéralogie de l'Université Catholique de Louvain-La-Neuve - Belgique et à l'Université de Jussieu - Paris VI- France) bouclent mal en raison du non dosage du SO_4 , du CO_2 et du Sr (voir tableau en annexe).

D'après Shaw (1960a), la composition chimique des scapolites est représentée par une solution solide entre deux termes extrêmes : la marialite $Na_4(AlSi_3O_8)_3 Cl$ et la méionite $Ca_4(Al_2Si_2O_8)_3(CO_3)$, dont les compositions sont équivalentes respectivement à 3albite + NaCl [$(3NaAlSi_3O_8).NaCl$] et à 3anorthite + $CaCO_3$ [$(3CaAl_2Si_2O_8.CaCO_3)$].

La formule de base des scapolites (Shaw, 1960a; Aitken, 1979), s'écrit donc : $X_4Y_{12}O_{24}Z$, avec : X = Ca, Na, K; Y = Al, Si; Z = CO_3 , Cl, SO_4

La composition chimique des scapolites est exprimée soit par le pourcentage en méionite ($\% Me = 100 \times (Ca + Sr) / (Na + K + Ca + Sr)$, Shaw (1960a), soit par le rapport Al / Si. Ce dernier est représenté par EqAn (contenu équivalent en anorthite).

$EqAn = 100 \times (Al - 3) / 3$ et Al est le nombre d'atomes d'Al par unité formulaire (Ellis, 1979).

La composition chimique des scapolites des skarns des Beni-Toufout semble dépendre essentiellement de la répartition spatiale des skarns par rapport au granite. En effet, les scapolites des skarns sur cornéennes calc-silicatées, développés au contact du granite (Ech. P19) présentent une composition chimique proche du pôle méionite (67 % à 70 % méionite, avec des

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

Tableau III - Composition chimique et formule structurale des scapolites des skarns des Beni-Toufout
Chemical composition and structural formula of scapolites from Beni-Toufout skarn

Echantillon	S17	S17	S17	P19	P19	Ok14	Ok30	Ok30	Ok30
Num	Yb68	Yb71	Yb72	yb104	Yb109	L36	L65	L66	L70
SiO ₂	52.815	54.693	54.635	45.563	46.566	55.67	51.82	53.06	52.68
TiO ₂	<seuil	0.07	0.045	0.027	0.017	<seuil	<seuil	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	23.924	23.892	23.62	27.557	27.497	23.2	24.7	24.15	24.14
FeO	0.033	<seuil	0.05	0.23	0.188	0.09	0.04	0.02	0.09
MnO	<seuil	0.032	<seuil	0.006	0.027	<seuil	0.01	<seuil	0.04
MgO	<seuil	0.013	0.025	0.008	0.017	<seuil	<seuil	<seuil	0.02
CaO	11.052	9.482	8.373	16.882	15.129	7.52	10.94	9.7	9.85
Na ₂ O	6.97	7.24	8.135	2.945	3.08	9.46	7.21	7.8	7.84
K ₂ O	0.93	1.119	1.113	1.541	1.512	0.92	1.02	1.17	1.08
Cl	2.13	2.621	2.681	1.161	1.269	n.d	n.d	n.d	n.d
F	n.d	n.d	n.d	n.d	0.025	n.d	n.d	n.d	n.d
Total	97.85	99.15	98.66	95.92	95.32	96.86	95.74	95.93	95.77
Si	7.825	7.924	7.952	7.009	7.078	8.05	7.686	7.812	7.794
Al	4.174	4.076	4.048	4.992	4.922	3.951	4.314	4.187	4.206
Ti	-	0.008	0.005	0.003	0.002	-	-	0.003	0.003
Fe	0.004	-	0.006	0.03	0.024	0.011	0.005	0.002	0.011
Mn	-	0.004	-	0.001	0.003	-	0.001	-	0.005
Mg	-	0.003	0.005	0.002	0.004	-	-	-	0.004
Ca	1754	1.472	1.306	2.782	2.464	1.165	1.739	1.53	1.561
Na	2.002	2.034	2.296	0.878	0.908	2.652	2.074	2.227	2.249
K	0.176	0.027	0.207	0.302	0.293	0.17	0.193	0.22	0.204
% Me	44.61	39.64	34.29	70.22	67.23	29.22	43.41	38.47	38.89
Eq An	39.13	35.87	34.93	66.40	64.07	31.70	43.80	39.57	40.20

teneurs en chlore de l'ordre de 1.15 %); alors que celles des skarns sur cornéennes calc-silicatées, développés à distance du granite (Ech. S17; OK14; OK30), présentent une composition chimique proche du pôle marialite (27 % à 44 % méionite, avec des teneurs en chlore supérieures à 2 %).

- Idocrase

La composition chimique de l'idocrase primaire du skarn sur cornéenne calco-silicatée de l'aureole de contact du granite miocène des Beni-Toufout semble être efficacement contrôlée par l'héritage sédimentaire des substrats de départ. En effet, l'idocrase primaire de la colonne à scapolite, développée dans les alternance schistocarbonatées se particularise par des teneurs en TiO₂ assez élevées (3.6 % et 4 %) et des teneurs en Al₂O₃ relativement faibles (14.7 %). Ces fortes

teneurs en TiO₂ sont traduites dans cet idocrase par des teintes de polarisation anormales. Quant à l'idocrase de la colonne à scapolite, de la série marneuse, il est moins riche en TiO₂ (0.8 % à 3 %) et plus riche en Al₂O₃ (16 à 17.5 %).

- Grenats

Les grenats des skarns sur cornéennes calc-silicatées et pélitiques appartiennent à la série grossulaire / andradite. Leur teneur en titane semble dépendre, comme dans le cas de l'idocrase, de la composition du substrat de départ. La teneur en composante pyralspite de ces grenats reste faible. Cependant, la teneur en composante pyralspite dans les grenats tardifs est relativement plus importante que celle des grenats primaires (tabl. V). Le rapport moyen Al / Al + Fe⁺⁺⁺ de ces grenats est de 0.8.

Tableau IV - Composition chimique et formule structurale des idocrases des skarns des Beni-Toufout

Chemical composition and structural formula of vesuvianites of Beni-Toufout skarn

Ech	C6	C6	C6	C6	S1	S17	S17	S17
N°	L86	L87	L90	L91	L98	Yb75	Yb76	Yb77
SiO ₂	35.32	34.99	35.42	35.8	36.01	36.689	36.747	36.659
TiO ₂	4.02	3.64	3.62	3.77	2.87	1.721	0.947	0.802
Al ₂ O ₃	14.7	14.69	14.72	14.83	16.15	16.429	17.462	17.326
FeO	3.68	4.25	4.1	3.8	2.01	2.583	2.422	2.599
MnO	0.0	0.07	0.01	0.11	0.11	0.062	0.008	0.125
MgO	1.9	2.28	2.3	2.36	2.62	2.23	2.232	1.943
CaO	35.16	35.00	35.42	35.32	35.82	35.841	36.172	35.777
Na ₂ O	0.13	0.15	0.04	0.05	0.05	0.116	0.111	0.098
K ₂ O	0.02	0.24	0.0	0.00	0.00	0.00	0.002	0.00
Cl	nd	nd	nd	nd	nd	0.154	0.039	0.57
F	nd	nd	nd	nd	nd	0.929	1.235	1.323
Total	95.23	95.31	95.63	96.04	95.64	96.75	97.4	97.22
Si	17.581	17.466	17.569	17.637	17.642	17.967	17.88	17.989
Al ^{vi}	1.505	1.367	1.351	1.397	1.058	0.634	0.347	0.296
Ti	8.617	8.636	8.599	8.604	9.318	9.475	10.006	10.012
Fe ²⁺	1.657	1.774	1.701	1.566	0.824	1.058	0.986	1.067
Mn	0.0	0.03	0.004	0.046	0.046	0.026	0.003	0.052
Mg	1.41	1.697	1.701	1.733	1.914	1.628	1.619	1.421
Ca	18.752	18.719	18.824	18.644	18.803	18.805	18.857	18.81
Na	0.125	0.145	0.038	0.048	0.047	0.11	0.105	0.093
K	0.013	0.153	0.00	0.00	0.00	0.00	0.012	0.00
cations	49.66	49.987	49.787	49.675	49.652	49.703	49.815	49.74

Tableau V - Compositions chimiques et formule structurale des grenats du skarn sur cornéenne calc-silicatée des Beni-Toufout (analyses à la microsonde électronique - Université de Jussieu-Paris VI, France)

Chemical composition and structural formula of garnets of Beni-Toufout skarn on calc-silicate hornfels

Ech	4233	4233	4233	4233	C»3	C»6	C'2	C6	C»2
N°	Yg32	Yg34	Yg35	Yg36	L30	L96	L2	L96	L1
SiO ₂	39.37	39.2	39.03	35.62	38.51	38.56	38.66	38.55	38.66
TiO ₂	0.83	0.39	0.3	0.5	1.01	0.69	0.74	0.69	0.74
Al ₂ O ₃	18.6	18.46	18.44	18.59	17.76	18.52	18.86	18.32	18.16
Fe ₂ O ₃	5.18	5.82	5.6	5.46	5.65	5.5	7.75	7.09	5.54
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	1.99	2.14	0.00	0.00	2.76
MnO	0.16	0.16	0.13	0.18	0.24	0.17	0.23	0.17	0.23
MgO	0.18	0.17	0.15	0.18	0.27	0.24	0.21	0.24	0.21
CaO	35.79	34.38	35.69	35.62	34.54	35.38	34.44	35.38	33.44
Total	100.11	98.58	99.34	96.15	100.2	100.47	100.9	100.47	
100.06									
Si	3.013	3.05	3.009	2.833	2.97	2.93	2.955	2.953	2.99
Al ^{vi}	1.676	1.691	1.674	1.575	1.583	1.587	1.652	1.605	1.644
Ti	0.048	0.023	0.017	0.03	0.059	0.039	0.043	0.04	0.043
Fe ³⁺	0.298	0.34	0.325	0.326	0.456	0.45	0.445	0.408	0.5
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.021	0.02	0.017	0.021	0.031	0.027	0.024	0.027	0.024
Mg	0.01	0.011	0.008	0.012	0.016	0.011	0.015	0.011	0.015
Ca	2.934	2.866	2.948	3.036	2.854	2.88	2.82	2.904	2.771
Total cations	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Oxygène	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Alm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
And	14.74	16.57	16.10	16.91	21.73	21.66	20.81	19.88	22.87
Gr _{gross}	84.22	82.39	83.04	82.00	76.61	76.83	77.78	78.66	75.68
Pyrope	0.69	0.68	0.58	0.70	1.07	0.93	0.84	0.93	0.86
sp _{sp}	0.35	0.36	0.29	0.40	0.54	0.37	0.52	0.37	0.54

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

Les profils géochimiques réalisés sur des sections zonées de ces grenats, montrent une parfaite correspondance entre la variation de la composition chimique et les anomalies optiques (fig. 7 et 8).

Par ailleurs, ces profils laissent apparaître que la variation de composition chimique dans ces grenats tardifs est principalement liée à un remplacement dans le site octaédrique du $Al + Fe^{3+}$ par $Ti^{4+} + Fe^{2+}$ (Bouftouha, 2002)

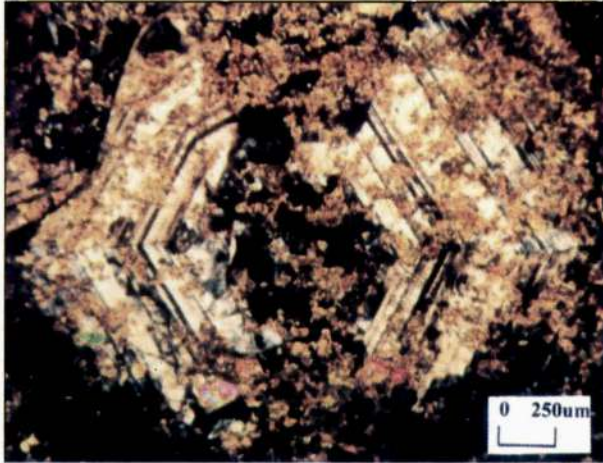


Fig. 7 - Observation microscopique (lumière polarisée) d'une section d'un grenat zoné du skarn sur cornéenne calc-silicatée des Beni-Toufout.

Microscopic observation (polarized light) to section of a zoned garnet skarn on calc-silicate hornfels of Beni-Toufout.

VI -3 - Skarns sur quartzite

Le skarn sur quartzite est représenté par des veines de wollastonite, développées aux dépens des niveaux de quartzites et des veines de quartz traversant le granite.

Les analyses chimiques de la wollastonite montrent une composition très proche du pôle théorique. Les impuretés (traces de Fe et de Mn) sont très faibles de l'ordre de 0.03 atome de Fe et 0.005 atome de Mn.

Traversée dans un grenat zoné tardif du skarn rubané des Beni-Toufout (coeur-bordure)

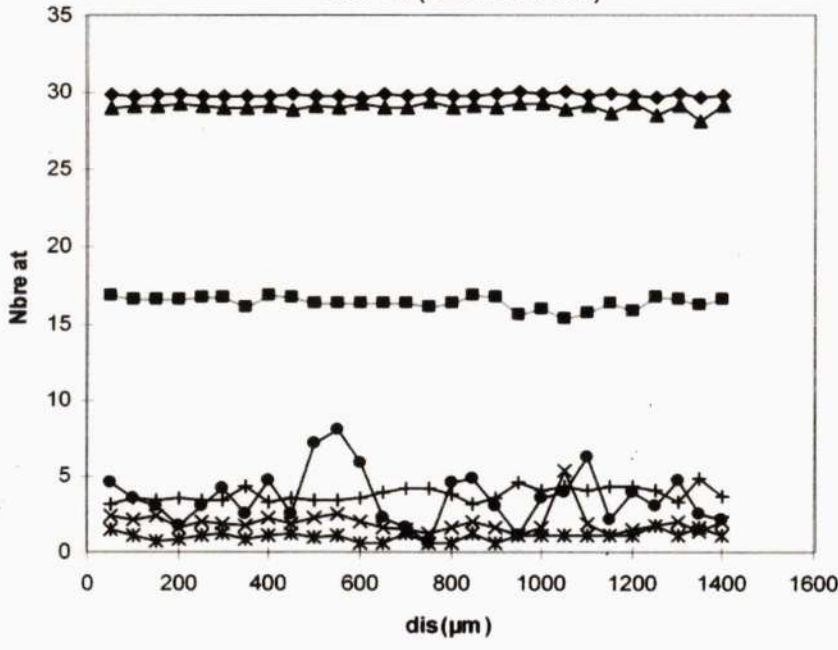
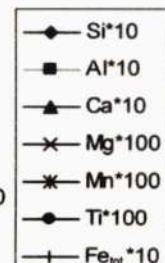


Fig. 8 - Profils de variation de la composition chimique dans un grenat zoné tardif du skarn sur cornéennes calc-silicatées

Profiles of chemical variation in a zoned garnet skarn on the calc-silicate hornfels (border-heart)



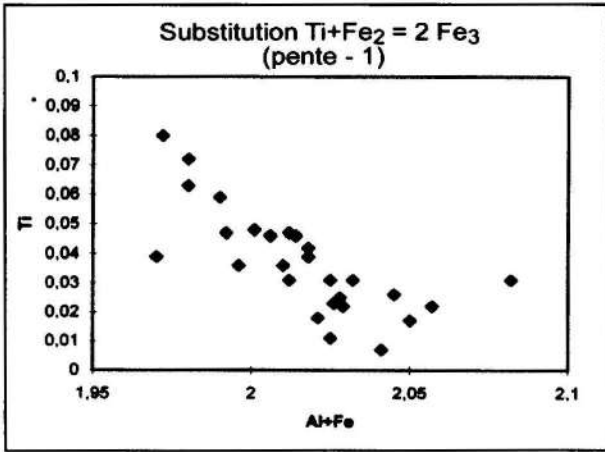


Fig. 9 - Corrélation négative entre le Fe_{tot}/Al dans un grenat zoné du skarn sur cornéenne calc-silicatée

Negative correlation between Fe_{tot}/Al in a zoned garnet skarn on the calc-silicate horfels

VII - GEOCHIMIE

Afin d'approcher la composition chimique des fluides responsables des transformations métasomatiques des roches de l'auréole de contact du granite miocène des Beni-Toufout, nous avons effectué un bilan chimique du skarn sur marbre dolomitique.

L'évaluation des transferts de matière et leur distinction d'éventuelles hétérogénéités du protolithe repose principalement sur la précision de l'identification de la composition chimique du protolithe et l'échantillonnage. A cet effet, les parties de roches comparées doivent être prélevées d'un même échantillon. A ce propos, l'uniformité de composition minéralogique et chimique des substrats carbonatés (calcaires et dolomies) dans des domaines assez étendus rend l'estimation des transferts de matière des skarns qui s'y développent assez aisée (Fontelles, 1978), alors que l'hétérogénéité des substrats pélitiques et calcaro-pélitiques rend souvent cette estimation assez délicate.

Le bilan chimique a pour but de quantifier les gains et les pertes en éléments au cours du

processus de skarnification par rapport à un référentiel ou un invariant du système, qui peut être la masse, le volume ou un des éléments chimiques réputés inertes. Dans ce type de calcul, le référentiel du système est choisi d'avance.

Il existe une méthode de calcul du bilan chimique dite méthode « isocon » (Grant, 1986). Dans cette méthode, l'invariant du système n'est pas défini d'avance, il est donné par la droite « isocon ». Cette méthode a un double avantage, on peut faire le choix de l'invariant du système (masse constante, volume constant) et on peut mettre sur le même graphique les éléments majeurs et les éléments en traces. Cette méthode sera utilisée pour le calcul du bilan chimique du skarn sur marbre dolomitique des Beni-Toufout.

VII-1- Bilan chimique de la skarnification sur marbre dolomitique

Les analyses chimiques en roches totales des skarns et de leur protholithe carbonaté à la fluorescence-X et les mesures de densité ont été réalisées au laboratoire de géochimie de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Les diagrammes des figures 10 et 11 illustrant les bilans de masse du skarn sur marbre dolomitique par la méthode des isocons, laissent apparaître que les éléments, réputés inertes et que l'on peut considérer comme invariants du système sont le Ti, le Zr et le Hf. Ces éléments s'alignent sur une même droite passant par l'origine ou droite « isocon ». Sur le diagramme de la figure 10, on note un léger décalage dans l'alignement des points représentant le Ti et le Zr sur la droite isocon. Ce décalage serait lié à un problème de dosage du Ti, car le point représentant ce dernier devrait s'aligner sur la même droite comportant le Zr et le Hf, comme sur le diagramme de la figure 11.

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

Tableau VI - Composition chimique du marbre dolomitique et des zones de skarn
Chemical composition of dolomitic marble and skarn zones

	Eléments majeurs			Eléments en traces		
	Marbre	Zone à pyroxène	Zone à grenats	Marbre	Zone à pyroxène	Zone à grenats
Den	2.886	3.2	3. Elé52	Ni	3.60	19.2
SiO ₂		51.99	36.78	Cu	<seuil	<seuil
TiO ₂	0.054	0.22	0.09	Zn	19.00	73.6
Al ₂ O ₃	0.97	2.02	0.24	Ga	4.90	8.1
Fe ₂ O ₃	1.35	4.89	23.98	Rb	2.20	3.9
MnO	0.21	0.20	0.24	Sr	116.40	163.1
MgO	19.83	14.36	0.50	Y	4.20	9.0
CaO	28.92	24.79	32.61	Zr	29.20	87.9
Na ₂ O	0.12	0.04	0.65	Nb	2.60	5.3
K ₂ O	0.02	< seuil	< seuil	Hf	<seuil	7.2
P ₂ O ₅	0.01	0.12	0.03	W	<seuil	3.7
Pf	44.87	2.75	0.62	Pb	3.40	3.3
Total	98.93	1001.38	98.78	Th	<seuil	9.8
				U	<seuil	<seuil
				Sn	<seuil	292.9
				Sc	<seuil	<seuil
				Ba	8.70	<seuil
				La	10.0	32.1
				Ce	23.60	<seuil

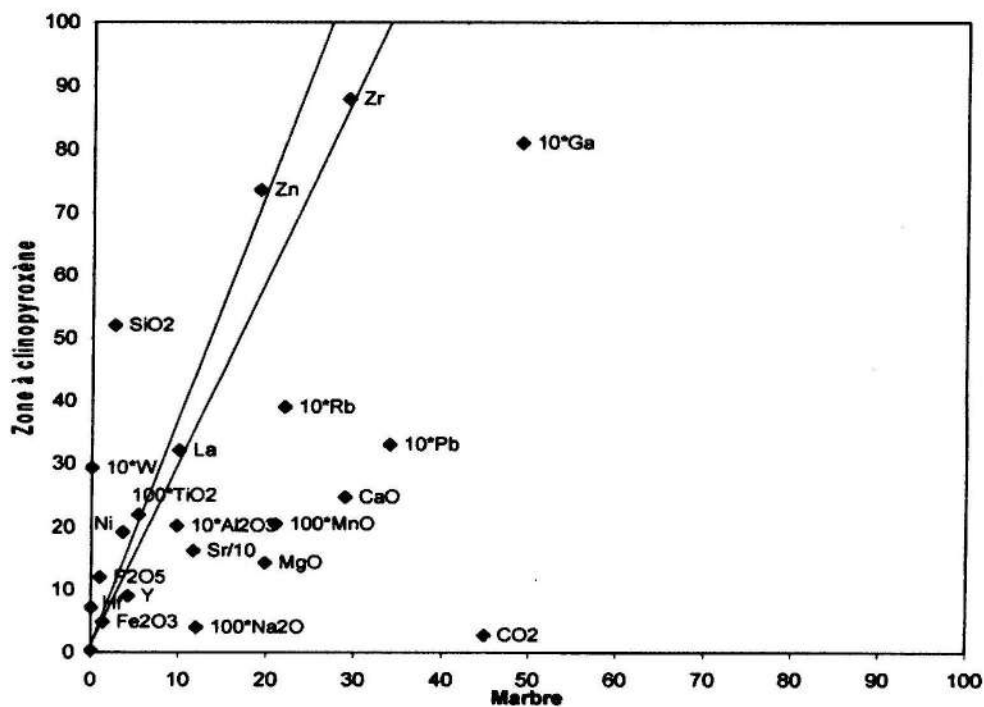


Fig. 10 - Bilan de masse zone à pyroxènes / marbre
Chemical balance sheet pyroxenes zone / marble

Le comportement des différents éléments majeurs et traces au cours de la formation de la zone à pyroxène sur le marbre dolomitique peut être résumé comme suit :

- Eléments majeurs

- **Si** est l'élément déterminant dans la formation de la zone à pyroxène du skarn sur marbre dolomitique : il est fortement apporté ;

- **Mg, Ca, Mn, Na, K, Al et CO₂** sont les éléments lessivés de la zone à pyroxène.

- **Ti, Zr, Fe, P** sont les éléments les moins affectés par la transformation. Ils restent sensiblement inchangés.

- Eléments en trace

Le comportement des éléments en trace au cours des processus métasomatiques est suscep-

tible 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.

- **W et Sn**, dont la teneur dans le marbre est généralement en dessous de la limite de détection, enregistrent une nette augmentation dans la zone à pyroxène;

- **Zn et Ga** enregistrent un enrichissement dans la zone à grenat;

- **Sr, Nb, Rb et Pb** comme le Ca et les alcalins sont lessivés de la zone à pyroxène;

- **Ni, La, Y et le Th** restent très peu affectés dans la zone à pyroxène.

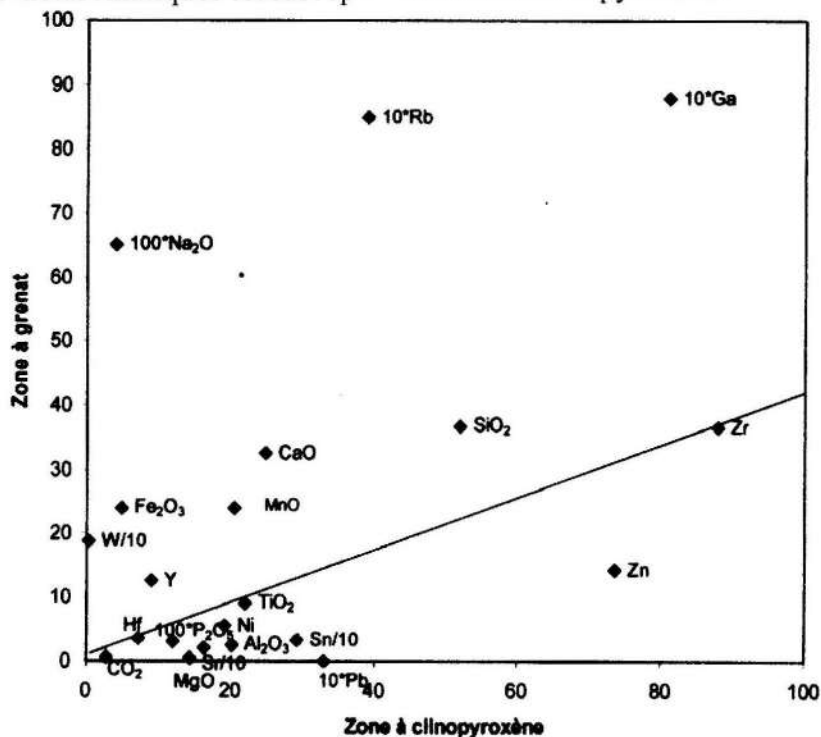


Fig. 11 - Bilan de matière zone à grenat / zone à pyroxène
Chemical balance sheet garnet zone / pyroxene zone

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

VII-2 - Bilan de matière zone à grenat zone à pyroxène

- *Eléments majeurs*

- **Si, Ca, Fe et Mn** sont les éléments apportés dans la zone à grenat du skarn sur marbre dolomitique;

- **Mg, Al et CO₂**, sont comme dans la zone à pyroxène, les éléments lessivés de la zone à grenat.

- *Eléments en trace*

- **W, Cu, Y et P** augmentent dans la zone à grenat, comparativement à la zone à pyroxène;

- **Sn** enregistre un certain lessivage dans la zone à grenat contrairement à la zone à pyroxène.

La concentration de l'étain et du tungstène dans la zone à grenat semble être favorisée par la structure cristalline du grenat qui offre une possibilité d'incorporation assez facile de ces deux éléments dans le site octaédrique.

Le **W**, élément tétravalent et de rayon ionique proche de celui du Fe⁺³, peut se substituer facilement à ce dernier dans le grenat andraditique et à Al, et/ou, au couple Ti⁺⁴ - Fe⁺² dans le grenat alumineux.

Sn, élément quadrivalent et de rayon atomique assez comparable à celui du Fe⁺³, peut rentrer facilement en substitution au Fe⁺³ dans le site octaédrique du grenat en se combinant au Fe⁺².

Sn, peut se substituer également au Ti⁺⁴ dans le réseau du grenat et du sphène.

Ti, Zr et Hf, sont les éléments les moins affectés. Ils restent pratiquement inchangés.

VIII – PHENOMENES RETROGRADES DE LA SKARNIFICATION

Les phénomènes régressifs, caractérisant l'épisode hydrothermal plus ou moins tardif par

rapport à la mise en place des skarns primaires de l'aurole de contact du granite miocène des Beni-Toufout sont particulièrement exprimés dans les zones internes (zones à idocrase et à grenat).

Au cours de cet épisode hydrothermal tardif, le grenat andraditique subit un remplacement partiel par une association calcite-quartz-oxyde de fer, le grenat alumineux et l'idocrase subissent une transformation partielle ou totale en épidote et/ou en épidote-calcite-quartz, le pyroxène est remplacé par de la chlorite et/ou par une association à calcite-quartz-sulfures, la scapolite subit une rétro-morphose en albite et/ou en épidote et la wollastonite un remplacement par de la calcite et du quartz.

Les paragenèses minérales hydrothermales résultant de l'altération du grenat alumineux et de l'idocrase s'accompagnent généralement par un développement de cristaux de sphène de taille relativement importante et par l'apparition de traces de scheelite, en association à la paragenèse à calcite-quartz-épidote.

La néoformation de sphène et la précipitation de la scheelite parallèlement à la destruction du grenat semblent correspondre à une libération du Ti et W contenus dans le grenat et l'idocrase. La précipitation de la scheelite et du sphène pendant la phase d'altération hydrothermale tardive semble être favorisée par la baisse de température et surtout par le changement des conditions chimiques du milieu, notamment une augmentation du potentiel chimique du calcium (mise en solution du calcium du grenat) et un pH basique, comme l'indique la cristallisation de la calcite.

Le développement de sulfures et l'apparition sporadique de traces de scheelite au cours de la phase hydrothermale tardive nous a conduit à faire un examen détaillé du développement de ces phases dans les produits d'altération des skarns sur cornéenne calco-silicatée.

VIII - 1 - La scheelite

Les échantillons porteurs de traces de scheelite ont été sélectionnés au cours d'une campagne de prospection nocturne à la lampe de Wood (Bouftouha, 1989 et 2000). Ces échantillons proviennent essentiellement des anciennes tranchées creusées dans la masse d'épidote de la Koudiat Di Taoulloul, ainsi que le long de la piste longeant cette dernière (partie occidentale du massif granitique des Beni-Toufout).

La scheelite reconnue sur le terrain à la lampe UV et confirmée au laboratoire par l'examen microscopique est assez rare. Lorsqu'elle est présente, elle s'exprime sous forme de petites taches sur les parois des fractures, de petits granules isolés ou encore sous forme de très fines veinules.

Au microscope, les grains de scheelite de taille très réduite, s'observent associés à la paragenèse hydrothermale à épidote - calcite - quartz.

La finesse des grains de scheelite et leur rareté n'ont pas permis l'analyse chimique de cette dernière.

VIII - 2 - Les sulfures

Contrairement à la scheelite, les sulfures sont relativement plus abondants. Les sulfures développés au cours de la phase hydrothermale tardive se distinguent des sulfures contenus dans les cornéennes (généralement exprimés sous forme de petites granules disséminées dans la roche) par leur morphologie généralement en veines, en plages squelettiques englobant poeciliquement les autres phases minérales tardives ou encore sous forme de placages sur les parois des fractures.

Les phases sulfurées associées aux skarns des Beni-Toufout sont essentiellement représentées par de la pyrrhotite, à laquelle s'ajoute

en moindre quantité de la chalcoppyrite et de l'arsénopyrite.

La pyrrhotite montre souvent un remplacement par une association à pyrite-marcassite.

IX - DISCUSSION ET CONCLUSION

Les données pétrographiques, minéralogiques et géochimiques relatives aux skarns de l'auréole de contact du granite miocène des Beni-Toufout, mettent en évidence un développement sur des substrats variés. La transformation métasomatique du marbre dolomitique s'est déroulée essentiellement par apport de silice et de fer et lessivage de CaO, MgO et du CO₂ et celle des roches mixtes et silico-alumineuses par apport de chaux et lessivage des alcalins. Cette transformation s'est accompagnée par un certain enrichissement des skarns en métaux rares, notamment Sn et W par rapport à leur protolithe.

La zonation oscillante de la composition chimique des grenats et des idocrases de ces skarns traduit des fluctuations de l'un des paramètres du fluide percolant. L'examen des substitutions chimiques dans ces minéraux laisse apparaître que le paramètre qui semble être à l'origine de ces fluctuations de composition chimique, serait vraisemblablement la fugacité en oxygène du fluide. En effet, les conditions oxydantes sont plus favorables pour la fixation du Fe³⁺ que pour Al³⁺ et les conditions réductrices favorisent la fixation du Ti⁴⁺ + un cation bivalent (Fe²⁺ ou Sn²⁺) dans le site octaédrique à la place de Fe³⁺ et Al³⁺.

En ce qui concerne la variation de la composition chimique des scapolites, elle semble être efficacement contrôlée par la répartition spatiale des skarns par rapport au granite, autrement dit par le facteur température.

La prédominance du grenat andraditique sur le diopside dans le skarn sur marbre dolomitique

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

des Beni-Toufout, durant le stade prograde et le développement d'une association à calcite, quartz, chlorite et pyrite, durant le stade rétrograde, permettent de classer ce dernier, selon la typologie des skarns (e.g. Einaudi et al., 1981, Meinert, 1997), dans la catégorie des skarns oxydés (riches en Fe³⁺).

La présence de scapolite dans les skarns développés sur cornéennes calc-silicatées serait un bon indice pour la présence de concentrations de Fe, d'Au, de W, de Cu, de Pb-Zn, de Sn, de Mo et de U-Th et terres rares (Meinert, 1997).

Cependant et malgré la minéralogie favorable des skarns des Beni-Toufout, leur contenu en métaux rares reste assez faible. Les faibles apports en métaux par les fluides, pourraient être imputables à la faible différenciation magmatique du granite miocène des Beni-Toufout. En effet, la différenciation magmatique joue un rôle important dans la libération et la préconcentration des métaux. Cette libération et préconcentration des métaux au cours des stades ultimes de la différenciation magmatique facilitent l'extraction et le lessivage des métaux par les fluides hydrothermaux.

Les données géochimiques et métallogéniques des granites et skarns de la Kabylie de Collo, comparées à ceux du Filfila et de l'Edough (étudiés respectivement par Aïssa, 1996, Bouabsa et al., 2005 et Bourefis, 2007), permettent une bonne illustration du rôle de la différenciation magmatique sur le plan métallogénique.

BIBLIOGRAPHIE

AÏSSA, D.E. 1996. Etude géologique, géochimique et métallogénique du massif cristallophyllien de l'Edough (Annaba) et caractérisation des phases fluides minéralisatrices. *Thèse Doct. Etat, I.S.T./U.S.T.H.B, Alger*, 500 p.

AITKEN, B. G. 1979. T-X_{CO2} stability relations and phase equilibria of a calcic carbonate scapolite. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 47, (3), pp. 351-362.

BAKER, J. AND NEWTON, R.C. 1994. Standard thermodynamic properties of meionite, Ca₄Al₆Si₆O₂₄CO₃, from experimental phase equilibrium data. *American Mineralogist*, 79, 478-484.

BOUABSA, L., MARIGNAC, C. ET GHERBI, M. 2005. Le complexe granitique langhien du Filfila (Nord-Est constantinois, Algérie) : Granites à cordiérite, granites à tourmaline et granites à métaux rares. Nouvelles données minéralogiques et géochimiques et conséquences pétrologiques. *Bull. Serv. Géol. Algérie*, 16, 15-53.

BOUFTOUHA, Y. 1989. Etude des skarns et indices métallifères de l'aureole métamorphique du massif granitique des Beni-Toufout (Kabylie de Collo, N.E algérien). *Thèse de magister, Univ. de Constantine*, 136 p.

BOUFTOUHA, Y. 2000. Pétrologie, géochimie et métallogénie des skarns de la Kabylie de Collo (Nord-Est algérien). *Thèse Doct. Etat, Univ. Constantine*, 257 p.

BOUFTOUHA, Y. 2002. Interprétation des anomalies optiques des grenats des skarns de la Kabylie de Collo. *Revue Sc. Tech. Univ. Constantine, Algérie*, N° 17, pp. 113 – 118.

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.

BOUILLIN, J.P. 1979. La transversale de Collo et d'El-Milia (petite Kabylie) : une région-clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. *Mém. Soc. géol. France*, 135; 84 p.

BOUREFIS, A. 2007. Pétrologie, Minéralogie et Géochimie des skarns, granites et cornéennes du Djebel Filfila (Skikda – Algérie). *Thèse Doct. Etat, Univ. Mentouri-Constantine*, 201 p.

BOWMAN, J.R. 1998. Basic aspects and application of phase equilibria in the analysis of metasomatic Ca-Mg-Al-Fe-Si skarns. In : Lentz, DR (Ed.), Mineralized intrusion-related skarn systems, *Mineralogical association of Canada, Short Course*. Volume 26, pp. 1-50.

- CHARTTERJEE, N.D. AND JOHANNES, W. 1974.** Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic $2M_1$ -Muscovite, $KAl_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 48, pp. 89-114.
- EINAUDI, M.T., MEINERT, L.D. AND NEWBERRY R.J. 1981.** Skarns deposits. *Econ. Geology*, 77, 4, pp. 747-754.
- ELLIS, D.E. 1979.** Stability and phase equilibria of chlorite and carbonate bearing scapolite at 750°C and 4000 bars. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 42, p. 1271.
- FONTEILLES, M. 1978.** Les mécanismes de la métasomatose. *Bull. Minéral.*, 101, pp. 166-194.
- GOLDSMITH, J.R. AND NEWTON, R.C. 1977.** Scapolite-plagioclase stability relation at high pressure and temperature in the system $NaAlSi_3O_8$ - $CaAl_2Si_2O_8$ - $CaCO_3$ - $CaSO_4$. *Am. Min.*, 62, pp. 1063-1081.
- GRANT, J.A. 1986.** The isocon diagram – A simple solution to Gresens equations for metasomatic alteration. *Econ. Geol.*, 81, pp. 1976-1982.
- GREENWOOD, H.J. 1967.** Wollastonite stability in H_2O - CO_2 mixtures and occurrence in a contact-aureole near Salino, British Columbia, Canada. *Am. Min.*, 52, pp. 1119-1680.
- HEWITT, D.A. 1973.** The metamorphism of micaceous limestones from South-Central Connecticut. *Amer. J. Sc.*, Cooper Volume, 273 A, pp. 444-469.
- HOLDAWAY, M.J. 1971.** Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *Am. J. Sci.* 271, pp. 97-192.
- HOLDAWAY, M.J. AND MUKHOPADHYAY, B. 1993.** A-Re-evaluation of the stability relations of andalusite: Thermochemical data and phase diagram for aluminum silicates. *Am. Min.*, 78, pp. 298-315.
- KERRICK, D.M. 1974.** Review of metamorphic mixed-volatile (H_2O - CO_2) equilibria. *Am. Min.*, 59, pp. 729-762.
- KWAK, T.A.P. 1987.** W-Sn skarn deposits. *Elsevier, New York*, 451 p.
- MEINERT, L.D. 1993.** Igneous petrogenesis and skarn deposits. In: R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, & J.M. Duke, (eds.), *Geol. Assoc. Can. Special Paper*, v. 40, pp. 569-583.
- MEINERT, L.D. 1995.** Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits - Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization: In Thompson, J.F.H., (eds.), *Magma, fluids, and ore deposits, Min. Assoc. Can. Short Course Series*, v. 23, pp. 401-418.
- MEINERT, L.D. 1997.** Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. *Expl. and Mining Geol.*, 6, pp. 185-208.
- MEINERT, L.D. 1998.** A review of skarns that contain gold, in: Lentz, D. R., ed., Mineralized porphyry/skarn systems, *Min. Assoc. Can. Short Course Series*, v. 26, p. 359-414.
- MEINERT, L.D., HEFTON, K.K., MAYES, D., AND TASIRAN, I. 1997.** Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya. *Economic Geology*, 92, pp. 509-526.
- MEINERT, L. D., HEDENQUIST, J.W., SATOH, H. AND MATSUHISA, Y. 1999.** Retrograde alteration in skarns from magmatic fluids: Evidence from the Ertsberg district, Irian Jaya and Mines Gaspé, Quebec: *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, v. 31, p. A161.
- MORA, C.L. AND VALLEY, J.W. 1989.** Halogen-rich scapolite and biotite: implication for metamorphic fluid-rock interaction. *Am. Min.*, 74, pp. 721-737.
- NEWBERRY, R.J. 1998.** W and Sn – skarn deposits: a 1998 status report. In: Lentz, DR (Ed.), Mineralized intrusion-related skarn systems, *Mineralogical association of Canada, short course vol.* 26, pp. 289-336.
- OUABADI, A. 1994.** Pétrologie, géochimie et origine des granitoïdes peralumineux à cordiérite (Cap-Bougaroun, Beni-Toufout et Filfila) Algérie nord orientale. *Th. Doct. Univ. Rennes I, France*, 257 p.

LES SKARNS A SCAPOLITE DE L'AUREOLE DE CONTACT DU GRANITE MIOCENE DES BENI-TOUFOUT (KABYLIE DE COLLO - NE ALGERIEN) : ETUDE PETROGRAPHIQUE, MINERALOGIQUE, GEOCHIMIQUE ET INTERET METALLOGENIQUE.

- ORVILLE, P.M. 1975.** Stability of scapolite in the system Ab-An-NaCl-CaCO₃ at 4 kb and 750°C. *Geochim. and Cosmochim. Acta*, 39, pp. 1091-1095.
- PAN, Y. 1998.** Scapolite in skarn deposits: petrogenetic and geochemical significance. *Mineralogical association of Canada*, pp. 169 – 210.
- PATTISON, D.R.M. 1992.** Stability of andalusite and sillimanite and the Al₂SiO₅ triple point : constraints from the Ballachulish aureole, Scotland. *Am. Mineral.* 86, pp. 1414-1422.
- PATTISON, D.R.M. 2001.** Instability of Al₂SiO₅ «triple point» assemblage in muscovite+ biotite+ quartz – bearing metapelites, with implications. *Am. Min.*, 86, pp. 1414-1422.
- PATTISON, D.R.M., SPEAR, F.S., AND CHENEY, J.T. 1999.** Polymetamorphic origin of muscovite + cordierite + staurolite + biotite assemblages: implications for the metapelitic petrogenetic grid and for P-T paths. *J. Metamorph. Geol.*, 17, pp. 685–703.
- PATTISON, D.R.M. AND VOGEL, J. 2005.** Contrasting sequences of metapelitic mineral-assemblages in the aureole of the tilted Nelson Batholith, British Columbia : Implication for phase equilibria and pressure determination in andalusite – sillimanite-type settings. *Canadian Mineralogist*, 43, pp. 51-88.
- PATTISON, D.R.M., SPEAR, F.S., DEBUHR, C.L., CHENEY, J.T. AND GUIDOTTI, C.V. 2002.** Thermodynamic modeling of the reaction muscovite + cordierite + Al₂SiO₅ + biotite + quartz + H₂O : constraints from natural assemblages and implication for the metapelitic petrogenetic grid. *J. Metamorph. Geol.* 20, pp. 99-108
- PENVEN, M.J. ET ZIMMERMANN, J.L. 1986.** Mise en évidence d'un âge langhien pour le plutonisme calco-alkalin de la Kabylie de Collo (Algérie). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 303, (II), pp: 403-406.
- SHAW, D.M. 1960a.** Geochemistry of scapolite. Part. I : Previous work and general mineralogy. *J. Petrol.*, 1, pp. 218-221.
- WINKLER, H.G.F. 1979.** Petrogenesis of metamorphic rocks. Fifth edition. *Springer Verlag*. 188 p.