

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

Nadia BOUREGHDA* et **, Khadidja OUZEGANE** et Jean-Robert KIENAST***

RÉSUMÉ

Les métapélites constituent un matériel privilégié pour reconstituer les trajectoires de pression et de température suivies par ces roches au cours de l'histoire d'un événement géodynamique. Dans les métapélites migmatitiques situées au Nord des Gour Oumelalen, la paragenèse la plus précoce à grenat, disthène, muscovite et quartz correspond au faciès amphibolite de haute pression. L'association à grenat, sillimanite, biotite, feldspath potassique, quartz, ilménite et rutile s'est équilibrée dans les conditions du faciès granulite à des températures de $892 \pm 82^\circ\text{C}$ et à des pressions de 9.0 ± 1.1 kb. Les métapélites, situées au Sud des Gour Oumelalen dans la région de Zirmerzouk sont composées d'une paragenèse primaire à staurotide, grenat, disthène, muscovite, biotite, plagioclase, tourmaline, quartz et ilménite dont l'équilibre se fait pour des températures de $556 \pm 20^\circ\text{C}$ et une pression de 11.5 ± 0.9 kb témoin d'un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolite de haute pression. L'apparition de l'andalousite à des températures de $582 \pm 50^\circ\text{C}$ et des pressions de 4.3 ± 1.6 kb, se réalise à la suite d'une décompression importante sans modification de température.

La différence considérable de gradient thermique entre ces deux régions pose la question de l'homogénéité des Gour Oumelalen et pourrait s'expliquer par la superposition tectonique de deux unités différentes. Au cours de l'Eburnéen, un complexe basique et ultrabasique à anorthosite, important vecteur de chaleur s'est accumulé à la base de la croûte et a pu contribuer à l'augmentation de la température responsable du métamorphisme prograde vers le faciès granulite dans le Nord des Gour Oumelalen.

Mots clés - Hoggar - Gour Oumelalen - Granulite - Amphibolite - Thermobarométrie.

*Département des Sciences du Sol, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, ENSA.

**Laboratoire de Géodynamique, de Géologie de l'Ingénieur et de Planétologie, F.S.T.G.A.T., U.S.T.H.B., B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie.

***Institut de Physique du Globe de Paris, 75252 Paris Cedex 05, France.

- *Manuscrit déposé le 04 Février 2009, accepté après révision le 27 Juin 2009.*

IS THERE ANY HETEROGENEITY IN THE GOUR OUMELALEN AREA (NE HOGGAR)? ARGUMENTS BASED ON PETROLOGIC, MINERALOGIC, THERMODYNAMIC STUDIES IN METAPELITES.

Abstract

Metapelites constitute a privileged material to pressure-temperature paths reconstitution during geodynamical event. In the North of the Gour Oumelalen migmatitic metapelites, the earlier high pressure amphibolite paragenesis consists of garnet, kyanite muscovite and quartz. The garnet-sillimanite-biotite-k-feldspar-quartz-ilmenite-rutile secondary assemblage is equilibrated under the granulite facies with temperatures at $892 \pm 82^\circ\text{C}$ and pressures at 9.0 ± 1.1 kb. The late retrograde stage is marked by the reaction garnet + k-feldspar + quartz \rightarrow sillimanite + biotite that follows the crystallization of the anatectic liquid. The metapelites from the Zirmerzouk area in the South of the Gour Oumelalen are composed of staurolite-garnet-kyanite-muscovite-biotite-plagioclase-quartz-ilmenite which are the characteristic of the amphibolite high pressure facies conditions with temperatures estimated at $556 \pm 20^\circ\text{C}$ and pressures at 11.5 ± 0.9 kb. The subsequent decompression is marked by the andalousite appearance at temperatures of 582 ± 50 and pressures of 4.3 ± 1.6 kb. The considerable variation in thermal gradient between the two areas let's us to question the Gour Oumelalen homogeneity. This variation could be due to the tectonic superposition of two different units. During the Eburnean, an emplacement of ultramafic to mafic anorthositic complex at the lower crust contributes, as a main vector of heat, to reach the North Gour Oumelalen granulitic facies conditions.

Keywords - Hoggar - Gour Oumelalen - Granulite - Amphibolite - Thermobarometry.

I. INTRODUCTION

Le Hoggar comprend plusieurs régions granulitiques, principalement dans le Hoggar central (Gour Oumelalen, Tidjénouine, Tin Beggane et Tamanrasset); la mieux étudiée est celle de l'In Ouzzal dans le Hoggar Occidental (Kienast et al., 1996; Ouzegane et al., 2003). Dans cette région, les températures maximales excèdent les 1100°C pour des pressions de 10 à 11 kb suite à un métamorphisme prograde, suivi d'une décompression de 9 à 6 kb quasi isotherme (Bertrand et al., 1992; Ouzegane et Boumaza 1996; Adjerid et al., 2008). Dans le terrane de Laouni qui appartient au Hoggar central les trois régions de Tamanrasset, de Tin Beggane et de Tidjénouine montrent un cheminement horaire. A Tamanrasset, la pression maximale est de 10.5 kb pour des températures

de 825°C , suivie d'une décompression à 6 kb pour une température de 700°C (Ouzegane, 1981; Ouzegane et al., 2001). À Tidjénouine, la pression au pic du métamorphisme atteint 7.5 kb pour des températures de 875°C , suivie d'une décompression jusqu'à 3.5 kb à des températures de 700°C (Bendaoud et al., 2003; Bendaoud et al., 2004; Bendaoud et al., 2008) et enfin les plus hautes pressions sont enregistrées à Tin Beggane avec 13.5 kb pour des températures de 850°C , suivi d'une décompression à 5 kb pour des températures de 700 à 600°C (Derridj et al., 2003). Dans les Gour Oumelalen, Latouche (1983) estime que l'équilibre de l'association à orthoferrosilite, fayalite et quartz s'est produit à une température de 800°C et une pression de 10 à 11 kb. Il extrapole ensuite ses résultats à toute la région. L'un des buts de cette publication est de montrer au contraire

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

que la région des Gour Oumelalen présente une hétérogénéité thermodynamique et que les extrapolations de Latouche (1978, 1983) conduisent à des conclusions non justifiées. Le but de cet article est aussi de décrire, d'une part, les séries métamorphiques des Gour Oumelalen avec les complexes mafiques et ultramafiques associés que nous mettons en évidence pour la première fois, et d'autre part, de mieux contraindre le cheminement P-T de deux régions : la région des Gour Oumelalen sensu stricto au nord et la région de Zirmerzouk plus au sud. Dans ce cadre, les métapélites sont particulièrement adaptées pour les estimations de la pression et de la température. Ainsi, nous étudierons les métapélites à grenat, sillimanite, disthène, muscovite, biotite, feldspath potassique, quartz, ilménite et rutile appartenant à l'unité du super-groupe des Gour Oumelalen au nord et les métapélites à staurotide, grenat, disthène, andalousite, muscovite, biotite, plagioclase, tourmaline et ilménite de la région de Zirmerzouk. La signification de l'hétérogénéité des paragenèses des métapélites sera ensuite discutée dans la conclusion.

II. LITHOLOGIE DE LA RÉGION DES GOUR OUMELALEN

Le Hoggar central, au nord duquel est située la région des Gour Oumelalen (fig.1) regroupe quatre terranes (Liégeois et *al.*, 2003) qui partagent des caractéristiques majeures et qui correspondent à une marge passive rigide séparée du bloc d'Assodé-Issalane par les complexes océaniques du terrane du Serouenout (Adjerid et *al.*, 2008). D'après Black et *al.* (1994) et Liégeois et *al.* (2003), le Hoggar central, formé principalement durant l'orogénèse éburnéenne, évolue comme un métacraton durant le Protérozoïque moyen en acquérant un épaissement lithosphérique et une rigidité permettant la préservation et la conservation des caractéristiques des terrains granulitiques éburnéens.

La région des Gour Oumelalen située au NE du terrane de l'Egéré-Aleksod est très diversifiée, tant sur le plan du métamorphisme que des âges (fig. 2). Diverses unités tectono-mé-

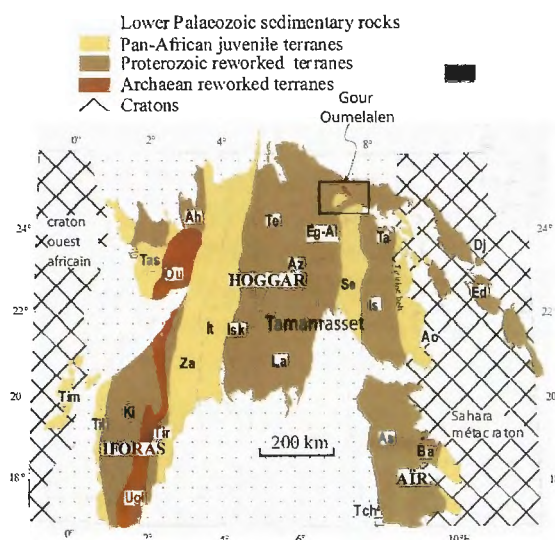


Fig.1 - Carte schématique du Bouclier Targui montrant les 23 terranes et la localisation de la région des Gour Oumelalen.

Schematic map of the Tuareg Schield showing the 23 terranes (Black et al., 1994) and the location of the Gour Oumelalen area

Djanet (Dj), Edembo (Ed), Aouzeguer (Ao), Barghot (Ba), Assodé-Issalane (As-Is), Tchilit (Ts), Tazat (Ta), Sérouénout (Se), Egéré Aleksod (Eg-Al), Azrou-n-Fad (As), Tefedest (Te), Laouni (La), Iskel (Is), In Teidini (It), Tin Zaouatène (Za), Tirek (Tir), Ahnet (Ah), In Ouzzal (Ou), Unité granulitique des Iforas (Ugi), Tassendjanet (Tas), Kidal (Ki), Timétrine (Tim).

Djanet (Dj), Edembo (Ed), Aouzeguer (Ao), Barghot (Ba), Assodé-Issalane (As-Is), Tchilit (Ts), Tazat (Ta), Sérouénout (Se), Egéré Aleksod (Eg-Al), Azrou-n-Fad (As), Tefedest (Te), Laouni (La), Iskel (Is), In Teidini (It), Tin Zaouatène (Za), Tirek (Tir), Ahnet (Ah), In Ouzzal (Ou), granulitic unit of Iforas (Ugi), Tassendjanet (Tas), Kidal (Ki), Timétrine (Tim).

tamorphiques majeures la composent. L'unité des gneiss rouges correspond au seul témoin archéen (2.7 milliards d'années, Peucat et *al.*, 2003; Drareni et *al.*, 2007) extrudé à la faveur de grandes zones de cisaillement qui jalonnent le granite d'Ounane (fig.2). L'unité du supergroupe des Gour Oumelalen (au nord), est composée d'une série métasédimentaire de plateforme (marbres, quartzites, métapélites) paléoprotérozoïque (2.2 milliards d'années, Peucat et *al.*, 2003), qui surmonte un complexe ultramafique et mafique lité non daté, elle-même recoupée par des charnockites dont la mise en place est contemporaine du métamorphisme granulitique (1.9 milliards d'années, Latouche, 1978; Peucat et *al.*, 2003). L'unité néoprotérozoïque de Toukmatine composée d'amphibo-

lites à grenat et de métapélites à staurotide-chloritoïde (Bouregghda, travail en cours), repose en discordance sur le supergroupe des Gour Oumelalen et le complexe des gneiss rouges, elle pourrait correspondre à une vaste écaille charriée à l'avant du terrane de Sérouenout (Latouche, 1978).

Le supergroupe des Gour Oumelalen montre une variation spatiale du degré de métamorphisme; il se caractérise au sud (région de Zirmerzouk) par des amphibolites, alors qu'au Nord des Gour Oumelalen, les granulites dominent. La région des Gour Oumelalen comprend quatre unités (fig. 2) : l'unité des gneiss rouge; l'unité du supergroupe des Gour Oumelale; la série de Zirmerzouk; l'unité de Toukmatine.

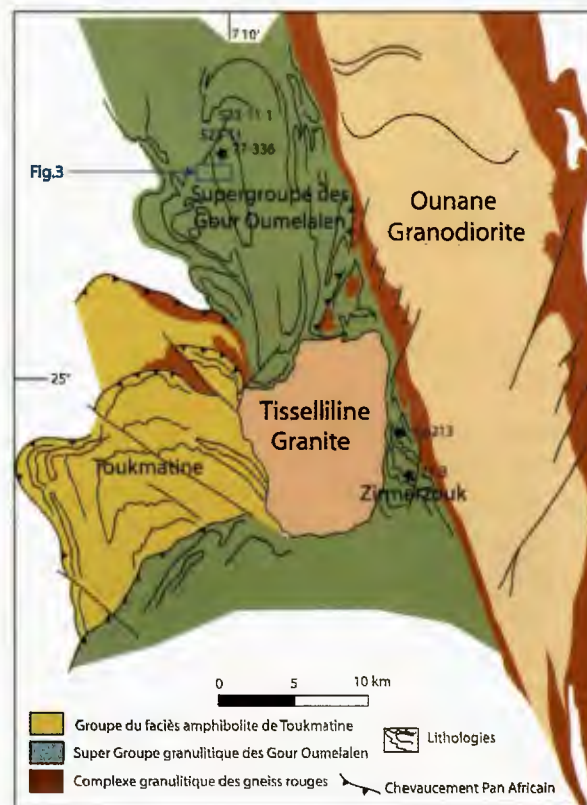


Fig. 2 - Carte géologique des Gour Oumelalen (d'après Latouche, 1978) montrant la localisation des métapélites du Nord des Gour Oumelalen et des métapélites de Zirmerzouk.

Geological sketch map of the Gour Oumelalen area (after Latouche, 1978) showing the location of the studied metapelites of the North Gour Oumelalen and the Zirmerzouk area.

II. 1- L'unité des gneiss rouges

Elle comprend deux faciès principaux: des gneiss gris et des gneiss rouges. Les gneiss gris sont généralement rubanés et souvent migmatitiques. Ils sont plagioclasiques et constitués d'andésine, de quartz, de biotite et d'hornblende avec parfois des inclusions de clinopyroxène. Les gneiss rouges, représentent un peu plus de 60 % des roches de l'unité et se composent essentiellement de quartz, d'oligoclase parfois séricitisé, de microcline perthitique et de biotite. Des âges de 2.7 milliards d'années ont été obtenus (U-Pb sur zircon par SIMS et TIMS, Peucat et *al.*, 2003; Drarení et *al.*, 2007). Les âges modèles Nd suggèrent que ces gneiss se sont formés par la remobilisation d'un protolithe plus ancien, d'âge compris entre 3 et 3.2 milliards d'années. Il n'y a aucune évidence d'âge à 3.5 milliards d'années (Drarení et *al.*, 2007) comme cela avait été suggéré par les travaux antérieurs de Latouche (1978) obtenus par la méthode Pb-Pb.

II. 2- L'unité du supergroupe des Gour Oumelalen (au nord)

Elle est composée, à la base d'une série litée basique et ultrabasique surmontée par des

métasédiments variés, associés à des charnockites (fig. 3). La série ultrabasique que nous décrivons ici pour la première fois, est formée par des roches massives brunes à vert bronze qui correspondent à des péridotites de composition minéralogique variable. Les associations minéralogiques observées sont à olivine-spinelle, olivine-spinelle-orthopyroxène-amphibole, olivine-spinelle-clinopyroxène, olivine-spinelle-orthopyroxène ; cette dernière association correspondant au type harzburgite est la plus répandue. Ces péridotites passent progressivement aux webstérites, formées essentiellement de clinopyroxène et d'orthopyroxène en proportions variables avec quelques cristaux d'olivine; certaines webstérites sont très riches en chromite, la série comporte également des hornblendites à clinopyroxène, amphibole, plagioclase avec ou sans grenat et des gabbros à orthopyroxène, clinopyroxène, amphibole et plagioclase. Au contact des webstérites affleurent des lentilles d'anorthosites à clinopyroxène, grenat, plagioclase et quelques rares feldspaths potassiques (fig. 3). La série métasédimentaire est formée par des métapélites à grenat, biotite, muscovite et sillimanite incluant des reliques de disthène, ainsi que par des marbres à olivine et des quartzites à magnétite-orthoferrosilite-grenat. Dans ces derniè-

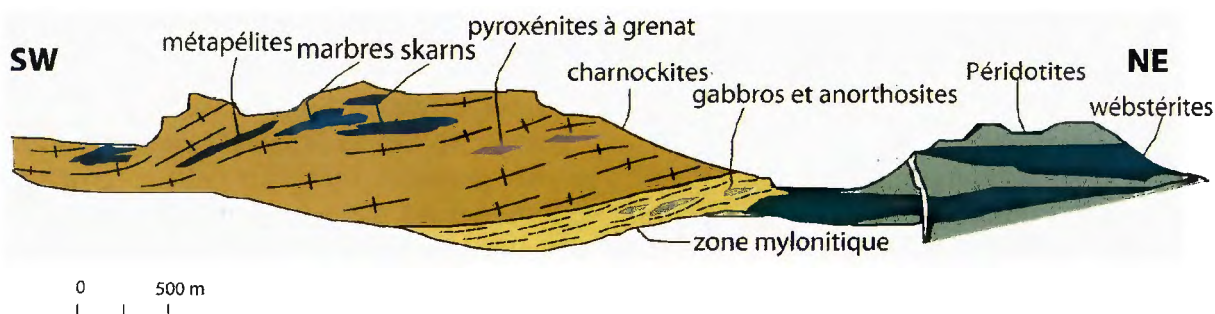


Fig.3 - Coupe géologique schématique montrant les relations structurales entre le complexe mafique ultrabasique, les charnockites et la série métasédimentaire granulitique du Nord des Gour Oumelalen.

Schematic geological cross section showing structural relationships between mafic and ultramafic complex, charnockites and granulitic metasedimentary series of the North Gour Oumelalen area.

res roches particulières, associées à des lentilles de norites, avec ou sans grenat, Latouche (1983) décrit des assemblages à fayalite-orthoferrosilite-quartz correspondant à des conditions de pression et de température de 10-11 kb et de 820°C. Au contact des marbres, se développent des skarns à scapolite, wollastonite, grossulaire, amphibole, plagioclase, calcite, feldspath potassique et clinopyroxène en relation avec la mise en place de charnockites pegmatitiques (fig.3). Les charnockites sont des roches massives de teinte cassonade, composées essentiellement de quartz, de plagioclase, de grenat et d'hypersthène.

II. 3- La série de Zirmerzouk

Située à l'Est de Toukmatine (fig. 2), elle était alors considérée par Latouche (1978) comme l'équivalent de la série des Gour Oumelalen sensu stricto. Néanmoins, nos observations de terrain montrent que Zirmerzouk est composée de marbres rubanés ferrifères associés à des amphibolites à grenat, des quartzites à fuchsite et des métapélites à staurotide, disthène et andalousite. Par ailleurs, le métamorphisme caractérisant cette série correspond aux conditions du faciès amphibolite. Aucune évidence de relique granulitique n'est observée.

II. 4- L'unité de Toukmatine

Elle est d'âge supposé néoprotérozoïque, elle est composée de micashistes à grenat charriés sur le groupe granulitique des Gour Oumelalen et séparée de ce dernier par des quartzites et des mylonites à disthène (Latouche, 1978). Au cœur du massif de Toukmatine, une puissante série composée de gabbros, de péridotites serpentinisées très déformées, représentent sans doute, les reliques d'une ancienne croûte océanique arrachée au terrane du Serouénout (Latouche, 1978).

III. PÉTROGRAPHIE DES MÉTAPÉLITES.

L'étude pétrographique a été faite sur cinq échantillons de métapélites; trois échantillons proviennent de la région nord des Gour Oumelalen (523-11, 523-11-1, 77-336) et deux échantillons proviennent de la région sud des Gour Oumelalen appelée la région de Zirmerzouk (Go213 et 71-3; fig.2).

III. 1- Les métapélites du super groupe du Nord des Gour Oumelalen.

Les métapélites du super groupe des Gour Oumelalen présentent généralement un aspect migmatitique avec des porphyroblastes de grenat, coexistant avec la sillimanite, la biotite et le disthène dans les mélanosomes. Les perthites, le plagioclase et le quartz se concentrent généralement dans les leucosomes. A cela, s'ajoutent des minéraux accessoires comme l'ilménite et le rutile. Deux générations de muscovite sont observées, la plus précoce est blindée dans le grenat, la tardive est en couronne autour de la sillimanite la séparant du feldspath potassique suivant la réaction : sillimanite + feldspath potassique + H₂O → muscovite + quartz.

Le disthène, se présente en relique dans la sillimanite et appartient à l'assemblage le plus précoce composé aussi de grenat, muscovite, et quartz. L'association secondaire de plus haute température est représentée par le grenat, la sillimanite, le feldspath potassique, la biotite et le quartz (fig.4A) où le grenat apparaît souvent en gros grains de forme arrondie, il renferme de nombreuses inclusions principalement représentées par de la muscovite, du quartz, du disthène et du feldspath potassique. Il est entouré d'un fin liseré de fines biotites en paillettes. Par endroit, la biotite est associée à de la sillimanite qui sépare ainsi le grenat du feldspath potassique et du quartz, suggérant une réaction du type :

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

**grenat + feldspath potassique + quartz
+H₂O → sillimanite + biotite.**

La sillimanite, est le silicate d'alumine le plus fréquent dans les métapélites des Gour Oumelalen. Elle se présente en prismes, le plus souvent en inclusion dans les bordures du grenat. Par endroit, des agrégats de sillimanite apparaissent en pseudomorphose de grains de disthène (fig. 4 B). Les perthites sont très abondantes, en grandes plages à contours irréguliers et sont associées au quartz. Le rutile est très fréquent et apparaît en grains plus ou moins arrondis souvent associé à l'ilménite ou en inclusion dans la biotite. L'ilménite se retrouve dans les fractures des grenats ou en équilibre avec la biotite.

III. 2- Les métapélites de Zirmerzouk. (Sud des Gour Oumelalen)

Les métapélites de Zirmerzouk sont très déformées. Elles montrent une texture oeillée, les porphyroblastes sont formés par le grenat, l'andalousite, la staurotide et quelques rares disthènes, les autres minéraux sont essentiellement le quartz, la biotite, la muscovite, le plagioclase et la tourmaline. La paragenèse de haute pression est représentée par le grenat, la biotite, la muscovite, la staurotide, le quartz et le disthène. L'andalousite (fig. 4C), fait partie de la paragenèse secondaire de basse pression composée aussi, de biotite, de muscovite et de quartz; elle forme des porphyroblastes souvent très déformés, ou encore en couronne autour de la staurotide (fig. 4D). L'une des

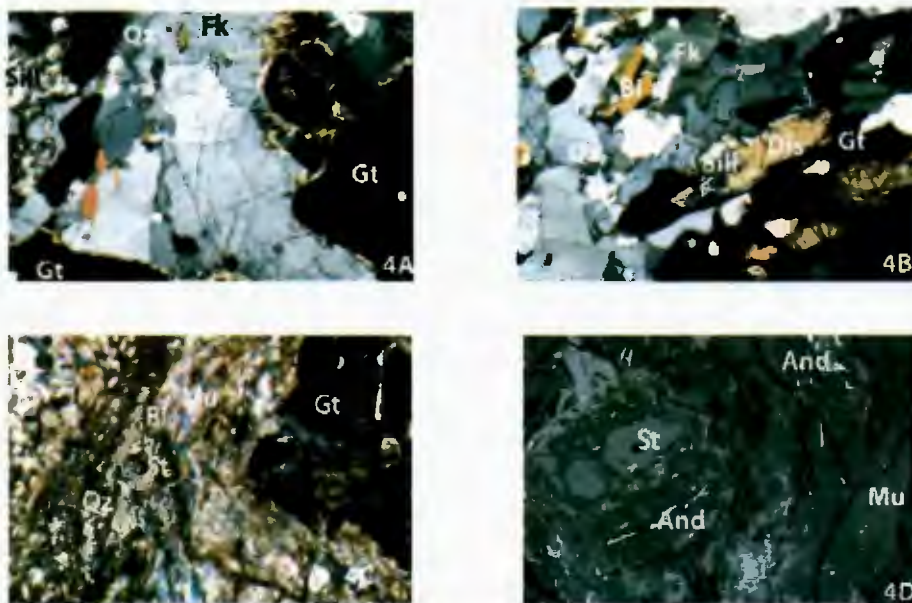


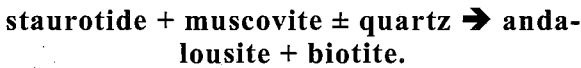
Fig. 4 - A. Détail de l'association de haute température à grenat, sillimanite, feldspath potassique (Fk) et quartz (Qz). (*Detail of high temperature garnet, sillimanite, k-feldspar (Fk), quartz (Qz) association in the metapelite of the North Gour Oumelalen area.*)

B. Relique blindée de disthène (Dis) dans la sillimanite (Sill) en inclusion dans le grenat (Gt) dans une métapélite granulitique (*Relict of armoured kyanite (Dis) in sillimanite (Sill) in inclusion in garnet (Gt) in the granulitic metapelite.*)

C. Détail de l'association de haute pression à grenat, biotite (Bi), muscovite (Mu), staurotide (St), quartz et disthène dans une métapélite de Zirmerzouk (*Detail of high pressure garnet, biotite (Bi), muscovite (Mu), staurolite (St), quartz and kyanite assemblage from the metapelite of Zirmerzouk.*)

D. couronne d'andalousite (And) autour de la staurotide (*Corona of andalusite (And) around staurolite.*)

particularités de ces métapélites est la présence de grenat en couronnes régulières autour des grains de quartz montrant une belle structure en mosaïque. La biotite souvent chloritisée est généralement associée à la muscovite en baguettes allongées soulignant ainsi la schistosité. Le plagioclase n'est pas abondant mais il apparaît en grandes plages à contours plus ou moins réguliers. La réaction qui permet d'expliquer les couronnes d'andalouosite autour de la staurotide pourrait être du type :



Contrairement aux unités du Nord des Gour Oumelalen, on n'observe ni faciès granulite, ni polymétamorphisme, mais une simple évolution métamorphique.

IV. MINÉRALOGIE

La composition chimique des phases minérales a été déterminée en utilisant la microsonde électronique Cameca SX100 de l'univer-

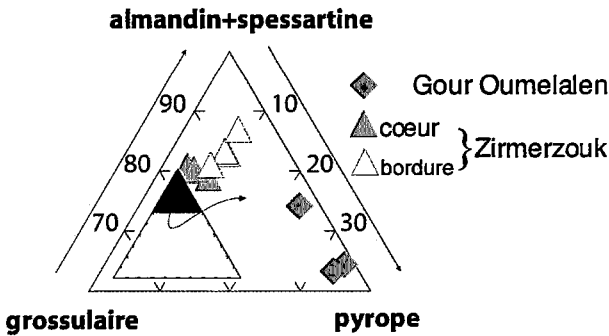


Fig. 5 - Projections des compositions des grenats des deux types de métapélites (Nord des Gour Oumelalen et Zirmerzouk) dans le diagramme grossulaire-almandin+spessartine-pyrope.

Plot of garnet compositions in the grossular-almandine+spessartine-pyrope diagram for both types of metapelites (North Gour Oumelalen and Zirmerzouk)

sité de Paris VI, VII, IPGP dans des conditions de 15kv et un courant d'intensité de 10 nA. Les analyses représentatives des minéraux des métapélites sont présentées dans les tableaux Ia, Ib, Ic et Id.

Le grenat des métapélites des Gour Oumelalen est bien distinct de celui des métapélites de Zirmerzouk (fig. 5). Pour le premier il s'agit d'un almandin (63-73%) relativement riche en pyrope (23-34%) avec des proportions négligeables en grossulaire (2-3%) et spessartine (<1%) et ne montre aucune zonation. Au contraire, le grenat des métapélites de Zirmerzouk est zoné (fig. 6) avec un enrichissement en almandin (cœur 77% et bordure 80%) et un appauvrissement en grossulaire (cœur 16 % et bordure 11%). Les proportions en pyrope sont peu élevées (4-8%) comme celles en spessartine (1-4%). Nous verrons dans la partie relative à la thermobarométrie que cette diminution du grossulaire est en relation avec la décompression des métapélites de Zirmerzouk.

Les biotites comme les grenats montrent des différences entre les Gour Oumelalen et

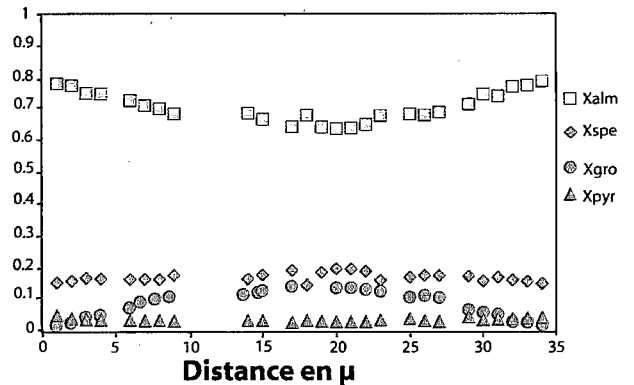


Fig. 6 - Zonation d'un grenat des métapélites de Zirmerzouk.

Zonation of garnet in metapelites from Zirmerzouk

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE
PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

Tableau la - Composition chimique des biotites, muscovites et staurotides des métapélites de la région
du Nord des Gour Oumelalen et de la région de Zirmerzouk

Chemical composition of biotite, muscovite and staurolite of metapelites from North Gour Oumelalen and Zirmerzouk areas.

| | Zirmerzouk | | Gour Oumelalen | | | Zirmerzouk | | | Gour Oumelalen | | Zirmerzouk | | |
|--------------------------------|------------|-------|----------------|-------|-------|------------|-------|-------|----------------|--------|------------|-------|--------|
| | Bi | Bi | Bi | Bi | Bi | Mu | Mu | | Mu | Mu | St | St | St |
| Analyses | 64 | 40 | 53 | 60 | 120 | 54 | 62 | | 57 | 85 | 24 | 25 | 26 |
| SiO ₂ | 35.11 | 35.89 | 36.68 | 40.05 | 35.46 | 45.22 | 44.45 | 45.45 | 46.75 | 47.23 | 27.72 | 27.51 | 28.05 |
| TiO ₂ | 2.22 | 1.84 | 2.55 | 0.31 | 1.94 | 0.03 | 0.00 | 0.12 | 0.83 | 0.97 | 0.41 | 0.66 | 0.41 |
| Al ₂ O ₃ | 19.70 | 19.05 | 18.01 | 19.07 | 18.39 | 35.95 | 36.13 | 36.44 | 35.34 | 34.63 | 53.52 | 52.93 | 53.77 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.09 | 0.07 | 0.23 | 0.09 | 0.13 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.02 |
| MgO | 8.27 | 9.55 | 11.72 | 8.47 | 8.59 | 0.40 | 0.32 | 0.42 | 0.67 | 0.92 | 1.40 | 1.28 | 1.24 |
| FeO | 19.71 | 18.25 | 14.81 | 17.80 | 18.92 | 0.96 | 1.08 | 1.03 | 0.99 | 1.23 | 12.57 | 12.31 | 11.94 |
| MnO | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.10 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.11 | 0.08 | 0.08 |
| ZnO | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.53 | 1.55 | 1.48 |
| CaO | 0.13 | 0.17 | 0.13 | 0.23 | 0.25 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Na ₂ O | 0.06 | 0.07 | 0.12 | 0.08 | 0.14 | 0.85 | 1.04 | 0.90 | 1.38 | 1.15 | 0.04 | 0.04 | 0.06 |
| K ₂ O | 8.74 | 8.00 | 8.75 | 8.21 | 8.04 | 9.20 | 8.82 | 9.01 | 9.35 | 9.53 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| H ₂ O | 3.80 | 3.76 | 3.87 | 3.95 | 3.76 | 4.41 | 4.33 | 4.42 | 4.46 | 4.5 | | | |
| F | 0.19 | 0.30 | 0.07 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.07 | 0.16 | 0.08 | 0.00 | 0.03 | 0.04 |
| Cl | 0.04 | 0.01 | 0.18 | 0.17 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 |
| Total | 98.08 | 97.03 | 97.14 | 98.60 | 95.93 | 97.04 | 96.37 | 97.94 | 100.0 | 100.32 | 97.35 | 96.42 | 97.10 |
| Si | 2.699 | 2.756 | 2.782 | 2.986 | 2.772 | 3.068 | 3.040 | 3.055 | 3.089 | 3.115 | 8.084 | 8.098 | 8.165 |
| Ti | 0.128 | 0.106 | 0.145 | 0.018 | 0.114 | 0.002 | 0.000 | 0.006 | 0.041 | 0.048 | 0.089 | 0.146 | 0.090 |
| Al | 1.785 | 1.724 | 1.610 | 1.676 | 1.695 | 2.875 | 2.912 | 2.886 | 2.752 | 2.692 | 18.398 | 18.36 | 18.452 |
| Cr | 0.005 | 0.004 | 0.014 | 0.005 | 0.008 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.009 | 0.000 | 0.005 |
| Mg | 0.947 | 1.094 | 1.325 | 0.941 | 1.001 | 0.040 | 0.032 | 0.042 | 0.066 | 0.09 | 0.610 | 0.561 | 0.540 |
| Fe ²⁺ | 1.267 | 1.172 | 0.940 | 1.110 | 1.237 | 0.054 | 0.062 | 0.058 | 0.055 | 0.068 | 3.066 | 3.029 | 2.907 |
| Mn | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.006 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.001 | 0.003 | 0.027 | 0.019 | 0.021 |
| Zn | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.329 | 0.337 | 0.317 |
| Ca | 0.010 | 0.014 | 0.011 | 0.018 | 0.021 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.004 | 0.000 |
| Na | 0.010 | 0.01 | 0.017 | 0.011 | 0.020 | 0.112 | 0.137 | 0.118 | 0.177 | 0.147 | 0.020 | 0.024 | 0.032 |
| K | 0.857 | 0.784 | 0.847 | 0.781 | 0.802 | 0.796 | 0.769 | 0.773 | 0.788 | 0.802 | 0.000 | 0.003 | 0.002 |
| OH | 1.948 | 1.927 | 1.960 | 1.967 | 1.965 | 1.999 | 1.978 | 1.984 | 1.967 | 1.983 | | | |
| F | 0.046 | 0.072 | 0.017 | 0.012 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.015 | 0.033 | 0.016 | 0.000 | 0.028 | 0.041 |
| Cl | 0.006 | 0.001 | 0.023 | 0.021 | 0.035 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.00 | 0.001 | 0.009 | 0.004 | 0.000 |
| Total | 9.711 | 9.67 | 9.692 | 9.552 | 9.673 | 8.947 | 8.958 | 8.941 | 8.976 | 8.966 | 30.642 | 30.61 | 30.574 |
| XFe | 0.572 | 0.517 | 0.415 | 0.541 | 0.553 | 0.123 | 0.151 | 0.132 | 0.183 | 0.155 | 0.834 | 0.844 | 0.843 |

Tableau Ib - Composition chimique des ilménites des métapélites de la région du Nord des Gour Oumelalen et de la région de Zirmerzouk

Chemical composition of ilmenite of metapelites from North Gour Oumelalen and Zirmerzouk areas.

| Zirmerzouk | | | Gour Oumelalen |
|--------------------------------|-------|-------|----------------|
| | ilm | ilm | ilm |
| Analyses | 31 | 32 | 116c |
| SiO ₂ | 0.02 | 0.10 | 0.10 |
| TiO ₂ | 52.64 | 53.89 | 50.92 |
| Al ₂ O ₃ | 0.07 | 0.14 | 0.00 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.00 | 0.05 | 0.00 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.00 | 0.00 | 0.80 |
| MgO | 0.00 | 0.06 | 0.17 |
| FeO | 45.51 | 44.22 | 44.84 |
| MnO | 0.93 | 0.83 | 0.39 |
| ZnO | 0.19 | 0.00 | 0.10 |
| CaO | 0.01 | 0.06 | 0.01 |
| Na ₂ O | 0.01 | 0.00 | 0.06 |
| K ₂ O | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| F | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cl | 0.00 | 0.02 | 0.01 |
| Total | 99.40 | 99.37 | 97.40 |
| Si | 0.000 | 0.002 | 0.002 |
| Ti | 1.003 | 1.018 | 0.991 |
| Al | 0.002 | 0.004 | 0.000 |
| Cr | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| Fe ³⁺ | 0.000 | 0.000 | 0.016 |
| Mg | 0.000 | 0.002 | 0.006 |
| Fe ²⁺ | 0.965 | 0.929 | 0.971 |
| Mn | 0.020 | 0.018 | 0.009 |
| Zn | 0.004 | 0.000 | 0.002 |
| Ca | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| Na | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| K | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| F | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Cl | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| Total | 1.996 | 1.977 | 2.001 |
| Xil | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| Xhm | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Xgk | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Xpy | 0.02 | 0.02 | 0.01 |

Tableau Ic - Composition chimique des plagioclases et des feldspaths potassiques des métapélites de la région du Nord des Gour Oumelalen et de la région de Zirmerzouk.

Chemical composition of plagioclase and k-feldspar of metapelites from North Gour Oumelalen and Zirmerzouk areas.

| Zirmerzouk | | | Gour Oumelalen | | | |
|--------------------------------|-------|-------|----------------|--------|-------|-------|
| | Pl | Pl | Fk | Fk | Fk | |
| Analyses | 21 | 36 | 113 | 114 | 132 | 140 |
| SiO ₂ | 65.75 | 67.34 | 64.02 | 64.90 | 64.61 | 64.62 |
| TiO ₂ | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Al ₂ O ₃ | 21.49 | 20.42 | 22.67 | 22.43 | 18.77 | 19.21 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| MgO | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| FeO | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.00 | 0.04 | 0.07 |
| MnO | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| ZnO | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CaO | 1.99 | 1.02 | 2.52 | 3.30 | 0.01 | 0.45 |
| Na ₂ O | 9.01 | 9.36 | 9.57 | 9.51 | 0.94 | 2.43 |
| K ₂ O | 0.06 | 0.06 | 0.33 | 0.19 | 15.56 | 12.78 |
| F | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 |
| Cl | 0.02 | 0.00 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| Total | 98.62 | 98.38 | 99.33 | 100.38 | 99.96 | 99.61 |
| Si | 2.912 | 2.973 | 2.838 | 2.847 | 2.982 | 2.966 |
| Ti | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Al | 1.122 | 1.063 | 1.184 | 1.160 | 1.021 | 1.040 |
| Cr | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| Mg | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Fe ²⁺ | 0.004 | 0.004 | 0.005 | 0.000 | 0.001 | 0.003 |
| Mn | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Zn | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ca | 0.094 | 0.048 | 0.120 | 0.155 | 0.000 | 0.022 |
| Na | 0.773 | 0.802 | 0.822 | 0.809 | 0.084 | 0.216 |
| K | 0.004 | 0.003 | 0.019 | 0.011 | 0.916 | 0.748 |
| F | 0.009 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.004 |
| Cl | 0.001 | 0.000 | 0.004 | 0.001 | 0.000 | 0.001 |
| Total | 4.925 | 4.896 | 4.994 | 4.986 | 5.007 | 5.001 |
| Xan | 0.11 | 0.06 | 0.12 | 0.16 | 0.00 | 0.02 |
| Xab | 0.89 | 0.94 | 0.86 | 0.83 | 0.08 | 0.22 |
| Xor | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.92 | 0.76 |

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

Tableau Id - Composition chimique des grenats des métapélites de la région du Nord des Gour Oumelalen et de la région de Zirmerzouk.

Chemical composition of garnet of metapelite from North Gour Oumelalen and Zirmerzouk areas.

| | Gt | Gt | Gt | Gt | Gt |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Analyses | 6 | 12 | 50b | 51c | 57bi |
| SiO ₂ | 36.78 | 36.42 | 38.66 | 38.51 | 37.82 |
| TiO ₂ | 0.09 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.00 |
| Al ₂ O ₃ | 20.75 | 20.32 | 21.91 | 21.85 | 21.36 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 0.03 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.22 | 2.76 | 0.13 | 0.50 | 0.29 |
| MgO | 1.03 | 1.73 | 8.84 | 8.71 | 5.80 |
| FeO | 33.70 | 34.86 | 29.24 | 29.04 | 32.63 |
| MnO | 1.62 | 0.44 | 0.31 | 0.29 | 0.34 |
| ZnO | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| CaO | 5.34 | 4.03 | 0.73 | 0.96 | 1.14 |
| Na ₂ O | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 |
| K ₂ O | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.03 |
| F | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 |
| Cl | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 |
| Total | 100.63 | 100.65 | 100.05 | 99.94 | 99.58 |
| Si | 2.969 | 2.944 | 2.992 | 2.984 | 2.999 |
| Ti | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.000 |
| Al | 1.974 | 1.936 | 1.999 | 1.996 | 1.997 |
| Cr | 0.005 | 0.001 | 0.004 | 0.001 | 0.002 |
| Fe ³⁺ | 0.074 | 0.168 | 0.008 | 0.029 | 0.017 |
| Mg | 0.124 | 0.209 | 1.019 | 1.006 | 0.685 |
| Fe ²⁺ | 2.275 | 2.357 | 1.893 | 1.882 | 2.164 |
| Mn | 0.111 | 0.030 | 0.021 | 0.019 | 0.023 |
| Zn | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 |
| Ca | 0.462 | 0.349 | 0.060 | 0.080 | 0.097 |
| Na | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.011 |
| K | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.003 |
| F | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.000 | 0.000 |
| Cl | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.004 |
| Total | 8.001 | 8.000 | 8.024 | 8.001 | 8.004 |
| Xalm | 0.77 | 0.80 | 0.63 | 0.63 | 0.73 |
| Xpyr | 0.04 | 0.07 | 0.34 | 0.34 | 0.23 |
| Xgro | 0.16 | 0.12 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| Xspe | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| XFe | 0.948 | 0.919 | 0.650 | 0.652 | 0.760 |

celle de Zirmerzouk (fig.7). Elles sont plus magnésiennes dans les métapélites des Gour Oumelalen avec un X_{Mg} qui varie entre 0.45 à 0.59 par rapport à celles de Zirmerzouk qui présentent un X_{Mg} qui oscille entre 0.43 à 0.49 et des teneurs en Al₂O₃ pratiquement équivalentes (18 à 19.7%). Les proportions en TiO₂ varient dans un large intervalle de 0.31 à 1.84% dans les biotites des métapélites des Gour Oumelalen et sont comprises entre 1.61 à 1.84% dans les biotites des métapélites de Zirmerzouk.

Le plagioclase très rare dans les métapélites de Zirmerzouk est un plagioclase de type albite avec une teneur en anorthite qui varie entre 6 à 11%. Dans les métapélites des Gour Oumelalen le plagioclase est de type oligoclase et montre un X_{An} un peu plus élevé compris entre 12 et 16%.

Le feldspath potassique apparaît seulement dans les métapélites du Nord des Gour Oumelalen, il montre une composition qui varie de Or₇₆ à Or₉₂.

La muscovite accompagne la biotite dans les métapélites, elle est caractérisée par un X_{Na}

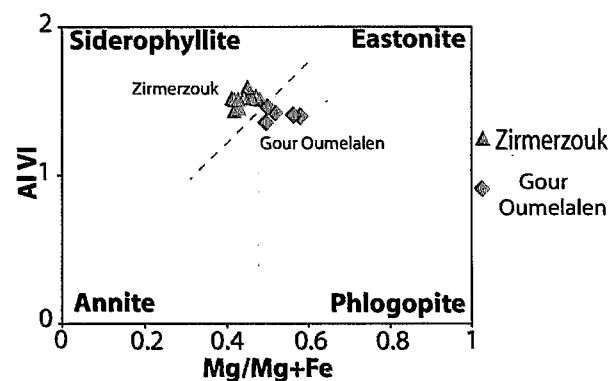


Fig. 7 - Report de la composition des biotites des deux types de métapélites dans le diagramme de Guidotti (1984).

Plot of biotite compositions in the Guidotti (1984) diagram for both types of metapelites.

qui varie entre 0.11 et 0.15, pour les métapélites de Zirmerzouk et entre 0.15 et 0.18 pour les métapélites de l'unité des Gour Oumelalen.

La **staurotide** apparaît uniquement dans les métapélites de Zirmerzouk, les analyses montrent qu'il s'agit d'une staurotide ferrifère avec un X_{Mg} de l'ordre de 0.16, le manganèse est en faible proportion inférieure à 0.11% en poids d'oxydes, les proportions en zinc oscillent entre 1.48 et 1.55% en poids d'oxydes.

V. GÉOTHERMOBAROMÉTRIE

Nous avons utilisé le logiciel *THERMOCALC* (Powell et Holland, 1990) pour l'estimation de la pression et de la température par la méthode « average PT » en calculant les activités des différentes phases aux coeurs des grains appartenant aux paragenèses primaires

pour les conditions les plus précoces et les bordures des grains, ainsi que, les minéraux néoformés pour les conditions plus tardives (tabl. II et III).

Les estimations de pression et de température pour les métapélites de l'unité du super groupe du Nord des Gour Oumelalen, obtenues en utilisant l'assemblage grenat-sillimanite-biotite-feldspath potassique-quartz-ilménite-rutile sont de l'ordre de $9,0 \pm 1,1$ kb pour une température proche de T à $892 \pm 82^\circ\text{C}$. Ces conditions correspondent au pic du métamorphisme dans le faciès granulite (tabl. II).

Dans la région de Zirmerzouk, aucune trace du faciès granulite n'a été retrouvée, l'association à grenat-muscovite-biotite-staurotide indique un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolite de haute pression avec

Tableau II - résultats obtenues par Thermocalc pour les paragenèses de haute température
Average PT results from high temperature parageneses using Thermocalc

| | gr | alm | py | phl | ann | an | ab |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|---------|
| a | 5.34e-5 | 0.380 | 0.0129 | 0.0240 | 0.0394 | 0.147 | 0.392 |
| sd(a)/a | 0.83349 | 0.15000 | 0.52765 | 0.42860 | 0.39178 | 0.21849 | 0.11083 |
| | san | ilm | ru | sill | q | H ₂ O | |
| a | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.700 | |
| sd(a)/a | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

L'ensemble des réactions obtenues par Thermocalc
Independent set of reactions

- 1) $gr + 2sill + q = 3an$
- 2) $3ilm + sill + 2q = alm + 3ru$
- 3) $phl + 6an = 2gr + py + san + 3sill + H_2O$
- 4) $naph + 6an = 2gr + py + ab + 3sill + H_2O$
- 5) $ann + 6an = 2gr + alm + san + 3sill + H_2O$

| Average PT | a H ₂ O | avP (Kb) | sd | av (T°C) | sd | fit |
|------------|--------------------|----------|-----|----------|----|------|
| | 0.7 | 9.0 | 1.1 | 892 | 82 | 1.17 |
| Fit lim | 1.61 | | | | | |

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE
PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

Tableau III - Résultats obtenue par Thermocalc pour les paragénèses de haute pression
Average PT results from high pressure parageneses using Thermocalc

| | gr | alm | phl | ann | east | pa |
|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|---------|
| a | 0.00408 | 0.412 | 0.0202 | 0.637 | 0.0350 | 0.101 |
| sd(a)/a | 0.63527 | 0.15000 | 0.44146 | 0.15000 | 0.39640 | 0.24251 |
| | an | fst | ky | q | H ₂ O | |
| a | 0.162 | 0.834 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| sd(a)/a | 0.21042 | 0.20000 | 0 | 0 | | |

L'ensemble des réactions obtenues par Thermocalc

Independent set of reactions

- 1) $gr + 2ky + q = 3an$
- 2) $alm + 3east + 4q = 2phl + ann + 4ky$
- 3) $24east + 6fst + 57q = 16phl + 8ann + 78ky + 12H_2O$
- 4) $ann + naph + 3an = gr + alm + phl + pa$

Average PT

| | a H ₂ O | avP (Kb) | sd | av (T°C) | sd | fit |
|--|--------------------|----------|-----|----------|----|------|
| | 1 | 11.5 | 0.9 | 556 | 20 | 0.10 |

fit lim = 1.73

Résultats obtenus par Thermoclac pour les paragénèses de basse pression

Average PT results from low pressure parageneses using Thermocalc

| | alm | py | phl | ann | east | mu |
|---------|---------|----------|---------|---------|-----------|------------------|
| a | 0.431 | 0.000334 | 0.0355 | 0.0446 | 0.0433 | 0.700 |
| sd(a)/a | 0.15000 | 0.77940 | 0.39507 | 0.37485 | 0.3762110 | 0.10000 |
| | cel | ab | fst | and | q | H ₂ O |
| a | 0.00991 | 0.267 | 0.844 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| sd(a)/a | 0.48649 | 0.16114 | 0.20000 | 0 | 0 | 0 |

L'ensemble des réactions obtenues par Thermocalc

Independent set of reactions

- 1) $east + cel = phl + mu$
- 2) $3east + 5q = 2phl + mu + 2and$
- 3) $ann + 2and + q = alm + mu$
- 4) $17alm + 25mu + 6fst = 25ann + 96and + 12H_2O$
- 5) $50py + 75cel + 42fst = 56alm + 75phl + 372and + 84H_2O$
- 6) $32alm + 3east + 48naph + 228and = 47py + 3phl + 48ab + 24fst$

Average PT

| | a H ₂ O | avP (Kb) | sd | av (T°C) | sd | fit |
|--|--------------------|----------|-----|----------|----|------|
| | 1 | 4.3 | 1.6 | 582 | 50 | 1.25 |

fit lim = 1.54

des températures de $556 \pm 20^\circ\text{C}$ et une pression de 11.5 ± 0.9 kb suivie d'une décompression marquée par l'apparition de l'andalousite avec des températures de $582 \pm 50^\circ\text{C}$ pour une pression de 4.3 ± 1.6 kb en utilisant la paragenèse grenat-muscovite-biotite-andalousite-staurotide (tabl. III).

VI. RELATION DE PHASE DANS LE SYSTÈME KFMASH.

VI.1 - Pseudosection P-T adaptée aux métapélites des Gour Oumelalen.

Les métapélites des Gour Oumelalen sont composées de grenat, disthène, sillimanite, muscovite, feldspath potassique, plagioclase, biotite et quartz que nous pouvons représenter dans le système KFMASH (K_2O , FeO , MgO , Al_2O_3 , H_2O). Isolé dans le plagioclase et en faible proportion dans le grenat, le calcium n'a donc pas été pris en considération.

Dans le système KFMASH, nous pouvons calculer une réaction univariante qui s'équilibre de la façon suivante : 10 grenats + 8573 muscovites + 5957 quartz \rightarrow 443 biotites + 8130 feldspaths potassiques + 7285 sillimanites + 8130 H_2O , pour une roche dont la composition chimique correspond à une métapélite des Gour Oumelalen (SiO_2 : 75.10 Al_2O_3 : 12.79 MgO : 2.09 FeO : 6.39 K_2O : 3.62). Cette réaction traduit la transition du faciès amphibolite vers le faciès granulite. Pour cette composition particulière nous pouvons aussi identifier quatre domaines bivariants qui sont (Fk) grenat-sillimanite-muscovite - biotite - quartz, (Gt) biotite- muscovite - feldspath potassique-sillimanite- quartz, (Bi) grenat - muscovite - feldspath potassique-sillimanite-quartz et (Mu) grenat-feldspath potassique-sillimanite - biotite - quartz. Ces domaines bivariants correspondent à des réactions univariantes dans le système KFMASH (fig. 8) autour du point invariant [St] qui s'équilibrent comme suit :

(Fk) : grenat + muscovite \rightarrow biotite + sillimanite + quartz + H_2O ;

(Gt) : muscovite + quartz \rightarrow feldspath potassique + biotite + sillimanite + H_2O ;

(Bi) : muscovite + quartz \rightarrow grenat + feldspath potassique + sillimanite + H_2O ;

(Mu) : biotite + sillimanite + quartz \rightarrow grenat + feldspath potassique + H_2O .

Entre les champs divariants, les domaines trivariants ont été calculés (fig. 9). Nous avons, d'une part, la paragenèse à grenat-muscovite-disthène-quartz à haute pression ainsi que les paragenèses biotite-muscovite-sillimanite-quartz et feldspath potassique-biotite-sillimanite-quartz à basse pression. Les microdomaines où l'on trouve l'équilibre grenat-feldspath potassique-sillimanite-quartz caractérisent, d'autre part, les domaines à haute température.

Nous avons représenté sur la figure 9 les compositions $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ du grenat avec le maximum de 0.4 qui correspond à une pression de 10.5 kb et une température de 850°C , compatible avec les calculs thermobarométriques (fig. 8 et tableau II) en tenant compte de la marge d'erreur. Nous pouvons reconstituer les différentes étapes métamorphiques de ces métapélites par l'interprétation de la pseudosection (fig. 9). Ainsi, la paragenèse la plus précoce correspond au domaine trivariant à grenat-muscovite-disthène-quartz, avec le disthène et la muscovite préservés exceptionnellement blindés dans le grenat (fig. 4B). Cette association est en équilibre à haute pression à une température inférieure à 800°C . L'apparition de la sillimanite se fait suite à la réaction: muscovite + quartz + $\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ liquide + sillimanite (fig. 8), marquant la transition amphibolite granulite vers 750°C , avec la formation de migmatites et de liquide anatectique. Au cours de ce stade, le disthène se pseudomorphose en

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

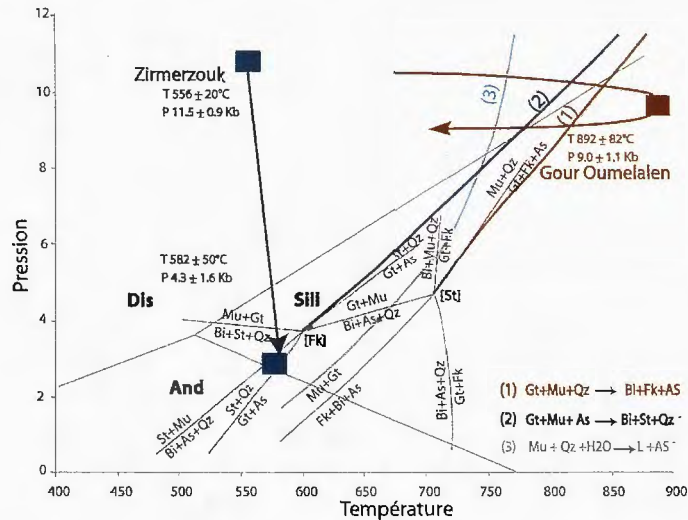


Fig. 8 - grille pétrogénétique dans le système KFLASH autour des points invariants [Fk] et [St] et position des réactions univariantes (1) et (2) dans le système KFMASH montrant des trajets pression température très distincts. Le Nord des Gour Oumelalen est caractérisé par un cheminement P-T correspondant à un refroidissement quasi isobare à la limite entre le faciès amphibolite et granulite alors que Zirmerzouk montre une décompression isotherme dans le faciès amphibolite. La réaction (3) est aussi montrée, elle fait référence à la formation du premier liquide anatectique (L) dans la transition du faciès amphibolite vers le granulite.

Petrogenetic grid in KFLASH system around [Fk] and [St] invariant points and location of univariant reactions (1) and 2 in KFMASH system showing two contrasting P-T Paths. The North Gour Oumelalen P-T trajectory is characterized by isobaric cooling at the boundary between amphibolite and granulite facies, while the Zirmerzouk is remarkable by isothermal decompression path in amphibolite facies. The reaction (3) is also shown, it refers to the first production of melt in the amphibolite-granulite facies transition.

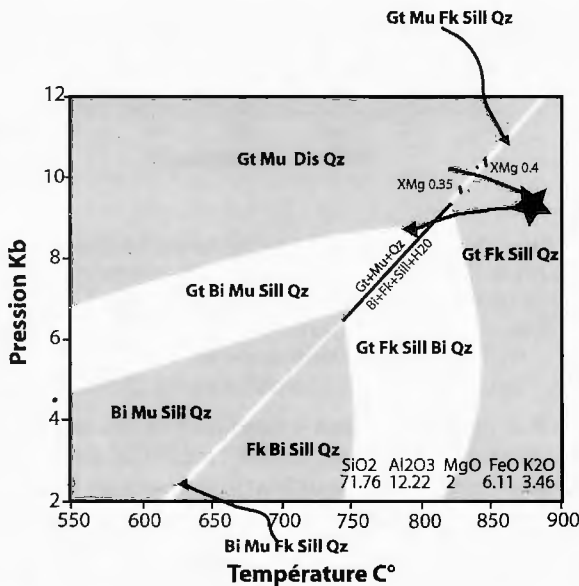


Fig. 9 - Pseudosection P-T construite à partir de la composition d'une métapélite du Nord des Gour Oumelalen grâce au logiciel THERMOCALC (Holland et Powell, 1998) dans le système KFMASH montrant le trajet prograde et rétrograde.

P-T pseudosection calculated in the KFMASH system with bulk composition of metapelite from the North Gour Oumelalen using THERMOCALC software (Holland and Powell, 1998) showing the prograde and retrograde trajectory.

sillimanite (fig. 4B). Ultérieurement la réaction grenat + feldspath potassique + H₂O → biotite + sillimanite contribue à la formation de symplectites à biotite-sillimanite bien observées dans les métapélites. L'histoire réactionnelle tardive de ces roches est marquée par une nouvelle cristallisation de la muscovite (figs. 8 et 9) qui se produit d'après la pseudosection, à la suite d'un refroidissement qui pourrait être isobare.

VI-2. Pseudosection P-T adaptée aux métapélites de Zirmerzouk.

Les métapélites de Zirmerzouk sont plus riches en fer par rapport à celles de l'unité des Gour Oumelalen, comme le montre la projection dans le diagramme AFM à partir de la muscovite et du quartz (fig. 10). L'absence de

staurotide dans les paragenèses précoces du faciès amphibolite dans le Nord des Gour Oumelalen pourrait ainsi s'expliquer par un X_{Mg} plus élevé. Les métapélites de Zirmerzouk composées de staurotide, grenat, disthène, andalousite, biotite, quartz, plagioclase et muscovite peuvent être interprétées par la construction d'une pseudosection. La figure 11 montre que pour une composition de la roche correspondant à SiO₂ : 61.60, Al₂O₃ : 18.89, MgO : 2.85, FeO : 6.82, K₂O : 4.19, avec H₂O et quartz en excès, on peut observer une seule réaction univariante dans le système KFMASH à sept phases qui s'équilibre de la façon suivante : biotite + staurotide + quartz → grenat + muscovite + disthène + H₂O. Cette réaction n'a pas été observée dans ces métapélites. La composition de la roche permet aussi de mettre en évidence, quatre domaines bivariants (fig.11).

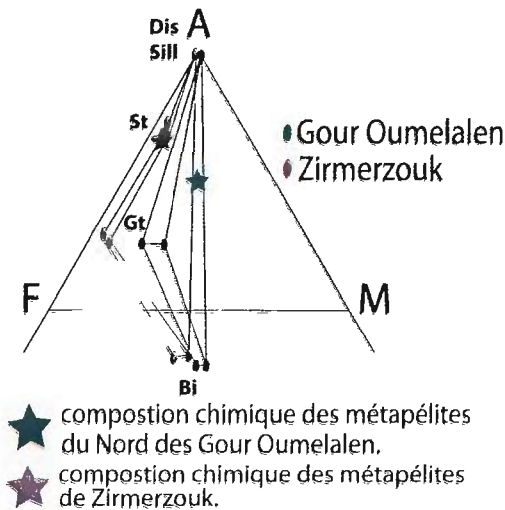


Fig. 10 - Projection des assemblages des métapélites du Nord des Gour Oumelalen et de Zirmerzouk dans le diagramme A-F-M à partir du quartz et de la muscovite.

Plot of metapelites assemblages from the North of the Gour Oumelalen and Zirmerzouk areas in the AFM diagram from quartz and muscovite.

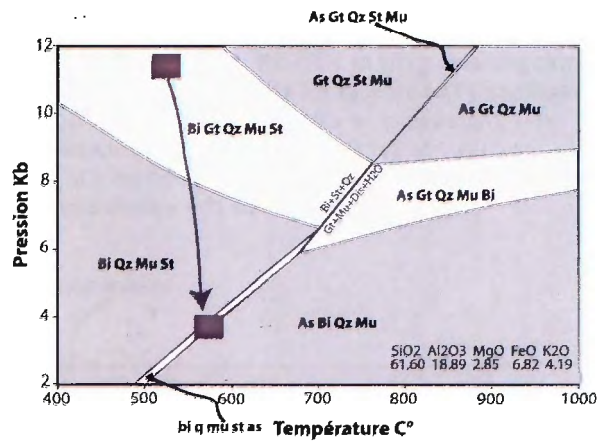


Fig. 11 - Pseudosection P-T calculée grâce au logiciel THERMOCALC dans le système KFMASH montrant la réaction univariante biotite + staurotide + quartz → grenat + muscovite + disthène + H₂O et le trajet isotherme en décompression adapté pour les métapélites de Zirmerzouk.

P-T pseudosection calculated in the KFMASH system according to the THERMOCALC software showing the univariant reaction biotite + staurolite + quartz → garnet + muscovite + kyanite + H₂O and isothermal decompression path of Zirmerzouk metapelites.

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

Parmi les associations bivariantes observées, il y a dans le stade précoce, la paragenèse biotite-grenat-quartz-muscovite-staurotide qui d'après le calcul thermobarométrique à l'aide du logiciel *THERMOCALC* («average P-T», tableau III), est en équilibre à 11.5 ± 0.9 kb et $556 \pm 20^\circ\text{C}$. A ce stade, se succède un domaine trivariant à biotite-quartz-muscovite-staurotide et un domaine bivariant qui montre la réaction staurotide + muscovite \rightarrow biotite + andalousite + quartz, bien observée dans les stades les plus tardifs de l'évolution des métapélites de Zirmerzouk. Ainsi, cette pseudosection permet de proposer le cheminement en décompression quasi isotherme suivi par les métapélites depuis le stade de haute pression vers le stade où l'andalousite remplace la staurotide et le disthène à 4.3 ± 1.6 kb et $582 \pm 50^\circ\text{C}$.

CONCLUSION.

L'étude des paragenèses et l'utilisation conjointe de la composition chimique des minéraux pour quantifier les processus métamorphiques, permettent de reconstituer non seulement la position des échantillons dans la croûte continentale, mais aussi la nature du gradient géothermique qu'ils ont subi et par conséquent de déterminer s'il y avait ou non une anomalie thermique dans la région des Gour Oumelalen. Les assemblages minéralogiques des métapélites sont ceux qui répondent le mieux à la détermination des conditions de pression et de température par la facilité avec laquelle ils enregistrent les différentes étapes du métamorphisme.

Les métapélites du Nord des Gour Oumelalen se distinguent de celles de Zirmerzouk par les chemins pression, température suivis (fig. 8). Ainsi, dans les Gour Oumelalen, la paragenèse granulitique de haute pression succède à la paragenèse à grenat-disthène-muscovite-plagioclase-quartz ($T < 800^\circ\text{C}$) à la suite d'une élévation de la température jusqu'à 892°C et

une pression de 9.0 ± 1.1 kb permettant à la sillimanite et à la biotite de cristalliser à la place du disthène et de la muscovite primaire. Ce cheminement horaire est compatible avec une collision continentale (England et Thompson, 1984). Aucune baisse de pression n'est enregistrée ensuite par ces roches lors de la cristallisation tardive de la muscovite secondaire à la suite d'une augmentation de l'activité de l'eau et d'une baisse de température. De plus ces métapélites s'accompagnent de fusion partielle, comme en témoigne les leucosomes diffus dans ces roches. Il est probable que l'eau libérée par la cristallisation de la partie fondue ait été utilisée pour la cristallisation tardive de la muscovite. Ce type de cheminement caractérisé par un refroidissement quasi isobare caractérise des exhumations très lentes des parties profondes des chaînes. Il est ainsi admis qu'un deuxième orogène soit indispensable pour remonter à la surface des granulites montrant une telle trajectoire P-T. Cette orogénèse pourrait aussi avoir favorisé la mise à l'affleurement des gneiss rouges archéens à la faveur de grandes zones de cisaillement le long du granite d'Ounane.

Alors que les associations précoces à haute pression du faciès amphibolite à grenat-disthène-muscovite-quartz avec ou sans biotite se retrouvent dans les deux régions, les associations progrades caractéristiques du faciès granulite ne sont observables que dans les métapélites du Nord des Gour Oumelalen. L'apparition du faciès granulite dans cette dernière région est probablement favorisée par la mise en place de complexes mafiques et ultramafiques et l'apport juvénile de CO_2 en base de croûte. C'est aussi pendant le métamorphisme que se mettent en place les charnockites à grenat, datées à 1.9 milliards d'années (Peucat *et al.*, 2003). La détermination de tous les protolithes de ces roches d'origine magmatique (Bouregghda, travail en cours) devrait permettre de mieux contraindre le contexte géodynamique au Paléo-

protérozoïque des granulites des Gour Oumelalen. Il apparaît ainsi nettement que, la région des Gour Oumelalen est hétérogène sur la base d'arguments lithologiques et thermodynamiques, composée d'une superposition d'unités tectoniques, celle du Nord des Gour Oumelalen, granulitique, celle de Zirmerzouk de faciès amphibolite et celle de Toukmatine de faciès schiste vert à chloritoïde. Contrairement au Nord des Gour Oumelalen, la trajectoire de Zirmerzouk est caractérisée par une décompression quasi isotherme, ceci traduit une exhumation rapide syn-orogénique dont l'âge reste inconnu.

Remerciements : Nous tenons à remercier les Professeurs Abla Azzouni-Sekkal et Hamid Haddoum pour leurs remarques pertinentes. Les travaux de terrain dans la région des Gour Oumelalen ont pu être menés en 2005, grâce à l'assistance inestimable de Farid Ighilahriz, Directeur de l'OPNA. Cette publication est une contribution au projet CNRS-PICS « Architecture lithosphérique et dynamique du manteau sous le Hoggar », au projet PHC TASSILI n° 09 MDU 787 « Architecture et évolution du Bouclier Touareg : le rôle des grands accidents lithosphériques » et au projet CNEPRU « Géodynamique des terrains métamorphiques du Hoggar ».

BIBLIOGRAPHIE

- ADJERID, Z., OUZEGANE, K., GODARD, G. AND KIENAST, J.R. 2008. First report of ultrahigh-temperature sapphirine + spinel + quartz and orthopyroxene + spinel + quartz parageneses, discovered in Al-Mg granulite from Khanfous area (In Ouzzal metacraton, Hoggar, Algeria). *Geological Society*, 297, pp. 147-167.
- BLACK, R., LATOUCHE, L., LIÉGEOIS, J.P., CABY, R. AND BERTRAND, J.M. 1994. Pan-African displaced terranes in the Tuareg Shield Central Sahara. *Geology*, 22, pp. 641-644.
- BENDAOU, A., OUZEGANE, K. AND KIENAST, J.R. 2003. Fayalite quartz bearing granulites from Tidjenouine Central Hoggar, Algeria. *J. Afr. Earth. Sci.*, 37, pp. 241-255.
- BENDAOU, A., DERRIDJ, A., OUZEGANE, K. AND KIENAST, J.R. 2004. Granulitic metamorphism in the Laouni terrane (Central Hoggar, Tuareg Shield, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 39, pp. 187-192.
- BENDAOU, A., OUZEGANE, K., GODARD, G., LIÉGEOIS, J.P., KIENAST, J.R., BRUGUIER, O. AND DRARENI, A., 2008. The Eburnian Granulitic Metapelites of Tidjenouine, geochronology and metamorphic P-T-X evolution (Central Hoggar, Algeria): witness of the LATEA metacratonic evolution. *Geological Society*, 297, pp. 111-146.
- BERTRAND, P., OUZEGANE, K. AND KIENAST, J. R., 1992. PTX relationships in the Precambrian Al-Mg rich granulites from In Ouzzal, Hoggar, Algeria. *J. Metamorph. Geol.* 10, pp. 17-31.
- DERRIDJ, A., OUZEGANE, K., KIENAST, J.R. AND BELHAI, D. 2003. P-T-X evolution in garnet pyroxenites from Tin Begane (Central Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 257-268.
- DRARENI, A., OUZEGANE, K. ET BENDAOU, A. 2007. L'Archéen du Hoggar. *Bulletin du Service Géologique National - Algérie*, 18 (2), pp. 103 - 126.
- ENGLAND, P.C. AND THOMPSON, A.B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism. Part I : Heat transfer during the evolution of regional metamorphism, part II : heat transfer during the evolution of region crustal melting in continental collision zones. *J. Petro*, 25, pp. 894-928.
- GUIDOTTI, C.V. 1984. Micas in metamorphic rocks, reviews *In* : mineralogy, 13. Ed. Bily S.W., pp. 257-467. Mineral Soc. America, Washington DC.
- KIENAST, J. R., FOURCADE, S., GUIRAUD, M., HENSEN, B. J. AND OUZEGANE, K. 1996. Special issue on the In Ouzzal granulite unit, Hoggar, Algeria. *J. Metamorph. Geol.* 14, pp. 659-808.

EXISTE-T-IL UNE HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES GOUR OUMELALEN (NE HOGGAR) ? ARGUMENTS À PARTIR DE L'ÉTUDE PÉTROLOGIQUE, MINÉRALOGIQUE ET THERMOBAROMÉTRIQUE DES MÉTAPÉLITES.

- LATOUCHE, L. 1978.** Etude pétrographique et structurale du Précambrien de la région des Gour Oumelalen (NE Hoggar, Algérie). *Unpublished Thesis, Paris, France*, 225 p.
- LATOUCHE, L. 1983.** L'orthoferrosilite et les roches associées de la région des Gour Oumelalen (NE de l'Ahaggar, Algérie). *Bulletin de Minéralogie*, 106, pp. 329–339.
- LIÉGEOIS, J.P., LATOUCHE, L., BOUHRARA, M., NAVEZ, J. AND GUIRAUD, M. 2003.** The LATEA metacraton Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria: behaviour of an old passive margin during the Pan-African orogeny. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 161-190.
- OUZEGANE, K. 1981.** Le métamorphisme polyphasé granulitique de la région de Tamanrasset (Hoggar central). *Thèse de doctorat 3^{ème} cycle de l'Université de Paris*.
- OUZEGANE, K., AND BOUMAZA, S. 1996.** An example of ultrahigh-temperature metamorphism: orthopyroxene-sillimanite-garnet, sapphirine-quartz and spinel-quartz parageneses in Al-Mg granulites from In Hihaou, In Ouzzal, Hoggar. *J. Metamorph. Geol.* 14, pp. 693–708.
- OUZEGANE, K. BENDAOU, A., KIENAST, J.R. AND TOURET, J.L.R. 2001.** Pressure-temperature-fluid evolution in Eburnean metabasites and metapelites from Tamanrasset (Hoggar, Algeria). *Journal of Geology*, vol 109, pp 213-230.
- OUZEGANE, K., KIENAST, J.R., BENDAOU, A. AND DRARENI, A. 2003.** A review of Archaean and Paleoproterozoic evolution of the In Ouzzal granulitic terrane (Western Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 207-227.
- PEUCAT, J.J., DRARENI, A., LATOUCHE, L., DELOULE, E. AND VIDAL, P. 2003.** U–Pb zircon (TIMS and SIMS) and Sm–Nd whole-rock geochronology of the Gour Oumelalen granulitic basement, Hoggar massif, Tuareg Shield, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 229–239.
- POWELL, R., AND HOLLAND, T.J.B. 1988.** An internally consistent data set with uncertainties and correlations : 3. Applications to geobarometry worked examples and a computer program. *J. metamorphic Geol.*, v. 6, pp. 173-204.
- POWELL, R. AND HOLLAND, T.J.B. 1990.** Calculated mineral equilibria in the pelite system, K MASH. *American Mineralogist*, 75, pp. 367 380.
- POWELL, R., HOLLAND, T.J.B. AND WORLEY, B. 1998.** Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *J. Metamorph. Geol.*, 16, pp. 577–588.