

## Nature et évolution des séries métamorphiques de très haute température de l'unité granulitique de l'In Ouzzal (Ouest Hoggar)

Khadija OUZEGANE\* et Jean-Robert KIENAST\*\*

\* Institut des Sciences de la Terre, U.S.T.H.B., B.P. 9, *Dar el Beida, Alger*

\*\* Laboratoire de Pétrologie, Université de Paris VI-VII, URA-CNRS 736,  
*Tour 26-0, 4 Place Jussieu, 75 252, Paris, France*

**Résumé:** L'unité granulitique de l'In Ouzzal est composée principalement d'orthogneiss charnockitiques de type tonalite - trondhjémite - granodiorite (TTG) et d'un matériel d'origine volcano-sédimentaire constitué de lentilles basiques à ultrabasiques qui sont d'anciennes tholéïtes et komatiïtes intercalées avec des métasédiments de type marbres, quartzites à magnétite et granulites aluminomagnésiennes. La croûte continentale représentée par l'unité granulitique de l'In Ouzzal s'est formée durant diverses périodes d'activités orogéniques qui s'étalent entre 3500 et 2000 Ma. L'individualisation d'une croûte continentale composée de tonalites et de trondhjémites s'est déroulée entre 3500 et 2700 Ma alors que le dépôt des métasédiments s'est réalisé autour de 2700 - 2600 Ma. La nature des métasédiments (marbres, quartzites, pélites anormales) distincte de ceux des ceintures vertes de bas degré de métamorphisme, est interprétée comme étant de plate-forme en milieu marin de faible profondeur. La composition chimique très particulière des granulites Al-Mg ne correspond pas à des résidus de fusion partielle mais à des mélanges de sédiments issus du démantèlement et de l'altération hydrothermale de matériaux basiques à ultrabasiques et granitiques. Les métasédiments aux chimismes très variés de l'In Ouzzal comme les granulites Al-Mg, les quartzites, les marbres fournissent des indications précieuses sur la nature des protolithes avant 2600 Ma et suggèrent indirectement la présence à cette époque de terrains typiques de l'Archéen composés d'une série bi-modale de ceintures vertes et granites en grande partie disparus. Dans la majorité des continents, la croissance crustale atteint son apogée au cours de l'Archéen terminal, durant le développement des ceintures vertes autour de 2800-2600 Ma et s'achève à 2500 Ma marquant la limite entre l'Archéen et le Protérozoïque inférieur. Une activité orogénique comparable est mise en évidence dans l'In Ouzzal. Vers 2650 Ma se mettent en place des granites alcalins similaires en composition aux granites des rifts c'est à dire dans un régime de tectonique extensive. Le dernier événement magmatique à l'Archéen se situe vers 2500 Ma et correspond à la mise en place de charnockites d'affinités granodioritiques à monzogranitiques appartenant à une série calco-alcaline issue de la fusion partielle de la croûte continentale durant un épaissement crustal peut être accompagné d'un métamorphisme de haut grade dont les paragenèses ont été oblitérées par le métamorphisme extrême Eburnéen (2000 Ma). La structuration majeure observable dans l'In Ouzzal est éburnéenne et correspond à une tectonique tangentielle en conditions granulitiques de très haute température (900-1050°C à 10-11 kbar). La structure initiale E-W a été reprise par des plis déversés vers le NW, puis par des cisaillements décrochants sénestres, le tout dans un contexte granulitique en décompression (9 à 6 Kbar). Ce métamorphisme s'accompagne d'une fusion partielle très limitée malgré les très hautes températures atteintes; ce très faible taux de fusion s'explique par l'absence de fluides, notamment H<sub>2</sub>O, probablement suite à un événement de haut grade vers 2500 Ma responsable de la déshydratation précoce de la croûte

continentale profonde. Les textures réactionnelles et l'évolution des paragenèses à l'Eburnéen suggèrent une trajectoire P-T horaire caractérisée par une évolution prograde à haute pression suivie d'une décompression isotherme avec probablement des flux de chaleur importants liés à de l'«underplating» à l'interface manteau-croûte inférieure dont quelques traces à l'affleurement seraient représentées par de rares anorthosites ou ultramafites.

**Mots-clés :** Archéen, Eburnéen - Hoggar, In Ouzal - Granulites - Métamorphisme de très haute température.

### **Nature and evolution of ultrahigh temperature In Ouzal granulitic unit (Western Hoggar)**

**Abstract :** The dominant lithologies in In Ouzal granulitic unit are tonalite-trondhjemite-granodiorite charnockitic orthogneisses and metamorphosed volcanic-sedimentary rocks composed of tholeiitic-komatiitic basic/ultrabasic lenses and metasedimentary rocks including marbles, magnetite-quartzites and Al-Mg granulites. The continental crust of the In Ouzal granulitic unit was formed between 3.5 and 2.0 Ga ago during successive periods of orogenic activity. Crustal accretion was mainly developed between 3.5 and 2.7 Ga ago with associated tonalite and trondhjemite similar to the Archaean TTG suite. The geochronological data suggests that the age of deposition of the metasediments should be bracketed between 2.7 and 2.6 Ga. The nature of the sedimentary association (limestone, quartzite, unusual pelite) are not metamorphosed facies equivalent of low grade granite-greenstone belt terrains. The highly unusual chemical compositions of Al-Mg granulites is more compatible with pre-metamorphic sedimentary characteristics rather than partial melting processes. The trace element patterns and oxygen characteristics of these rocks were best explained by variable mixtures of hydrothermally altered mafic/ultramafic and felsic protoliths. Consequently unusual chemistry of Al-Mg granulites as well as associated metasediments (marbles, quartzites) provide information indirectly for the presence of the dual granite-greenstone belt association prior to 2.6 Ga in the In Ouzal unit. On most continents, the period of Late Archaean crustal growth reaches a maximum during the period 2.8-2.6 Ga, the time of major greenstone belt development and with crustal stabilization by about 2.5 Ga. Comparable activity occurred in the In Ouzal area. The metasediments are intruded by alkali granite 2.65 Ga ago, probably in a rifting context. A later stage of magmatism in Archaean period with calc-alkaline granodioritic and monzogranitic suites occurred close to 2.5 Ga probably in context of crustal thickening processes inducing incorporation of the supracrustal rocks into deep crust and partial melting. The ultrahigh temperature metamorphism occurred 2.0 Ga ago and was associated with two main deformational phases. The first is responsible for a regional foliation which was refolded during the second phase. The In Ouzal granulitic unit shows very little evidence of melting restricted to scarce cordierite-bearing monzogranitic gneisses (leptynites), despite the very high temperature conditions (900-1050°C°). This can only mean a very dry metamorphic environment. Dehydration could have been accomplished during the earlier high-grade event 2.5 Ga ago. The reaction textures and the evolution of the mineral assemblages suggests a clockwise P-T trajectory with nearly isothermal decompression path and probably introduction of heat to the base of the crust as suggested by the presence of anorthosites emplaced close to 2.0 Ga ago.

**Key-words :** Archaean, Eburnean - Hoggar, In Ouzal - granulites, ultrahigh-temperature metamorphism.

## INTRODUCTION

L'unité granulitique de l'In Ouzzal (Ouest Hoggar) constitue dans le bouclier Touareg, un témoin des premiers stades de l'histoire tectono-métamorphique de la croûte continentale profonde. Un des buts de cette synthèse est de mettre en évidence les époques et les mécanismes de création, de structuration et de différenciation d'un segment de croûte depuis l'Archéen (3000 Ma). Du fait de l'absence de reprise tectono-métamorphique plus récente que l'événement Eburnéen (2000 Ma), ces granulites présentent les caractères généraux précurseurs des terrains archéens de haut degré de métamorphisme et on y retrouve donc les thèmes habituels à ce genre de terrain comme la recherche de la nature des protolithes, les relations mutuelles entre les ensembles ortho et paradiérivés, l'âge de mise en place des protolithes, les âges du ou des métamorphismes et enfin la caractérisation structurale et métamorphique des granulites qui doit permettre d'établir les chemins pression température suivis par ces roches au cours de leur évolution.

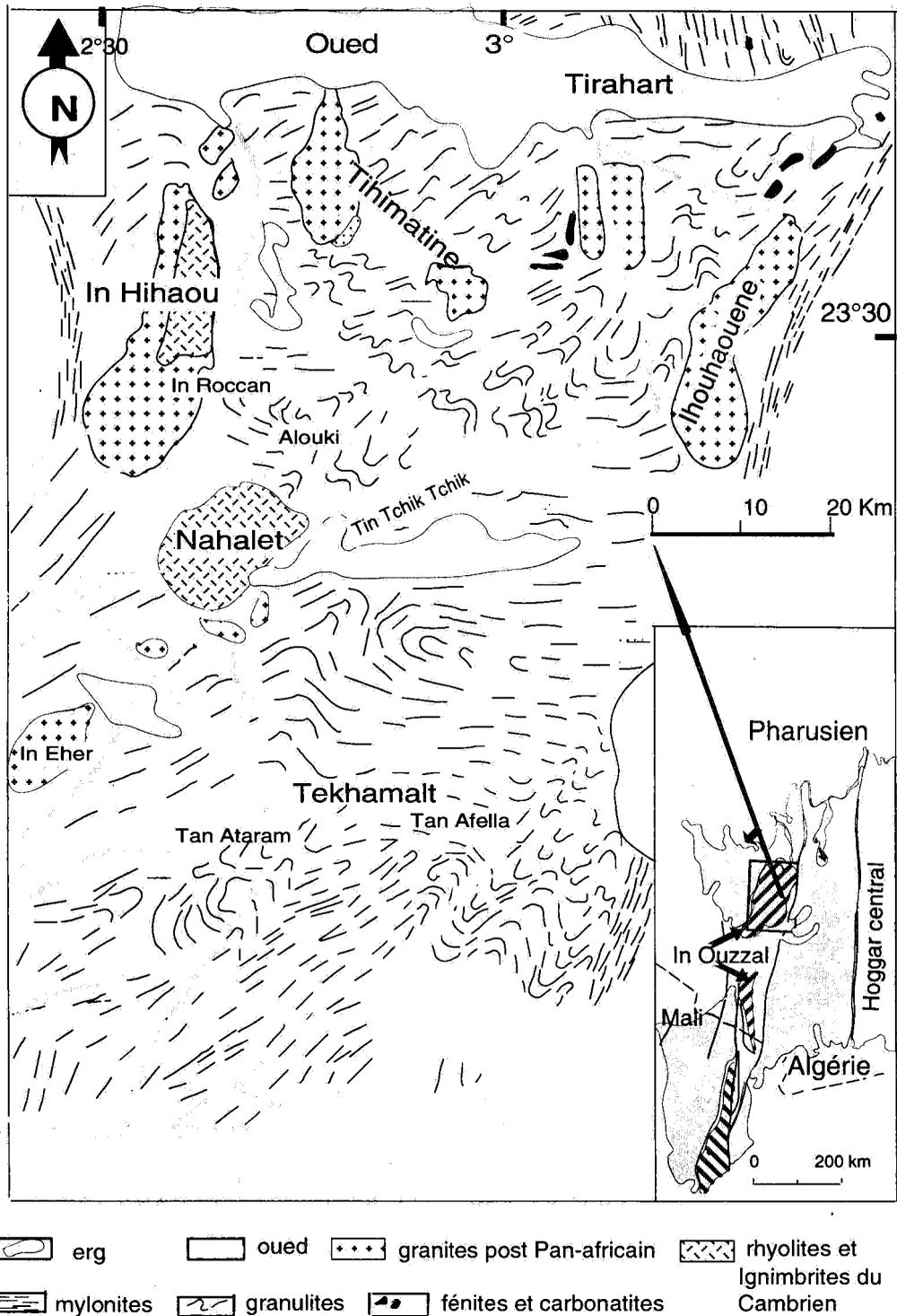
Cette publication est la synthèse des résultats d'études structurales, pétrologiques et géochimiques consacrés à l'Unité granulitique de l'In Ouzzal, décrites dans des thèses (Ouzegane 1987, Haddoum 1992, Rahmani 1992, Mouri 1995, Semiani 1995, Ait Djaffer 1996, Benyahia 1996, Boumaza 1996, Djemai 1996,) et des publications réalisées en grande partie depuis une dizaine d'années et en particulier dans le Journal of Metamorphic Geology paru en Novembre 1996.

## CADRE GEOLOGIQUE

L'unité granulitique de l'In Ouzzal forme un bloc allongé de direction nord-sud, de plus de 400 km de longueur, large au Nord de 80 Km à hauteur du massif d'In Hahaou et s'amincissant jusqu'à disparaître au Sud vers la frontière malienne pour être relayé par l'Adrar des Iforas (fig. 1). Les principaux reliefs qui dominent le roc granulitique de l'In Ouzzal de plusieurs centaines de mètres, sont des massifs

d'ignimbrites et de granites post pharusiens d'In Hahaou et In Eher à l'Ouest, de Nahalet, Tihimatine au centre et d'Ihouhaouene à l'Est (fig. 1). Les limites de l'Unité granulitique de l'In Ouzzal avec les rameaux de la chaîne pharusienne sont des décrochements verticaux. La bordure mylonitique Est - In Ouzzal étudiée en détail dans la région de Tirek (Attoum, 1983) et Amesmessa (Djemaï, 1996) est une faille verticale profonde avec une composante décrochante en jeu dextre, le décrochement Ouest-ouzzalien est par contre, sénestre (Caby, 1970). La mise en évidence de contacts tectoniques et le contraste métamorphique entre l'unité granulitique de l'In Ouzzal et la chaîne pharusienne, de faciès amphibolite et schiste vert, de même que l'âge archéen des granulites ont permis de conclure que le môle In Ouzzal correspondait à un terrain archéen exotique au sein d'un domaine Pan-Africain (Caby, 1996). Les méthodes radiométriques appliquées aux granulites ont permis de mettre en évidence deux événements majeurs dans l'histoire de l'In Ouzzal. Le premier âge archéen de 2860 Ma sur les granulites de l'In Ouzzal a été obtenu par Ferrara et Gravelle en 1966 par la méthode Rb/Sr sur roches totales. Cet âge est confirmé plus tard par Allègre et Caby (1972), Lancelot *et al.*, (1976), Ben Othman *et al.*, (1984) et Haddoum *et al.*, (1994). Lancelot *et al.*, (1976) suggèrent que cet événement correspond non pas à l'âge du métamorphisme mais au processus originel de sédimentation sur la base de zircons brunâtres pouvant être détritiques dans certaines granulites. Les âges de 2100 Ma sur minéraux par la méthode Rb/Sr (Allègre et Caby 1972), U/Th/Pb sur Zircon (Lancelot *et al.*, 1976) et Nd/Sm sur grenat (Ben Othman *et al.*, 1984) impliquent que l'In Ouzzal a acquis son métamorphisme durant l'orogénèse éburnéenne. Les nouvelles données géochronologiques sur les orthogneiss charnockitiques et les granulites Al-Mg (Bernard-Griffiths *et al.*, 1996; Peucat *et al.*, 1996) présentés dans les sections suivantes permettent de mettre en évidence plusieurs événements qui se succèdent entre 3500 et 2000 Ma.

Les premières connaissances pétrologiques de l'In Ouzzal, sont dues à Lelubre (1952) qui a mis en



**Fig. 1 - Carte géologique du Nord de l'unité granulitique de l'In Ouzzal dans l'Ouest du Hoggar**  
**Geological map of the northern In Ouzzal granulitic unit in western Hoggar**

évidence l'originalité des séries à "faciès In Ouzzal" qu'il rapproche des charnockites de l'Inde et qui pose le problème de l'âge de ces granulites bien avant que les techniques plus précises de la géochronologie soient utilisées. Dans la région d'In Hihaou et Tekhamalt un complexe granulitique a été décrit par Giraud (1961) et Le Fur (1966). Ce complexe se compose de charnockites, de cipolins à nodules silicatés, de gneiss à grenat - graphite, de quartzites à magnétite, de quartzites à grenat - orthopyroxène - sillimanite et de leptynites (Giraud (1961).

Les travaux plus récents montrent que du point de vue lithologique les séries à "faciès In Ouzzal" sont très diversifiées et composées principalement par deux ensembles : un ensemble infracrustal (orthodérivé) constituée pour l'essentiel de charnockites et un ensemble supracrustal composé de métasédiments de type quartzites, quartzites rubanées à magnétite, marbres, granulites alumino - magnésiennes communément associés à un matériel orthodérivé comme des leptynites, des anorthosites et des lentilles basiques (norites, pyrigarnites) et ultrabasiques (lherzolites et hazburgites).

En ce qui concerne l'ensemble supracrustal, le trait le plus original est sans conteste l'abondance et la variété des granulites Al-Mg. Ces roches renferment des paragéneses à orthopyroxène sillimanite-grenat-quartz, saphirine-quartz, (Kienast et Ouzegane 1987, Ouzegane 1987, Bertrand *et al.*, 1992, Ouzegane et Boumaza 1996), spinelle - quartz (Aït Djafer 1996, Ouzegane et Boumaza 1996) et osuillite - sillimanite - orthopyroxène (Audibert *et al.*, 1993, Aït Djafer 1996) qui témoignent d'un métamorphisme de très haute température de l'ordre de 1000°C pour une pression de 10-11 kbar. Les marbres à wollastonite - scapolite - calcite - quartz (Benyahia 1996) et les quartzites à spinelle - quartz avec ou sans corindon (Aït Djafer 1996, Guiraud *et al.*, 1996) confirment aussi les conditions extrêmes de ce métamorphisme.

## PRINCIPAUX TYPES LITHOLOGIQUES ET NATURE DES PROTOLITHES

### Les séries orthodérivées

#### *Les granulites basiques et ultrabasiques*

##### *Les pyriclasites et pyrigarnites*

Les granulites basiques (pyriclasites et pyrigarnites) sont localisées en majeure partie dans la région d'In Hihaou mais on les trouve aussi dans la région de Tekhamalt et Amesmessa où elles apparaissent en lentilles de 1 à 4 mètres de puissance, au contact des granulites alumino - magnésiennes, des quartzites à magnétite, des marbres ou en intercalation dans les orthogneiss charnockitiques. Les pyriclasites sont composés de clinopyroxène, orthopyroxène, plagioclase (An 48 à An 90), pargasite, magnétite et parfois biotite. Les pyrigarnites sont remarquables par la présence de grenat entouré systématiquement d'une auréole réactionnelle à plagioclase-orthopyroxène développée à la faveur de la réaction grenat + clinopyroxène + plagioclase (An 50-60) + quartz + O<sub>2</sub> → orthopyroxène + plagioclase (An 72-An 84) + magnétite. Les granulites basiques dont la teneur en silice varie de 45 à 51 % présentent des compositions tholéitiques correspondant à des basaltes komatiitiques et des basaltes tholéitiques riches en Mg (à quartz normatif) comparables aux séries volcaniques des ceintures vertes archéennes (fig.2). Certaines de ces granulites sont d'anciens basaltes andésitiques calco-alcalins (fig.2).

##### *Les lherzolites et hazburgites*

Les péridotites apparaissent en masses lenticulaires de plusieurs centaines de mètres surtout dans le nord du môle In Ouzzal (In Hihaou et Tekhamalt) associées aux formations paradérivées avec lesquelles elles sont impliquées dans les plissements. Ce sont des roches à texture rubanée montrant le plus souvent un état de serpentinitisation très avancée. Ces péridotites peuvent

contact de quartzites à magnétite, de métanorites, lherzolites ou de leptynites (Ouzegane 1987). A l'affleurement sur les surfaces patinées d'aspect scoriacé, le spinelle précurseur de la saphirine, sert de site de nucléation et reste en saillie. L'essentiel de la roche est composée de saphirine en intercroissance avec l'orthopyroxène en équilibre avec la biotite et il peut s'y ajouter le grenat dans la paragenèse primaire. L'absence totale de sillimanite ne serait-ce qu'à l'état relictuel et la présence de spinelle primaire constituent les caractères distinctifs de ces roches.

*Les granulites alumino-magnésiennes  
à corindon*

Elles affleurent dans le reg de Roccan en lentilles métriques dans les granulites alumino-magnésiennes avec et sans quartz. Le corindon en petits grains incolores n'est pas distribué de façon uniforme dans la roche. Il est systématiquement blindé dans la saphirine. L'orthopyroxène primaire ne présente pas de contact stable avec le corindon. Des couronnes de très grandes tailles (pouvant atteindre 10 centimètres) composées de saphirine et de sillimanite autour du corindon s'expliquent par une réaction du type corindon + orthopyroxène → saphirine + sillimanite (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992). Des intercroissances de cordiérite-saphirine se développent systématiquement dans les contacts phlogopite-sillimanite et orthopyroxène-sillimanite. Les variétés à grenat sont plus rares.

*Les granulites alumino-magnésiennes  
sans quartz*

Elles affleurent surtout dans les régions d'In Hihaou et Tekhamalt mais on les rencontre aussi dans la région d'Ihouhaouene en lentilles métriques au sein des granulites alumino-magnésiennes à quartz. Le type le plus simple de ces roches est représenté par les deux minéraux primaires orthopyroxène et sillimanite, mais les variétés riches en biotite et grenat sont les plus abondantes. La cordiérite, la saphirine,

l'orthopyroxène et la biotite en petits cristaux forment l'essentiel de la paragenèse secondaire.

*Les granulites alumino-magnésiennes à quartz*

Elles sont très abondantes dans le reg de l'Oued Roccan mais on les trouve aussi dans les régions d'Ihouhaouene, de Tekhamalt et d'Amesmesssa. Elles se composent de l'association orthopyroxène-sillimanite - quartz - biotite avec ou sans grenat et sont remarquables par la géométrie et le développement de réactions coronitiques, aussi bien dans les stades précoces de l'histoire de la roche qui se marquent dans certains faciès à grenat primaire et quartz par l'apparition de symplectites en gros cristaux (0,5 à 2 centimètres) de sillimanite et d'orthopyroxène, mais aussi dans les stades tardifs où apparaît la cordiérite. Les porphyroblastes de grenat, très souvent étirés et boudinés, de forme sigmoïdale, sont affectés de micro-failles obliques sur la foliation et remplies de symplectites fines à cordiérite - orthopyroxène avec ou sans saphirine et spinelle (Haddoum 1992; Aït Djafer 1996). Des amas quartzo-feldspathiques se développent dans les ombres de pression du grenat ou se rassemblent dans les charnières de plis, conférant à ces roches un aspect migmatitique (Aït Djafer 1996).

*Les quartzites alumino-magnésiennes*

Elles sont remarquables par la présence de quartz bleuté associé à l'orthopyroxène et la sillimanite, auxquels peuvent s'ajouter la biotite et le grenat qui constituent la paragenèse primaire. Des assemblages secondaires sous forme de couronnes se développent dans divers microdomaines de la roche : cordiérite qui isole la sillimanite de l'orthopyroxène et du quartz et symplectites à orthopyroxène cordiérite dans les sites à grenat-quartz. Dans la région de Tekhamalt des symplectites à saphirine quartz orthopyroxène secondaires, caractéristiques du métamorphisme de très haute température, se développent au détriment du grenat (Rahmani 1992).

La composition chimique réfractaire des granulites alumino-magnésiennes est inhabituelle, ne correspond à aucune composition de roche éruptive ou sédimentaire et pose, comme pour bon nombre de roches métamorphiques, le problème de leur origine. Leur caractéristique géochimique est probablement en relation avec les conditions géologiques particulières de l'Archéen, en particulier la présence durant cette période de ceintures vertes caractérisées par l'abondance de roches basiques et ultrabasiques de type komatiite, mais aussi à des effets d'altérations sous des conditions climatiques particulières. La composition chimique des granulites Al-Mg caractérisée par des teneurs élevées en alumine et magnésium et appauvrie en calcium et sodium avec des teneurs en silice très variables, permet le développement de paragenèses de très haute température comme les associations saphirine-quartz, spinelle-quartz, orthopyroxène-sillimanite-grenat et osumilite. De telles compositions peuvent être dues soit à un processus pré-métamorphique soit syn-métamorphique. Si le caractère réfractaire des granulites Al-Mg est acquis au cours d'une histoire pré-métamorphique, les hypothèses retenues sont : soit (1) une altération hydrothermale de roches basiques ou ultrabasiques sous des conditions de très faibles températures et forte activité de  $H_2O$ ; soit (2) une altération superficielle météorique de roches de diverses sources, conduisant à des paléosols hyperalumineux. Cette altération hydrothermale ou météorique entraînerait le départ du calcium et concentreraient les éléments immobiles comme l'aluminium, le magnésium, le titane mais aussi le chrome, le nickel et le vanadium. Ceci conduirait par exemple à des sédiments riches en kaolinite, montmorillonite ou/et chlorite, à des latérites alumineuses ou bauxites ou à des argiles associées à des évaporites (Vallance 1967; Woodford et Wilson, 1976; Vrana 1975; Warren 1979; Windrin *et al.*, 1984). Si par contre, la composition réfractaire est acquise au cours du métamorphisme, les hypothèses proposées considèrent que les granulites Al-Mg sont: soit (1) des résidus de fusion partielle de pélites après extraction de la partie granitique fondue, la restite qui résulte de ce processus étant ainsi enrichie en éléments

comme Al, Mg, Fe, Mn, Ti et appauvrie en éléments comme Si, Na, K, Ca (Grant, 1968, Lal *et al.*, 1978); soit (2) des roches métasomatiques contemporaines du métamorphisme, à partir de roches d'origine variée et en particulier des ultrabasiques après départ de Si, Ca et enrichissement en K (Herd *et al.*, 1969).

Les éléments majeurs et traces (spécialement les teneurs élevées en Cr, Ni, Co) des granulites Al-Mg de l'In Ouzzal montrent que leur chimie réfractaire particulière est plus compatible avec des sédiments d'origine pré-métamorphique que des restites d'un processus de fusion partielle ou encore de roches métasomatiques contemporaines du métamorphisme (Rahmani 1992; Mouri *et al.*, 1994; Bernard-Griffiths *et al.*, 1996; Boumaza, 1996). Ces sédiments correspondent à un mélange, dans des proportions variables, d'un composant détritique mature (composé essentiellement de quartz) provenant de l'altération d'un protolithe granitique avec un composant extrêmement immature, issu de l'altération hydrothermale de protolithes basiques à ultrabasiques. Ce composant est de type chloritique riche en Al, Mg, Cr, Co, Ni, mélangé probablement à du spinelle riche en chrome (Bernard-Griffiths *et al.*, 1996). Les quartzites Al-Mg, avec des teneurs en  $SiO_2$  qui peuvent atteindre 85 %, correspondent à des compositions de grès. Les zircons hérités présents dans ces roches montrent un spectre d'âge compris entre 2700 et 3200 Ma, ce qui correspond à la mise en place des différentes générations de TTG (Peucat *et al.*, 1996). Ceci indique qu'une partie de la silice présente dans ces roches a une origine détritique et proviendrait de l'altération d'anciens granites archéens de l'In Ouzzal. Plus de 95 % des granulites Al-Mg est représenté par les quatre constituants  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , FeO et MgO. Aussi paraît-il utile pour reconstituer l'origine de ces roches de projeter les compositions chimiques globales en même temps que les minéraux présents avant et contemporains du métamorphisme. La plupart des roches projetées dans le diagramme  $SiO_2 - (MgO + FeO) - Al_2O_3$ , exprimé en moles, occupent un domaine un peu plus alumineux que le joint quartz-chlorite (fig. 4). Les granulites Al-Mg à corindon ou à spinelle se projettent dans le domaine proche de la composition

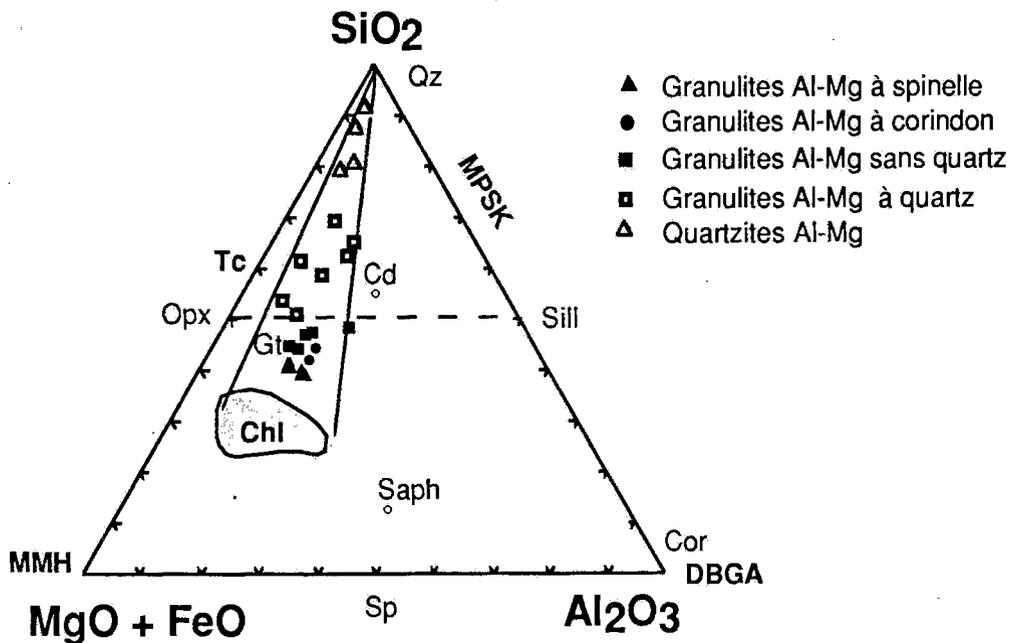


Fig. 4 - Projection dans le diagramme triangulaire  $\text{SiO}_2$  -  $\text{MgO}+\text{FeO}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (exprimés en moles) de minéraux métamorphiques caractéristiques et des compositions globales de granulites Al-Mg

*Ternary plot into plane molar  $\text{SiO}_2$ -  $\text{FeO}+\text{MgO}$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  showing both metamorphic minerals characteristics and whole rock compositions of Al-Mg granulites*

Opx : orthopyroxène (*orthopyroxene*); Sill : sillimanite (*sillimanite*); Qz : quartz (*quartz*); Cd : cordiérite (*cordierite*); Cor : corindon (*corundum*); Sp : spinelle (*spinel*); Saph : saphirine (*sapphirine*). Cette projection montre aussi les associations mineralogiques possibles avant le métamorphisme (*This projection illustrates also the range of possible pre-metamorphic mineral associations.*); Chl : chlorite hydrothermale aluminuse d'après Windrin *et al.*, 1984 (*field of aluminous chlorite from hydrothermal systems after Windrin et al., 1984*); Tc : talc (*talc*); MMH : magnétite, magnésite, hématite (*magnetite, magnesite, hematite*); MPSK : montmorillonite, pyrophyllite, séricite kaolinite (*montmorillonite, pyrophyllite, sericite kaolinite*); DBGA : diasprose, boehmite, gibbsite, alunite (*diasprose, boehmite, gibbsite, alunite*)

du grenat et de la chlorite, sous la ligne qui joint orthopyroxène à sillimanite. Les granulites Al-Mg à quartz se projettent quand à elles au dessus du joint orthopyroxène-sillimanite. Ce diagramme (fig.4) confirme l'hypothèse que les granulites Al-Mg sont d'anciens sédiments contenant de la chlorite associé à des minéraux argileux aluminux et magnésiens comme la montmorillonite et d'un composant aluminopotassique comme la kaolinite ou l'illite (les teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  dans ces roches sont variables mais peuvent atteindre 2%). Les teneurs très élevées en chrome (3960 ppm) et nickel (jusqu'à 1100 ppm) dans les

granulites Al-Mg de l'In Ouzzal est un trait typique des sédiments immatures de l'Archéen précoce (Bernard-Griffiths *et al.*, 1996) qui résultent de l'altération de komatiites et de basaltes magnésiens (Caby *et al.*, 1987). La variabilité du rapport Cr/Ni (0,17 à 0,63) dans les granulites étudiées permet de supposer que les protolithes de ces roches ne sont pas systématiquement liés aux mêmes assemblages mineralogiques de départ, ainsi la présence d'un spinelle détritique peut être évoquée pour expliquer les teneurs élevées en chrome dans certaines quartzites de l'In Ouzzal. L'utilisation de la géochimie des

isotopes de l'oxygène dans les granulites Al-Mg a permis à Rahmani (1992) et à Bernard - Griffiths *et al.*, (1996) de mettre en évidence le rôle des fluides liés à la genèse de ces granulites. Les valeurs de  $\delta O^{18}$  de granulites Al-Mg de la région de Tekhamalt qui varient de +5 à +6 ‰ sont anormalement basses et ne correspondent pas à celle des pélites ordinaires, mais sont comparables à celles des chlorites, produit d'altération hydrothermale en milieu marin de matériaux basiques à ultrabasiques (Rahmani 1992; Bernard -Griffiths *et al.*, 1996). L'interprétation des compositions singulières des granulites Al-Mg se précise par l'étude des isotopes de l'oxygène, ils dérivent donc d'une altération hydrothermale subaquatique de roches basiques et ultrabasiques plutôt que d'une altération météorique aboutissant à des paléosols. Cette hypothèse est confirmée aussi par la disposition spatiale des granulites Al-Mg qui n'est pas toujours liés aux roches basiques et ultrabasiques sur le terrain.

D'autre part les granulites Al-Mg à saphirine d'Ihouhaouene présentent des réactions impliquant le phlogopite à très haute température (900-1000°C) à liquide absent dans le système KFMASH (Mouri *et al.*, 1993; Mouri 1995). L'une des hypothèses proposée par Mouri *et al.* (1996) pour expliquer la stabilité de l'assemblage phlogopite + quartz à très haute température, sans fusion, est la présence de fluor qui stabilise la biotite dans les conditions de faciès granulite extrême comme l'ont montré les travaux expérimentaux de Carrington et Harley (1995). La fusion partielle et le métamorphisme ne sont donc pas responsables au premier ordre du chimisme particulier de ces roches.

#### *Les granulites Al-Fe à grenat-sillimanite et gédrite-grenat-sillimanite*

##### *Les granulites Al-Fe à grenat - sillimanite*

Elles sont bien représentées dans la région d'Ihouhaouene à proximité des gisements de carbonatites (Ouzegane 1987). Elles affleurent de

façon fort variable tantôt en bancs massifs lités qui forment les collines qui dominent le reg d'une dizaine de mètres entre le centre 1 et 2 de carbonatites (Ouzegane 1987), tantôt en bancs discontinus dilacérés en forme de lentilles de 10 à 20 centimètres. Des filonnets quartzo-feldspathiques se disposent dans les charnières des plis, conférant à ces roches un aspect migmatitique (Ait Djafer 1996). En lames minces ces filonnets se composent de quartz en plaquettes à contours suturés associé au plagioclase (An 33) et au feldspath potassique. Le grenat primaire (Mg/Mg + Fe: 0,2 à 0,4) est systématiquement entouré de cordiérite alors que le spinelle en vermicules vert olive (Mg/Mg + Fe: 0,15- 0,39) bourgeonne à partir de la sillimanite et forme des symplectites avec la cordiérite (Mg/Mg + Fe 0,64 à 0,87). Le développement synchrone de la cordiérite et du spinelle s'explique par la déstabilisation du grenat au contact de la sillimanite. Il existe également un spinelle primaire en grands cristaux isolés du quartz par une couronne de cordiérite.

##### *Les granulites à gédrite - grenat - sillimanite*

Elles apparaissent en lentilles centimétriques associées aux granulites Al-Mg à saphirine-orthopyroxène-sillimanite et aux pyrigarnites dans la région d'Amesmessa (Djemai 1996; Ouzegane *et al.*, 1996). L'association gédrite-sillimanite est rare, elle n'existe que dans quelques localités dans le monde reportés dans la littérature internationale (Robinson & Jaffe, 1969; Spear, 1982; Goscombe 1992; Spear 1993). La paragenèse primaire est composée de grenat (Pyrope: 22 à 50 %, almandin : 45 à 75%), gédrite (Mg/Mg + Fe : 0,64 à 0,70), sillimanite, quartz, plagioclase (An 25 à An 42), rutile, ilménite et biotite (Mg/Mg + Fe: 0,77-0,78). Les minéraux appartenant à la paragenèse primaire ne sont pas observés en contact direct et sont toujours séparés par des couronnes ou des symplectites appartenant à la paragenèse secondaire composée de cordiérite-orthopyroxène avec ou sans spinelle. L'orthopyroxène néoformé présente des compositions d'enstatite proche de 47-51% quand il

se développe à partir de la réaction grenat + quartz  $\rightarrow$  orthopyroxène + cordiérite, et il est plus magnésien (enstatite 62-68 %) lorsque la gédrite intervient dans la réaction en présence de quartz. Les symplectites à cordiérite - orthopyroxène - spinelle se développent au contact gédrite-grenat dans les microdomaines de la roche sans quartz. Le grenat est entouré d'une couronne de cordiérite et la sillimanite par des symplectites à cordiérite-spinelle dans les microdomaines sans quartz et sans gédrite, suggérant une réaction du type grenat + sillimanite  $\rightarrow$  cordiérite + spinelle. La cordiérite seule, en couronne, sépare le grenat de la sillimanite et du quartz en l'absence de la gédrite (Ouzegane *et al.*, 1996).

Toutes ces roches présentent des rapport Mg/Mg + Fe inférieurs à 0,40 et cette caractéristique chimique ne permet pas à l'association orthopyroxène + sillimanite et à la saphirine de se développer, par opposition aux granulites Al-Mg (Mg/Mg + Fe > 0,50) caractérisées par l'omniprésence de ces associations.

### *Les marbres*

Les gisements de marbre se réduisent généralement à des bancs isolés et lenticulaires (de quelques mètres à 100 mètres) mais des affleurements de grande étendue sont aussi observés dans la région d'Ihouhaouene, de Roccan et Tekhamalt. Le plus souvent, ils forment des niveaux plissés intercalés dans les quartzites à magnétite et les granulites Al-Mg. Dans la région de Tirek, les marbres jalonnent des zones de cisaillement que l'on peut suivre sur plusieurs kilomètres (Haddoum 1992). Ils sont remarquables par des nodules de phlogopite qui peuvent atteindre plusieurs centimètres et sont recoupés par des syénites datés à 2000 Ma (Semiani 1995). Les marbres de l'In Ouzal présentent une diversité minéralogique, en relation avec une grande variabilité des rapports Mg/Mg + Fe et Al/Al+Si; deux grands groupes peuvent être distingués, les marbres Al-Mg caractérisés par la paragenèse à

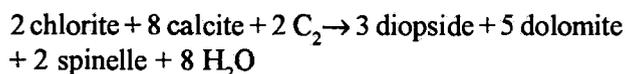
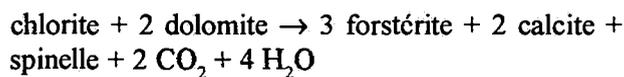
olivine spinelle et les marbres Si-Fe à quartz - grossulaire - andradite - wollastonite (Benyahia, 1996).

### *Les marbres Al - Mg*

A l'échelle de l'affleurement les marbres Al-Mg, se distinguent par un rubanement relativement bien souligné par des niveaux riches en olivine - spinelle qui alternent avec des niveaux blanc crémeux riche en dolomite. Parfois indépendamment du rubanement, on observe des nodules sombres laissés en saillie sur les surfaces d'érosion, de taille variables (2 à 10 centimètres), monocristallins ou polycristallins, composés d'olivine, spinelle ou clinopyroxène qui tranchent sur le fond carbonaté clair de la roche. Chimiquement les paragenèses sont très proches du système CMAS (CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>). La dolomite (Mg/Mg + Fe : 0,90) est de loin le carbonate le plus abondant, qui coexiste avec la calcite dont les teneurs en FeO et MnO atteignent un maximum de 2 %. L'olivine de type forstérite (Fo: 0,86 à 0,95) et le spinelle vert (Mg /Mg+ Fe : 0,80-0,90, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 1,2%) sont en équilibre avec un clinopyroxène (Mg/Mg + Fe: 0,94-0,98) proche du pôle pur diopside. Il peut s'y ajouter le phlogopite (Mg/Mg + Fe : 0,95) riche en fluor (jusqu'à 2%) et exceptionnellement dans la région d'Ilassaka le phlogopite peut être très riche en barium (7 à 12 %). L'amphibole plus rare est de type pargasite (Mg/Mg + Fe : 0,93) avec des teneurs en K<sub>2</sub>O proche de 1,7%. Dans la région de Tekhamalt ces marbres au contact de charnockites (orthogneiss granitique alcalins) développent des diopsidites à anorthite et spinelle (Rahmani 1992). Fourcade *et al.* (1996) interprètent ces roches décarbonatées comme des paléoskarns sur la base de leur teneurs non négligeable en W et Ag (300 ppm et 325 ppb respectivement). Le processus de décarbonatation s'est opéré ainsi avant le métamorphisme granulitique éburnéen, et est probablement contemporain de la mise en place des orthogneiss granitiques alcalins à clinopyroxène autour de 2,65 Ma.

Une mention spéciale doit être accordée à un ensemble de granulites à silicates calciques très rares

puisqu'elles n'affleurent qu'en un point de la région d'Alouki. Il s'agit de roches rubanées remarquables par la présence d'association à musgravite-saphirine-spinelle-phlogopite-corindon-pyrochlore-sheelite-monazite qui alternent avec des niveaux à pargasite-clinopyroxène-musgravite-spinelle-anorthite-pyrochlore et calcite (Benyahia 1996). La musgravite, minéral riche en béryllium (5 à 6%) est très rare, puisqu'on en connaît que cinq gisements au monde. Généralement, ces gisements résultent d'un processus métasomatique en relation avec une intrusion de granite riche en béryllium au contact d'un calcaire dolomitique. Dans les granulites d'Alouki, aucune évidence de métasomatose n'a été révélée. Benyahia (1996) attribue l'origine de ces roches riches en Al, Mg, K, terres rares, uranium, niobium et béryllium à d'anciens paléosols composés d'un mélange dans des proportions variables d'argile de type montmorillonite illite et de carbonate développées à partir de formations carbonatées. L'identification des protolithes a été aussi établi par Fourcade *et al.*, (1996) sur la base de la composition chimique et de la caractéristique isotopique des marbres Al-Mg. La richesse en Al et Mg des marbres peut être due à une addition d'un composant détritique chloritique provenant de l'altération hydrothermale d'une source basique/ultrabasique durant la sédimentation carbonatée. Le sédiment carbonaté composé de proportions variées de calcite, dolomite et chlorite, à la suite du métamorphisme granulitique produit des marbres à forstérite spinelle avec et sans diopside à la faveur des réactions suivantes équilibrées dans le système CMAS (Fourcade *et al.*, 1996):



La serpentine peut aussi être présente comme composant détritique et les argiles de type smectite ou illite contribue aussi à un équilibre de masse en Mg, Al et K. Les signatures isotopiques en oxygène ( $\delta\text{O}^{18} = 7,9 \text{ à } 18,9 \text{ ‰}$ ) et carbone ( $\delta\text{C}^{13} = -0,8 \text{ à } -4,2 \text{ ‰}$ )

très hétérogènes ont montré d'autre part que les marbres de l'In Ouzzal ont conservé leurs caractères pré-métamorphiques. La préservation d'une telle hétérogénéité isotopique implique l'absence de fluides homogénéisateurs et de percolation de  $\text{CO}_2$  d'origine mantellique durant le faciès granulite (Fourcade *et al.*, 1996).

### *Les marbres Si - Fe*

Les marbres siliceux et ferrifères affleurent dans l'Oued Ihouhaouene le long d'un linéament de direction NE-SW de plusieurs kilomètres. Au contact avec les charnockites encaissantes, les marbres présentent parfois des textures de type mylonitique accompagnées d'un allongement des minéraux et de la réduction de la taille des grains, le rubanement des marbres étant toujours parallèle à la foliation des charnockites. La minéralogie des marbres Si-Fe est caractérisé par la présence de wollastonite qui coexiste avec la calcite et le quartz. Le clinopyroxène de type hedenbergite est riche en manganèse (1,3 à 10 %) il est en équilibre avec un grenat qui est une solution solide entre le grossulaire (40 à 99 %) et l'andradite (1 à 60 %), pauvre en pyrope (< 0,5 %) et almandin (0,1 à 8 %). Il peut s'y ajouter la scapolite qui contient jusqu'à 1% de chlore, le feldspath potassique riche en barium (environ 3%) et plus rarement la margarite et la sphalérite. La magnétite, le sphène et l'apatite sont des minéraux accessoires. La présence de scapolite riche en Na et Cl suggère la présence de métaévaporites associées aux formation carbonatées avant le métamorphisme (Benyahia 1996).

### *Les quartzites à magnétite*

Les principaux affleurements de quartzites à magnétite sont ceux du massif d'Alouki où ils sont impliqués dans des plis d'échelle cartographique, que l'on peut suivre sur plus de 20 kilomètres. On les retrouve aussi dans la région d'Ihouhaouene et Tekhamalt en niveaux plus ou moins continus de 1 à 50 mètres répétés par des plis isoclinaux. Leur

association aux marbres et aux granulites aluminomagnésiennes est pratiquement constante, mais on les trouve dans la région d'Ihouhaouene en contact direct de fénites (centre 1 et 2 de carbonatites, Ouzegane 1987) ou de charnockites. Leur minéralogie est généralement simple, composée de quartz et de magnétite. La magnétite est soit disséminée dans la roche, soit rassemblée en lits de 1 à 10 centimètres d'épaisseur. Ces roches sont parfois très déformées avec des niveaux fins de pseudotachyllite. Il existe aussi des quartzites à magnétite à minéralogie plus variée, remarquable par les associations à hercynite-quartz, corindon-quartz et orthoferrosilite-almandin.

#### *Les quartzites à magnétite - orthopyroxène*

Elles affleurent exclusivement dans la région de Tekhamalt à proximité de Tekhamalt Tan Afella, Tan Attaram et Khanfous en petits niveaux métriques intercalés dans les granulites Al-Mg et marbres. Les zones de cisaillement sont soulignées par la réduction de la taille des grains de plus en plus intense jusqu'aux pseudotachyllites. Dans les zones non déformées, l'orthopyroxène (Mg/Mg + Fe : 0,30 à 0,45) en grands cristaux polygonaux présente des points triples souligné par le grenat. Dans les zones de cisaillement, l'orthopyroxène de forme sigmoïdale montre des macles de déformation soulignées parfois par des granules de magnétite. Le spinelle très rare (Mg/Mg + Fe : 0,17) est observé en inclusion dans la magnétite. La formation du grenat (Mg / Mg + Fe : 0,15-0,17) en couronne autour de la magnétite peut s'expliquer par une réaction entre le spinelle (solution solide spinelle- magnétite à haute température) et le quartz.

#### *Les quartzites à magnétite - corindon*

Ce sont des roches très rares, elles affleurent dans la région d'Ihouhaouene au contact de carbonatite-fénites du centre 1, et n'ont comme équivalent que les formations ferrifères du massif de Morin au Canada

(Martignole, 1975) et celles de Norvège (Krogh 1977). Ces quartzites montrent les associations corindon-quartz-magnétite-hercynite (Mg/Mg + Fe: 0,2 à 0,3), quartz-magnétite et almandin (Mg/Mg+Fe: 0,3-0,4) et quartz- magnétite. Deux types de corindon sont reconnus, le premier ( $Fe_2O_3$  : 0,5 à 1,1 %) en grands cristaux (1 centimètre de long) est primaire et il est en équilibre avec le quartz et la magnétite; le second ( $Fe_2O_3$  : 1,2 à 2,2 %) associé à magnétite et chlorite, résulte de la déstabilisation de l'association hercynite - magnétite - quartz (Guiraud *et al.*, 1996). La sillimanite est rare et elle est en inclusion dans le quartz ou la magnétite. Dans la littérature l'association corindon - quartz était toujours considérée comme métastable mais dans l'In Ouzzal il n'est pas exclu que cette association ait été stable dans les conditions du faciès granulite extrême (Guiraud *et al.*, 1996).

#### *Les quartzites à magnétite - hercynite - quartz*

Elles sont moins rares que les roches précédentes, elles forment des niveaux discontinus dans le reg d'Ihouhaouene, et à Alouki où elles sont associées à des séries paradérivées. Le développement du grenat et de la sillimanite en couronne ou en symplectites s'explique par une réaction du type hercynite + magnétite + quartz → almandin + sillimanite. Les zircons détritiques de l'une de ces roches (Inh 635, Ihouhaouene) montrent des structures de croissances avec des coeurs anciens et des couronnes formées au cours du faciès granulite à 2000 Ma. Les coeurs hérités des zircons indiquent des âges qui s'étalent entre 3100 et 2700 Ma (Helal 1987; Peucat *et al.*, 1996). Ces données radiochronologiques indiquent que le dépôt de la série supracrustale se déroule probablement après 2700 Ma (Peucat *et al.*, 1996).

### EVOLUTION PARAGENETIQUE ET CONDITIONS DU METAMORPHISME

Les granulites de l'In Ouzzal, sont particulièrement adaptées pour la reconstitution de l'histoire métamor-

phique en relation avec les variations de pression, de température, de  $X_{H_2O}$  et des compositions chimiques des phases minérales.

L'estimation des conditions de pression et de température a été entreprise à partir des granulites Al-Mg (Ouzegane 1987; Kienast et Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992; Aït Djafer 1996; Mouri *et al.*, 1996, Ouzegane et Boumaza 1996), des granulites Al-Fe (Aït Djafer 1996, Djemaï 1996, Ouzegane *et al.*, 1996), des quartzites à corindon - magnétite - quartz (Guiraud *et al.*, 1996), des granulites à silicates calciques (Benyahia 1996) et des pyrigarnites (Ouzegane 1987; Kienast et Ouzegane 1987; Djemaï 1996). C'est dans les granulites alumino-magnésiennes que la séquence des réactions est la plus complète et qu'un métamorphisme prograde a pu être mis en évidence dans les conditions du faciès granulite (Ouzegane 1987; Kienast et Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992, Ouzegane et Boumaza 1996). Bien qu'un continuum existe dans la succession des paragénèses, cette séquence peut être subdivisée en deux stades majeurs, un stade prograde réalisé à une pression de 10-11 Kbar caractérisé par une élévation de la température de 800°C à 1050°C, suivi d'un stade en décompression de 9 à 6 kbar à une température proche de 900°C (Ouzegane 1987, Bertrand *et al.*, 1992; Ouzegane et Boumaza 1996). Le stade prograde qui permet d'atteindre les conditions d'un métamorphisme de très haute température est caractérisé par la croissance exagérée d'un certain nombre de minéraux et le développement d'associations caractéristiques comme saphirine - quartz. Le métamorphisme rétrograde en décompression est caractérisé par la formation de symplectites de plus en plus fines à cordiérite, saphirine, orthopyroxène et spinelle.

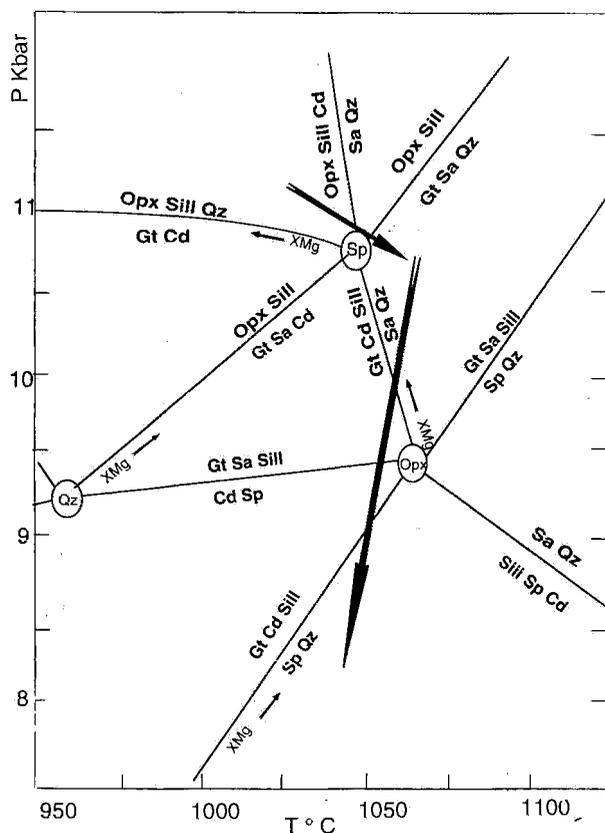
### Le stade prograde

Ce stade précoce, dans le système FMAS, est caractérisé par l'équilibre des paragénèses primaires tel que orthopyroxène - corindon - grenat, orthopyroxène - corindon, grenat - spinelle, grenat - spinelle - corindon, grenat - quartz - sillimanite - orthopy-

roxène, orthopyroxène - sillimanite et orthopyroxène - sillimanite - quartz, avec plus ou moins de biotite, feldspath potassique, plagioclase et rutile dans les systèmes chimiques plus complexes. Dans les granulites Al-Mg à corindon ou à spinelle, les réactions les plus précoces permettent le développement de saphirine en grands cristaux (1 à 10 centimètres). Le corindon est séparé de l'orthopyroxène par une double couronne, la saphirine qui blinde le corindon et la sillimanite suggérant une réaction du type orthopyroxène + corindon  $\rightarrow$  saphirine + sillimanite (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992). A 9 kbar l'association hypersthène - corindon - saphirine - sillimanite fournit des températures de 795°C pour des assemblages magnésiens et de 850°C pour celles plus riches en fer (Bertrand *et al.*, 1992) ce qui semble indiquer une augmentation de 55°C de la température pour des conditions isobariques. Toutes les réactions progrades se caractérisent par une croissance des minéraux et des textures d'équilibre avec des points triples. Parmi les réactions progrades très rares, identifiées uniquement dans l'In Ouzzal (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992) et qui peuvent se poursuivre jusqu'à la disparition complète du corindon ou du spinelle, nous avons les réactions du type grenat + corindon + spinelle  $\rightarrow$  saphirine et grenat + spinelle  $\rightarrow$  saphirine + orthopyroxène.

L'évolution des paragénèses des granulites Al-Mg à quartz de l'In Ouzzal peut être représentée dans la grille pression-température établie d'après les travaux de Hensen et Harley (1990) et les études expérimentales de Bertrand *et al.*, 1991, dans le système FMAS à  $fO_2$  réduite (fig. 5).

Dans les granulites Al-Mg à quartz, la réaction la plus précoce est du type grenat + quartz  $\rightarrow$  orthopyroxène + sillimanite. Les conditions de cristallisation de ce stade précoce sont estimées aux environs de 9,5 - 11,5 kbar et 1000°C, à partir de la calibration de l'équilibre grenat - hypersthène - sillimanite - quartz comme géobaromètre (Bertrand *et al.*, 1992). Le pic thermique du métamorphisme est matérialisée par l'association saphirine - quartz, à 10 kbar et pour des conditions de  $fO_2$  faibles. Bertrand



**Fig. 5** - Grille pétrogénétique partielle dans le système FMAS et à faible fugacité d'oxygène d'après les travaux de Hensen et Harley (1990) modifiée suite aux contraintes expérimentales de Bertrand *et al.*, 1991. Cette grille montre le cheminement pression température basé à la fois sur les réactions univariantes observées et les conditions P-T estimées sur les granulites Al-Mg à quartz de très haute température de l'In Ouzzal. Les réactions n'impliquant pas la sillimanite ne sont pas représentées pour plus de clarté du diagramme. Le vecteur d'accroissement de XMg (Mg / Mg + Fe) le long des courbes univariantes dans les phases minérales est montré.

*A partial petrogenetic grid for the FMAS system at low  $f_{O_2}$  from Hensen and Harley (1990) modified after the experimental constraints of Bertrand *et al.*, 1991. This grid shows the preferred P-T path based on reaction textures and P-T estimates on the ultrahigh-temperature quartz Al-Mg granulites from the In Ouzzal. Reaction curves not involving sillimanite have been left out for clarity. Vector of increasing XMg (Mg / Mg + Fe) in phases is also shown.*

*et al.*, (1991) montrent que cette association est stable au dessus de 1050°C. Cette paragenèse dans les granulites étudiées peut se former selon une réaction univariante dans le système FMAS du type orthopyroxène + sillimanite → grenat + saphirine + quartz (Bertrand *et al.*, 1992, Ouzegane et Boumaza 1996, fig.5). Les symplectites à orthopyroxène - quartz - saphirine autour du grenat et la réaction divariante orthopyroxène + sillimanite → saphirine + quartz n'ont été observées que dans les quartzites de Tekhamalt (Rahmani 1992; Bertrand *et al.*, 1992). Sur la base de la grille P-T (fig.5), toutes les associations à saphirine+quartz apparaissent du côté droit du point invariant [Sp] et reflètent les plus hautes températures atteintes dans les granulites.

Durant la succession des réactions précoces progrades, le coefficient de distribution Kd entre le grenat-hypersthène ( $(X_{Mg}^{Hy} X_{Fe}^{Gt}) / (X_{Fe}^{Hy} X_{Mg}^{Gt})$  : 2,06 à 1,99) et la saphirine-hypersthène ( $(X_{Mg}^{Sa} X_{Fe}^{Hy}) / (X_{Fe}^{Sa} X_{Mg}^{Hy})$  : 2,00 à 1,30) décroît de façon significative alors que la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de l'orthopyroxène s'accroît en sens inverse de celui de la saphirine (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992). Ces observations, combinées aux calculs thermodynamiques et aux contraintes topologiques, indiquent clairement que le stade à haute pression (10-11 Kbar) s'accompagne d'un accroissement sensible de la température (de 800 à 1050°C) sous des conditions isobariques (Bertrand *et al.*, 1992; Ouzegane et Boumaza 1996). Au cours de la formation de l'association saphirine + quartz, la pression et la température sont extrêmes comme cela est montré par la faible valeur du Kd entre l'hypersthène et le grenat (Kd : 2,06 à 1,99), la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans l'orthopyroxène atteint 11,8 % et celle du pyrope dans le grenat 50-55 %. La thermométrie basée sur l'équilibre d'échange Fe-Mg et sur la solubilité de l'alumine entre le grenat et l'orthopyroxène fournit des températures proches de 970 ± 70°C° à 10 ± 1,5 Kbar ce qui est compatible avec l'association saphirine-quartz (Bertrand *et al.*, 1992).

### Le stade de décompression

Toutes les associations primaires et intermédiaires développées au cours du stade prograde sont destabilisées au cours d'une évolution métamorphique avec une baisse sensible de la pression de 9 à 6 kbar (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992). Les minéraux caractéristiques de cette dernière étape sont des symplectites à cordiérite - orthopyroxène, cordiérite-saphirine, cordiérite - spinelle, cordiérite-orthopyroxène - saphirine et cordiérite-orthopyroxène - spinelle.

Dans les granulites Al-Mg à quartz, l'orthopyroxène, la sillimanite et le quartz sont systématiquement isolés par une couronne de cordiérite suggérant une réaction du type orthopyroxène + sillimanite + quartz → cordiérite; cette réaction se produit pour les associations magnésiennes à une pression proche de 9 kbar et une température de 900°C (Bertrand *et al.*, 1992). Dans les systèmes chimiques plus riches en fer, les réactions impliquent le grenat, comme grenat + sillimanite → saphirine + cordiérite, qui apparaît pour des grenats dont la teneur en pyrope est proche de 51 %. L'une des dernières étapes de l'histoire métamorphique des granulites alumino - magnésiennes se traduit par la cristallisation de symplectites à cordiérite - spinelle au détriment de la saphirine, du grenat et de la sillimanite (fig.5). Exceptionnellement dans certaines granulites de la région d'In Hihaou, dans les microdomaines de la roche les plus riches en fer, l'association spinelle ( $Mg/Mg + Fe = 0,33$ ) - quartz apparaît à la suite de la réaction univariante grenat + sillimanite + cordiérite → spinelle + quartz et indique que la décompression s'est déroulée à une température très élevée (> 900°C, Ouzegane et Boumaza, 1996). Il y a de grandes chances par conséquent pour que les températures estimées à partir des géothermomètres classiques basés sur les réactions d'échange entre Fe et Mg, comme par exemple les couples cordiérite-grenat, biotite - grenat et orthopyroxène - grenat ne reflètent pas des conditions d'équilibre métamorphique mais des conditions de blocage des échanges des éléments qui peuvent se

poursuivre jusqu'à des températures de 700°C.

L'étude des granulites à gédrite - sillimanite-grenat - quartz de la région d'Amesmessah permet d'apporter des précisions fondamentales à ces premières données et indiquent que les textures en symplectites d'orthopyroxène - cordiérite - spinelle ou orthopyroxène - cordiérite se sont réalisées par décompression depuis un pic estimé à 7-9 kbar et 850-900°C jusqu'à 3,5-4,5 kbar et 700-800°C (Ouzegane *et al.*, 1996). Cette évolution pression-température est aussi compatible avec celle des lentilles de pyrigarnites qui montrent des conditions précoces de  $10 \pm 1,5$  kbar et  $900 \pm 70$ °C et finales de 5-6 kbar et  $750 \pm 70$ °C (Ouzegane, 1987; Kienast et Ouzegane 1987; Djemai 1996).

### TECTONIQUE EBURNEENNE DE L'IN OUZZAL

Grâce à des conditions d'affleurement exceptionnelles, l'unité granulitique de l'In Ouzzal offre de magnifiques exemples de déformation de roches dans les domaines profonds à de très hautes températures. Haddoum (1992) et Haddoum *et al.* (1994) distinguent deux phases de déformation d'âge Eburnéen contemporaines du métamorphisme granulitique, la première D1, est compressive, la deuxième D2 est distensive :

- La phase compressive affecte un protolithe d'âge archéen (orthodérivé et paradérivé); elle se manifeste par des cisaillements ductiles, une foliation F1, des plis de direction NE-SW ou E-W et un boudinage intense des formations surtout paradérivées. Dans le Nord de l'In Ouzzal, les structures plissées dominent alors que dans le Sud les structures en dômes de charnockites généralement sigmoïdes sont caractéristiques. L'allure compliquée des plissements et les structures d'interférences entre plusieurs directions, rappelant les plis d'écoulement, témoignent de leur caractère profond à la base de la croûte continentale. A In Hihaou, les plis sont semblables, de faible amplitude alors qu'à Alouki les plis sont plus

irréguliers et lâches, formant des structures d'interférences ovoïdes. A Tekhamalt les plis sont de plus grande amplitude, régulièrement orientés NE-SW et accompagnent les cisaillements auxquels ils sont presque toujours parallèles. Dans la région d'Amesmess, la trajectoire de la foliation montre des structures en dômes, occupés par des charnockites alors que les formations paradérivées (marbres à olivine-spinelle-phlogopite) sont visibles dans de petits bassins. Les dômes dans cette région sont limités par des zones de cisaillement NE-SW à NNE-SSW qui se parallélisent avec la foliation. Aux extrémités des dômes de charnockites, les formations paradérivées quartzitiques sont plissées avec parfois des plis en "blagues à tabac". La foliation généralement sub-verticale parallèle à la lithologie, témoigne de phénomène de transposition; la linéation d'étirement montre des plongements très variés, mais le plus souvent importants (70 à 90°).

L'histoire de la déformation globalement continue montre plusieurs étapes, la déformation qui était au début à dominante coaxiale (cisaillement pur) entraînant la formation de boudins et du rubanement évolue plus tard vers une déformation rotationnelle (cisaillement simple) avec une composante aplatissement très importante (Haddoum 1992). La phase compressive D1 qui se manifeste par une importante elongation qui donne lieu à des boudinages est contemporaine du métamorphisme granulitique de haute pression prograde. Les critères de la déformation ductile à composante rotationnelle sont évidents à l'échelle de la lame mince. Les microstructures témoignent de l'importance du boudinage à chaud marqué par l'étirement des queues dissymétriques des porphyroblastes de grenat. L'hypersthène comme le grenat, conserve les vestiges d'une foliation interne sigmoïde qui est oblique par rapport à la foliation F1. La phase distensive D2 marque un relâchement relatif des contraintes et est contemporaine de la décompression (9 à 6 kbar) en régime granulitique qui se matérialise par l'apparition de symplectites par le biais de réactions interminérales mettant en jeux les minéraux primaires de plus haute pression (Haddoum 1992).

## CONCLUSION

Les reliques de roches archéennes se retrouvent dans tous les continents et on reconnaît deux types majeurs d'associations lithologiques (Taylor et Mc Lennan 1985):

1- des terrains de métamorphisme de bas degré composés de granites-ceintures vertes avec deux périodes de formation à 3600-3200 et à 2800-2600Ma.

2- des terrains de métamorphisme de haut degré caractérisés par des granulites qui indiquent des températures de l'ordre de 700-1000°C et 4-12 kbar qui correspondent à des épaisseurs de croûte de l'ordre de 20 à 50 km dans des conditions de très faibles activités de H<sub>2</sub>O. Ces terrains archéens (3700-2600 Ma) montrent de nombreuses variétés de roches dominées par des orthogneiss gris (de type tonalite, trondhjémite, granodiorite) qui contiennent parfois des intrusions d'anorthosites, des lentilles de roches basiques et ultrabasiques, mais aussi des méta-sédiments composés de marbres, métapélites et quartzites à magnétite. La déformation contemporaine du métamorphisme et qui parallélise les différentes formations compliquent les relations entre les roches.

Les témoins de croûte océanique à l'Archéen, en Afrique Australe par exemple (Condie 1981), sont représentés par des ceintures vertes caractérisées par une série bi-modale (komatiite-tholéite) à caractère océanique (présence de pillow lavas) et d'une série calco-alcaline avec des andésites qui s'apparente à des produits d'une subduction mais qui s'en distingue par des caractéristiques géochimiques. Les sédiments sont constituées de grauwackes, d'argilites, de conglomérats et de dépôts chimiques représentés par des cherts et des formations carbonatées et ferrières rubanées. Ces ceintures vertes affectées d'un métamorphisme de type schiste vert se présentent fréquemment en synformes et sont environnées de granites en dômes. Les granites sont représentés par une lignée précoce tholéitique à tonalite - trondhjémite suivie d'une lignée calco - alcaline granodiorite - granite potassique.

Les terrains archéens de haut grade de type gneiss gris-granulites se distinguent nettement des ceintures vertes de bas degré de métamorphisme par la nature de leur métasédiments. En effet les ceintures vertes, sont caractérisées par des sédiments de type grauwwacks avec des turbidites, alors que les terrains granulitiques sont représentés par des quartzites, des marbres et des pélites qui évoquent une sédimentation dans des bassins peu profonds. Cette importante différence dans la sédimentation exclut l'hypothèse qui fait des terrains granulitiques des équivalents plus profonds des ceintures vertes (Taylor et Mc Lennan 1985).

La limite entre l'Archéen et le Protérozoïque se situe aux environs de 2500 Ma : c'est une limite très importante, elle marque, en effet suivant les idées classiques, la transition entre une tectonique archéenne dominée essentiellement par des mouvements verticaux par ascension de diapirs de granites et subsidence progressive du volcanisme tholéïtique basique et ultrabasique (Anhaeusser 1981; Bouhalier *et al.*, 1993) et une tectonique tangentielle au Protérozoïque généralement liée à une subduction continentale suivie d'une collision à l'échelle de la lithosphère à l'image de la tectonique des plaques des temps modernes. Cependant de nombreux exemples de tectonique tangentielle à l'Archéen sont connus comme dans le bouclier du Groenland (Mc Gregor *et al.*, 1991), en Afrique du Sud (Van Reenen *et al.*, 1990), au Canada (Iddon *et al.*, 1993), en Australie (Bickle *et al.*, 1980) et dans le bouclier Baltique, à l'Est de la Finlande (Jégouzo et Blais, 1991). Il est aussi probable que le changement du régime tectonique ne soit pas synchrone dans tous les continents, sinon on ne pourrait à la fois observer la nature ordonnée du volcanisme et du plutonisme dans des sites particuliers (arcs insulaires, bassins d'arrière arcs...) et les styles tectoniques dominés par des cisaillements. Il est admis que le flux de chaleur à l'Archéen devait être trois fois supérieur à l'actuel, comme en témoigne l'abondance du volcanisme et en particulier la présence des komatiites, laves ultrabasiques émises à des températures de 1600°C et produites par 45-50 % de fusion du manteau.

L'étude des granulites archéennes comme celles de l'In Ouzzal nous permet de rechercher les caractères magmatiques, structuraux et métamorphiques régnant à cette époque et de discuter le rôle de la tectonique des plaques au Précambrien lors de la croissance des continents.

Les roches les plus anciennes datées dans l'In Ouzzal sont des orthogneiss tonalitiques et trondhjémiques provenant de la région de Tin Tchik Tchik et Roccan qui ont révélé des âges modèles en Nd de 3500-3200 millions d'années (Peucat *et al.*, 1996) et sont similaires aux gneiss gris archéens, classiquement interprétés comme issus de la fusion partielle d'un protolithe de type amphibolite à grenat. Leurs caractères géochimiques caractérisés par des rapports  $K_2O/Na_2O < 0,5$  et des anomalies négatives en Ta, Nb, Y, Yb sont comparables aux suites tholéïtiques d'arcs qui à première vue ressemblent à celles des orogènes récents. Cependant comme le soulignent Taylor *et al.* (1985), la recherche des sites tectoniques du magmatisme et volcanisme archéen par la géochimie ne peut démontrer à elle - seule, que la tectonique des plaques était opérante ou non à cette époque. Les granulites basiques et ultrabasiques interstratifiées avec les métasédiments de l'In Ouzzal correspondent à d'anciennes komatiites et basaltes tholéïtiques magnésiens similaires aux suites magmatiques trouvées dans les ceintures vertes archéennes, mais aussi à des protolithes calco-alcalins de type andésite potassique (Peucat *et al.*, 1996). Le dépôt des métasédiments a eu lieu autour de 2700-2650 Ma (Bernard-Griffiths *et al.*, 1996; Peucat *et al.*, 1996). En ce qui concerne les protolithes des granulites alumino-magnésiens, ce sont d'anciens sédiments anormaux composés d'un mélange de matériel détritique provenant de roches acides de type granitique et de matériel extrêmement immature issue de l'altération hydrothermale de roches basiques et ultrabasiques. Les marbres à olivine-spinelle associés et déposés dans des bassins peu profonds présentent aussi un composant initial chloritique issu de l'altération hydrothermale de roches basiques-ultrabasiques bien démontrée par les isotopes de l'oxygène anormalement bas dans toutes ces roches

(Fourcade *et al.*, 1996). Les métasédiments de l'In Ouzzal ont donc acquis leurs caractéristiques chimiques avant le métamorphisme et témoignent de l'existence, même si elle est indirecte, de ceintures vertes associées à une série de tonalite-trondhjémite comme dans les autres régions dans le monde à l'Archéen. Vers 2650 Ma se sont mis en place des granites alcalins similaires en composition aux granites des rifts, dans la croûte continentale supérieure. Ils dérivent probablement de la fusion de la croûte continentale formée à 3300 Ma dans un régime de tectonique extensive (Peucat *et al.*, 1996). Vers 2500 Ma se mettent en place des granodiorites et monzogranites appartenant à une série calco-alcaline issue de la fusion partielle durant un épaissement crustal à la suite probablement d'une collision intracontinentale. Cet événement est contemporain d'un métamorphisme de haut grade, puisque les protolithes archéens sont affectés par une fusion partielle dans les conditions de la croûte moyenne ou inférieure, associé à une tectonique compressive qui affecte l'ensemble orthodérivé (tonalites, trondhjémites et granites alcalins) et sa couverture métasédimentaire, provoquant la formation de dômes et de bassins.

La structuration majeure et le métamorphisme granulitique décrits dans cette publication, s'effectue à 2000 Ma, et correspond à une tectonique tangentielle en conditions granulitiques extrêmes (1050°C), tectonique liée à des chevauchements crustaux majeurs. La structuration observable de cet ensemble est uniquement éburnéenne (foliation S1 synmétamorphisme granulitiques, cisaillements puis replissements de la foliation S1 tardi - granulitique, Haddoum 1992; Haddoum *et al.*, 1994). Cette structure initiale a été reprise par des plis déversés vers le NW, puis par des cisaillements décrochants sénestres d'orientation NE-SW, le tout dans un contexte rétrograde mais toujours granulitique. La fusion partielle très limitée au cours de cette période, qui a généré quelques rares monzogranites à cordiérite peut s'expliquer par le fait que la croûte continentale profonde pourrait avoir déjà été déshydratée au cours d'un premier métamorphisme vers 2500 Ma. Les paragenèses de ce premier métamorphisme ne sont

pas reconnues et ont été probablement complètement effacées au cours du métamorphisme éburnéen en raison de son intensité. En effet, les réactions minéralogiques successives reflètent le caractère continu d'un seul et même événement métamorphique à l'Eburnéen (Ouzegane 1987; Bertrand *et al.*, 1992, Ouzegane et Boumaza 1996). Les granulites de l'In Ouzzal montrent un cheminement horaire avec une augmentation de la température à pression constante (800 à 1050°C, 10 - 11 kbar) suivie d'une évolution isotherme avec baisse sensible de la pression (9 à 5 Kbar). Ce modèle s'applique aux chaînes métamorphiques formées par collision continentale avec apport de chaleur par mise en place de magmas (anorthosites ou ultrabasiques) à la base de la croûte, suivi d'une remontée extrêmement rapide en relation avec des cisaillements décrochants.

**Remerciements :** Cette publication est une contribution au projet «cartographie et synthèse géologique du Hoggar» entre l'O.R.G.M., l'I.S.T, U.S.T.H.B. et les Universités françaises (Paris 7, Rennes I, Montpellier et Nancy). Nous exprimons notre reconnaissance à R. CABY qui par ses critiques et ses suggestions a permis d'améliorer la dernière version du manuscrit. Nous tenons à exprimer notre gratitude à L. BITAM et B. TOUAHRI pour tous les encouragements qu'il nous ont prodigués pour la réalisation de cette synthèse et pour avoir contribué efficacement au succès des missions dans le Hoggar. Nous remercions aussi tous ceux qui par leurs travaux scientifiques en France ou en Algérie ont permis de mieux comprendre la géologie fascinante de l'In Ouzzal.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aït Djafer, S., 1996. Relation cristallisation fusion et cheminement pression température dans les migmatites de l'In Ouzzal (NW Hoggar). *Magister U.S.T.H.B.*
- Allègre, C., Caby, R., 1972. Chronologie absolue du Précambrien de l'Ahaggar occidental. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 275, 2095-2098.
- Anhaeusser, C.R., 1981. Geotectonic evolution of the Archean successions in the Barberton Mountain land. In *Precambrian Plate Tectonics (Kroner A., Ed.) Elsevier*, 137-160.
- Attoum, A., 1983. Etude géologique et structurale des mylonites Pan-africaines et des minéralisations aurifères associées dans le secteur de Tirek (Hoggar, Algérie). *Thèse 3ème cycle Montpellier*, 98 p.

- Audibert, N., Hensen, B.J., Bertrand, P., Kienast, J.R. and Ouzegane, K.** 1993. Cordierite- K-feldspar-quartz-orthopyroxène symplectite from southern Algeria : New evidence for osunilite in high grade metamorphic rocks. *Mineralogical Magazine*, 57, 354 - 357.
- Ben Othman, D., Polvé, M. and Allegre, C.J.,** 1984. Nd-Sr isotopic composition of granulites and constraints on the evolution of the lower continental crust. *Nature*, 307, 510-515.
- Benyahia O.,** 1996. Les granulites à silicates calciques du môle In Ouzzal (NW Hoggar): Minéralogie géochimie et relation de phases. *Magister, U.S.T.H.B.*
- Bernard-Griffiths, J., Fourcade, S., Kienast, J.R., Peucat, J.J., Martineau, F., and Rahmani, A.** 1996. Geochemistry and isotope (Sr, Nd, O) study of Al-Mg granulites from the In Ouzzal Archaean block (Hoggar, Algeria). *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 709 - 724.
- Bertrand, P., Ellis, D.J. and Green, D.H.,** 1991. The stability of sapphirine - quartz and hypersthene - sillimanite - quartz assemblages: an experimental investigation in the system FeO - MgO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -SiO<sub>2</sub> under H<sub>2</sub>O , H<sub>2</sub>O - CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 108, 55 - 71.
- Bertrand, P., Ouzegane, K. and Kienast, J.R.** 1992. P-T-X relationships in the precambrian Al-Mg rich granulites from In Ouzzal, Hoggar, Algeria. *Journal of Metamorphic Geology*, 10, 17 - 31,
- Bickle, K., M.J., Battenay, L.F., Boulter, C.A., Groves, D.I., and Morant, P.,** 1980. Horizontal tectonic interaction of the Archaean gneiss and greenstones, Pilbara Block. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 84, 25 - 35.
- Bouhalier, H., Choukroune, P. and Ballèvre, M.,** 1993. Diapirism, bulk homogeneous shortening and transcurrent shearing in the Archaean Dharwar craton : the Holenarsipur area, southern India. *Precambrian Research*, 63, 43 - 58.
- Boumaza, S.** 1996. Pétrologie d'un nodule migmatitique à sapphirine d'In Hihou (In Ouzzal, Hoggar occidental): diffusion chimique et comparaison avec les granulites Al-Mg de l'encaissant. *Magister, U.S.T.H.B.*
- Caby, R.,** 1970. La chaîne Pharusienne dans le NW de l'Ahaggar (Central Sahara, Algérie) : sa place dans l'orogénèse du Précambrien supérieur en Afrique. Thèse de Doctorat d'Etat, Montpellier et 1983, *Publication de la Direction des Mines et de la Géologie*, Alger, 47, 289 p.
- Caby, R., Dupuy, C., Dostal, J.** 1987. The very beginning of the Ligurian Tethys: Petrological and geochemical evidence from the oldest ultramafite-derived sediments in Queyras, Western Alps (France). *Eclogae Geol. Helv.*, 80, 223-240.
- Caby, R.** 1996. A review of the In Ouzzal granulitic terrane (Tuareg shield, Algeria): its significance within the Pan-African Trans-Saharan Belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 659 - 666.
- Carrington, D.P. and Harley, S.L.** 1995. Partial melting and phase relations in high grade metapelites: An experimental petrogenetic grid in the KFMAH system. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120, 270 - 291.
- Condie, K.C.,** 1981. Archaean Greenstone Belts. Elsevier.
- Djemai, S.,** 1996. Les pyrigarnites et les granulites alumineuses d'Amesmess (Môle In Ouzzal, Hoggar) : Relations de phases et déformation. *Magister U.S.T.H.B.*
- Ferrara, G. and Gravelle, M.** 1966. Radiometric ages from western Ahaggar (Sahara) suggesting an eastern limit for the west African craton. *Earth and Planetary Science letters*, 1, 319 - 324.
- Fourcade, S., Kienast, J.R., and Ouzegane, K.,** 1996. Metasomatic effects related to channeled fluid streaming through deep crust : fenites and associated carbonatites (In Ouzzal Proterozoic granulites, Hoggar, Algeria). *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 763 - 781.
- Giraud, P.** 1961. Les charnockites et les roches associées au suggarien à faciès In Ouzzal (Sahara central). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 3, 165 -170.
- Goscombe, B.,** 1992. High grade reworking of Central Australian granulites : Metamorphic evolution of the Arunta complex. *Journal of Petrology*, 33, 919 - 962.
- Grant, J.A.,** 1968. Partial melting of common rocks as possible source of cordierite-antophyllite bearing assemblages. *American Journal of Science*, 266, 908 - 931.
- Guiraud, M., Kienast, J.R. and Ouzegane, K.** 1996. Corundum-quartz bearing assemblage in the Ihouhaouene area (In Ouzzal, Algeria). *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 755-761.
- Haddoum H.,** 1992. Etude structurale des terrains archéens du môle In Ouzzal (Hoggar occidental, Algérie). *Thèse de Doctorat d'état U.S.T.H.B.*, 214 p.
- Haddoum, H. Choukroune, P. and Peucat J.J.** 1994. Structural evolution of the Precambrian In Ouzzal massif (Central Sahara, Algeria). *Precambrian Research*, 65, 155-166.

- Helal B., 1987.** Etude pétrographique et géochronologique d'une quartzite ferrifère de l'archéen du bouclier Touareg (In Ouzzal, Algérie). *D.E.A PARIS VI*, 76 p.
- Hensen, B.J. and Harley, S.L., 1990.** Graphical analysis of P-T-X relations in granulite facies metapelites. In Ashworth J.R., Brown M. (eds) High-temperature metamorphism and crustal anatexis. *Unwin Himan, London*. 19 - 56.
- Herd, R.K., Windley, B.F., and Ghisler, M. 1969.** The mode of occurrence and petrogenesis of the sapphirine-bearing and associated rocks of west Greenland. *Gronland Geologisk Undersogelse*, 24, 1 - 44.
- Jensen, L.S. et Pyke, D.R. 1982.** Komatiites in the Ontario portion of the Abitibi belt. In Arndt N.T., and Nisbet E.G. (eds) *Komatiites*. p. 147 - 157.
- Jégouzo, P. and Blais, S., 1991.** Thrusting, crustal thickening and granite formation in the Archaean of eastern Finland. *Terra Abstracts*, 3, 33.
- Kienast, J.R. and Ouzegane K. 1987.** Polymetamorphic Al-Mg rich parageneses in Archean rocks from Hoggar, Algeria. *Wiley J. (ed.) African Geology Reviews*, 22, 57 - 79.
- Krogh, E.J. 1977.** Origin and metamorphism of iron formations and associated rocks, Lofoten-Vesteralen, Norway. *The Vestpoltind Fe-Mn deposit. Lithos*, 10, 243 - 256.
- Lal, R.K., Ackermann, D., Seifert, F. and Haldar, S.K., 1978.** Chemographic relations in sapphirine-bearing rocks from Sonapahar, Assam, India. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 169 - 187.
- Lancelot, J.R., Vitrac, A. and Allegre, C.J., 1976.** Uranium and lead isotopic dating with grain-by grain zircon analysis: a study of a complex geological history with a single rock. *Earth and Planetary Science Letters*, 29, 357 - 366.
- Lassel K. 1990.** Les gneiss charnockitiques du socle archéen de l'In Ouzzal. Pétrologie, isotopes stables et inclusions fluides. *D.E.A Paris VII*.
- Le Fur, Y. 1966.** Nouvelles observations sur la structure de l'antécambrien du Hoggar nord occidental, région d'In Hihaou. *Thèse de troisième cycle*, Nancy.
- Lelubre, M., 1952.** Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental (Sahara central). *Bulletin du Service de la Carte Géologique, Algérie*, 22.
- Ludden, J., Hubert, C., Barnes, A., Mikereit, B. and Sawyer, E., 1993.** A three dimensional perspective on the evolution of the Earth's largest Archaean crust. LITHOPROBE seismic reflection images in the southwestern Superior Province. *Lithos*, 30, 357 - 372.
- Martignole, J. 1975.** Le Précambrien dans le Sud de la Province tectonique de Grenville (bouclier canadien). *Thèse d'état, Montréal*, 405 p.
- Mc Gregor, V.R., Friend, C.R.L., & Nutman, A.P. 1991.** The late-Archaean mobile belt trough Gotthabsfjord region, southern west Greenland: a continent-continent collision zone? *Bulletin Geological Society Denmark*, 39, 179 - 197.
- Mouri, H., Guiraud, M. Kienast, J.R. 1993.** Al-Mg granulites of Ihouhaouene, Hoggar, Algeria: An example of phase relationships in the KFMASH system and melt absent equilibria. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 316, 1565 - 1572.
- Mouri, H., Guiraud, M. et Kienast, J.R. 1994.** The origin of Al-Mg granulites of Ihouhaouene, Hoggar, Algeria: an example of phase relationships in the KFMASH system and melt absent equilibria. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 318, 941 - 948.
- Mouri H., 1995.** Relations de phases théoriques et naturelles dans le système KFMASH: exemple des granulites Al-Mg d'Ihouhaouene (Môle In Ouzzal- Hoggar- Algérie). *Doctorat de l'Université Paris VII*, 210 p.
- Mouri, H., Guiraud, M. and Hensen, B.J. 1996.** Petrology of phlogopite- sapphirine - bearing Al-Mg granulites from Ihouhaouene (Môle In Ouzzal- Hoggar Algeria): An example of phlogopite stable at high temperature. *Journal of metamorphic Geology*, 14, 725 - 738.
- Ouzegane, K. 1987.** Les granulites Al-Mg et les carbonatites dans la série de l'In Ouzzal NW Hoggar, Algérie. Nature et évolution de la croûte continentale profonde pendant l'archéen. *Thèse de Doctorat d'état d'Université Pierre et Marie Curie, Paris*. 433 p.
- Ouzegane, K. and Boumaza, S., 1996.** An example of very high temperature metamorphism: orthopyroxène-sillimanite-garnet, sapphirine-quartz, and spinel-quartz. *Journal of metamorphic Geology*, 14, 693 - 708.
- Ouzegane, K., Djemai, S., and Guiraud, M., 1996.** Gedrite garnet sillimanite bearing granulites from Amesmesa area, south In Ouzzal, Hoggar, Algeria. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 739 - 753.
- Peucat, J.J., Capdevila, R., Drareni, A., Choukroune, P., Fanning, M., Bernard-Griffiths, J. and Fourcade, S. 1996.** Major and trace element geochemistry and isotope (Sr, Nd, Pb, O) systematics of an Archaean basement involved in a 2.0 Ga VHT (1000°C) metamorphic event: In Ouzzal massif, Hoggar, Algeria. *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 667 - 692.

- Rahmani A., 1992.** Pétrologie et géochimie de la série granulitique du massif du Khanfous (In Ouzzal, Hoggar, Algérie). *Doctorat de l'Université Paris VI*, 204 p.
- Robinson, P and Jaffe, H. W., 1969.** Chemographic exploration of amphibole assemblages from central Massachusetts and Southwest New Hampshire. In : *Mineralogical Society of America Special Paper*, 2, 251 - 274.
- Semiani, A., 1995.** Métallogénie de la zone de cisaillement aurifère est-ouzzalienne: structure, pétrologie et géochimie des gisements d'or de Tirek-Amesmess (Hoggar occidental, Algérie). Doctorat de l'Université de Rennes I. Spear, F.S., 1982. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond volcanics Mt cube quadrangle Vermont. *Journal of Petrology*, 23, 383 - 426.
- Spear, F.S. 1993.** Metamorphism of ultramafic and cordierite anthophyllite rocks. In *Metamorphic Phase equilibria and pressure temperature time paths. Mineralogical Society of America*, 393 - 489.
- Taylor, S.R., and Mc Lennan, S.M. 1985.** The continental crust, its composition and evolution. *Blackwell, Oxford*, 312 p.
- Vallance, T.G., 1967.** Mafic rock alteration and isochemical development of some cordierite-anthophyllite rocks. *Journal of Petrology*, 8, 84 - 96.
- Van Reenen, D.D., Rooring, G., Brandl, G., Smith, C.A., and Barton J.M., 1990.** The granulite facies rocks of the Limpopo Belt, Southern Africa. In *Granulites and crustal evolution*, Vielzeuf, D., & Vidal. Ph., eds.
- Vrana, S., 1975.** Magnesian-aluminous rocks, the associated ore mineralization and the problem of magnesium-iron metasomatism. *Krystalinikum*, 11, 101 - 114.
- Warren, R.G., 1979.** Sapphirine bearing rocks with sedimentary and volcanogenic protoliths from the Arunta Block. *Nature*, 278, 159 - 161.
- Windrin, D.P., McCulloch, M.T., Chapell, B.W. & Cameron, W.E., 1984.** Nd isotopic systematics and chemistry of Central Australian sapphirine granulites, an example of rare earth element mobility. *Earth and Planetary Science Letters*, 70, 27 - 39.
- Woodford, P. J. and Wilson, A.F., 1976.** Sapphirine, hgbomite, korerupine, surinamite from aluminous granulite, north-eastern Strangways Range, Central Australia. *Neues Jahrbuch für Mineralogy Monatsheft*, 1, 15 - 35.