

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAIFIQUE DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

Malika MOKRI*, Khadidja OUZEGANE*, Jean Robert KIENAST**
et Renaud CABY***

RÉSUMÉ

Le complexe mafique et ultramafique du Camp Zora (terrane de l'Ahnet, Nord - Ouest du Hoggar) qui affleure au nord - est du terrane de l'In Ouzzal, est composé de séries litées supposées panafricaines (800 – 650 Ma). Sur la base d'études pétrologiques, trois groupes sont distingués. Le premier groupe est représenté par des cumulats ultramafiques avec et sans plagioclase, des métatroctolites et des anorthosites. Le second groupe est composé de métagabbros avec et sans grenat. Le troisième groupe est caractérisé par des schistes bleus à glaucophane. Des textures métamorphiques dans les métagabbros à grenat se surimposent à des reliques magmatiques et montrent le développement d'un grenat coronitique (almandin : 38 à 53%, pyrope : 25 à 38% et grossulaire : 16 à 21 %) et d'un clinopyroxène secondaire (X_{Mg} : 0.69 à 0.81) en intercroissance avec le quartz parfois associé à de la pargasite (X_{Mg} : 0.90 à 0.96) au détriment des associations précoces à orthopyroxène (X_{Mg} : 0.66 à 0.76) et plagioclase (An_{30} à An_{50}). L'estimation de la pression et de la température des métagabbros permet de montrer que l'apparition de la paragenèse à grenat-clinopyroxène-quartz et amphibole s'est produite par augmentation de pression jusqu'à 10.5 ± 1 kbar pour une température proche de 770 °C et d'une activité d' H_2O très faible de 0.1. Dans les zones mylonitiques, ces métagabbros à grenat se transforment en schistes à glaucophane par diminution de température jusqu'à 400 – 500°C et une pression de 8 à 9 Kbar. L'apparition du glaucophane est très significative en terme de géodynamique. En effet, les schistes à glaucophane sont en relation avec un gradient géothermique anormal (10 à 15 °C/Km) qui se développe préférentiellement dans les zones de subduction, ou les zones d'accumulation de nappes, dans lesquelles l'enfouissement puis l'exhumation jouent un rôle important.

Mots clés : Hoggar - Terrane de l'Ahnet - Métagabbros à grenat - Cheminement antihoraire - Pan-Africain.

* Laboratoire de Géodynamique, Géologie de l'Ingénieur et de Planétologie, U.S.T.H.B, BP. 32, Dar el Beida, 16111 - Alger, Algérie. e-mail : malika.mokri@gmail.com

** Laboratoire de Géosciences marines, CNRS-UMR 7097-IPGP, case 89, Université Denis Diderot, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France.

*** Laboratoire de Tectonophysique, Place E. Bataillon, Université de Montpellier - 234095 Montpellier, cedex 05 France.

- Manuscrit déposé le 04 Juin 2007, accepté après révision le 03 Juillet 2007.

PRESSURE AND TEMPERATURE EVOLUTION OF GARNET METAGABBROS FROM MAFIC AND ULTRAMAFIC CAMP ZORA COMPLEX (TERRANE OF AHNET, NW HOGGAR).

ABSTRACT

The mafic ultramafic complex of Camp Zora (Ahnet terrane, North - West Hoggar), which is exposed in the North - East side of the In Ouzzal terrane, is composed mostly by layered series supposed to be Pan-African in age (800-650 Ma). Based on the petrologic studies three groups are distinguished. The first group is represented by cumulates, which are ultramafites with and without plagioclase, metatroctolites and anorthosites. The second group is composed of metagabbros with and without garnet. The third group is characterized by blueschists with glaucophane. In the second significant group represented by metagabbros which are reactional, metamorphic textures are superimposed to magmatic relicts and show the development of a coronitic garnet (almandine: 38 to 53%, pyrope: 25 to 38%, grossular: 16 to 21%) and a secondary clinopyroxene (X_{Mg} : 0.69 to 0.81) in intergrowth with quartz associated to pargasite (X_{Mg} : 0.90 to 0.96) at the expense of early magmatic associations with orthopyroxene (X_{Mg} : 0.66 to 0.76) and plagioclase (An_{30} to An_{50}). The estimation of the Pressure and the Temperature in the metagabbros shows that the appearance of secondary metamorphic paragenesis with garnet-clinopyroxene-quartz and amphibole occurred by increase in Pressure up to 10.5 ± 1 kbar for a Temperature close to 770 °C and an activity of H_2O near 0.1. In the mylonitic zones, these garnet bearing metagabbros are transformed into blueschist with glaucophane by decrease in Temperature down to 400 – 500°C and a Pressure from 8 to 9 Kbar. The appearance of glaucophane is very significant in terms of geodynamics. Indeed, the glaucophane schists are in relation to an abnormal geothermic gradient (10 to 15 °C/km), which develops preferentially in the subduction zones, or in the sheet accumulation zones in which burial and exhumation play a significant role.

Key words : Hoggar - Ahnet terrane - Garnet metagabbros - Anticlockwise path - Pan-African.

I - INTRODUCTION

Le Hoggar montre de nombreux affleurements de roches mafiques et ultramafiques qui se présentent sous forme de lentilles plus ou moins serpentinisées, de taille variable allant de quelques centimètres à quelques kilomètres. D'après plusieurs auteurs dont Abed (1983), Boukhalifa (1987), Cottin *et al.* (1998) et Bechiri (2004), la formation de ces roches est liée à plusieurs épisodes magmatiques basiques, rattachés au cycle orogénique panafricain (800-650Ma).

Black *et al.* (1979), Caby *et al.* (1981), Caby (2003) et Kheloui *et al.* (2006) ont également décrit de vastes lambeaux ophiolitiques

déformés, témoins d'un océan pré panafricain (800Ma) dans les terranes du pharusien du Hoggar occidental et du Serouénout .

Fabriès et Gravelle (1977), Bertrand et Caby (1978) ont parallèlement décrit des batholites syntectoniques de gabbros et de diorites d'affinité calcoalcaline dans le terrane d'Iskel. L'ensemble correspond à la signature d'un ancien arc insulaire et d'une marge continentale active situés à l'est de l'océan pré panafricain (Caby, 2003).

Cottin *et al.* (1990) ont eux aussi mentionné l'existence de plusieurs intrusions basiques et ultrabasiques dans le terrane de Laouni. Ait Djafer *et al.* (2003) décrivent également des

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAFIQUE DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

complexes basiques lités représentés par des anorthosites, leucogabbros et gabbros post-tectoniques d'âge 592 Ma dans la région de Tin Zebane El Kahla dans le terrane de Tassendjanet (Pharusien du Hoggar occidental).

Le massif du Camp Zora objet de cette publication, situé dans le terrane de l'Ahnet au NW du Hoggar, est aussi un massif composé essentiellement de termes basiques et ultra-basiques d'âge panafricain supposé (Caby et Monié, 2003).

II - DESCRIPTION DE LA RÉGION D'ÉTUDE.

Le complexe mafique et ultramafique du camp Zora affleure au NE de l'unité granulitique de l'In Ouzzal (fig. 1A, 1B et 2) et au sud de la série d'Amasine qui jouxte l'Ahnet comme cela est montré sur les figures 1A, 1B et l'image satellite de Google Earth (2007). Ce complexe fait partie d'un grand ensemble où l'on trouve des collines essentiellement dominées par des péridotites associées à des anorthosites, des gabbros et des couloirs de «shear zones» dans le reg, où les métagabbros peuvent se transformer en schistes à glaucophane. Le complexe du Camp Zora, d'environ 20 Km de long et 7km de large, est surtout composé par des péridotites à spinelle et à plagioclase avec des lentilles d'anorthosites, des métatroctolites, des gabbros avec ou sans grenat et des leucogabbros. Au nord du complexe, les grands reliefs de quartzites de l'Adrar Ahnet sont représentés par plus de 5000m de sédiments supracrustaux. D'après Moussine-Pouchkine et *al.* (1988), ces sédiments sont divisés en deux groupes. Le groupe de l'Ahnet sensu-stricto est composé de quartzites fluviatiles matures et le groupe d'Amasine caractérisé, en plus des quartzites, par des formations carbonatées à stromatolites. Un volcanisme d'affinité tholéitique synsédimentaire intervient dans chacun des deux groupes, marqué par une première phase de riftogénèse suivie

par une ouverture d'un domaine océanique générant les stromatolites comparables à ceux du craton ouest africain (Moussine-Pouchkine et *al.*, 1988).

Pour Caby et Monié (2003), le complexe mafique du Camp Zora pourrait être charrié sur un terrain para autochtone comportant des metabasaltes et des métadolérites d'affinité

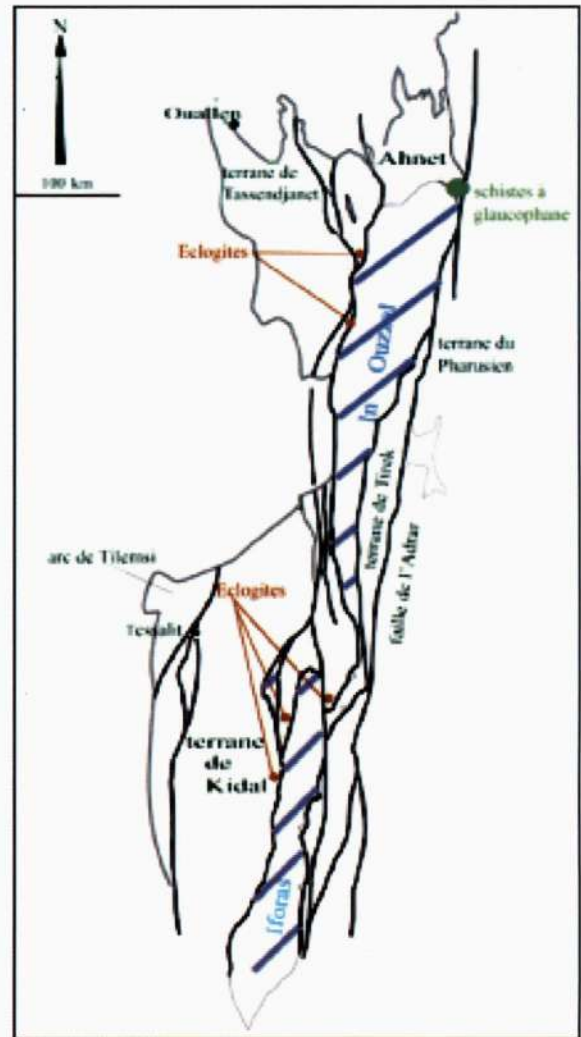


Fig.1A. - Localisation des schistes bleus à glaucophane du camp Zora et des éclogites autour des terranes de l'In Ouzzal et des Iforas d'après Caby (2003).

Localization of the glaucophane blueschists of Camp Zora and eclogites around the In Ouzzal and Iforas terranes after Caby (2003).

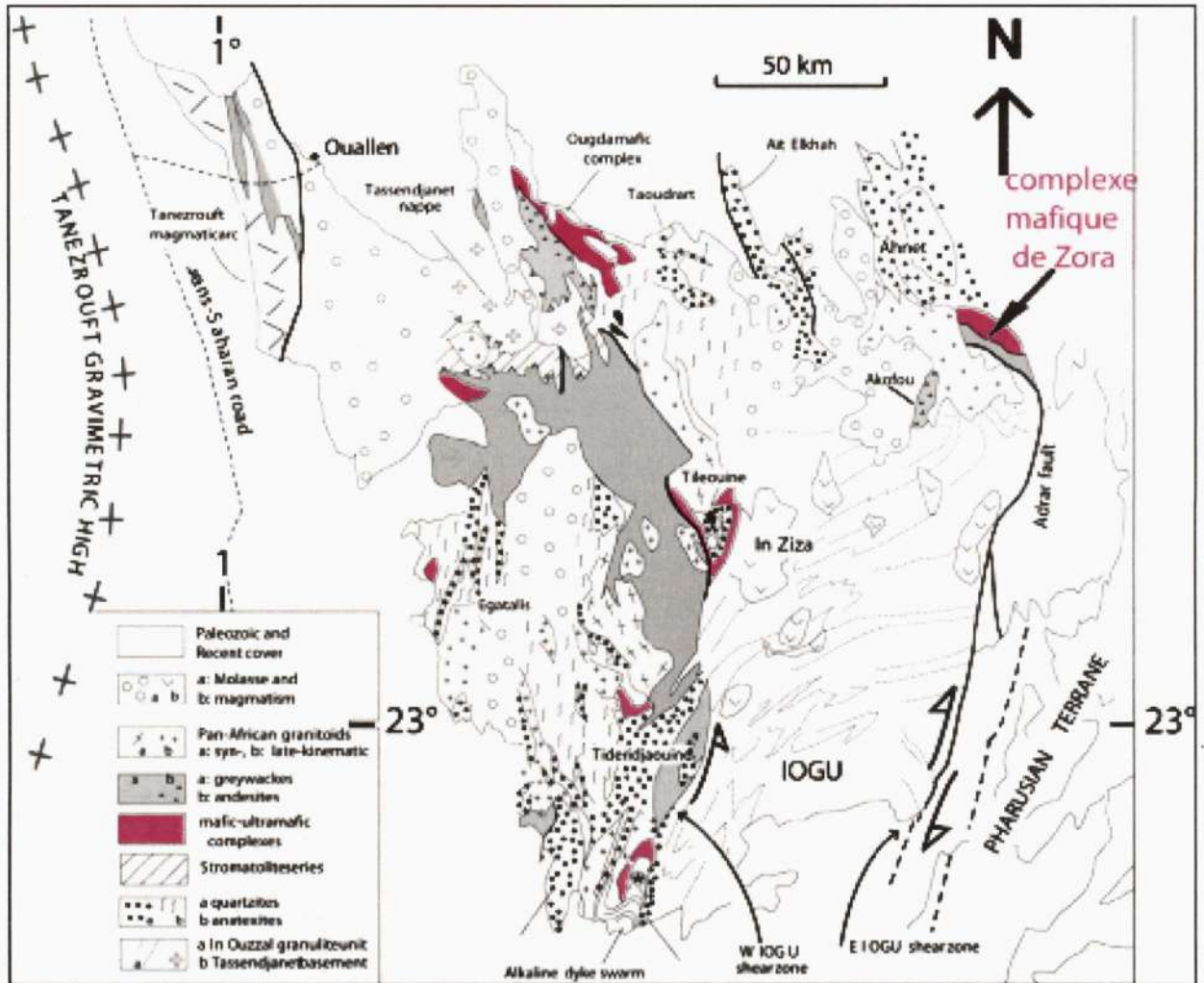


Fig. 1B. - Carte géologique montrant le complexe mafique et ultramafique du Camp Zora le long de l'accident qui sépare le terrain de l'In Ouzal de celui de l'Ahnet (Caby et Monié, 2003).

Geological map showing the mafic and ultramafic complex of Camp Zora along the shear zone separating In Ouzal from the Ahnet terrane (Caby and Monié, 2003).

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAFIQUE DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

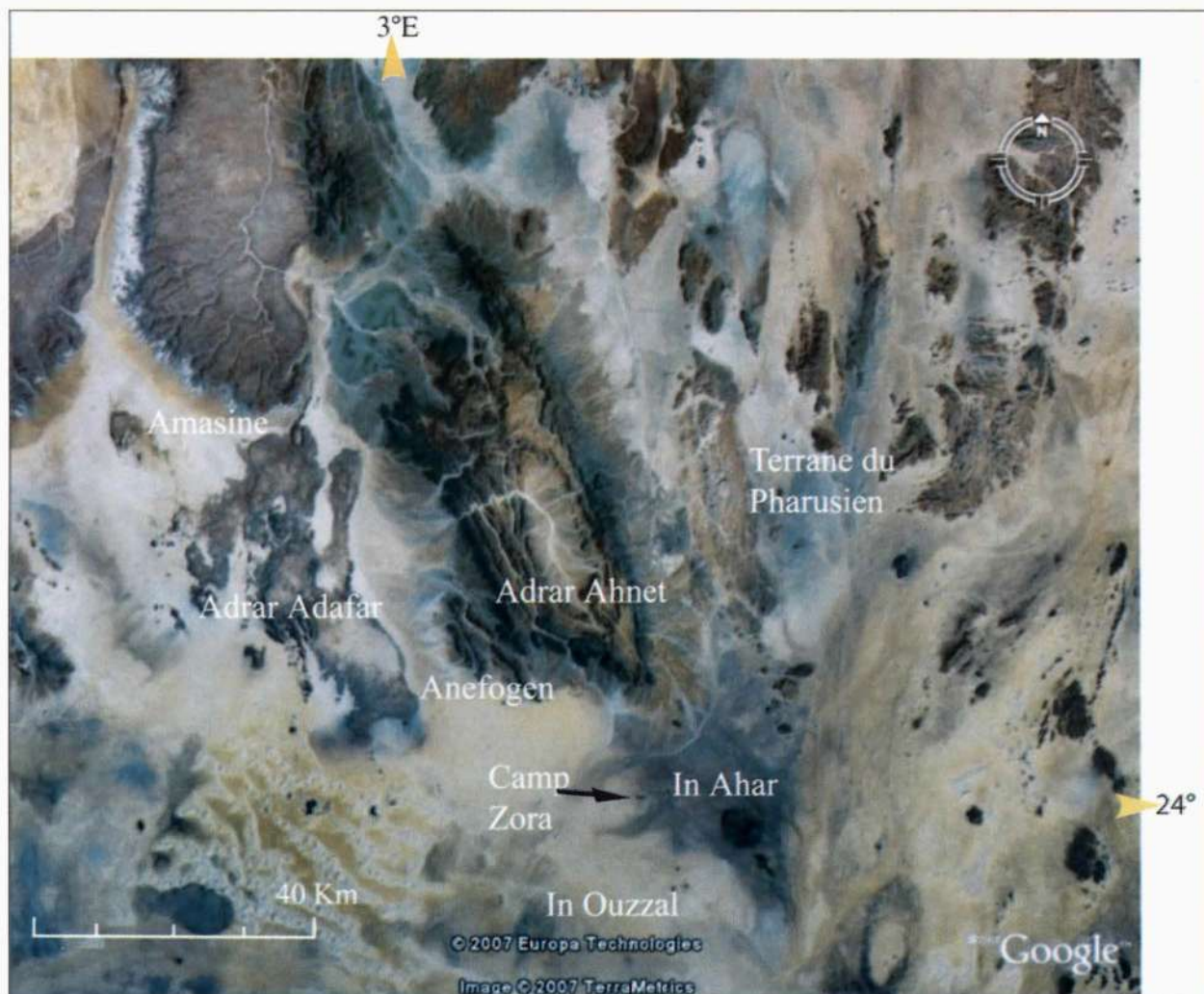


Fig.2 - Photo satellite (Google Earth, 2007) montrant la localisation du Camp Zora et des terrains limitrophes.
Satellite image (Google Earth, 2007) showing the localization of the Camp Zora and border areas.

océanique. Ces interprétations sont en cohérence avec les nouvelles conceptions sur le Hoggar occidental développées par Cabby et Cabby et Monié en 2003. En effet, ces auteurs proposent un nouveau scénario géodynamique pour la formation des terranes du Hoggar occidental, à l'est et à l'ouest du terrane de l'In Ouzzal et de l'Adrar des Iforas, au Panafricain.

Ce concept est basé essentiellement sur la formation, dans le premier stade, à 730 Ma, de subductions de part et d'autre de l'In Ouzzal (Caby, 2003; fig.3). Les terranes qui constituent actuellement le Hoggar étaient séparés les uns des autres, au Panafricain, par des portions de croûtes océaniques entraînées, par la suite, dans ces zones de subductions, dont les témoins pourraient être certaines éclogites (fig.3). Le dernier stade, vers 685- 610Ma, toujours dans cette conception, serait marqué par une collision et des exhumations au cours desquelles les éclogites seraient remontées à la surface et les schistes à glaucophane se seraient formés. Dans cette publication nous nous intéresserons aux relations de phases dans les métagabbros à grenat du Camp Zora dont les systèmes réactionnels témoignent de l'évolution pression température et a_{H_2O} au cours du temps, et donc de

l'évolution géodynamique de l'unité du Camp Zora. Dans les zones de cisaillement ces métagabbros peuvent se transformer en schistes à glaucophane, pour la première fois signalés au Hoggar et même en Algérie, mais nous réservons pour une publication à venir leur description et leur signification.

III - PÉTROGRAPHIE ET MINÉRALOGIE.

L'étude pétrographique du massif mafique et ultramafique montre une diversité très marquée et présente des caractéristiques des complexes à composante cumulative.

Ce complexe du Camp Zora contient des métagabbros avec ou sans grenat, des anorthosites, des troctolites et des cumulats ultramafiques. Dans les zones mylonitiques qui jouxtent ce massif, les métagabbros à grenat sont transformés en amphibolites à grenat et dans les zones les plus déformées on trouve des schistes à noyaux mafiques montrant une minéralogie originale à épidote, phengite, albite, trémolite et glaucophane. Ces schistes sont parallèles à la foliation des métagabbros, il est probable qu'ils représentent les parties les plus rétro-morphosées de ces métagabbros.

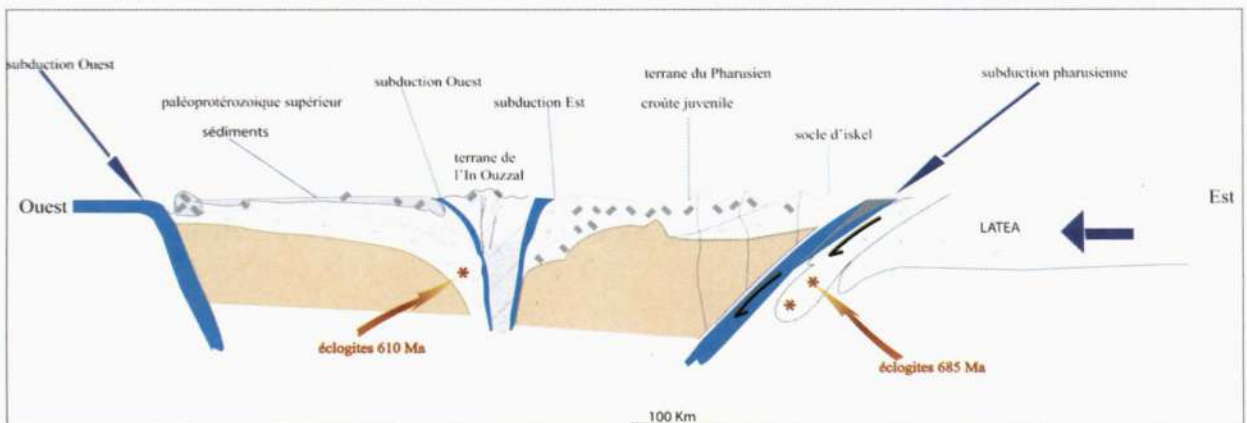


Fig.3 - Modèle géodynamique montrant les arcs insulaires de part et d'autre de l'unité granulitique de l'In Ouzzal et l'arc insulaire d'Iskel limitrophe au métacraton de LATEA

Geodynamic model showing the insular arcs on both sides of the granulitic unit of In Ouzzal and Iskel arc adjacent to the LATEA metacraton

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAFIQUE
DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

Les cumulâts ultramafiques sont représentés par des lherzolites à orthopyroxène, olivine, clinopyroxène, amphibole associés à un spinelle chromifère en intercroissance avec l'orthopyroxène, le clinopyroxène et l'amphibole (Mokri, 2005).

Associés à ces cumulâts, on trouve des métagabbros sans grenat qui sont les plus magnésiens et des métagabbros à grenat réactionnel, moins magnésiens. Les phases minérales les plus communes dans les métagabbros sans grenat sont représentées surtout par l'orthopyroxène ($X_{Mg} = 0,86$ à $0,99$), le clinopyroxène ($X_{Mg} = 0,86$ à $0,95$), le plagioclase (labrador An52) alors que les amphiboles s'inscrivent dans le champ des pargasites ($Al VI > Fe^{3+}$, $Na+K_A > 0,5$ et $Ti < 0,5$) présentant des X_{Mg} qui évoluent très peu, entre $0,90$ - $0,96$.

Les métagabbros à grenat montrent clairement la superposition de deux paragénèses, la plus précoce est composée de reliques de texture magmatique à orthopyroxène ($X_{Mg} = 0,66$ à $0,76$) et de plagioclase (An 30 à An 49), la secondaire est caractérisée par le développement de symplectites à quartz, grenat (almandin : 38 à 53 % ; pyrope : 25 à 38% et grossulaire : 16 à 21 %,) du côté du plagioclase et des couronnes de clinopyroxène ($X_{Mg} = 0,69$ à $0,81$) autour de l'orthopyroxène. Cette texture suggère une réaction du type :

orthopyroxène + plagioclase \rightarrow grenat + clinopyroxène + quartz (fig.4A).

De l'amphibole, et de l'ilménite autour du rutile peuvent également se développer dans les associations métamorphiques secondaires suggérant une réaction du type :

orthopyroxène + plagioclase + rutile + $H_2O \rightarrow$ grenat + clinopyroxène + amphibole + ilménite + quartz (fig.4B, 4C).

De l'amphibole plus tardive peut également se développer à la suite des réactions possibles suivantes :

orthopyroxène + clinopyroxène + grenat + quartz + $H_2O \rightarrow$ amphibole
et /ou

orthopyroxène + plagioclase + $H_2O \rightarrow$ clinopyroxène + grenat + quartz + amphibole.

Ces deux groupes d'amphiboles correspondent pour celles qui sont en équilibre avec le grenat et le clinopyroxène à des pargasites et pour les secondes à des tchermakites évoluant vers les magnésio- hornblendes. Les pargasites montrent des $Na+K_A > 0,5$, des valeurs en Si de l'ordre de $6,3$ et des rapports X_{Mg} variant entre $0,61$ et $0,72$.

Les amphiboles les plus tardives présentent des $Na+K_A < 0,5$, des valeurs Si comprises entre $6,1$ et $6,6$ et des X_{Mg} entre $0,61$ à $0,87$.

IV - LES RÉACTIONS DES MÉTAGABBROS À GRENAT DANS LES SYSTÈMES CMASH ET NCMASH.

Les réactions observées dans les métagabbros sont le reflet de variations de pression et de température symptomatiques de l'évolution géodynamique de la série qui les contient, que nous pourrions quantifier dans des systèmes variés qui se rapprochent le plus possibles de la composition chimique réelle. L'utilisation du logiciel Thermocalc (Holland et Powell, V 2.7, 1990) permet de construire des diagrammes quantitatifs de pression et de température dans des systèmes de type **CMASH** (CaO, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 et H_2O) et **NCMASH** (Na_2O , CaO, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O) qui permettront de mieux suivre leur évolution réactionnelle.

IV -1- Le système CMASH

Les métagabbros à grenat du Camp Zora présentent une minéralogie variée à orthopyroxène, plagioclase, grenat, clinopyroxène, quartz et

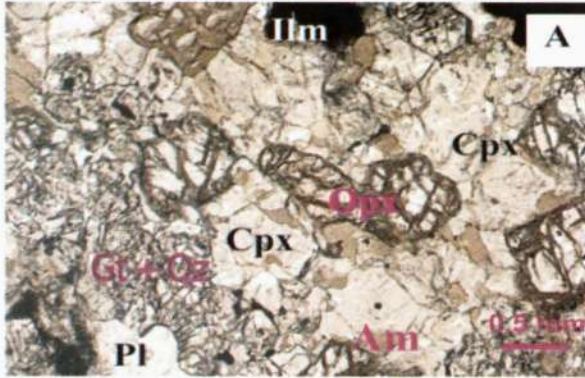


Fig.4A - Relique blindée d'orthopyroxène dans le clinopyroxène, isolée du plagioclase primaire par une symplectite à grenat secondaire et quartz. De l'amphibole secondaire est aussi observée autour du clinopyroxène.

Armoured relict of orthopyroxene in clinopyroxene isolated from primary plagioclase by symplectite of secondary garnet and quartz. Secondary amphibole is also observed around clinopyroxene.

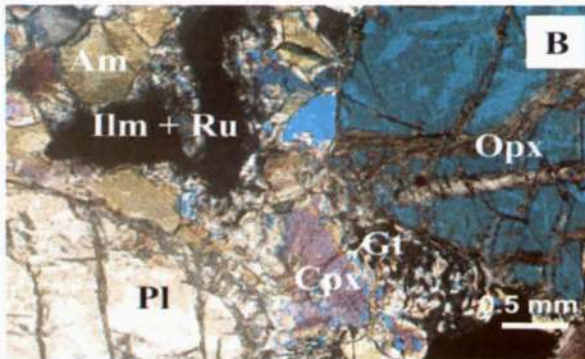


Fig.4B - Texture réactionnelle en lumière polarisée analysée dans les métagabbros à grenat montrant la réaction du type :

orthopyroxène + plagioclase + rutile + H₂O → grenat + clinopyroxène + quartz + amphibole + ilmenite.

*Reactional texture in plane polarized light of the garnet metagabbros showing the following reaction:
orthopyroxene + plagioclase + rutile + H₂O → garnet + clinopyroxène + quartz + amphibole + ilmenite.*

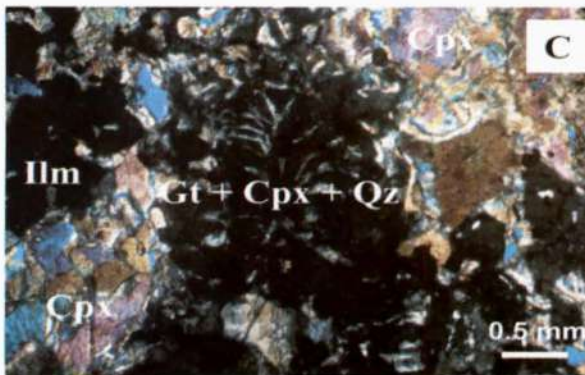
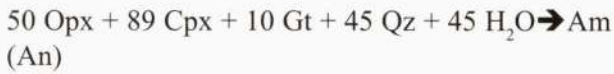


Fig.4C - Détail des associations secondaires à grenat, quartz, clinopyroxène et ilménite dans les métagabbros à grenat. Notez les vermicules de quartz secondaires dans le grenat.

*Detail of secondary associations with garnet, quartz, clinopyroxene and ilmenite in the garnet metagabbros.
Note droplets of secondary quartz in garnet.*

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAIFIQUE
DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

amphibole. À ces minéraux peuvent s'ajouter tardivement l'épidote et la chlorite. Deux réactions successives sont observées, il s'agit des réactions équilibrées dans le système CMASH :



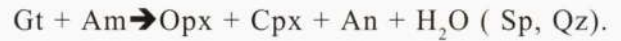
La première réaction qui permet le développement de couronnes et de symplectites à grenat, clinopyroxène et quartz se surimpose à l'association magmatique primaire composée d'orthopyroxène et de plagioclase (fig.4A, 4B et 4C). La deuxième réaction permet d'expliquer l'amphibolitisation des métagabbros, qui peut être très avancée dans les zones de cisaillement favorisée par la circulation des fluides.

Pour représenter ces deux réactions dans un diagramme P-T nous les avons équilibrées et calculées grâce au logiciel Thermocalc V 2.7 (Holland et Powell, 1990), elles se positionnent autour du point invariant [Sp]. Dans le système **CMASH**, le point invariant [spinel] prend en considération 6 phases qui sont grenat (Gt), orthopyroxène (Opx), clinopyroxène (Cpx), quartz (Qz), anorthite (An) et amphibole (Am); six réactions possibles univariantes sont équilibrées, il s'agit de :

- (1)- (Am) Gt+ Cpx +Qz \rightarrow Opx + An
- (2)- (An) Gt+ Opx +Cpx +Qz \rightarrow Am
- (3)- (Opx) Gt+ Cpx +Qz \rightarrow Am+ An
- (4)- (Cpx) Gt +Am +Qz \rightarrow Opx+ An
- (5)- (Qz) Gt +Am \rightarrow Opx +Cpx+ An
- (6)- (Gt) Opx+ Cpx + Qz + An \rightarrow Am

Les réactions (1) et (2) sont celles qui nous concernent.

Nous avons aussi construit le point invariant (quartz) pour comparer la position relative des réactions avec quartz (sans spinelle) et les réactions avec spinelle (sans quartz). Une réaction relie les deux points invariants (fig.5), il s'agit de la réaction :



Les réactions observées dans les métagabbros à grenat montrent que le cheminement est probablement en relation avec une augmentation de la pression à la suite de la déstabilisation de l'association plus précoce à Opx + Pl qui permet d'une part le développement de couronnes de grenat en symplectite avec le quartz du côté du plagioclase et d'autre part celui du clinopyroxène autour de l'orthopyroxène. Ensuite le développement de l'amphibole se fait à la suite d'une baisse de la température: ainsi la réaction (An) est traversée. La poursuite de cette réaction permet dans un stade intermédiaire d'avoir des amphibolites à grenat avec disparition du clinopyroxène et de l'orthopyroxène et dans un stade plus poussé, la disparition du grenat.

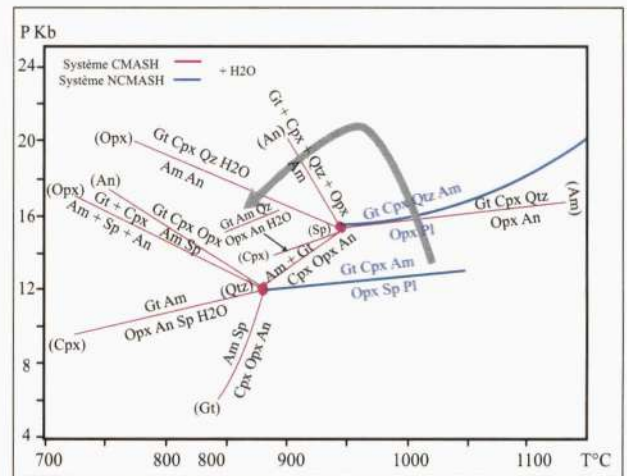


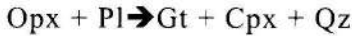
Fig.5 - Grille pétrogénétique calculée grâce au logiciel Thermocalc (Holland et Powell, V.2.7, 1990) montrant les réactions émanant de deux points invariants (Qtz) et (Sp) construits dans le système **CMASH**, les réactions univariantes du système **NCMASH** et le cheminement pression - température proposé.

Petrogenetic grid calculated using the Thermocalc software of Holland and Powell, (V.2.7, 1990) showing the reactions around the two invariant points (Qtz) and (Sp) built in system CMASH, the univariant reactions of NCMASH system and proposed anticlockwise pressure -temperature path.

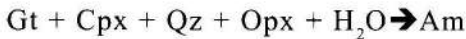
IV- 2 Le système NCMASH

Si on ajoute au système **CMASH** le constituant Na_2O (il entre, en effet, dans la composition des amphiboles, des plagioclases et des clinopyroxènes), le point invariant [spinel] migre le long d'un équilibre qui devient $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Qz} + \text{Am}$ et le point invariant (quartz) migre le long de la réaction univariante $\text{Opx} + \text{Sp} + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Am}$.

Les textures réactionnelles sont en faveur de réactions de type:



et



Dans certains microdomaines, la réaction univariante équilibrée dans le système **NCMASH** qui implique six phases : $\text{Opx} + \text{An} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Qz} + \text{Am}$ est aussi observée,

avec le rutile et l'ilménite comme phases supplémentaires (fig.4C).

V - LES CONDITIONS DU MÉTAMORPHISME

La pression, la température et la pression d'eau ont été estimées avec le programme Thermocalc («average P-T» qui permet de tenir compte des compositions réelles des minéraux). Les activités des minéraux comme le grenat, le clinopyroxène, l'amphibole et le plagioclase ont été calculées grâce au logiciel «ax» de Holland (1996, non publié). Nous avons utilisé les compositions du plagioclase en bordure du grenat, avec les minéraux produits de la réaction $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Qz} + \text{Am}$ pour estimer les conditions de pression, température et de l'activité d' H_2O contemporains de la formation des couronnes de grenat, clinopyroxène, quartz et amphibole (tab.I, II et III).

Tableau I - Calcul des activités du grenat, orthopyroxène, clinopyroxène, plagioclase et amphibole d'après le logiciel «ax» de Holland, 1996 (non publié).

Calculated activities of garnet, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase and amphibole using the «ax» software programm of Holland (1996, not published).

a : activité (*activity*), **sd(a)/a** : erreur sur l'activité (*error in activity*), **py** : pyrope (*pyrope*), **gr** : grossulaire (*grossular*), **alm** : almandin (*almandine*), **en** : enstatite (*enstatite*), **fs** : ferrosillite (*ferrosillite*), **mgts** : Mg tschermak (*Mg tschermak*), **di** : diopside (*diopside*), **hed** : hedenbergite (*hedenbergite*), **cats** : Ca tschermak (*Ca tschermak*), **an** : anorthite (*anorthite*), **ab** : albite (*albite*), **tr** : trémolite (*tremolite*), **ts** : tschermakite (*tschermakite*), **parg** : pargasite (*pargasite*), **gl** : glaucophane (*glaucophane*), **q** : quartz (*quartz*), **ilm** : ilménite (*ilmenite*), **ru** : rutile (*rutile*).

a sd(a)/a	py	gr	alm	en	fs	mgts	di
	0.0590 0.33566	0.0192 0.48254	0.0900 0.27409	0.420 0.10092	0.0930 0.28985	0.0620 0.26395	0.530 0.06627
a sd(a)/a	hed	cats	an	ab	Tr	ts	parg
	0.240 0.15612	0.280 0.15552	0.590 0.05043	0.620 0.05000	0.0947 0.28754	0.00100 0.63246	0.0820 0.25933
a sd(a)/a	gl	q	ilm	ru	H2O		
	0.00262 0.54016	1.000	1.000	1.000	0.0100		

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAFIQUE
DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

Tableau II - Le système de réactions indépendantes obtenues par Thermocalc.

The System of independent reactions obtained by Thermocalc.

Ensembles des réactions obtenues par Average PT	
1)	$fs + 2ru = 2q + 2ilm$
2)	$2py + gr + 3q = 3en + 3an$
3)	$gr + 3mgts + 3q = py + 3an$
4)	$py + 2gr + 3q = 3di + 3an$
5)	$gr + 2alm + 3q = 3fs + 3an$
6)	$2gr + alm + 3q = 3hed + 3an$
7)	$4en + ts = 2py + tr$
8)	$py + cats = 2mgts + di$
9)	$21an + 6tr = 10py + 11gr + 27q + 6H_2O$
10)	$18en + 12an + 3parg = 11py + 4gr + 3ab + 3tr$
11)	$5py + 4gr + 3gl = 6en + 6an + 3ab + 3parg$

Tableau III - Les conditions pressions, températures obtenues en fonction de l'activité d' H_2O . a_{H_2O} : activité de l'eau, P_{moy} : pression moyenne, sdP erreur sur la pression, T_{moy} : température moyenné, sdT : erreur sur la température.

The pressure, temperature conditions according to the activity of H_2O . a_{H_2O} : activity of water, P_{moy} : average pressure, sdP : error on pressure, T_{moy} : average temperature, sdT : error on temperature.

a_{H_2O}	P_{moy}	sdP	T_{moy}	sdT
0,5	13	3,2	985	190
0,1	11,7	3,1	826	169
0,05	11,2	3,1	770	164
0,01	10,5	2,7	644	118

Les résultats sont très sensibles à la variation de l'activité d'eau. Ainsi, pour une $a_{H_2O} = 0.01$, la pression est de 10.5 ± 2.7 Kbar et la température de $644 \pm 118^\circ C$. Pour une a_{H_2O} de 0.1, la pression est de 11.7 ± 3 Kbar et $T = 826 \pm 169^\circ C$ et enfin pour une a_{H_2O} de 0.5, la pression est de 13 ± 3.2 Kbar et la température de $985 \pm 190^\circ C$.

De ces chiffres on peut conclure que les métagabbros à grenat se sont rééquilibrés à des conditions de pression de l'ordre de 10.5 ± 2.5

kbar et à une température de 700 à 800 °C correspondant à la limite granulite - amphibolite. La présence de chlorite et de zoisite en phases tardive au détriment du plagioclase montre que la température a diminué ensuite au cours du temps.

La géothermobarométrie classique permet aussi l'estimation des conditions de pression et de température par l'utilisation de différentes calibrations de thermomètres et de baromètres à partir des compositions des minéraux

considérés. Nous en avons utilisé plusieurs dont les résultats sont reportés sur le tableau IV. Si nous examinons les différentes calibrations, en particulier le géobaromètre Gt-Cpx-Plag-Qz de Newton et Perkins (1982), de Eckert et *al.* (1991), Powell et Holland (1988), Ganguly et Saxena (1984) et Moecher et *al.* (1988; fig.6) qui sont les plus utilisés pour le faciès granulite, nous obtenons des pressions de 9.6 – 10.3 kbar pour une température comprise entre 700 et 800°C (Newton et Perkins, 1982), les pressions obtenues pour Eckert et *al.* (1991) sont de 9.8-10.5 kbar pour le même intervalle de température. Les températures calculées pour la calibration du géothermomètre Gt-Cpx de Ellis et Green (1979) et de Powell (1985) sont toutes comparables et proches de 770±50°C (fig.6). D'autres géothermomètres ont été utilisés comme Gt-Opx de Sen et Bhattacharya (1984) et de Harley (1984), les températures obtenues sont comparables à celles du géothermomètre Gt-Cpx (fig. 6) avec une différence d'une vingtaine ou une trentaine de degrés au-dessus ou au-dessous de celles de Ellis et Green (1979).

On peut conclure de ces calculs que les conditions les plus intenses du métamorphisme, c'est-à-dire celles où les grenats sont apparus, se situent vers 10 kbar en pression et 700°C à 800°C en température; ces chiffres sont similaires à ceux qui sont obtenus avec average PT de Thermocalc, dans le paragraphe précédent, pour une faible activité d'eau, entre 0.05 et 0.1.

VI - CONCLUSION.

En conclusion, dans les métagabbros à grenat une grille dans les systèmes **CMASH** et **NCMASH** a permis de construire deux points invariants et diverses réactions univariantes observées dans les métagabbros du Camp Zora. Parmi les réactions observées il y a les réactions bivariantes $\text{Opx} + \text{Pl} \rightarrow \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Qz}$ et $\text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Qz} + \text{Opx} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Am}$ et probablement aussi la réaction univariante $\text{Opx} + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Qz} + \text{Am}$. Un des renseignements le plus important est que l'évolution P-T déduite de ces grilles est un cheminement anti-horaire, caractérisé par une augmentation de pres-

Tableau IV - Pressions et températures calculées à partir de différents géothermomètres et géobaromètres.

Pressure and temperature calculated by different geothermometers and geobarometers.

Calibration	Géothermomètre	Température(°C)	Pression (K bar)
Grenat-clinopyroxène	Ellis et Green (1979)	782±50	Calculés pour une pression de 10 Kb
	Powell (1985)	770±50	
Grenat-orthopyroxène	Sen et Bhattacharya (1984)	851±50	
	Harley (1984)	766± 50	
Calibration	Géobaromètre	Température(°C)	Pression (K bar)
Grenat-plagioclase-clinopyroxène-quartz	Newton et Perkins (1982)	Calculés pour une température de 750°	9.6-10.3
	Powell et Holland (1988)		10±1.5
	Moecher et al (1988) (pôle magnésien)		10.7±1.5
	Moecher et al (1988) (pôle ferrique)		10.5±1.5
	Eckert et Kleppa (1991)		9.88-10.5

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAIFIQUE
DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

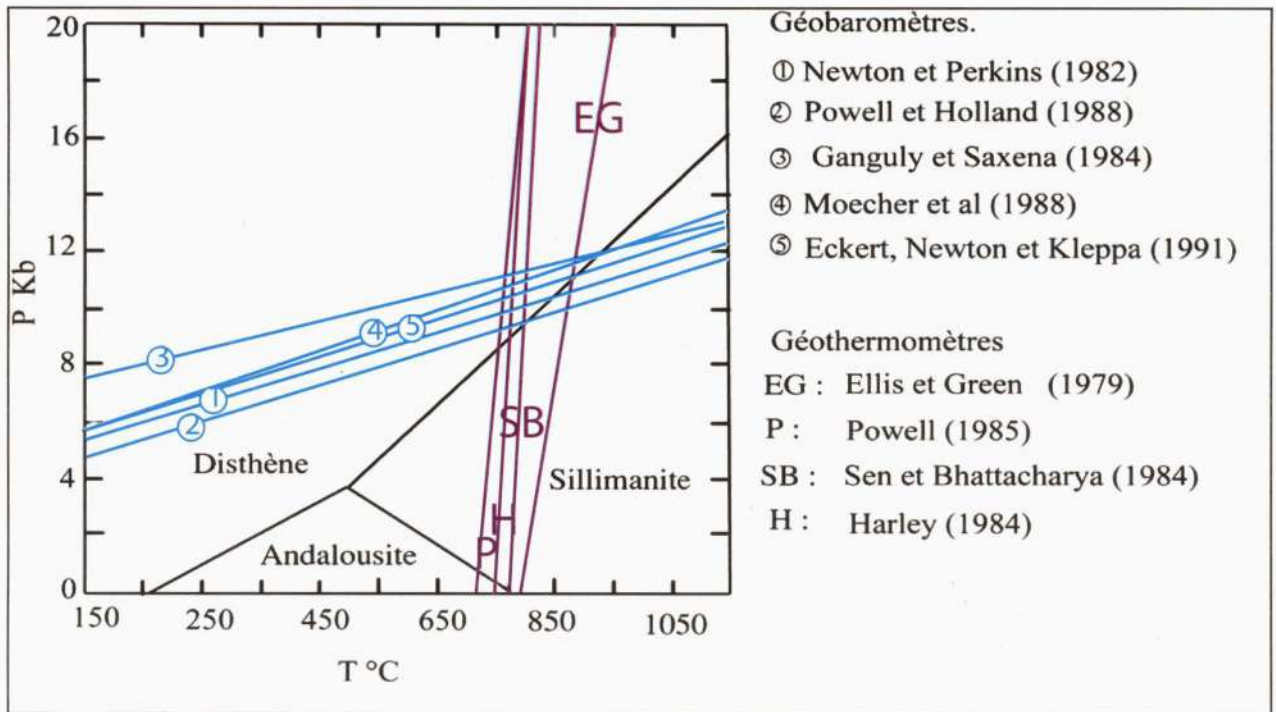


Fig.6 - Conditions de pression et de température enregistrées pour les métagabbros à grenat du complexe du Camp Zora estimées grâce aux calibrations de différents géothermomètres et géobaromètres.

Pressure and temperature conditions recorded for the garnet metagabbros of the Camp Zora complex estimated using the calibrations of various geothermometers and geobarometers.

sion suivie d'une baisse de température (fig. 5). L'estimation de la pression et de la température en tenant compte de la composition réelle des minéraux permet de montrer que l'apparition de la paragenèse à Gt-Cpx-Qz-Am s'est produite à la suite d'une élévation de la pression jusqu'à 10.5 ± 1 kbar pour une température proche de 770°C et une activité d'eau très faible, de 0.1. Dans les zones mylonitiques, les métagabbros ont continué de se transformer à la suite d'une diminution de la température jusqu'à $400\text{-}500^\circ\text{C}$ et une pression de 8 à 9 kbar permettant ainsi, occasionnellement, l'apparition de glaucophane. La reconstitution du cheminement P-T global des métagabbros étudiés définit une évolution antihoraire symptomatique d'un site géodynamique particulier, compatible avec une subduction, ou tout au moins un enfouissement suivi d'une exhumation dont le glaucophane pourrait être le témoin.

Remerciements : Nous tenons à remercier les professeurs Abba Azzouni et Hamid Haddoum pour leurs recommandations pertinentes. Nous exprimons aussi notre reconnaissance, particulièrement à Farid Ighilahriz, Directeur de l'Office du Parc National de l'Ahaggar pour son assistance technique aux travaux de terrain dans l'Ahaggar occidental. Ce travail est une contribution aux projets TASSILI 05 MDU 653, intitulé « Imagerie tridimensionnelle et évolution spatio-temporelle du Hoggar » et CNRS intitulé « architecture lithosphérique et dynamique du manteau sous le Hoggar » et CNEPRU intitulé « géodynamique des terrains métamorphiques du Hoggar ».

BIBLIOGRAPHIE

- ABED, H. 1983.** Paléosuture à caractère ophiolitique du Protérozoïque supérieur dans la région de Silet, Hoggar occidental (Algérie). *Thèse 3^{ème} cycle. Uni. Nancy I. France*, 172p.
- AIT DJAFER, S., OUZEGANE, K., LIÉGEOIS, J.L. AND KIENAST, J.R. 2003.** An example of post-collisional mafic magmatism: the gabbro-anorthosite layered complex from the Tin Zebane area (western Hoggar, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 37, 313-330.

- BECHIRI, H. 2004.** Le complexe basique-ultrabasique de Tin-Erit : Pétrographie, minéralogie et géochimie (bloc d'Iskel, Hoggar) Algérie, *Magister USTHB*, 92 p.
- BERTRAND, J.M. AND CABY, R. 1978.** Geodynamic evolution of the Pan-African orogenic belt: A new interpretation of the Hoggar shield (Algerian Sahara). *Geology Rundschau*, 67, 357-388.
- BLACK, R., CABY, R., MOUSSINE-POUCHKINE, A., BAYER, R., BERTRAND, J.M.L., BOULLIER, A.M., FABRE, J. AND LESQUER, A. 1979.** Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature*, 278, 223-227.
- BOUKHALFA, L. 1987.** Diversité et signification géodynamique des complexes ultrabasiques - basiques d'âge protérozoïque supérieur du rameau oriental de la chaîne Pan- Africaine (Hoggar, Algérie). *Thèse d'Université, Nancy I, France*, 279p.
- CABY, R., BERTRAND, J.M.L. AND BLACK, R. 1981.** Pan-African closure and continental collision in the Hoggar-Iforas segment, Central Sahara. In *Kröner, A, ed: Precambrian Plate Tectonics, Elsevier, Amsterdam.*, 407-434.
- CABY, R. 2003.** Terrane assembly and geodynamic evolution of central - western Hoggar: a synthesis. *Journal of African Earth Sciences*, 37, 133 -159.
- CABY, R. AND MONIÉ, P. 2003.** Neoproterozoic subduction and differential exhumation of western Hoggar (southwest Algeria): new structural, petrological and geochronological evidence. *Journal of African Earth Sciences*, 37, 269 -293
- COTTIN, J.Y., GUIRAUD, M. ET LORAND, J.P. 1990.** Le magmatisme et le métamorphisme Pan -Africain témoins d'amincissement crustal dans la région de Laouni (Hoggar central, Algérie). *Comptes-rendus de l'Académie des sciences, Paris*, 311, 1345-1351.
- COTTIN, J.Y., LORAND, J.P., AGRINIER, P., BODINIER, J.L. AND LIÉGEOIS, J.P. 1998.** Isotopic (O, Sr, Nd) and trace element geochemistry of the Laouni layered intrusions (Pan-African belt, Hoggar, Algeria): evidence for post-collisional continental tholeiitic magmas variably contaminated by continental crust. *Lithos*, 45, 197-222.
- ECKERT, J.O., NEWTON, R.C. AND KLEPPA, A. 1991.** Paleopressure of south Indian two-pyroxene garnet granulites from thermochemically calibrated CMAS barometers: *J. Metamorphic Geol*, v. 11, 845-854.
- ELLIS, D.J AND GREEN, E.H. (1979).** An experimental study of the effect of Ca upon Garnet Clinopyroxène Fe- Mg exchange equilibria. *Contrib. Minéral. Petrol* . 71, 13 - 22.
- FABRIÉS, J. ET GRAVELLE, M. 1977.** Modalité du magmatisme au protérozoïque supérieur dans la région de Silet (Hoggar central, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr., Paris*, S, 7, t. XIX, 995-1004.
- GANGULY, J. AND SAXENA, S.K. 1984.** Mixing properties of aluminosilicate garnets : constraints from naturel and experimental data, and applications to geothermo-barometry. *American Mineralogist*, V69, 88-97, 1984.
- Harley, S.L. 1984.** An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 36, 359-373.
- HOLLAND, T.J.B., AND POWELL, R. 1990.** An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2-O_2$. *J. Metamorphic Geol.*, Vol. 8, 89-124.

ÉVOLUTION PRESSION ET TEMPÉRATURE DES MÉTAGABBROS À GRENAT DU COMPLEXE MAFIQUE ET ULTRAMAFIQUE
DU CAMP ZORA (TERRANE DE L'AHNET, NORD - OUEST DU HOGGAR).

- KHELOUI, R., BECHIRI-BENMARZOUG, F., AZZOUNI-SEKKAL, A., LIEGEOIS, J.P. ET BONIN, B. 2006.** Etude pétrographique, minéralogique et géochimique du massif basique-ultrabasique d'Ideleh (Silet, bloc d'Iskel, Hoggar, Algérie). *Fourth meeting of IGCP 485-USTHB, Algiers, Algeria*, 2-3 december 2006, p. 55.
- MOECHER, D.P., ESSENE, E.J., AND ANOVITZ, L.M. 1988.** Calculation and application of clinopyroxene - garnet - plagioclase - quartz geobarometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, 92-106.
- MOKRI, M. 2005.** Pétrologie et géochimie des suites magmatiques basiques et ultrabasiques de la région de Tin Tanet Firt (Hoggar nord Occidental) *Magister, USTHB*. 90 p.
- MOUSSINE-POUCHKINE, A., BERTRAND-SAFATI, J., BALL, E., ET CABY, R. 1988.** Les séries sédimentaires et volcaniques anorogéniques protérozoïques impliquées dans la chaîne Pan-Africaine: la région de l'Adrar Ahnet (NW Hoggar, Algérie). *Journal of African Earth Sciences.*, 7, 57-75.
- NEWTON, R.C. AND PERKINS, D. 1982.** Thermodynamic calibration of géobarometers based on the assemblage garnet-plagioclase-orthopyroxène-clinopyroxène-quartz-Am-mineral., 67, 203-222.
- POWELL, R. 1985.** Geothermometry and geobarometry: a discussion: *J. Geol. Soc.*, 3, 231-43.
- 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.*, 6, 173-204.
- SEN, S.K. AND BHATTACHARYA, A. 1984.** An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88 64 - 71.