

LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR): HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.

Malika MOKRI*, Khadidja OUZEGANE*, Zouhir ADJERID***,
Jean-Robert KIENAST***, Hamid HADDOUM**** et Renaud CABY*****

RÉSUMÉ

Le massif néoprotérozoïque de Tin Hallen (terrane de l'Ahnet, Hoggar occidental) comprend plusieurs types de roches représentées essentiellement par des péridotites, associées à des métatroctolites, des anorthosites, des leucogabbros et des métagabbros avec et sans grenat. Cet ensemble basique et ultrabasique montre une déformation très hétérogène générée vraisemblablement lors du déplacement de l'In Ouzzal vers le nord, au cours du Panafricain. La modélisation thermodynamique des assemblages minéralogiques caractérisant les principales étapes du métamorphisme enregistrées par ces roches, a permis de tracer un cheminement pression-température anti-horaire. Ce dernier est caractérisé par une augmentation croissante de la pression et une baisse graduelle de la température, au cours du temps.

Dans le détail, le premier stade de l'évolution dans les métatroctolites correspond à une granulitisation des paragenèses magmatiques à olivine-plagioclase-spinelle et leur déstabilisation en orthopyroxène-spinelle-clinopyroxène (6 kbar à 800-850°C). Cet épisode est suivi par une élévation de la pression qui se caractérise dans les métagabbros par l'apparition d'assemblages à grenat-clinopyroxène-quartz (10-11 kbar à 800-850°C) puis amphibole. Une hydratation accompagnée d'un refroidissement isobare (11 kbar à 500-600°C), des métatroctolites dans les zones mylonitiques, permet à des assemblages à margarite, disthène, corindon et clinozoïsite de se développer. Le stade ultime de la transformation des métagabbros dans les zones de cisaillement aboutit au développement du glaucophane suite à un déclin significatif de la température (425- 450°C à 10 kbar).

Mots-clés - Tin Hallen - Terrane de l'Ahnet - Hoggar - Trajectoire P-T anti-horaire - Granulite - Schiste bleu - Glaucophane.

*Laboratoire de Géodynamique, Géologie de l'Ingénieur et de Planétologie, F.S.T.G.A.T.-U.S.T.H.B., BP. 32, El Alia, Dar el Beïda, 16111-Alger, Algérie. E-mail: malika.mokri@gmail.com; k.ouzegane@gmail.com

**Ecole Normale Supérieure, Département des Sciences Naturelles, BP. 92, Vieux Kouba, 16050-Alger, Algérie. E-mail: zouhir.adjerid@gmail.com; adjerid@ens-kouba.dz

***Université Denis-Diderot (Paris 7), 4 place Jussieu, 75252-Paris, France.

****Laboratoire de Géo-Environnement, F.S.T.G.A.T.-U.S.T.H.B., B.P. 32 El Alia, Dar el Beïda, 16111-Alger, Algérie.

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

- Manuscrit déposé le 15 Juillet 2012, accepté après révision le 08 Novembre 2012.

THE TIN HALLEN COMPLEX (AHNET TERRANE, NW HOGGAR): REACTIONAL HISTORY AND THERMODYNAMIC MODELING

ABSTRACT

An occurrence of glaucophane-bearing schists in the Hoggar Shield is presented. This high-pressure and low-temperature schist is exposed with other types of metabasites (cumulates of ultramafic rocks, metatroctolites, anorthosites, garnet-bearing and garnet-free gabbros) in the Tin Hallen complex (Ahnet Terrane, Western Hoggar).

Detailed petrographic investigation on selected samples and phase equilibrium modeling from this region were used to constrain the metamorphic evolution of the Tin Hallen complex. The determination of the P–T trajectories indicates that rocks have recorded an anti-clockwise P–T evolution with a pressure increase from about 6 kbar to 11 kbar accompanied by cooling from 800–850 to 425–450°C. Maximum pressure values during the prograde granulitic stage fall within the stability field of garnet with clinopyroxene and quartz symplectites that develop between orthopyroxene and plagioclase in the metagabbros, at 10–11 kbar and 800–850°C.

The ultimate stage of transformation is characterised by near-isobaric cooling at 450–425°C. These conditions permit the occurrence of glaucophane within the shear zones.

Keywords - Tin Hallen - Ahnet Terrane - Hoggar - Anti-clockwise P-T path - Granulite - Blue schist - Glaucophane.

INTRODUCTION

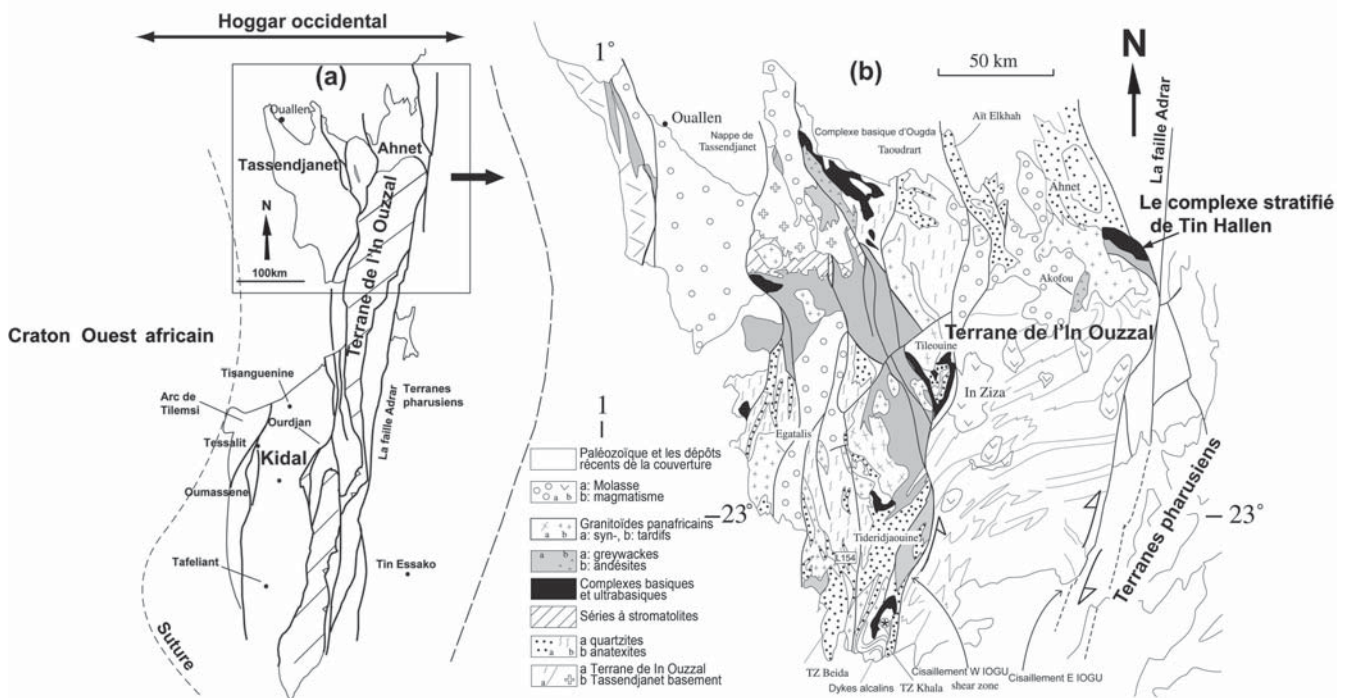
Ce travail se focalise sur la description d'une des zones de sutures ayant abouti à la structuration du bouclier targui, au Panafricain, où un métamorphisme assez particulier est à signaler. Il s'agit d'un métamorphisme de haute pression (HP) et de basse température (BT) du faciès schiste bleu (i.e. un métamorphisme à glaucophane), le premier à être décrit dans le Hoggar (Mokri, 2005). En effet, les ceintures métamorphiques avec glaucophane sont des témoins potentiels de l'existence d'anciennes sutures. Elles sont caractérisées par un cheminement pression (P) - température (T) tout à fait particulier qui permet le maintien de températures assez faibles (400–500°C), jusqu'à de grandes profondeurs. Ce type de gradient géothermique détermine une série de faciès métamorphiques originaux, parmi lesquels le faciès du schiste bleu caractéristique des chaînes de subduction. Le complexe stratifié basique et ultrabasique de la région de Tin

Hallen au nord-ouest du Hoggar semble l'un de ces rares exemples.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET LITHOLOGIE

Le massif de roches basiques et ultrabasiques de Tin Hallen, qui s'étend sur plus de 20 km de long et 7 km de large, occupe la partie méridionale du terrane de l'Ahnet (24°05'00" N, 03° 13' 00" E); une zone limitrophe avec le terrane de l'In Ouzzal (Hoggar occidental, figs. 1a, b et c). D'après Moussine-Pouchkine *et al.* (1988), les sédiments protérozoïques post-éburnéens du terrane de l'Ahnet (Hoggar occidental) sont subdivisés en deux groupes. Le groupe des quartzites de l'Ahnet composé de plus de 5000 m de quartzites fluviatiles matures, et recouvert par le groupe d'Amassine qui contient des sédiments de plateforme carbonatée à stromatolithes. Les quartzites de l'Adrar-Ahnet ont été datés indirectement par

LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR) :
HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.



**Fig.1 - (a) Carte schématique du Hoggar occidental montrant la localisation du terrane de l'Ahnet (Caby, 2003).
Sketch map of the occidental Hoggar showing the setting of the Ahnet Terrane (Caby, 2003).**

**(b) Carte géologique montrant la position du complexe de Tin Hallen (Caby, 2003).
Geological map showing the position of the of Tin Hallen complex (Caby, 2003).**

ces mêmes auteurs à environ 1800 Ma, alors que les stromatolites d'Amassine, ont été attribués à un âge riphéen supérieur (900-700 Ma). Un volcanisme tholéiitique intervient dans chacun des deux groupes : le premier au sein des quartzites est lié à un rifting; le second franchement sous-marin surmonte les carbonates et est lié à l'ouverture océanique.

L'objet de cet article concerne le complexe stratifié basique et ultrabasique comprenant des péridotites associées à des métatroctolites, des anorthosites, des leucogabbros et des métagabbros avec ou sans grenat (fig. 2a). L'ensemble montre une déformation très hétérogène qui se manifeste par la juxtaposition de zones intensément déformées jusqu'aux ultramylonites avec des zones très peu atteintes par la déformation, et, où, le litage magmatique précoce est encore préservé et visible. Le tout apparaît sous forme

de lentilles de direction NO-SE, de dimensions très variables. C'est dans les lentilles de plus grande échelle que sont conservées les reliques magmatiques et granulitiques, alors qu'au niveau des couloirs de la déformation mylonitique, se développent les paragenèses de BT qui renferment des minéraux hydratés comme l'épidote, la margarite ou le glaucophane.

Les roches ultrabasiques (fig. 2a), très sombres, occupent un grand volume dans le complexe stratifié; elles montrent des litages magmatiques auxquels se surimposent une foliation métamorphique avec des cumulats à olivine-chromite qui alternent avec des cumulats ou en plus des minéraux précédents, apparaît le plagioclase en taches claires. Dans ces ultramafites à plagioclase, il n'est pas rare d'observer, à l'échelle de l'affleurement, des olivines auréolées d'une couronne d'orthopyroxène (fig. 2b).

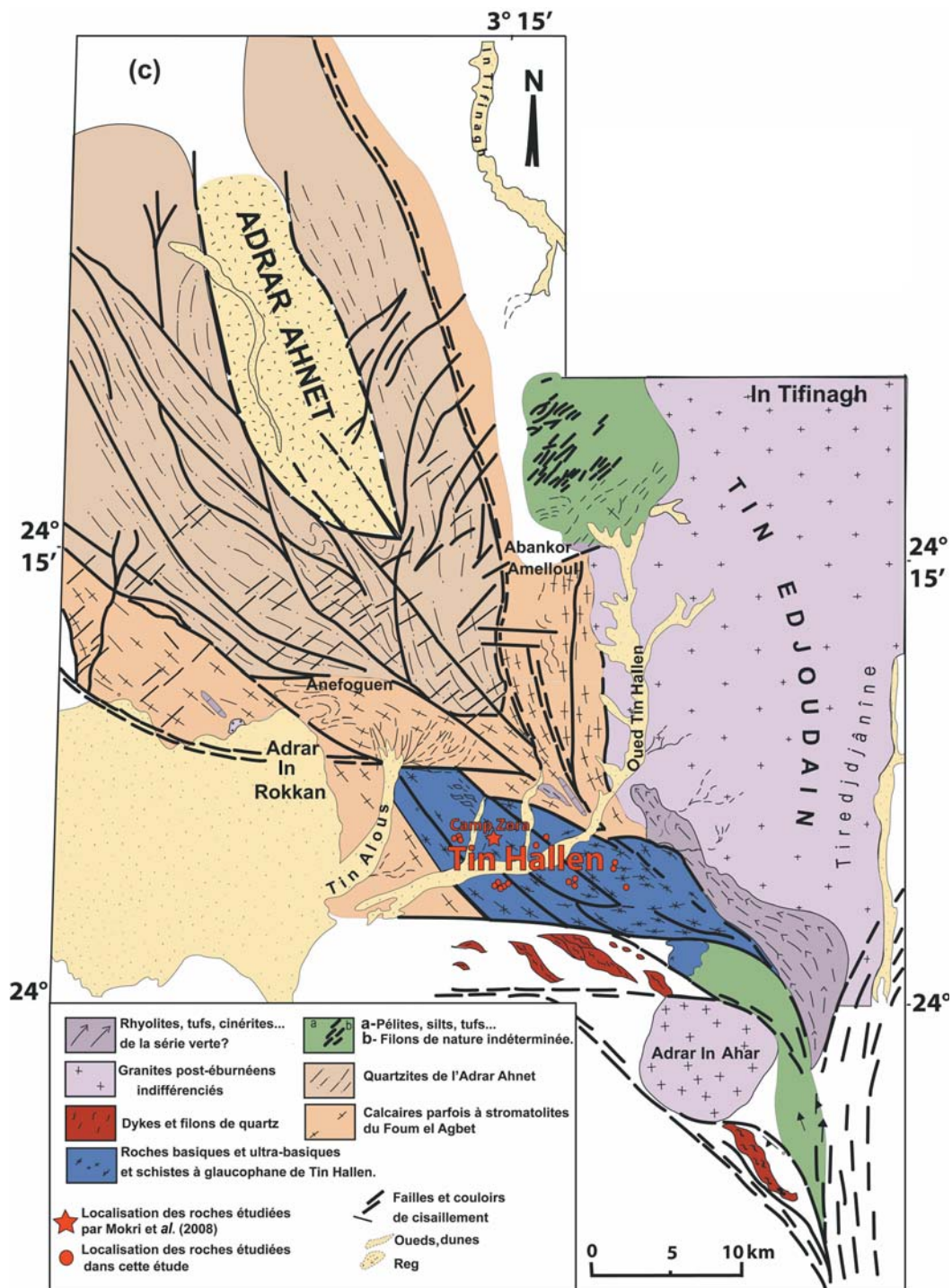


Fig. 1 - (c) Carte géologique schématique de la région de l'Adrar Ahnet (Moussine-Pouchkine et al., 1988) modifiée par Haddoum et al. (sous presse), montrant la localisation des échantillons étudiés et celle du Camp Zora (Mokri et al., 2008).

Sketch map of the Adrar Ahnet (Moussine-Pouchkine and al., 1988) modified by Haddoum and al. (in press), showing the localization of the studied rocks and the samples from previous studies (Mokri and al., 2008).

LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR) :
HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.

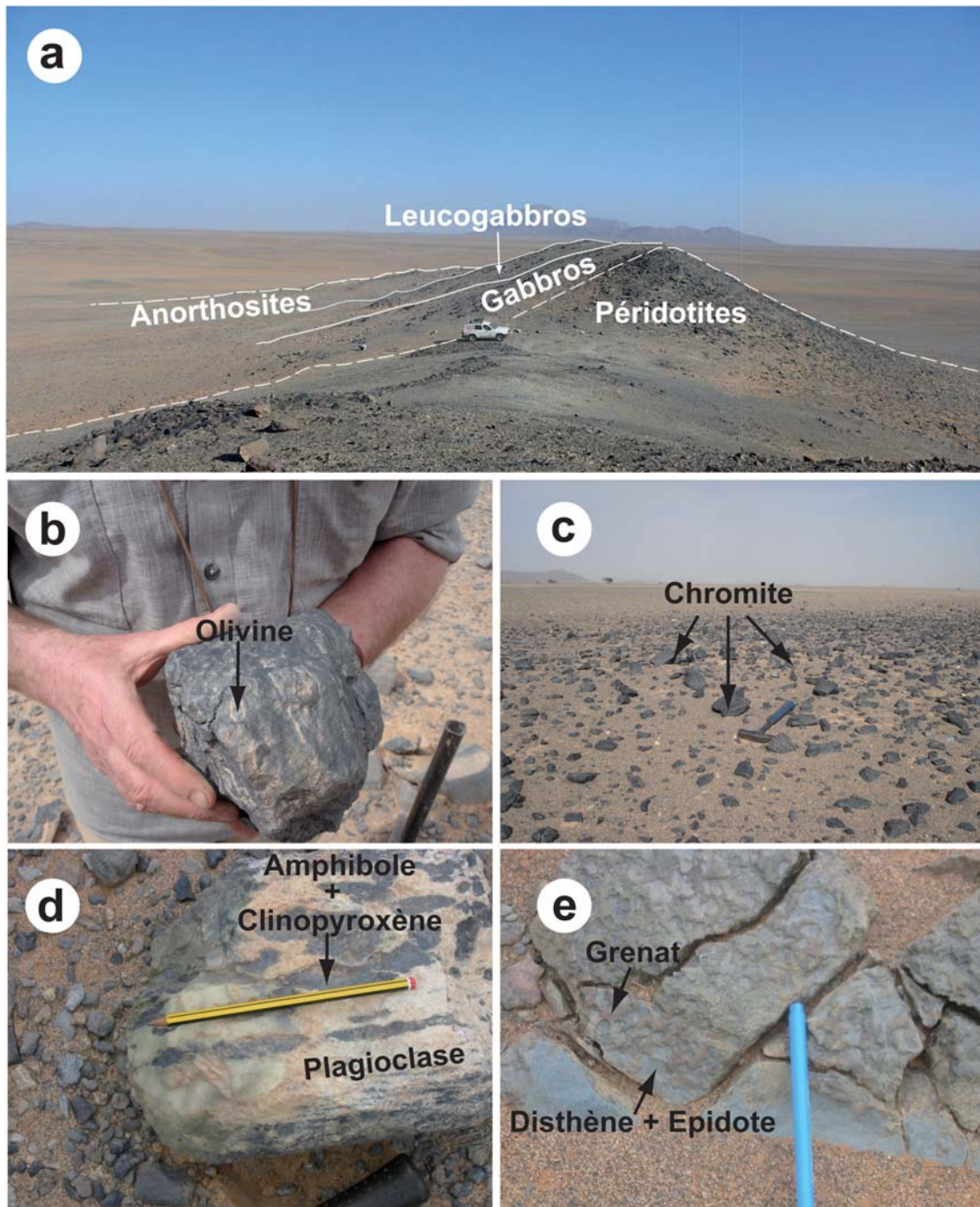


Fig.2 - Photographies montrant à l'affleurement

Photographs showing outcropping

(a) une colline à Tin Hallen formée par des péridotites, gabbros, leucogabbros et des anorthosites (*a general view of the series of the Tin Hallen complex*); (b) des ultramafites avec des olivines réactionnelles (*ultramafites with reactional olivine grains*); (c) pointement de chromite dans le reg (*a tip of chromite in the reg*); (d) une anorthosite montrant des flammèches de clinopyroxènes et amphiboles dans une matrice plagioclasique (*clinopyroxene and amphibole bearing-anorthosite*); (e) une anorthosite rétro-morphosée montrant des couronnes de grenat autour d'anciens sites à plagioclase complètement transformé en disthène et épidote (*the growth of garnet coronae around plagioclase, partially retro-morphosed by kyanite and epidote intergrowth in retrogressed anorthosite*).

Quelques pointements de chromite, métrique à décimétrique, alternent avec ces roches ultramafiques (fig. 2c). Dans les métatroctolites, la taille des lits plagioclasiques leucocrates devient importante; ils alternent avec des niveaux sombres, décimétriques, où dominent l'amphibole et le clinopyroxène, associés parfois à du spinelle. L'olivine (Ol) et l'orthopyroxène (Opx) sont moins répandus. Dans les anorthosites, les ferro-magnésiens se répartissent en flammèches dans une matrice plagioclasique, intensément déformée (fig. 2d). Dans les couloirs mylonitiques d'anorthosites, le disthène forme des amas bleuâtres, et est, associé à du corindon (Cor) et de la zoïsite (Cz), alors que le grenat (Grt) bourgeonne en couronnes autour des anciens sites à plagioclase (fig. 2e). Des roches intermédiaires entre les gab-

bros et les anorthosites sont représentées par des leucogabbros; ils sont caractérisés par l'alternance de lits clairs à dominance plagioclasique et des lits sombres formés principalement de ferromagnésiens tels que le clinopyroxène, l'amphibole avec ou sans grenat (fig. 3a). Les métagabbros à grenat, de forme généralement en amande ou lenticulaire, dominant dans les regs (fig. 3b). Il est très rare d'observer la paragenèse magmatique primaire à orthopyroxène-plagioclase-ilménite dans ces roches, qui sont nettement foliées et montrent une évolution vers des amphibolites à grenat dans les zones très déformées (fig. 3c). Dans le reg, un seul gisement dans une zone d'ultramylonite a révélé la présence de schistes à glaucophane (fig. 3d). Il est possible que ces schistes résultent de l'évolution métamor-

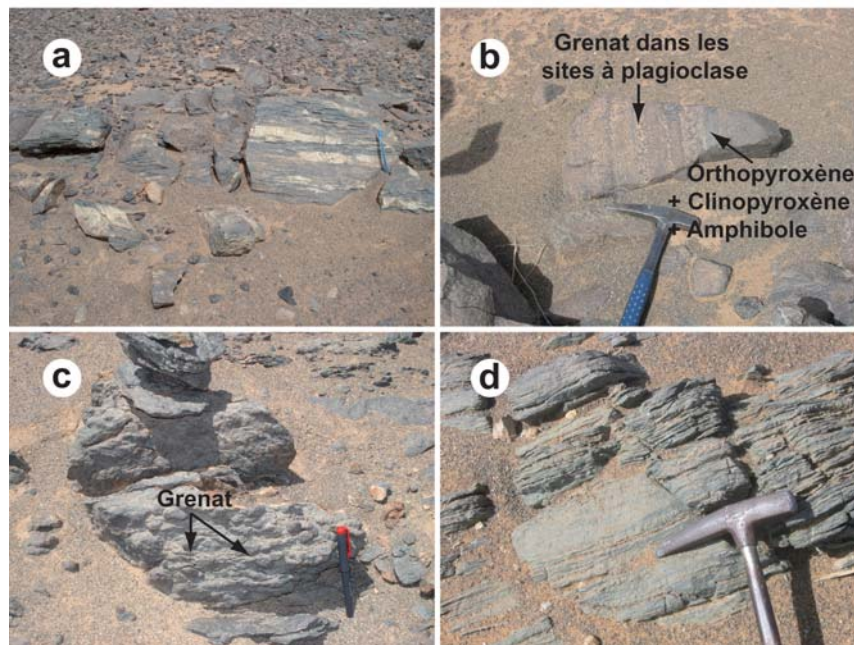


Fig. 3 - (a) Leucogabbro montrant une alternance de lits clairs plagioclasiques et de lits sombres à amphibole et clinopyroxène.

Banded leucogabbro. Plagioclase bearing feldspathic layers alternating with amphibole and clinopyroxene.

(b) Metagabbro à grenat folié montrant une alternance de lits à grenat et plagioclase et des lits sombres à orthopyroxène, clinopyroxène et amphibole.

Foliated metagabbro. Garnet and plagioclase-bearing layers are alternating with orthopyroxene, clinopyroxene and amphibole.

(c) Transformation des gabbros en amphibolites à grenat dans une zone de cisaillement.
Transformation of gabbro into garnet-bearing amphibolite along a shear zone.

(d) Schiste à glaucophane montrant les surfaces de schistosité.
Glaucophane-schist showing axial-plane schistosity.

phique extrême par hydratation et baisse de la température des métagabbros à grenat.

PÉTROLOGIE ET MINÉRALOGIE

Les roches du complexe stratifié de Tin Hallen (fig. 1c) sont variées; mais globalement trois groupes principaux peuvent être distingués : **le groupe I** regroupe les roches ultrabasiqes (ultramafites avec/ou sans plagioclase) et les métatrocotolites; **le groupe II** comprend les métagabbros avec/ou sans grenat et **le groupe III** est représenté par les schistes à glaucophane.

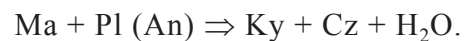
Le groupe I correspond à des cumulats des ultramafites et des métatrocotolites. Les ultramafites renferment des associations à olivine-spinelle-orthopyroxène-clinopyroxène-pargasite, avec/ou sans plagioclase (tabl. I). Dans les métatrocotolites, à l'échelle de la lame mince, les textures sont plus complexes et révèlent en plus, de la couronne à orthopyroxène, la présence d'une symplectite très fine à clinopyroxène (Cpx)-spinelle (Spl) et parfois même à amphibole (Amph) au contact du plagioclase (Pl). Les lits clairs sont dominés aussi par un assemblage, symplectitique à vermiculaire, composé par du disthène (Ky) et de l'épidote (Ep). Ces derniers entourent partiellement ou totalement des reliques de margarite baignant dans une matrice de plagioclase. Chimiquement, l'olivine présente un rapport X_{Mg} élevé la rapprochant du pôle forstérite ($Fe_{0.86-0.84}$), le spinelle forme une solution solide entre la hercynite (71%) et la chromite (~21%), le clinopyroxène est un diopside (X_{Mg} : 0.81-0.92) alors que l'orthopyroxène est une bronzite (X_{Mg} : 0.80-0.90). Ce dernier montre deux habitus différents, en gros grains ou en association symplectitique très fine avec le spinelle. Dans les ultramafites sans plagioclase, l'amphibole montre une nette évolution depuis le pôle tschermakite ($6 < Si < 6.5$; X_{Mg} : 0.94 à 0.96; $Na+K = 0.42$ à 0.45) vers le pôle magnésio-hornblende ($6.6 < Si < 7.3$; X_{Mg} : 0.96), alors qu'elle est de type pargasite ou même

magnésio-hastingsite [$(Na + K)_A \geq 0.5$; X_{Mg} : 0.62 à 0.72] dans les ultramafites à plagioclase. Dans ce dernier cas, le plagioclase affiche une composition proche de celle de la bytownite (X_{An} : 0.83).

Les métatrocotolites sont particulièrement intéressantes vu les textures réactionnelles, nombreuses, qui caractérisent les roches et qui permettent de définir plusieurs stades métamorphiques à partir des assemblages observés. La composition chimique des minéraux des métatrocotolites est très proche de celle des minéraux des ultramafites, à l'exception du plagioclase qui est plus sodique (X_{An} : 0.55-0.27), en raison de son évolution à HP. L'assemblage précoce dans ces roches est magmatique, il comprend l'olivine (X_{Mg} : 0.85) et le plagioclase qui sont séparés, suite au métamorphisme, par une double couronne, à orthopyroxène (X_{Mg} : 0.82) d'un côté, et à spinelle (X_{Mg} : 0.59-0.63), clinopyroxène (X_{Mg} : 0.89-0.92) et pargasite (X_{Mg} : 0.80-0.99) de l'autre côté. La couronne à orthopyroxène enveloppe préférentiellement l'olivine alors que la symplectite à spinelle-clinopyroxène-pargasite se développe du côté du plagioclase (fig. 4a); une telle texture permet d'évoquer la réaction:



Postérieurement, la margarite apparaît dans les anciens sites à plagioclase mais se transforme au contact du plagioclase relique en une symplectite à disthène + clinozoisite (fig. 4b), suite à la réaction:



Le groupe II comprend deux variétés de roches, les métagabbros à grenat et les métagabbros sans grenat (tabl. I). Ces derniers sont à orthopyroxène (X_{Mg} : 0.86 à 1), clinopyroxène de type diopside (X_{Mg} : 0.86 à 0.95), plagioclase (X_{An} : 0.30-0.52) et à amphibole de type pargasite ($Al^{VI} > Fe^{3+}$, $Na+K > 0.5$; $Ti < 0.5$; X_{Mg} : 0.90-0.96). Les métagabbros à grenat mon-

Tableau I : Tableau récapitulatif résumant la superposition des paragenèses et la composition des phases dans les cumulats réactionnels (métatroctolites) et dans les métagabbros à grenat.**Summary table showing the main assemblages and mineralogical compositions of metatroctolites and metagabbros.**

Roches	Métatroctolites			Métagabbros à grenat	
	Paragenèse primaire	Paragenèse secondaire	Paragenèse tertiaire	Paragenèse primaire	Paragenèse secondaire
Olivine	$X_{Mg}: 0.85$	–	–	–	–
Orthopyroxène	–	$X_{Mg}: 0.82$	–	$X_{Mg}: 0.66-0.76$	–
Clinopyroxène	–	$X_{Mg}: 0.89-0.92$	–	–	$X_{Mg}: 0.69-0.81$
Amphibole	–	$X_{Mg}: 0.80-0.99$	–	–	<i>tschermakite</i> $X_{Mg}: 0.61-0.87$ et/ou <i>pargasite</i> $X_{Mg}: 0.61-0.72$
Spinelle	–	$X_{Mg}: 0.59-0.92$	–	–	–
Plagioclase	$X_{An}: 0.55-0.27$	–	–	$X_{An}: 0.30-0.50$	–
Grenat	–	–	–	–	<i>Alm</i> ₃₈₋₅₃ <i>Pyr</i> ₂₅₋₃₈ <i>Gross</i> ₁₆₋₂₁
Disthène	–	–	+	–	–
Corindon	–	–	+	–	–
Margarite	–	–	+	–	–
Phengite	–	–	+	–	–
Epidote	–	–	+	–	–
Chlorite	–	–	–	–	+
Quartz	–	–	–	–	+

trent la superposition de deux paragenèses, une précoce magmatique à orthopyroxène (X_{Mg} : 0.66 à 0.76) et à reliques de plagioclase (X_{An} : 0.30-0.50), et une paragenèse tardive à grenat-quartz-clinopyroxène qui se développe sous forme de symplectites fines. La répartition de ces intercroissances permet de distinguer des formes concentriques rappelant l'aspect des couronnes métamorphiques. La première couronne à grenat (*Alm*₃₈₋₅₃*Pyr*₂₅₋₃₈*Gross*₁₆₋₂₁) et à quartz enveloppe préférentiellement le plagioclase, alors que la couronne monominérale à clinopyroxène seul (X_{Mg} : 0.69-0.81) pousse du côté de l'orthopyroxène. Une telle texture suggère la réaction :

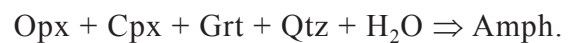


Cet équilibre traduit soit une augmentation de la pression au sein du faciès granulite, soit une décroissance de la température.

Les amphiboles observées dans les métagabbros à grenat sont soit de type tschermakite avec une légère évolution vers la magnésio-hornblende ($(\text{Na}+\text{K})_A < 0.5$; $\text{Si} = 6.1-6.6$; X_{Mg} : 0.61-0.87), soit de type pargasite [$\text{Al}^{\text{VI}} > \text{Fe}^{3+}$; $(\text{Na}+\text{K})_A > 0.5$; $\text{Ti} < 0.5$; $\text{Si} = 6.3$; X_{Mg} : 0.61-0.72]. Les textures dans les métagabbros à grenat indiquent que la croissance de ces amphiboles est plutôt tardive (figs. 4c et 4d). Elle se fait comme suit:



et,



La croissance de la magnésio-hornblende par ce type de réaction traduit sûrement le passage vers le faciès amphibolite.

LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR) :
HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.

Le groupe III comprend des schistes particuliers qui apparaissent le long des zones mylonitiques. Ces schistes sont à glaucophane, albite, phengite, chlorite, épidote, quartz et calcite. Les glaucophanes lenticulaires montrent des microfractures dont le remplissage est composé d'épidote et de magnétite (fig. 4e). Parfois, des veines tardives de calcite recoupent ces schistes (fig. 4f). L'amphibole est représentée par le glaucophane et la magnésio-riebeckite [$(Na+K)_A < 0.5$ et $NaB > 1.50$]. Elles présentent des teneurs peu variables en Si (7.71-7.99) et des rapports X_{Mg} compris entre 0.58 et 0.78. Une autre amphibole, calcique, de type actinote a été également observée.

**Relation de phases
et cheminement P-T**

L'étude des relations de phases dans des systèmes simples tels que le CMASH (CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O) et le CASH (CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O) permet de bien interpréter les transformations métamorphiques observées dans les métatrolites, depuis le stade magmatique précoce jusqu'aux conditions du faciès amphibolite de HP, en passant par le faciès granulite. L'interprétation des textures dans les métagabbros à grenat nécessite par contre des modélisations thermodynamiques dans des systèmes plus com-

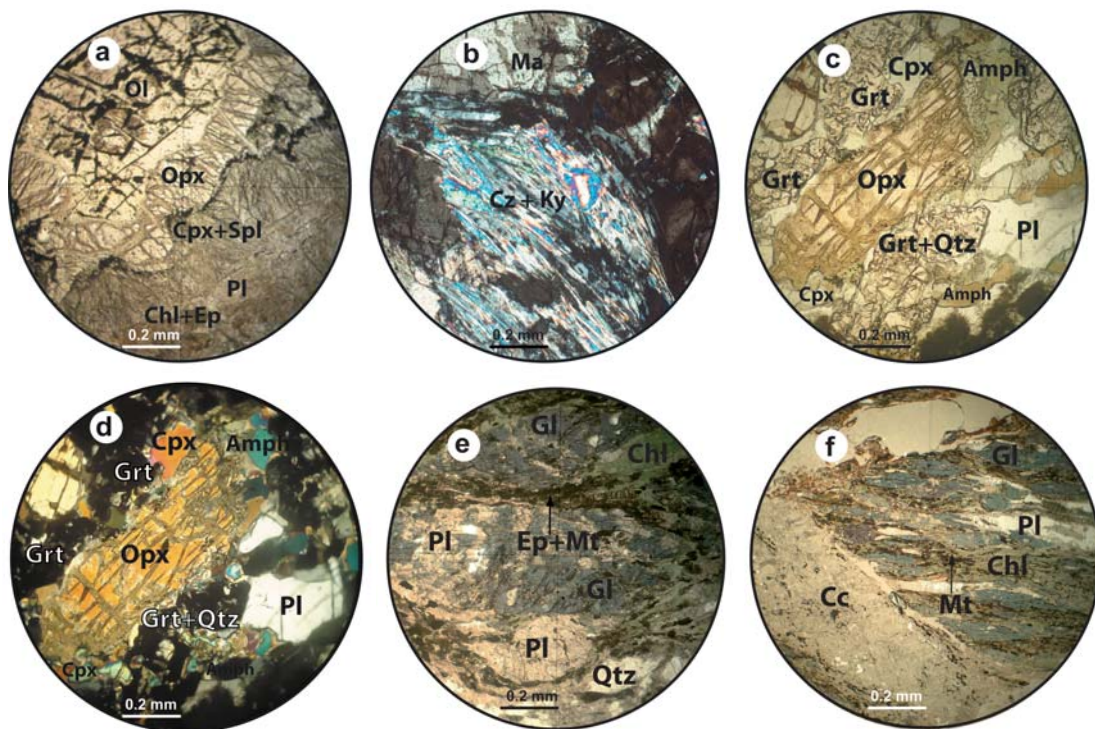


Fig. 4 - Textures réactionnelles montrant

Reactional textures showing

(a) la granulitisation des assemblages magmatiques et le développement de l'orthopyroxène (*the replacement of magmatic minerals by orthopyroxene (Opx), clinopyroxene (Cpx) and spinel (Spl) symplectites*); (b) le remplacement du plagioclase par la margarite puis par le disthène et la clinozoïsité des métatrolites (*a continuous reaction allowing, first, the replacement of plagioclase by margarite (Ma) and then the development of kyanite (Ky) and clinozoisite (Cz) from margarite in metatrolites*); (c) le développement de l'amphibole dans les métagabbros, en lumière naturelle (*the occurrence of amphibole in the metagabbros using cross-polarised light*) et (d) en lumière polarisée analysée (*using plane-polarised light*); (e) la déformation matérialisée par des grains déformés de glaucophane et par des fentes à épidote-magnétite qui recoupent la chlorite (*a deformed glaucophane grain which is cutting the chlorite by epidote and magnetite-bearing expansion slots*); (f) des fentes tardives à calcite (*late calcite-bearing slots*).

plexes comme le NCFMASH ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$). Ce dernier est plus adapté pour bien contraindre les conditions de pression et de température des équilibres à chaque stade du métamorphisme. Enfin, pour les schistes à glaucophane, le système NCFMASHTIO ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$) rend bien compte des conditions d'équilibre des assemblages observés.

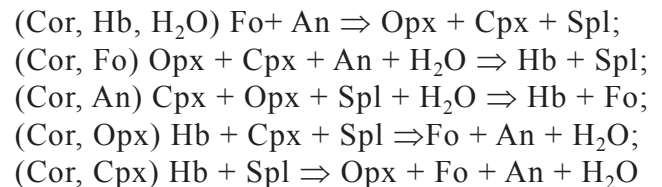
Les calculs thermodynamiques sont effectués en utilisant le logiciel *THERMOCALC* v3.33 (Powell et Holland, 1988). Ce dernier exploite la base de données thermodynamiques de Holland et Powell (1988, 1998). Les modèles thermodynamiques des solutions solides utilisées lors des calculs sont établis par White et al. (2007) pour le grenat, Holland et Powell (1998) pour l'épidote et l'olivine, Diener et al. (2007) pour l'amphibole, Green et al. (2007) pour le clinopyroxène, White et al. (2000; 2002) pour l'orthopyroxène et le spinelle, Holland et al. (1998) pour la chlorite et Holland et Powell (2003) pour le plagioclase.

L'albite, le corindon, le disthène, la margarite, le sphène, le quartz et H_2O sont considérées comme des phases pures.

Relation de phases dans les métatroctolites dans le système CMASH et CASH

Dans les métatroctolites de Tin Hallen, les minéraux observés sont l'olivine, le spinelle, le clinopyroxène, l'orthopyroxène, l'amphibole, et le plagioclase. Dans les métatroctolites les plus évolués montrant la déstabilisation poussée du plagioclase on peut aussi trouver le corindon, la margarite, le disthène et la clinozoisite. Pour expliquer la succession des assemblages métamorphiques dans les métatroctolites, nous avons construit une grille P-T dans le système CMASH, où deux points invariants [corindon] et [forstérite] sont stables (fig. 5). Le point invariant [Cor], situé à ~ 6.3 kbar et 700°C implique six phases, l'olivine, le spinelle, le clinopyroxène, l'ortho-

pyroxène et le plagioclase anorthitique. Ainsi, six réactions univariantes gravitent autour de ce point (fig. 5) :



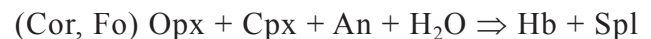
et,



D'après l'analyse paragenétique, la réaction précoce (stade1-2, fig. 5a) observée dans les métatroctolites est:



Celle-ci est suivie par la croissance de l'amphibole en symplectite avec le spinelle (stade3, fig. 5b) via la réaction:



Seules ces deux réactions, émanant du point invariant [Cor], ont été observées dans nos échantillons. Elles traduisent une transition entre le stade magmatique à olivine-plagioclase et le stade métamorphique du faciès granulite à orthopyroxène-clinopyroxène-spinelle (fig. 5a), puis le passage progressif vers le faciès amphibolite, suite à une hydratation du système (fig. 5b).

Pour montrer l'évolution de ces roches et leur transformation en amphibolite à corindon, un deuxième point invariant a été construit (fig. 5). C'est le point [Fo], situé à ~ 11.80 kbar et 790°C , qui n'implique plus l'olivine. Cette dernière est la première phase minérale à disparaître lors de la transformation métamorphique initiale.

La réaction qui relie les deux points invariants est :



LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR) :
HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.

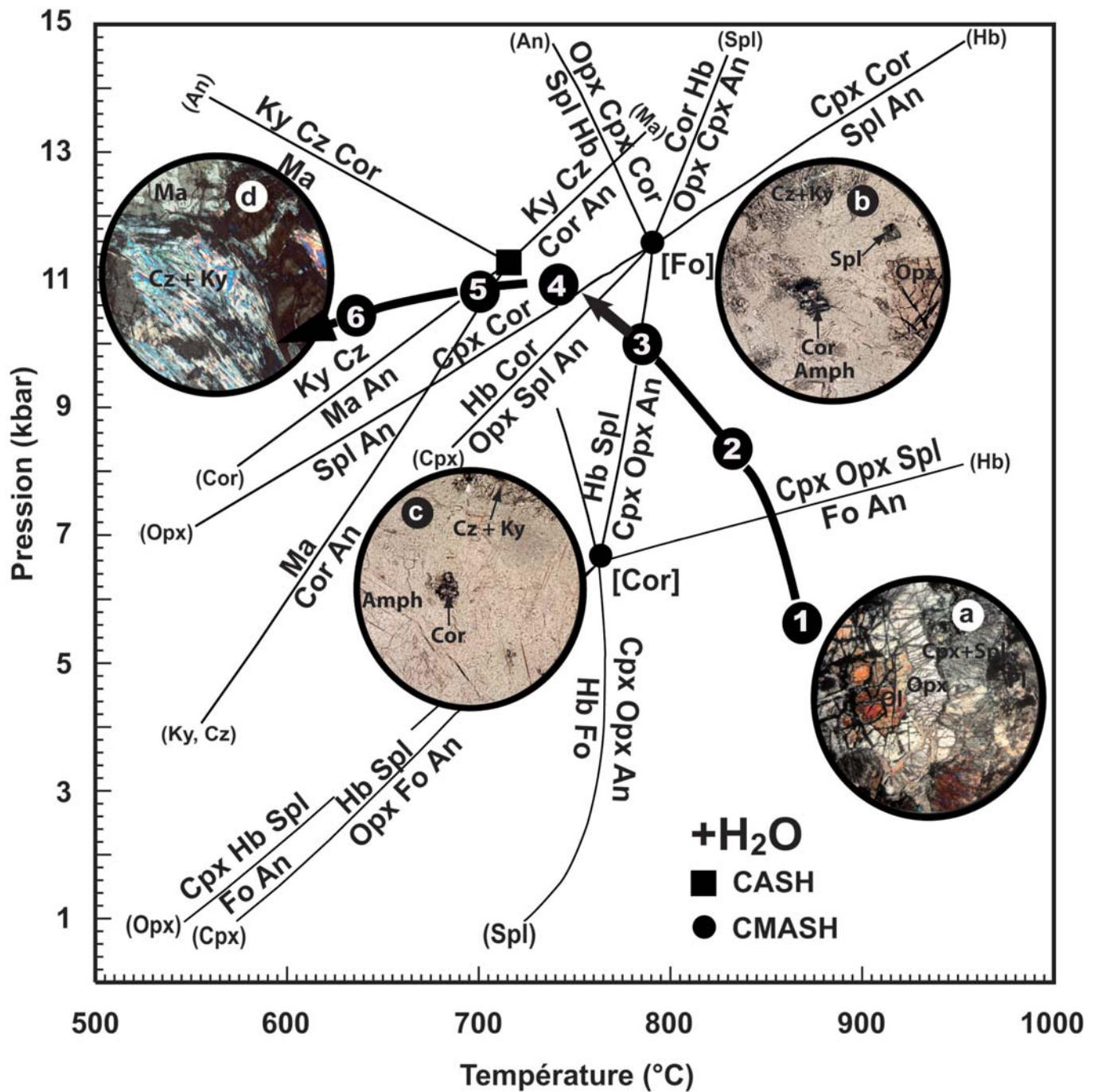


Fig. 5 - Grille *P-T* montrant l'évolution enregistrée par les roches du complexe de Tin Hallen. La trajectoire anti-horaire illustrée par la flèche marque le passage depuis un stade magmatique précoce (1) à olivine-plagioclase (a), vers un stade final de haute pression/basse température (6) à margarite-clinozoïcite-disthène (d), en passant par des stades intermédiaires du faciès granulite (2) à orthopyroxène-clinopyroxène-spinelle (a) et du faciès granulite de haute pression (4-5) à tschermakite-corindon (b-c).

P-T evolution of the Tin Hallen complex. The suggested P-T path is deduced by interpolating the reactional stages 1-6 (see the text).

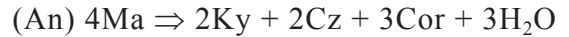
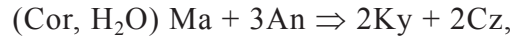
Elle traduit l'évolution depuis le stade 2 vers le stade 3 (fig.5). L'apparition du corindon en équilibre avec une amphibole très alumineuse (stade 4, fig. 5c) peut s'expliquer par la réaction :



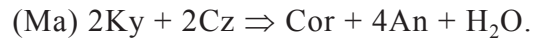
L'évolution vers le faciès amphibolite de HP se traduit par la déstabilisation complète du plagioclase par hydratation et baisse de la température dans les zones de cisaillement.

Le système simple CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (CASH) permet de bien montrer cette évolution qui implique dans ce cas de figure l'anorthite, la margarite, la clinozoïsite, le corindon, le disthène et H₂O. Quatre réactions univariantes (V = 1) sont

équilibrées dans ce système (fig. 5). Il s'agit des réactions :



et,



Ainsi, l'apparition des premiers cristaux de margarite dans les anciens sites à plagioclase (stade 5) peut s'expliquer par la réaction d'hydratation :

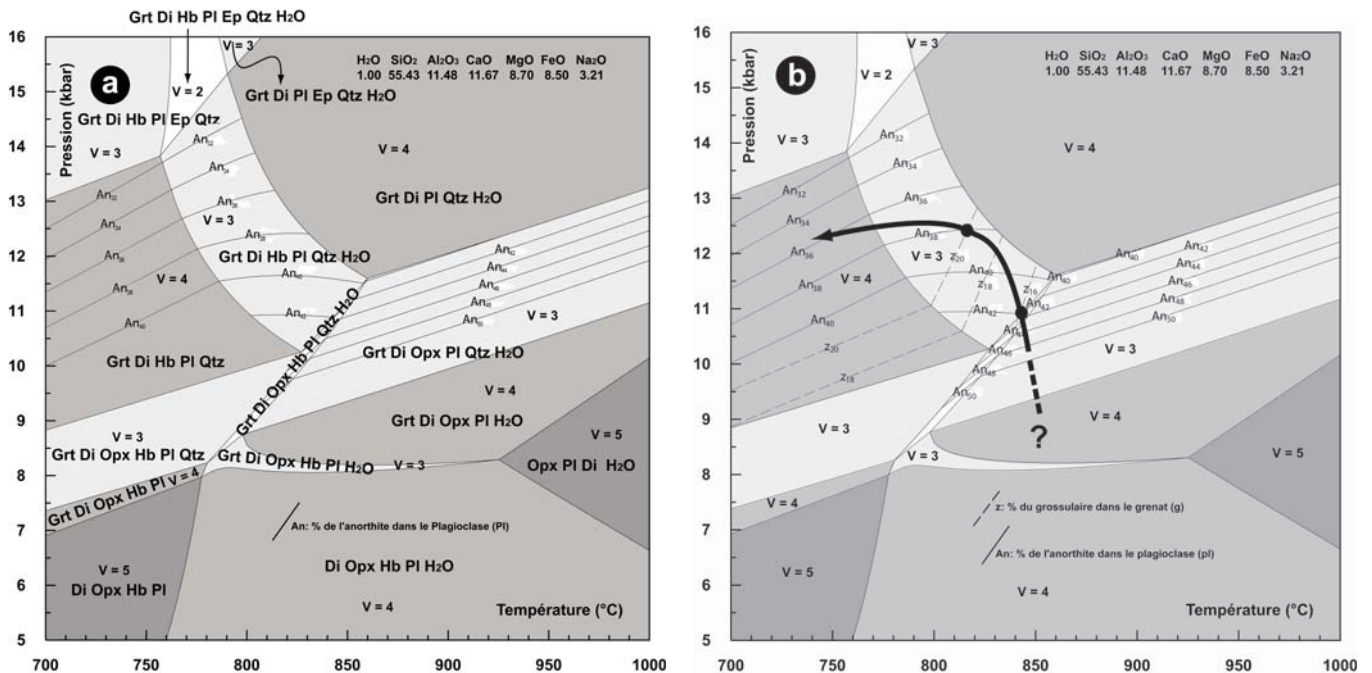


Fig. 6 - Pseudosections P-T, du système NCFMASH, adaptées aux métagabbros à grenat montrant (a) la position des champs calculés et (b) la trajectoire P-T déterminée en se basant sur la l'intersection des isoplèthes des minéraux en équilibre (celles des teneurs en grossulaire dans le grenat et de l'anorthite dans le plagioclase), dans les domaines observés des métagabbros à grenat.

P-T Isochemical diagrams modelled in the NCFMAH system, considering the bulk composition of a garnet-bearing metagabbro, (b) isopleths representing the percentage of grossular in garnet and anorthite in plagioclase are used to constrain the P-T evolution.

Dans un stade ultérieur (stade 6), la margarite se déstabilise à son tour suite à une baisse sensible de la température pour donner des symplectites à disthène et clinozoïsite (figs. 4b et 5d) suite à la réaction :



Relation de phases dans les métagabbros à grenat dans le système NCFMASH

Même si le système CMASH décrit remarquablement la succession des stades métamorphiques dans les métatroctolites et dans les métagabbros à grenat (Mokri et *al.*, 2008) depuis le faciès granulite vers le faciès amphibolite, son application aux associations naturelles, nécessite de prendre en compte la composition réelle des phases. En effet, dans les assemblages naturels, le grenat est une solution solide entre le grossulaire, le pyrope et l'almandin; le plagioclase est un mélange entre l'albite et l'anorthite; le clinopyroxène, l'orthopyroxène et l'amphibole n'ont pas de compositions de pôles purs et montrent des substitutions tschermackitiques (Mg, Fe) Si \Leftrightarrow Al Al et Fe \Leftrightarrow Mg. Ainsi, une pseudosection, adaptée au faciès granulite, i.e. une pression d'eau faible, est construite pour les métagabbros à grenat dans le système Na₂O - CaO - FeO - MgO - Al₂O₃ - SiO₂ - H₂O (NCFMASH), considéré comme le système le plus représentatif pour la composition de cette roche obtenue à partir de l'analyse de roche totale, Mokri (2005; figs. 6a et b). Un domaine bivariant (V = 2) à sept phases est calculé (figs. 4c et d), il s'agit de la réaction continue:



Ce champ divariant est environné par quatre associations trivariantes (V = 3) à six phases, chacune:

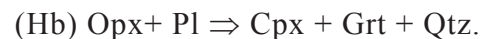
- (Hb) orthopyroxène-plagioclase-grenat-clinopyroxène-quartz-H₂O qui apparaît à HT;

- (Qtz) orthopyroxène-plagioclase-grenat-clinopyroxène-hornblende-H₂O, qui est stable à BP;

- (Opx) grenat-clinopyroxène-plagioclase-hornblende-quartz et H₂O, en équilibre à HP et BT;

- (H₂O) orthopyroxène-grenat-clinopyroxène-plagioclase-hornblende-quartz qui est stable à BT.

La réaction la plus précoce observée dans les métagabbros permet le développement de couronnes et de symplectites à grenat, clinopyroxène et quartz qui séparent l'orthopyroxène du plagioclase magmatique. Cette texture peut être ainsi exprimée sous forme d'un équilibre trivariant de type:



Le calcul des isoplèthes, représentant la teneur de la composante de l'anorthite dans le plagioclase (An₃₂-An₅₀) et celle du grossulaire dans le grenat (Z₁₆-Z₂₀), est reporté sur les figures 6a et 6b. L'intersection des isoplèthes du grenat (Z₁₆-Z₂₀) avec celles du plagioclase (An₃₈-An₄₂), correspondant aux compositions réelles des minéraux analysés à la microsonde, permettent de contraindre les conditions physiques (P-T) du développement des couronnes et des symplectites à grenat-clinopyroxène-quartz-plagioclase-hornblende à une pression comprise entre 10 et 12 kbar et une température de l'ordre de 800-850°C.

La composition du plagioclase en équilibre avec l'orthopyroxène du stade magmatique n'a pas été conservée. Le chemin P-T permettant de traverser les isoplèthes des plagioclases les plus calciques (An₅₀) observés dans ces roches vers les plagioclases les plus riches en albite (An₃₆), permettent de tracer une trajectoire anti-horaire avec une augmentation de la pression accompagnée d'une diminution de la température.

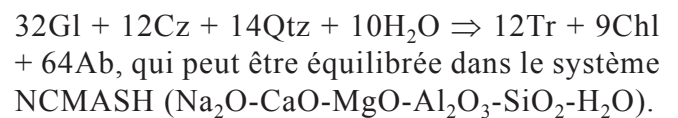
Relation de phases adaptées aux schistes à glaucophane dans le système NCFMASTIO

Le système le plus adapté pour l'étude des schistes à glaucophane est le système NCFMASTIO ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$), en considérant les phases suivantes: glaucophane, actinote, chlorite, épidote, albite, sphène, quartz, hornblende et H_2O .

Dans ce système à neuf constituants, le champ divariant ($V = 2$) qui nous intéresse, se situe entre 9.5 et 9.8 kbar, à une température quasi-constante, proche de 490°C . Parmi les assemblages trivariants ($V = 3$) qui émanent à partir de ce domaine divariant, on note la présence de la paragenèse qui nous intéresse, à glaucophane (Gl) - actinote (Act) - chlorite (Chl) - épidote (Ep) - albite (Ab) - sphène (Sph) - quartz (Qtz) - H_2O .

Pour parvenir à cette association, nous proposons qu'à partir d'une amphibolite composée d'hornblende, chlorite, épidote, sphène, quartz et

H_2O ($V = 5$) stable à une pression au-dessus de 8 kbar et une température proche de 525°C (fig. 7), une baisse de la température à pression constante, au niveau des zones de cisaillement, permettrait la stabilité de l'assemblage quadrivariant ($V = 4$) à glaucophane, chlorite, épidote, sphène, quartz et H_2O . C'est suite à la baisse de la pression qu'apparaît l'albite, suivant la réaction:



Dans les zones déformées où le glaucophane est absent, la roche est principalement à actinote, chlorite, épidote, albite, sphène, quartz. Cette association quadrivariante ($V = 4$) dans le système NCMASH est stable entre 425 et 500°C , pour un large intervalle de pression, qui reste cependant inférieure à 8 kbar (fig. 7). Cette paragenèse ainsi que toutes les associations à prehnite et pumpellyite sont en relation avec un gradient géothermique bas, anormal (10 à $15^\circ\text{C}/\text{km}$).

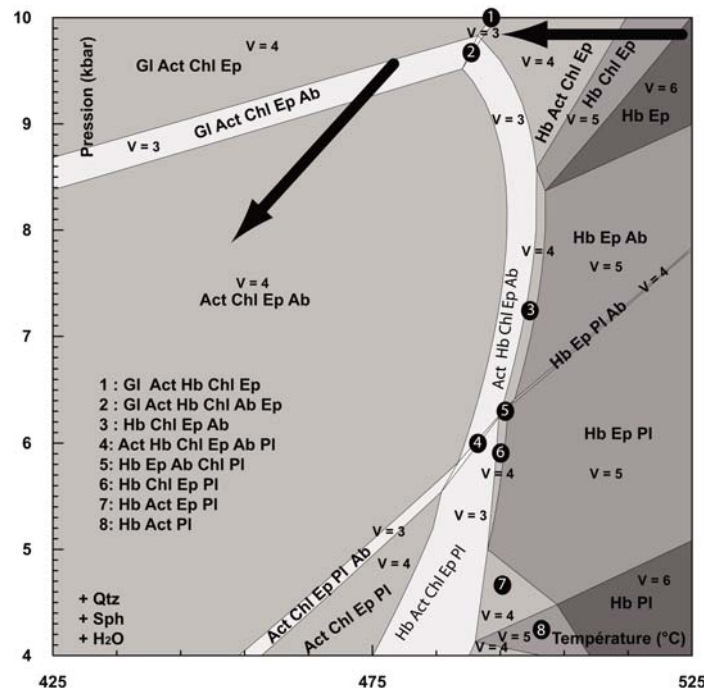


Fig. 7 - Pseudosections P-T, du système NCFMASTIO montrant la trajectoire P-T suivie par les schistes à glaucophane, se basant sur les paragenèses observées dans ces roches.

P-T pseudosections modelled in the NCFMASTIO system considering the bulk rock composition of a glaucophane-bearing schist. The suggested P-T path is deduced by interpolating the reactional stages in this rock.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'étude paragenétique des roches basiques et ultrabasiques du massif de Tin Hallen permet de définir plusieurs stades métamorphiques qui retracent un trajet P-T anti-horaire (fig.5). Ce dernier est marqué dans un premier stade par une granulitisation des paragenèses magmatiques (à olivine et plagioclase) avec l'apparition de l'orthopyroxène, du clinopyroxène et du spinelle (< 6 kbar à 800-850°C). Lors d'un épisode de haute pression, dans les métagabbros quartziques, le grenat apparaît en association symplectitique avec le clinopyroxène et le quartz et des couronnes d'amphibole se développent par déstabilisation du plagioclase et de l'orthopyroxène. Ce stade d'augmentation de pression se poursuit à plus basse température, avec une hydratation du système pour atteindre des conditions proches de 10-11 kbar et 500-600°C. Cette évolution conduit à la disparition du plagioclase et le développement de l'assemblage à margarite, disthène, corindon et clinozoïsite. Le stade ultime du refroidissement se fait dans les conditions du faciès schiste bleu, caractérisé par l'apparition du glaucophane aux environs de 425-450°C et 8-10 kbar.

Dans le Hoggar, on connaît de nombreuses zones de haute pression où affleurent différents types de roches métamorphiques, notamment des éclogites (Sautter, 1983; Liégeois *et al.*, 2003; Zetoutou *et al.*, 2004; Boubazine-Benhalla, 2007; Berger, 2008; Adjerid, 2009; Derridj *et al.*, 2010; Adjerid *et al.*, 2012) qui témoignent d'un enfouissement très important et sont donc interprétées comme des marqueurs d'anciennes zones de subduction et/ou de collisions ou de charriages importants. D'autres roches, moins fréquentes que les éclogites, témoins potentiels aussi, de l'existence d'anciennes sutures sont représentées par les schistes à glaucophane. Ce minéral dont l'occurrence est très rare, a été décrit pour la première fois dans le Hoggar par Mokri (2005) et Mokri *et al.* (2008). Dans le Gourma (Est du Mali), Caby *et al.* (2008) décrivent aussi des éclogites à glaucophane-grenat d'âge néoprotérozoïque, formées à 13-15 kbar et 500 ± 50°C. De telles conditions correspondent à des gradients géothermiques de l'ordre de 10 °C/km et sont expliquées par des contextes de subduction. Cette relation entre métamorphisme HP-BT et subduction existe surtout dans les chaînes de collision récentes (e.g. Alpes, Himalaya). Les gradients rétrogrades de ces unités de haute pression comme les éclogites et schistes blancs du Sérourout, (Hoggar central; Derridj *et al.*, 2010; Adjerid *et al.*, 2012), traduisent généralement une remontée des roches vers la surface par une décompression et une rééquilibration thermique avec une augmentation de la température par rapport aux conditions précoces de BT de la subduction. La trajectoire P-T suivie par ces roches est typiquement horaire. Le complexe stratifié de Tin Hallen est caractérisé par une évolution P-T des gradients progrades et rétrogrades inverse de ce qui est habituellement observé dans une zone de subduction. Généralement, les trajectoires anti-horaires sont associées dans la littérature internationale à des contextes d'arcs, où le refroidissement isobare est une caractéristique (Ellis, 1987; Bohlen, 1987; Spear, 1993). Les paragenèses métamorphiques les plus précoces de Tin Hallen se sont développées dans les conditions d'un gradient de HT/BP (≈ 6 kbar à 800-850°C) ayant évolué dans le temps vers des assemblages à HP suivi par un refroidissement quasi isobare conduisant à des associations de BT. L'exhumation de ce complexe stratifié s'est produite dans les conditions de BT correspondant au faciès schiste bleu. Ce cheminement anti-horaire, original, traduit probablement un comportement en relation avec l'obduction d'un segment d'arc insulaire développé au Néoprotérozoïque. En effet, la géochimie des métagabbros de Tin Hallen montre que les protolithes appartiennent à un complexe tholéitique formé dans un contexte d'arc, d'âge néoprotérozoïque probable (Mokri, 2005; Liégeois communication personnelle). D'après Haddoum *et al.* (sous presse) la déformation du complexe est en relation avec une compression est-ouest panafricaine montrant un con-

pression est-ouest panafricaine montrant un con-

tinuum. Aux premiers stades de la compression, l'In Ouzal a été exhumé vers le nord entraînant dans son ascension le complexe de Tin Hallen. La température qui était élevée au départ, diminue progressivement au cours du temps avec le refroidissement du complexe stratifié. Ces paragenèses de HP/HT tout comme les reliques magmatiques sont préservées au sein de blocs résistants, boudinés et faiblement déformés. La diversité du comportement rétrograde est due à l'hétérogénéité de la déformation post-granulitique. Ainsi, dans les zones mylonitiques en présence d'un fluide, comme H₂O, on assiste à une recristallisation partielle ou totale des paragenèses à BT. Pour mieux contraindre l'évolution géodynamique de cette région du Hoggar, une étude conjointe de géochronologie, géochimie et du métamorphisme est nécessaire et devrait permettre de suggérer s'il s'agit d'un cheminement P-T anti-horaire acquis au cours d'un seul événement orogénique continu ou de plusieurs événements séparés dans le temps.

Remerciements : Nous tenons à remercier Jean-Paul Liégeois et Julien Berger pour leurs remarques pertinentes qui ont permis l'amélioration du manuscrit. Nous exprimons aussi notre reconnaissance à Farid Ighilahriz, Directeur de l'Office du Parc National de l'Ahaggar pour son assistance technique aux travaux de terrain dans l'Ahnet. Cette publication est une contribution au projet PNR « Cartographie et genèse des gîtes à corindon du Hoggar » et au projet CNE-PRU « Apport de la télédétection à la cartographie géologique des terrains précambriens (Hoggar occidental) en zones désertiques ».

BIBLIOGRAPHIE

- ADJERID, Z. 2009.** Textures et modélisation thermodynamique : exemple des séries métamorphiques de haute température et de haute pression du Hoggar. *Thèse de Doctorat, FSTGAT/USTHB, Alger*, 384 p.
- ADJERID, Z., OUZEGANE, KH., GODARD, G., BITAM-DERRIDJ, A. ET KIENAST, J.-R. 2012.** Le Sérourout : Un fragment de lithosphère océanique subductée à haute pression, exhumé, puis granulitisé à haute température. *Bulletin du Service Géologique National*, vol. 23, n° 3, pp. 199-217.
- BERGER, J. 2008.** Les associations de roches basiques-ultrabasiqes néoproterozoïques d'Amalaoulaou (Gourma, Mali), du Tassendjanet (Hoggar occidental, Algérie) et cénozoïques du Saghro (Anti-Atlas, Maroc): témoins de l'évolution géodynamique de la ceinture péri-cratonique ouest-africaine. *Thèse de Doctorat, ULB, Belgique*, 404 p.
- BOHLEN, S.-R. 1987.** Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *Journal of Geology*, 95, pp. 617-632
- BOUBAZINE-BENHALLA, S. 2007.** Le métamorphisme de haute pression de la région de Tahifet (Hoggar Central). *Thèse de Magister, U.S.T.H.B. Algérie*.
- CABY, R. 2003.** Terrane assembly and geodynamic evolution of Central-Western Hoggar: a synthesis. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 133-159.
- CABY, R. AND MONIÉ, P. 2003.** Neoproterozoic subductions and differential exhumation of Western Hoggar (South-west Algeria): new structural, petrological and geochronological evidence. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 269- 293.
- CABY, R., BUSCAIL, F., DEMBELÉ, D., DIAKITÉ, S., SACKO, S. AND BAI, M. 2008.** Néoproterozoic garnet-glaucophanite and eclogites : new insights for subduction metamorphism of the Gourma fold and thrust belt (Eastern Mali). *Geol. Society of London*, special publication, 297, pp. 203- 216.
- DERRIDJ-BITAM, A., OUZEGANE, KH., ADJERID, Z., GASTON, G. ET KIENAST, J.-R. 2010.** Les éclo-gites granulitisées de Ti-N- Eggoleh (Terrane du Sérourout, Hoggar central) : étude métamorphique et conséquence géodynamique. *Bulletin du Service Géologique National*, vol. 21, n°2, pp. 117- 136.
- DIENER, J.-F.-A., POWELL, R., WHITE, R.-W. AND HOLLAND, T.-J.-B. 2007.** A new thermodynamic model for clino- and ortho-amphiboles in Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-O. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, pp. 631-656.
- ELLIS, D.-J. 1987.** Origin and evolution of granulites in normal and thickened crusts. *Geology*, 15, pp. 167-170.

LE COMPLEXE STRATIFIÉ DE TIN HALLEN (TERRANE DE L'AHNET, NORD-OUEST HOGGAR) :
HISTOIRE RÉACTIONNELLE ET MODÉLISATION THERMODYNAMIQUE.

- GREEN, E.-C.-R., HOLLAND, T.-J.-B. AND POWELL, R. 2007.** An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogite rocks. *American Mineralogist*, 92, pp. 1181-1189.
- HADDOUM, H., MOKRI, M., OUZEGANE, KH, AÏT-DJAFER, S. ET DJEMAI, S.** Extrusion de l'In Ouzzal vers le nord (Hoggar occidental, Algérie): une conséquence d'un poinçonnement panafricain. *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research* (In press).
- HOLLAND, T.-J.-B. AND POWELL, R. 1998.** An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, pp. 309-343.
- HOLLAND, T.-J.-B., BAKER, J.-M. AND POWELL, R. 1998.** Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *European Journal of Mineralogy*, 10, pp. 395-406.
- HOLLAND, T.-J.-B AND POWELL, R. 2003.** Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, pp. 492-501.
- LIÉGEOIS, J.-P., LATOUCHE, L., BOUGHRARA, M., NAVEZ, J. AND GUIRAUD, M. 2003.** The LATEA metacraton (Central Hoggar, Tuareg shield, Algeria): behaviour of an old passive margin during the Pan-African Orogeny. *Journal of African Earth Sciences*, 37, pp. 161-190.
- MOKRI, M. 2005.** Géochimie des roches ultramafiques et mafiques de la région de Tin Hallen (Hoggar Occidental) et relation avec l'encaissant métamorphique. *Thèse de Magister, FSTGAT/ USTHB*, 90p.
- MOKRI, M., OUZEGANE, KH., KIENAST, J.-R. ET CABY, R. 2008.** Evolution pression et température des métagabbros à grenat du complexe mafique et ultramafique du Camp Zora (Terrane de l'Ahnet, NO du Hoggar). *Bull. du Serv. Géol. Nat.*, vol. 19, n°01, pp. 17-31.
- MOUSSINE-POUCHKINE, A., BERTRAND-SARFATI, J., BALL, E. ET CABY, R. 1988.** Les séries sédimentaires et volcaniques anorogéniques protérozoïques impliquées dans la chaîne panafricaine: la région de l'Adrar-Ahnet (NW Hoggar, Algérie). *Journal of African Earth Sciences*, 7, pp. 57-75.
- POWELL, R. AND HOLLAND, T.-J.-B. 1988.** An internally consistent thermodynamic data set with uncertainties and correlations. 3. Applications, methods, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, 6, pp. 173-204.
- SAUTTER, V. 1983.** Les éclogites et les amphibolites à grenat des terrains précambriens de l'Aleksod; leur signification dans le cadre de l'orogénèse panafricaine. *Thèse de 3^{ème} cycle, UPMC, Paris*, 165p.
- SPEAR, F.-S. 1993.** Metamorphic phase equilibria and Pressure-Temperature-time paths. *Mineralogical Society of America, Washington, D.C.*, series, 799p.
- WHITE, R.-W., POWELL, R., HOLLAND, T.-J.-B. AND WORLEY, B.-A. 2000.** The effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology*, 18, pp. 497-511.
- WHITE, R.-W., POWELL, R. AND CLARKE, G.-L. 2002.** The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, pp. 41-55.
- WHITE, R.-W., POWELL, R. AND HOLLAND, T.-J.-B. 2007.** Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, pp. 511-527.
- ZETOUTOU, S., OUZEGANE, KH., BOUBAZINE, S. AND KIENAST, J.-R. 2004.** Azrou N' Fad (Central Hoggar, Algeria) one of the deepest terranes of LATEA: arguments based on P-T evolution in eclogites. *Journal of African Earth Sciences*, 39, pp. 193-200.