

Présentation et discussion de quelques diagrammes de phases dans le système Ca-Fe-Si-C-O des formations ferrifères de la région de Berrahal - Oued El Aneb (massif de l'Edough, NE algérien)

Henni BACHIR^{1,2*} et Guy BERNARD³

¹Département des Sciences Naturelles, Ecole Normale Supérieure, B.P 92 Kouba, 16050 Alger, Algérie

²Laboratoire « métallologie et magmatisme de l'Algérie », USTHB, Alger, Algérie

³Département Géosciences et environnement (GSE), Centre SPIN, E.N.Sup. des Mines, 158 Cours Fauriel, 42023 St Etienne, France

* Correspondance, courriel : bahenni@yahoo.fr

Résumé

La région de Berrahal-Oued El Aneb (Edough) contient d'anciens gisements et indices de magnétite \pm hématite liés à des roches calco-silicatées. Les corps minéralisés sont stratiformes, plus ou moins lenticulaires, et sont encaissés dans des schistes à disthène, staurotite et grenat au voisinage de marbres. Les principales paragenèses relevées dans les corps minéralisés comprennent essentiellement magnétite, olivine (fayalite), pyroxène (hedenbergite), calcite, micas et grenat (almandin). Ces minéraux ont subi les mêmes effets du métamorphisme que les roches encaissantes. L'interprétation d'analyses chimiques montre que les formations à l'origine des corps minéralisés correspondent à des roches carbonato-ferrifères impures, plus ou moins siliceuses. Le fer aurait été exprimé sous forme carbonatée (sidérite). Un processus pétrogénétique, illustré par la discussion de diagrammes de phases, expliquant l'évolution des corps minéralisés dans leur contexte est proposé et nous a conduit à retracer la succession des différentes étapes d'évolution de ces corps et à expliquer la cristallisation des minéraux constituant les paragenèses entrant dans la composition des faciès de minerai par une décarbonatation (+ oxydoréduction) métamorphique des formations originelles.

Mots-clés : *Edough, magnétite, formations ferrifères, métamorphisme, décarbonatation.*

Abstract

Presentation and discussion of some phase diagrams in the Ca-Fe-Si-C-O system of Berrahal-Oued El Aneb iron-formations (Edough massif, NE of Algeria)

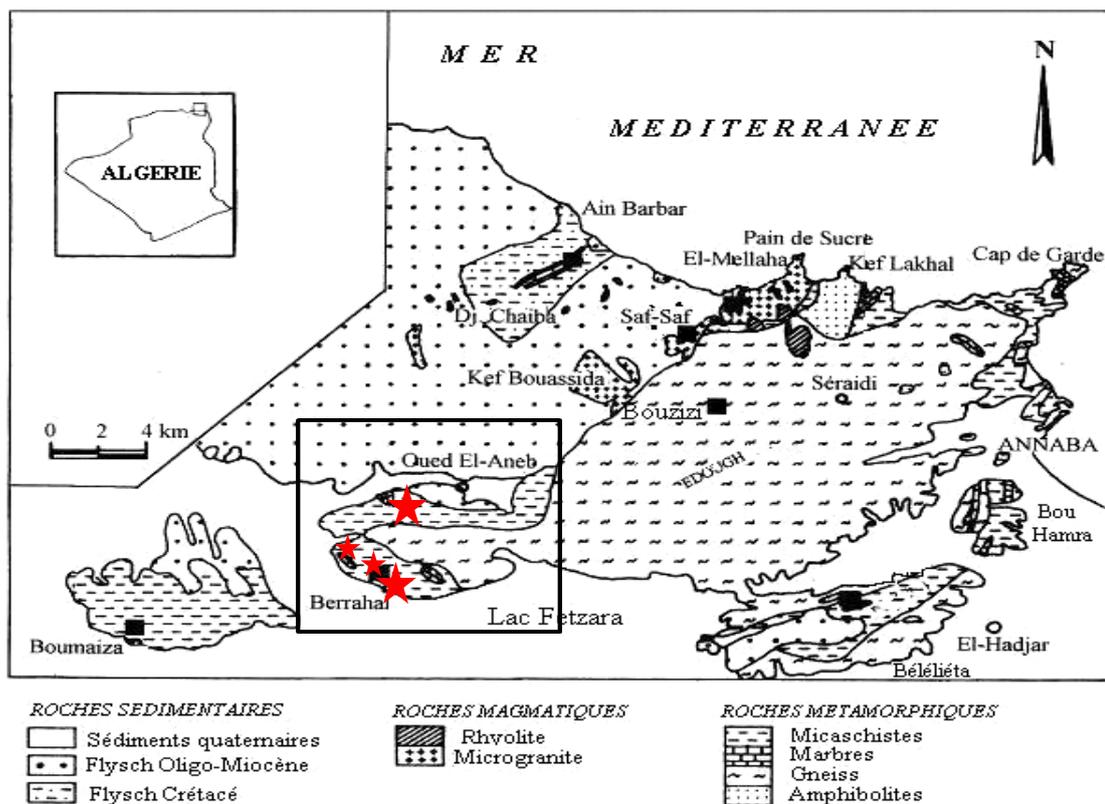
The Berrahal - Oued El Aneb area (Edough massif) hosts ancient deposits of magnetite \pm hematite ores associated with calc-silicate rocks. Ore bodies are more or less stratiform lenticular, and are hosted in kyanite, staurolite and garnet schists in the vicinity of marbles. The main minerals identified in the ore bodies are magnetite, olivine (fayalite), pyroxene (hedenbergite), calcite, mica and garnet (almandine). These minerals result from metamorphism of sedimentary or volcano sedimentary rocks. The interpretation of chemical analysis showed that the origin of ore bodies correspond to impure carbonate-iron-bearing

rocks, more or less siliceous. The iron was expressed as carbonate (siderite). A petrogenetic process, illustrated by the discussion of phase diagrams, explaining the evolution of mineralized bodies in their context is proposed and conduct us to explain the crystallization of minerals constituting parageneses entering in the composition of the facies of ore by a metamorphic decarbonation (+ oxydoreduction).

Keywords : *Edough, magnetite, iron formations, metamorphism, decarbonation.*

1. Introduction

La région de Berrahal-Oued El Aneb est située à une trentaine de kilomètres à l'Ouest de Annaba (*Figure 1*). La plupart des gisements de magnétite, anciennement exploités, affleurent au niveau du versant Sud du massif de l'Edough. Ce massif est constitué par un socle métamorphique polycyclique et une couverture épimétamorphique surmontés par des flyschs allochtones. L'ensemble est recoupé par diverses roches magmatiques acides affleurant au nord. L'étude de la minéralisation ferrifère de Berrahal-Oued El Aneb dont celle de Mokat El Hadid (y compris Boudjelbana), d'El MourOûan'ia et de la mine de Sidi Ammar Ben Mohammed a été axée principalement sur la recherche de données géologiques et gîtologiques dans le but de dégager tous les caractères pouvant permettre d'établir d'éventuels liens génétiques entre les différents corps minéralisés et de discuter l'évolution de ces derniers dans leur contexte.



★ : Positions des anciens gisements de fer

Figure 1 : Carte de localisation des anciens gisements et indices de fer de la région de Berrahal-Oued El Aneb (Carte géologique d'après travaux de [1]).

Il est délicat de retrouver les formations à l'origine de corps minéralisés dans un contexte complexe de métamorphisme régional du fait des diverses origines possibles des protolithes. Peu de travaux ont été entrepris sur les formations englobant ces gisements et indices. Des travaux de terrain, des études minéralogiques et géochimiques nous ont permis d'apporter de nouveaux résultats sur la caractérisation de ces formations, la nature des phases minérales, les différentes phases de métamorphisme ayant affecté les corps minéralisés et les roches encaissantes, ainsi qu'une mise en évidence des différentes paragenèses entrant dans la composition des corps minéralisés [2,3]. Dans cette note, nous proposons la discussion de quelques diagrammes de phases afin de comprendre et d'expliquer l'évolution des différents minerais dans leur contexte.

2. Méthodologie

2-1. Environnement géologique

Les formations métamorphiques du massif de l'Edough sont caractérisées par une série gneissique que surmonte un complexe micaschisteux [1]. Le complexe micaschisteux se subdivise principalement en deux séries :

- 1. Une série inférieure englobant les corps minéralisés en magnétite, composée par des micaschistes à grenat-staurotide à la base, avec intercalations de niveaux de marbre et présence sporadique de disthène. Les micaschistes à grenat-staurotides sont surmontés par des schistes grenatifères.

- 2. Une série supérieure à prédominance de séricitoschistes avec intercalations de niveaux de marbres, schistes carbonatés, talcschistes et lentilles de roches amphibolitiques (à Béliéta et Bou Maïza).

L'analyse paragenétique des formations schisteuses englobant les corps minéralisés, qui se localisent essentiellement au Sud du massif de l'Edough, a permis de déceler deux associations minérales distinctes [2] :

- Une première association plus ou moins conservée, antérieure à la schistosité principale caractérisée par le grenat, le disthène, la staurotide et attribuée à une phase de métamorphisme précoce Mn+1. Dans les micaschistes, l'étude de lames minces montre des paragenèses à grenat-staurotide et grenat-disthène. De l'andalousite est parfois présente dans les environs de Bou Hamra et de Béliéta attestant un métamorphisme de moindre intensité que dans les zones où la présence du disthène est généralisée.

- Une deuxième association synschisteuse et superposée à la première, caractérisée essentiellement par biotite + micas blancs + quartz. Cette association est liée à une phase tardive de métamorphisme Mn+2 responsable de la foliation "S" régionale affectant toutes les roches métamorphiques. Cette foliation est porteuse d'une linéation d'étirement minéral de direction moyenne N130-140. L'étude du terrain et de préparations microscopiques suivant des sections [XZ] (plan XZ de l'ellipsoïde de déformation) montrent le caractère non coaxial de la déformation liée à Mn+2 en s'exprimant par des cisaillements tangentiels avec un transport vers le NW.

2-2. Description et caractérisation des corps minéralisés

Les Corps minéralisés à magnétite se présentent sous forme de couches stratiformes plus ou moins lenticulaires composées par des roches calcitiques et calco-silicatés; l'ensemble est encaissé dans les schistes à Disthène - Staurotide - Grenat au voisinage de marbres.

Les données de la microsonde des minéraux analysés montrent parmi les silicates des termes essentiellement ferrifères. On note, essentiellement, des variations de compositions en Mn.

L'étude pétrographique des corps minéralisés nous a permis de distinguer trois types de faciès :

1er Faciès Mc (Minerai carbonaté):

C'est un minerai à gangue essentiellement carbonatée caractérisé par un rubanement exprimé par une alternance de bandes à calcite et de bandes à calcite + magnétite. Les proportions des bandes à calcite et des bandes à calcite + magnétite sont assez variables d'un échantillon à un autre. De la Sidérite est sporadiquement présente.

2eme Faciès Ms (Minerai silicaté):

Ce faciès est caractérisé par un minerai à gangue essentiellement silicatée (Fayalite et Hédenbergite). De l'amphibole est aussi présente (Hornblende ferroedenitique et hastingsitique) ainsi que du grenat (Almandin).

3eme Faciès Mi (Minerai intermédiaire):

C'est un minerai que nous considérons comme intermédiaire à cause de ses teneurs en silice plus faibles que celles de Ms. La gangue correspond essentiellement à de l'olivine. Des bandes essentiellement calcitiques s'intercalent parfois dans ce faciès.

Les minéraux précoces composant ces faciès tels que Magnétite, Calcite, Fayalite, Hédenbergite et Grenat sont répartis en proportions et paragenèses variables selon le type de faciès de minerai et sont affectés par Mn+2 attestant le même type de déformation notée dans les schistes encaissants et à l'échelle du massif de l'Edough [3-5]. La localisation des corps minéralisés dans plusieurs sites s'étendant, d'Est en Ouest, sur une quarantaine de kilomètres, de Bou Hamra passant par Béléliéta, Berrahal jusqu'à Bou Maïza et leurs similitudes pétrographiques et géochimiques laissent présager que l'étendue régionale de la minéralisation est héritée des formations originelles ou protolithes, à caractère sédimentaire ou volcano-sédimentaire, qui se seraient transformées par métamorphisme régional. L'étude géochimique des corps minéralisés de la région de Berrahal – Oued El Aneb montre qu'il s'agit de roches à affinités carbonato-siliceuses plus ou moins alumineuses et riches en fer ; celui-ci aurait été exprimé sous forme carbonatée notamment sidérite [6].

2-3. Approche thermodynamique et présentation du modèle

Le but principal de cette approche est d'élucider les conditions génétiques ayant présidé à la cristallisation des différentes paragenèses mises en évidence dans les corps minéralisés des différents secteurs étudiés de la région de Berrahal - Oued El Aneb et de comprendre les processus majeurs ayant opéré lors de l'évolution pétrogénétique de ces corps dans leur contexte. Le processus pétrogénétique majeur qui semble avoir opéré lors de l'évolution des dits protolithes et ayant entraîné la cristallisation des phases minérales exprimées en différentes paragenèses est une décarbonatation progressive avec départ de CO₂ ainsi qu'une part d'oxydoréduction (Les différentes réactions sont décrites plus loin) avec une éventuelle implication d'une métasomatose d'autres éléments chimiques. Au cours de notre démarche on tient compte du chimisme des types de formations susceptibles de représenter la roche originelle ou (protolithe) ayant contrôlé l'apparition des différentes paragenèses. Notre modèle thermodynamique se base aussi sur la nature du système: fermé ou ouvert (en prenant le soin de définir le statut des différents constituants et de sélectionner celui ou ceux susceptible(s) d'être mobile(s)). Ces derniers étant libres d'être transférés par infiltration et/ou par diffusion entre le système et son environnement. Le modèle en question se base sur l'analyse des paragenèses suivant la règle des phases de Gibbs et pour les diagrammes, sur les concepts géométriques introduits par [7] et développés par la suite par d'autres auteurs [8-10]. L'étude des différents échantillons des corps minéralisés nous a permis de définir plusieurs associations minérales caractérisées par un nombre réduit de minéraux variant en fonction des types de minerai définis précédemment, ce qui nous conduit à envisager d'attribuer une mobilité à certains constituants en proposant la construction et la discussion de diagrammes de phases exprimés en variables

thermodynamiques telles que les potentiels chimiques ‘ μ ’ des constituants mobiles à pression et température constantes afin d’élucider l’évolution des corps minéralisés et d’expliquer les zonations mises en évidence dans ces corps dans la mesure où les échanges avec l’extérieur (décarbonatation...) jouent un rôle fondamental dans l’évolution des paragenèses. Nous utilisons le logiciel *Zen+K*(version Windows) pour la construction de ces diagrammes [9], le principe est basé sur l’affigraphie [10].

Les phases minérales primaires identifiées et qui constituent les corps minéralisés de la région de Berrahal - Oued El Aneb sont : Magnétite (Fe_3O_4), Hématite (Fe_2O_3), Calcite ($CaCO_3$), Sidérite($FeCO_3$), Fayalite (Fe_2SiO_4), Hédenbergite ($CaFeSi_2O_6$), Almandin ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$), Quartz (SiO_2). Ceci nous a amené à considérer un système aux constituants suivants : $CaO-FeO-Fe_2O_3-SiO_2-Al_2O_3-O_2-CO_2$ mais nous ne discuterons pour le moment que le sous-système: $CaO-FeO- SiO_2 -O_2-CO_2$ (ou $Ca-Fe-Si-C-O$) ; la fraction alumineuse n’est pas prise en considération du fait qu’elle est peu importante dans les formations, d’une part, et pour simplifier le système d’autre part.

En ce qui concerne la définition du statut des constituants et à cause du nombre réduit des phases minérales noté dans les échantillons étudiés – alors que dans un tel système, le nombre de phases en équilibre peut atteindre 7 phases ($c + 2$ phases, avec $c = 5$) – il nous faut envisager la mobilité de quelques constituants. Il nous semble plus opportun, dans une première approche, de considérer O_2 et CO_2 comme constituants mobiles et CaO , FeO , SiO_2 comme constituants inertes car principaux éléments entrant dans la composition des différentes roches analysées. Les constituants MnO et MgO sont négligés à cause de leurs faibles teneurs et du fait qu’ils ne se trouvent qu’en solutions solides et par conséquent ne peuvent pas jouer de rôle déterminant dans l’apparition de phases minérales. En considérant le système fermé pour CaO , FeO et SiO_2 – sauf pour O_2 et CO – il a été utile, aussi, de tenir compte de la composition chimique des protolithes qui contrôle la cristallisation des différentes paragenèses. Nous reportons, dans ce cas, les principales phases minérales des formations ferrifères de la région de Berrahal - Oued El Aneb dans le triangle $Si-Ca-Fe$ à l’intérieur duquel sont, aussi, projetées les compositions chimiques des différents types de formations ferrifères et de leurs faciès de minerai (**Figure2**).

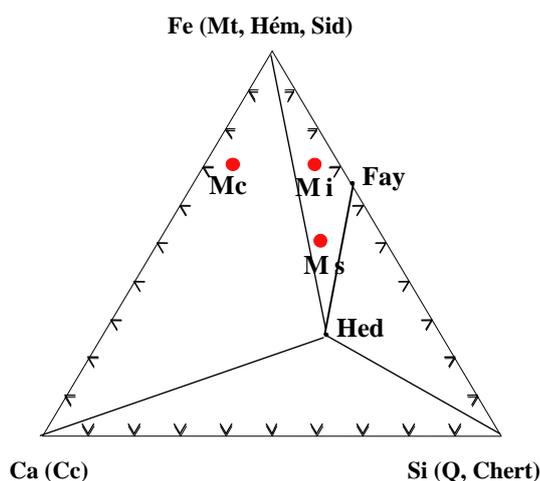


Figure 2 : *Compositions moyennes des différents faciès de minerai Mc, Mi, Ms pris en considération dans les calculs thermodynamiques avec les principales phases entrant dans leurs compositions.*

Mc : Minerai carbonaté Mi : Minerai intermédiaire Ms : Minerai silicaté
Phases minérales : Mt: Magnétite ; Hem: Hématite ; Sid: Sidérite ; Fa: Fayalite ;
Hed : Hédenbergite; Q : Quartz, Chert ; Cc : Calcite

3. Résultats et discussion

Il est important de rappeler que *Burt* [11] avait déjà pris l'initiative de discuter de manière qualitative des séquences de décarbonatation dans le système en question (Ca-Fe-Si-C-O) en faisant intervenir les phases suivantes : Graphite (C), Magnétite (Fe_3O_4), Hématite (Fe_2O_3), Calcite (CaCO_3), Sidérite (FeCO_3), Quartz (SiO_2), Wollastonite (CaSiO_3), Hédenbergite ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$), Fayalite (Fe_2SiO_4), Andradite ($\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$). Dans la région d'étude nous n'avons observé que les minéraux primaires cités auparavant ; donc sans Andradite (à la place nous avons un grenat à dominance Almandin), sans Graphite et sans Wollastonite. Les trois groupements de minerai, compte tenu de l'inertie des constituants déterminants, reflètent, dans ce cas, les protolithes susceptibles de contrôler les réactions lors de l'évolution métamorphique et par conséquent définir la stabilité des paragenèses minérales rencontrées dans les différents corps minéralisés de la région de Berrahal - Oued El Aneb. En fonction du statut des constituants : SiO_2 -CaO-FeO inertes et CO_2 - O_2 mobiles, ceci nous amène à considérer un système dans lequel un assemblage divariant est constitué de 3 phases. Dans la présente approche, lors de la présentation des diagrammes de phases qui suivent, la température et la pression sont constantes. On doit ensuite écrire la matrice de composition du système (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Matrice de composition du système à 600°C, 6Kb.

	Sid	Q	Cc	Fa	Hed	Mt	Wo	Hem	Andr	Gph
FeO(<i>i</i>)	1	0	0	2	1	3	0	2	2	0
SiO ₂ (<i>i</i>)	0	1	0	1	2	0	1	0	3	0
CaO(<i>i</i>)	0	0	1	0	1	0	1	0	3	0
CO ₂ (<i>m</i>)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
O ₂ (<i>m</i>)	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	-1
g ₀ (Kj/mol)	-	-	-	-	-	-	-	-	-6117.4	-6.66
	861.39	953.51	1301.61	1637.77	3030.2	1282.72	1718.9	928.76		
s (J/mol/K)	204.53	76.29	226.77	413.64	411.8	297.46	197.1	220.65	787.53	-1.16
v (cm ³)	2.94	2.27	3.69	4.64	6.79	4.45	3.99	3.03	13.19	0.53

Légende :

Phases: **Sid**: Sidérite; **Q**: Quartz; **Cc**: Calcite; **Fa**: Fayalite; **Hed**: Hédenbergite; **Mt**: Magnétite; **Wo**: Wollastonite; **Hem**: Hématite; **Andr**: Andradite; **Gph**: Graphite.

Statut des constituants: **i** : inerte; **m**: mobile

Fonctions thermodynamiques: **g₀**: énergie libre de Gibbs de référence (KJ/mol); **s**: entropie (J/mol/K); **v**: volume molaire (cm³).

Pour les diagrammes en potentiels chimiques, nous n'avons besoin que de l'enthalpie libre de référence. La validité de la base des données thermodynamiques est primordiale pour pouvoir mener à bien notre analyse. Il a été possible d'utiliser plusieurs bases de données [12,13]... et nous avons choisi d'utiliser les bases de données de [13] actualisées parce qu'elles renferment les données de toutes les phases qui nous intéressent et qu'elles ont été, régulièrement, mises à jour. En raison des conditions de P et T qui ont dû régner lors de l'évolution des formations ferrifères de la région d'étude et notamment leurs transformations par métamorphisme, nous avons dû effectuer des calculs dans le but de déduire les valeurs des paramètres thermodynamiques correspondant aux conditions adéquates et différentes des conditions standards à 25°C (298.15K) et 1 bar. Dans notre cas et pour la présente étude, les enthalpies libres de formation des phases qu'on a utilisé dans la construction des diagrammes μCO_2 - μO_2 ont été calculées pour les conditions T = 600°C et P = 6 Kb, en référence aux conditions de cristallisation des paragenèses

à Grenat-Staurotide-Disthène relevées dans les schistes encaissant les corps minéralisés, et antérieures au métamorphisme Mn+2.

Dans les diagrammes de phases restreints $\mu\text{CO}_2 - \mu\text{O}_2$ (à P et T constantes) qui suivent, dont on tient compte de la composition chimique initiale du système, les courbes univariantes sont des droites délimitant des domaines divariants où plusieurs associations à 3 minéraux peuvent être stables d'après la composition chimique initiale, en références aux compositions chimiques des minerais carbonaté, intermédiaire et silicaté. Nous ne développons dans cette note, comme exemple, que l'évolution du minerai carbonaté 'Mc'. Les mêmes approches sont entreprises sur les minerais 'Mi' et 'Ms' et montrent, aussi, une évolution concordante par rapport au minerai 'Mc'.

A partir du diagramme, (Figure 3 a, b), qui montre la décarbonatation du minerai carbonaté 'Mc' à T=600°C et P=6Kb, nous observons ce qui suit, de la droite vers la gauche (Dans le sens de la décarbonatation):

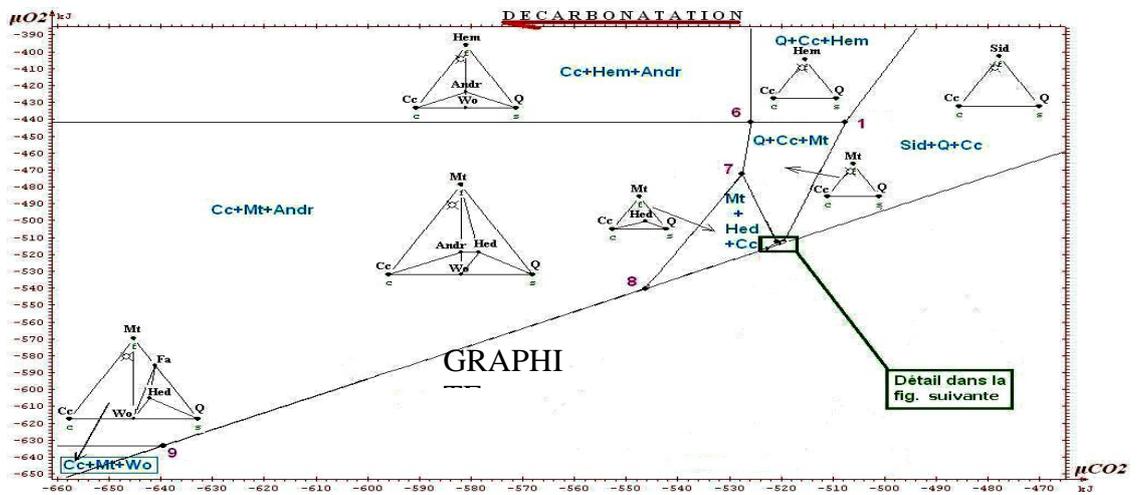


Figure 3a : Diagramme isotherme et isobare (600°C, 6Kb) $\mu\text{CO}_2 - \mu\text{O}_2$ des phases dans le système Ca-Fe-Si-C-O. Minerai Carbonaté 'Mc'.

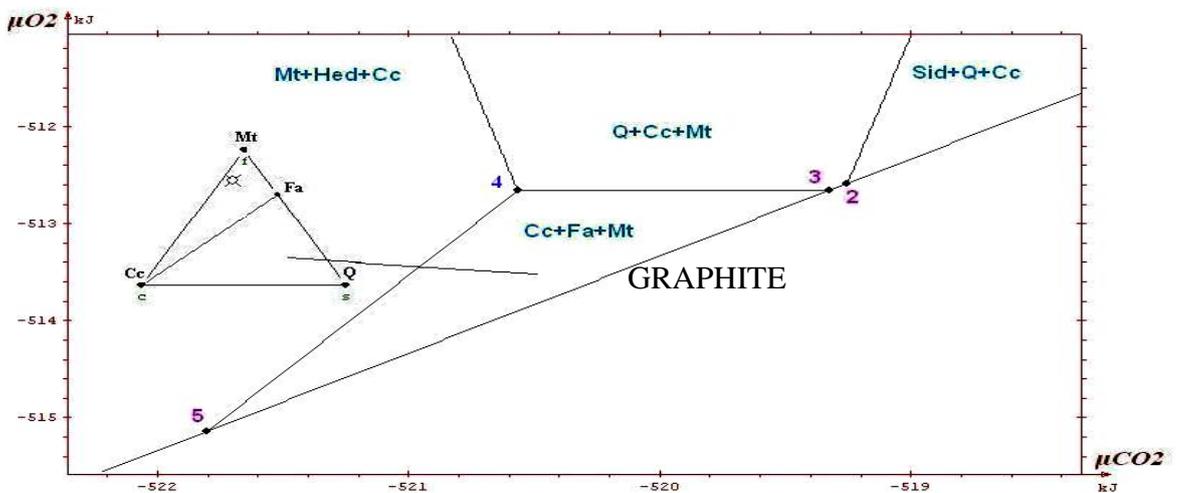


Figure 3b : Suite et détail du champ délimité dans la figure précédente.

A partir de ce diagramme nous observons ce qui suit, de la droite vers la gauche (Dans le sens de la décarbonatation) :

➤ Paragenèses stables dans les points invariants (paragenèses constituées de 5 phases)

	POINTS INVARIANTS				
	1	4	6	7	
Au-dessus de la droite « GRAPHITE »	Sid,Q,Cc,Hem, Mt	Hed,Q,Cc,Mt, Fa	Q,Cc,Mt,,Hed,A nd	Q,Cc,Mt,Hed,Andr	
	POINTS INVARIANTS				
	2	3	5	8	9
Le long de la droite « GRAPHITE »	Sid,Q,Cc,Gph,, Mt	Q,Cc,Fa,Gph, Mt	Cc,Fa,Mt,Gph,H ed	Cc,Hed,Mt,Gph,An dr	Cc,Mt,Andr,Gph,W o

➤ Paragenèses stables dans les domaines divariants (paragenèses constituées de 3 phases)

Au-dessus de la droite « GRAPHITE »	Sid,Q,Cc	Q,Cc,Hem	Q,Cc,Mt	Cc,Fa,Mt	Mt,Hed,Cc	Cc,Hem,Andr	Cc,Mt,Andr	Cc,Mt,Wollastonite
-------------------------------------	----------	----------	---------	----------	-----------	-------------	------------	--------------------

N.B : La droite « GRAPHITE » représente la réaction : $C + O_2 = CO_2$ et délimite deux domaines distincts caractérisés, simultanément, par des conditions réductrices (en dessous de la dite droite) à des conditions relativement oxydantes au-dessus.

Légende :

Sid : Sidérite ; **Q** : Quartz ; **Cc** : Calcite ; **Fa** : Fayalite ; **Hed** : Hédenbergite ; **Mt** : Magnétite ; **Wo** : Wollastonite ; **Hem** :Hématite ; **Andr** : Andradite ; **Gph** : Graphite.

Les principales réactions mises en jeu dans le système Ca-Fe-Si-C-O et susceptibles d'entraîner la cristallisation des paragenèses relevées dans le minerai carbonaté des formations ferrifères de la région de Berrahal - Oued El Aneb sont les suivantes:

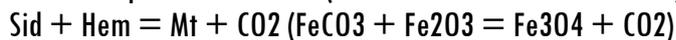
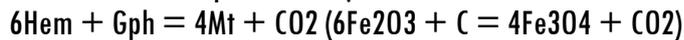
- (1) $2\text{Sid} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Hem} + 2\text{CO}_2$ ($2\text{FeCO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$)
- (2) $3\text{Sid} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Mt} + 3\text{CO}_2$ ($3\text{FeCO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{CO}_2$)
- (3) $2\text{Sid} + \text{Q} = \text{Fa} + 2\text{CO}_2$ ($2\text{FeCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2$)
- (4) $2\text{Mt} + 3\text{Q} = 3\text{Fa} + \text{O}_2$ ($2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SiO}_2 = 3\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + \text{O}_2$)
- (5) $3\text{Cc} + \text{Mt} + 6\text{Q} = 3\text{Hed} + 3\text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ ($3\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6\text{SiO}_2 = 3\text{CaFeSi}_2\text{O}_6 + 3\text{CO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$)
- (6) $3\text{Cc} + \text{Hem} + 3\text{SiO}_2 = \text{Andr} + 3\text{CO}_2$ ($3\text{CaCO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{SiO}_2 = \text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 3\text{CO}_2$)
- (7) $9\text{Cc} + 2\text{Mt} + 9\text{Q} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = 3\text{Andr} + 9\text{CO}_2$ ($9\text{CaCO}_3 + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 9\text{SiO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = 3\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + 9\text{CO}_2$)
- (8) $\text{Cc} + \text{Q} = \text{Wo} + \text{CO}_2$ ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$)

Il est à noter qu'on n'a pris en considération, dans les réactions chimiques, que des pôles purs des minéraux, dans les cas plus généraux, il faut tenir compte des solutions solides des minéraux impurs, avec des proportions molaires variables.

Les réactions se déroulent dans des conditions d'oxydoréduction où nous observons des réactions qui absorbent de l'oxygène et d'autres qui en produisent.

Dans les conditions réductrices (avec présence du graphite), où il peut se produire de l'hématite et de la magnétite à partir de la Sidérite, il est possible d'envisager

Les réactions suivantes:



5. Conclusion

Les diagrammes de la **Figure 3** illustrent les différentes zonations qu'on peut observer lors de la décarbonatation (+ oxydoréduction) du minerai 'Mc' issu d'une séquence de formations carbonato siliceuses riches en fer (à calcite + sidérite + quartz/chert essentiellement), à l'origine des formations ferrifères de la région de Berrahal - Oued El Aneb, dans des conditions de P, T concordantes au métamorphisme précoce ayant affecté ces formations. Ces diagrammes nous montrent plusieurs types de paragenèses, comme expliqué, précédemment. Lors d'étude d'échantillons du minerai carbonaté Mc des corps minéralisés de la région de Berrahal - Oued El Aneb, nous n'avons observé que des paragenèses, principalement, à calcite, magnétite, hématite, sidérite, quartz, hédénbergite et fayalite donc, sans graphite-andradite-wollastonite. Ceci nous amène à nous positionner de façon précise dans le diagramme de la **Figure 3** en suggérant que les transformations, ayant affecté les formations à l'origine du minerai carbonaté Mc, ont dû se limiter dans le domaine situé à droite de la figure et délimité par la droite « graphite » et les droites univariantes passant par les points invariants 6, 7, 8. L'inexistence du graphite, nous positionne au-dessus de la droite « graphite » donc suggérant des conditions modérément réductrices essentiellement à \pm oxydantes dans le cas des paragenèses à hématite qui sont de loin les moins abondantes que celles à magnétite. L'étude thermodynamique de ce type de minéralisations nous avait, également, permis de mettre en évidence l'association « fayalite + calcite » longuement considérée comme incompatible [14].

Ce travail nous a permis d'estimer l'évolution des formations ferrifères de la région de Berrahal - Oued El Aneb durant leurs transformations métamorphiques et de comparer les différentes paragenèses observées et mises en évidence dans les corps minéralisés, ce qui nous a amené à comprendre les variations des différents types de paragenèses d'un site à un autre ou au sein d'un même site.

Références

- [1] - J. HILLY, *Pub. Serv. Carte. Géol. Algérie*, (1962). Bull.19.
- [2] - B. HENNI, Thèse de Magister, Alger (1994)186 p.
- [3] - B. HENNI, Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Sces Tech Houari Boumediène (*USTHB*), Alger, (2006) 224 p.
- [4] - B. HENNI, B. GUY, D. GARCIA, *Bull. Serv. Géol. de l'Algérie*, vol. 13, (2002) 33-48.
- [5] - G. GLEIZES, J. BOULOTTON, G. BOSSIÈRE, P. COLLOMB, C. R. Acad. Sc. Paris Série II 306 (1988) 163-168.

- [6] - B. HENNI ET D. E. AÏSSA,. Géologie et géochimie des formations ferrifères de l'Edough (Annaba, NE algérien). *Bull. Serv. Geol. Nat.* 18 (3), (2007) 297–314.
- [7] - F. A. H. SCHREINEMAKERS, in “*mono and divariant equilibria*, *Koninkl. Nederlandse Akad. Wetensch*” Proc. (English version), v. 18-28 (1915-1925)(29 separate articles in the series).
- [8] - E. A. ZEN, *Geol. Surv. Bull*, 1225 (1966).
- [9] - B. GUY and J. M. PLA, *Intern. Confer. Calphad XXVI*, University of Florida, T. Anderson editor (1997a) D5.
- [10] - B. GUY and J. M. PLA, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 324 (1997b) 737-743.
- [11] - D. M. BURT, *Carnegie inst. Wash. Yearbook* 70, (1970) 178-184.
- [12] - R. A. ROBIE, B. S. HEMINGWAY, J. R. FISHER, *Geological survey bull.* Edition corrigée. (1979).
- [13] - T. J. B. HOLLAND and R. POWELL, *Journ. Metam. Geol.* 16 (1998) 309.
- [14] - B. HENNIAND, B. GUY, *C. R. Geoscience* 344, (2012) 349–356.