

# LES ISOTOPES STABLES DU CARBONE ET DE L'OXYGÈNE DES CARBONATES (CALCAIRES ET SIDÉRITES) DU GISEMENT DE FER DE BOUKHADRA (ALGÉRIE NORD ORIENTALE).

Djaouza AÏT ABDELOUAHAB\*, Azeddine BOUZENOUNE\*\* et Alain PREAT\*\*\*

## RÉSUMÉ

Le gisement de fer de Boukhadra, actuellement en exploitation, est l'un des plus importants de la région frontalière algéro-tunisienne. Il est encaissé dans des calcaires du Crétacé inférieur d'un anticlinal d'orientation NE-SW appartenant à l'extrémité nord orientale de l'Atlas Saharien.

Les minéralisations ferrifères sont représentées par deux paragenèses génétiquement liées. L'une, primaire, consiste en carbonates de fer (sidérites) formés par remplacement des calcaires et l'autre secondaire, représentée par des oxydes et hydroxydes de fer, issus de l'oxydation supergène de ces carbonates de fer au-dessus du niveau hydrostatique.

Les calcaires clansayésiens, encaissant ces minéralisations, montrent des valeurs moyennes du  $\delta^{13}\text{C}$  de +2,26 ‰ et du  $\delta^{18}\text{O}$  de -4,50 ‰. Les signatures isotopiques du carbone sont dans la gamme des valeurs isotopiques des calcaires marins du Crétacé inférieur.

Pour les sidérites, les isotopes du carbone indiquent une origine minérale marine ( $\delta^{13}\text{C} = +0,72$  ‰). Les compositions isotopiques de l'oxygène sont négatives ( $\delta^{18}\text{O} = -4,72$  ‰), elles traduiraient des processus minéralisateurs impliquant des fluides d'origine météorique ou hydrothermale ou les deux.

A l'échelle régionale, les minéralisations sidéritiques et l'encaissant carbonaté clansayésien du gisement de Boukhadra, présentent des compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène similaires à celles de l'ensemble des gisements de fer sidéritique, encaissés dans les carbonates du Crétacé inférieur de la région frontalière algéro-tunisienne (Ouenza, Jerissa, Slata et Hameima). Ces résultats suggèrent une similarité des processus minéralisateurs à partir de fluides géopressurés relativement chauds (une centaine de degrés), expulsés des sillons interdiapiriques durant les principales phases compressives du Néogène. L'étroite relation spatiale entre ces gisements et les extrusions des évaporites triasiques, permet d'attribuer aux processus diapiriques un rôle actif dans la genèse de ces minéralisations.

---

\*Laboratoire de Géologie et Environnement, Université Mentouri-Constantine, Campus Zouaghi Slimane, 25000 Constantine, Algérie.

\*\*Laboratoire de Génie Géologique, Université de Jijel, BP. 98, Ouled Aïssa, 18000 Jijel, Algérie.

\*\*\*Laboratoire de Géodynamique des Bassins, Université Libre de Bruxelles, 50, avenue F.-D. Roosevelt, 1050 Bruxelles, Belgique.

- *Manuscrit déposé le 29 Septembre 2009, accepté après révision le 18 Août 2010.*

**Mots-clés** - Isotopes du carbone et de l'oxygène - Sidérite - Clansayésien - Albien - Mine de Boukhadra

## **CARBONATES (LIMESTONES AND SIDERITES) CARBON AND OXYGEN STABLE ISOTOPES OF BOUKHADRA IRON ORE DEPOSIT (EAST NORTHERN ALGERIA).**

### **ABSTRACT**

The iron ore mine of Boukhadra, currently in exploitation, is one of the most important in the North-Eastern part of the Algero-Tunisian border. It is hosted in the Lower Cretaceous limestones which are folded to an NE-SW anticline at the North Eastern saharan Atlas.

Iron ore mineralizations are represented by two genetically related paragenesis. The first consists of iron carbonates (siderites) formed mainly by replacement of limestones. The second, represented by iron oxides and hydroxides, is related to a supergene oxidation of the iron carbonates above the hydrostatic level.

The clansayesian limestones, hosting these mineralization have mean values of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  equal to 2,26 ‰ and -4,50 ‰ respectively. Carbon isotopic signatures are in the range of  $\delta^{13}\text{C}$  values of the marine limestones of the Lower Cretaceous.

For siderites, carbon isotopes ( $\delta^{13}\text{C} = 0,72$  ‰) point to a marine origin whereas, oxygen isotopic compositions ( $\delta^{18}\text{O} = -4,50$  ‰) are slightly impoverished in heavy oxygen isotopes. These negative values suggest implication of fluids of meteoric or/and hydrothermal origins.

Siderite and clansayesian limestones in the Boukhadra area present the same isotopic compositions of carbon and oxygen already found in iron deposits and their Lower Cretaceous host rocks in the Algero-Tunisian border region (Ouenza, Jerissa, Slata, Hameima). These results would translate a similarity in the mineralizing processes implying hot geopressured (about 100°C) fluids expelled out of interdiapiric basins during the main compressive phases of the Neogene. The narrow spatial relation between these mineralization and the Triassic extrusions permits also to assign an active role to the diapiric processes in the genesis of these mineralizations.

**Keywords** - Carbon and oxygen isotopes - Siderite - Clansayesian - Albien - Boukhadra mine.

### **I- INTRODUCTION**

Les dépôts sidéritiques dans les roches sédimentaires du bassin méditerranéen sont bien développés : citons le gisement de Bilbao en Espagne (Gil, 1991), les gisements d'Ouenza,

de Boukhadra et de Chabet-el-Balout en Algérie; les gisements de Jerissa, de Hameima et de Slata en Tunisie. La minéralisation oxydée y est de type stratiforme, en amas ou en veinules et recèle des quantités variables, mais faibles

de Pb-Zn-Cu-Ba-F (Othmanine, 1987; Aoudjhane, 1991).

Les études isotopiques et/ou des inclusions fluides des carbonates de fer des gisements d'Ouenza (Paraire-Akrour, 1991; Bouzenoune, 1993; Bouzenoune et Lécolle, 1997), de Hammeima et Jerissa (Adjali-Aïssaoui, 1990) et de Slata (Smati, 1986), suggèrent une origine hydrothermale en relation avec les saumures d'un bassin subsident, tout comme pour les minéralisations Pb-Zn de type «Mississippi Valley» liées au diapirisme (Rouvier *et al.*, 1985; Othmanine, 1987; Salmi-Laouar *et al.*, 2004).

Pour le djebel Boukhadra, jusqu'à l'heure actuelle, aucune étude isotopique n'a encore permis de déterminer la signature et l'origine des fluides minéralisateurs.

Notre analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène, réalisée sur les calcaires encaissants et sur les sidérites actuellement mises à jour au niveau 820 de la carrière principale, tente d'apporter une réponse à cette question.

## II- CADRE GÉOLOGIQUE ET MINÉRALISATIONS

### II.1- Cadre géologique

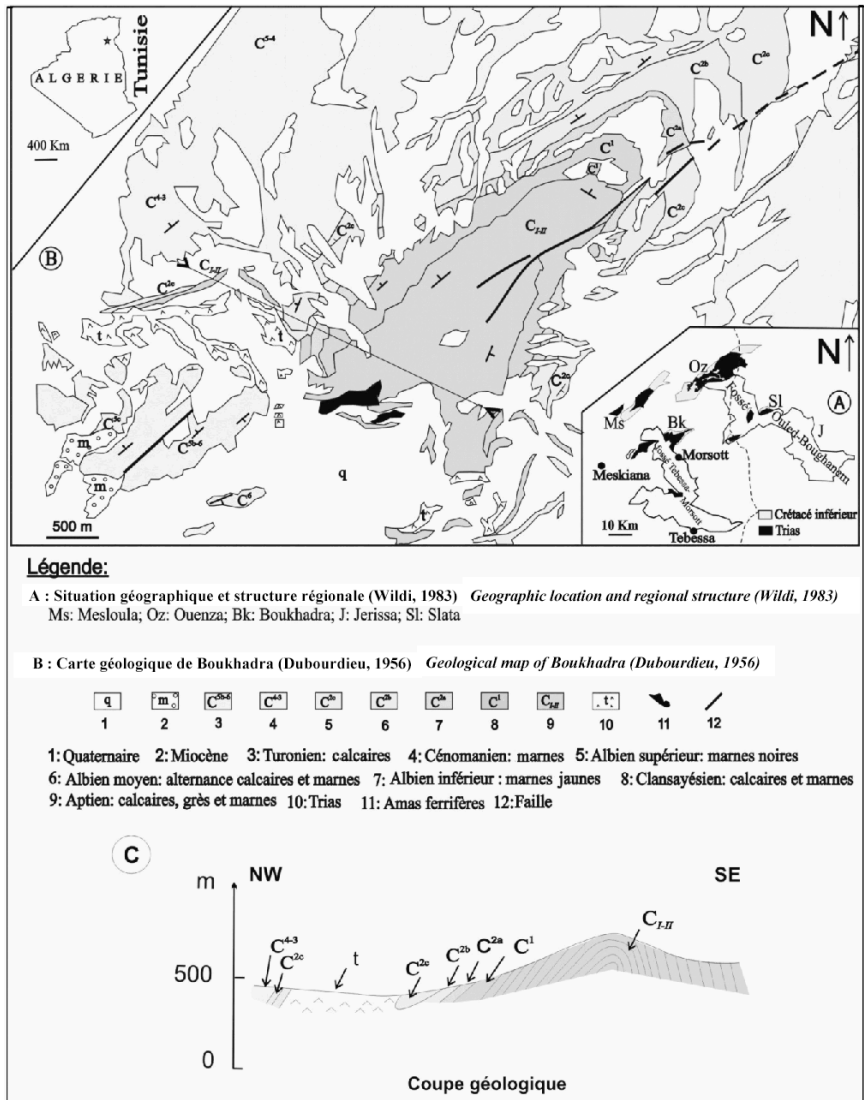
Le djebel Boukhadra appartient aux monts du Mellègue situés à l'extrémité nord orientale de l'Atlas Saharien. Ses formations crétacées ont été plissées lors de la phase atlasique éocène en un anticlinal d'orientation NE-SW. Ce pli est recoupé dans sa partie SW par le fossé d'effondrement de Morsott orienté NW-SE (fig.1A). L'ossature de l'anticlinal (fig.1B), est constituée de formations gréso-carbonatées de 600m d'épaisseur, datées du Clansayésien (Masse et Thieuloy, 1979). Ces formations sont surmontées par des dépôts albiens sous forme d'une alternance de

marnes noires et de calcaires marneux à ammonites (Dubourdieu, 1956). La partie SW de l'anticlinal ne présente pas de terminaison péri-anticlinale, elle est occupée par une vaste zone effondrée, limitée au SE et au NW par des couches très redressées, au contact des évaporites triasiques (fig.1C). Ces couches, datées de l'Ap-tien (Dubourdieu, 1956), puis de l'Albien (Masse et Thieuloy, 1979; Nedjari-Belalcene et Nedjari, 1984), comprennent également des conglomérats remaniant des éléments du Trias (fig.3b). Des formations triasiques chaotiques composées de marnes bariolées, de gypse et d'éléments décimétriques à pluridécimétriques de dolomies beiges ou grises finement grenues, bordent le massif dans sa partie SW (secteur de la gare) suivant la direction du fossé d'effondrement Tebessa-Morsott.

L'évolution géologique du secteur de Boukhadra est inconnue avant le Trias, de même que son évolution post-triasique anté-aptienne (Dubourdieu, 1956).

Le Crétacé supérieur se limite au Cénomano-Turonien sous forme de marno-calcaires et de marnes. Le Miocène discordant sur le Turonien, affleurant à l'extrémité ouest de Koudiat-el-Hamra (à l'ouest du djebel Boukhadra), est composé de conglomérats à silex, de fragments de calcaires, de marnes, de grès ferrugineux à ciment carbonaté, sur une épaisseur d'environ 400 m. Les dépôts du Quaternaire consistent en éboulis, limons et alluvions, leur épaisseur est d'une vingtaine de mètres et atteint 200 m dans les fossés.

Sur le plan tectonique, les plis d'orientation NE-SW résultent des compressions néogènes avec une phase majeure entre l'Eocène et le Miocène (Dubourdieu, 1956). Les premières manifestations d'effondrement des grabens ont commencé au cours de la distension crétacée avec une phase majeure au Miocène.



**Fig. 1 - Cadre géographique et géologique du massif de Boukhadra**  
**Geographical and geological setting of the Boukhadra massif**

## II.2- Les minéralisations

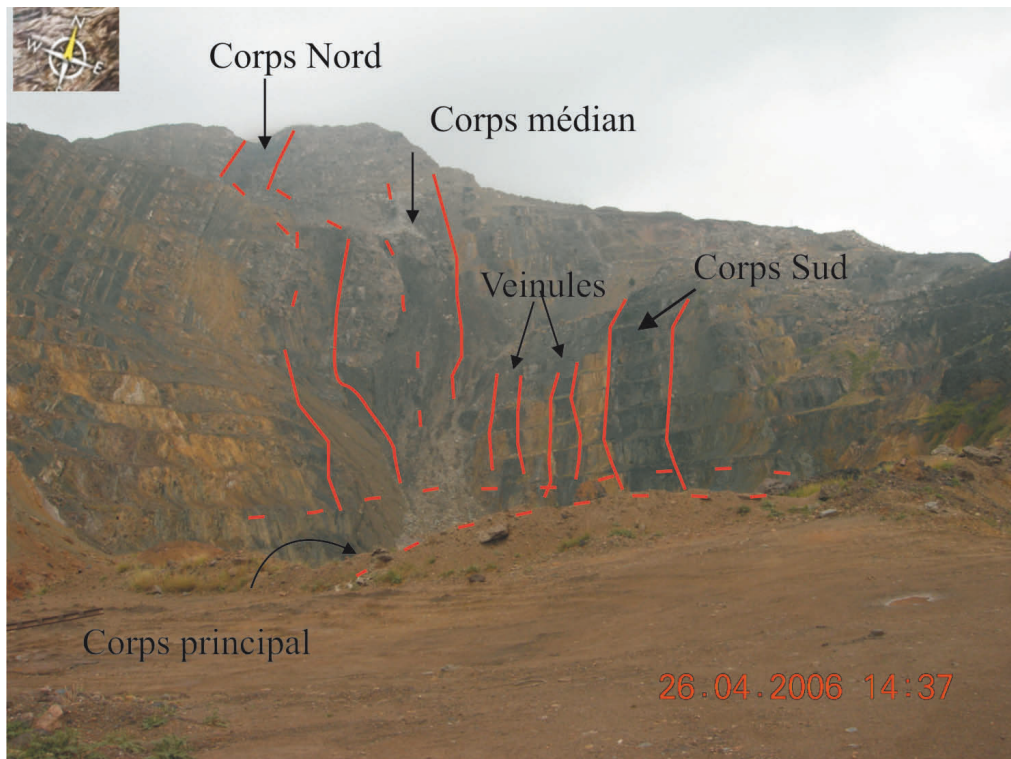
Le gisement de Boukhadra est actuellement exploité pour son minerai d'oxydes et d'hydroxydes de fer (hématite, goethite, limonite). Ce minerai secondaire est issu de l'oxydation supergène d'un minerai primaire carbonaté (sidérite), mis à jour en 2005, au niveau 820 de la carrière principale.

Les corps minéralisés présentent une morphologie en amas plus ou moins allongés et sont reliés à un amas principal au contact des formations triasiques et apto-albiennes. Cinq corps interstratifiés dans les calcaires clansayésiens sont issus de cet amas (fig.2). L'étude pétrographique du minerai carbonaté met en évidence deux types de sidérite, la première est finement grenue de couleur grise et la seconde est moyennement grenue ou baroque de couleur jaune miel. À

l'image de ce qui est connu dans les gisements de fer en roches carbonatées de type «Bilbao», la sidérite jaune, spathique est toujours postérieure à la sidérite grise fine dans laquelle elle peut occuper des espaces intergranulaires.

Contrairement aux gisements de l'Ouenza, de Jerissa et de Bilbao où la calcite et l'ankérite ont été mises en évidence, ces deux phases minéralogiques n'ont pas été identifiées à Boukhadra.

Le minerai carbonaté de Boukhadra contient également du quartz bipyramidé de taille millimétrique, déjà mis en évidence dans le minerai carbonaté de l'Ouenza où il est souvent corrodé par les carbonates de fer. On signale aussi, la présence dans le minerai carbonaté de Boukhadra de pyritoédres disséminés ou de petits amas de pyrite de dimension millimétrique.



**Fig. 2 - Morphologie des amas minéralisés à oxydes de fer**  
**Morphology of the iron ore bodies**

### III- METHODES : ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES ISOTOPIQUES

#### III.1- Echantillonnage

Les analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène ont été effectuées sur les calcaires clansayésiens et albiens, sur les éléments dolomitiques du Trias et sur les sidérites.

##### III.1.1- Les calcaires encaissants les minéralisations

Le choix des échantillons dans la série clansayésienne-albienne, a porté sur les microfaciès définis dans une étude sédimentologique (en cours) à partir d'une séquence standard de neuf microfaciès. Cette séquence enregistre le passage des milieux marins ouverts assez profonds (hémipélagiques, MF1) de l'Albien aux milieux moins profonds (plate-forme externe, MF2 à MF8) et milieux évaporitiques de sebkha (MF9) du Clansayésien. Les microfaciès gréseux MF2 et MF3, n'ont pas permis une interprétation détaillée des paléoenvironnements suite au manque de structures diagnostiques et à leur faible contenu en carbonates.

Quelques échantillons supplémentaires de calcaires albiens du microfaciès 4 (avant-barrière), prélevés au contact des formations triassiques complètent l'échantillonnage.

Les analyses isotopiques ont été réalisées sur des échantillons de roche totale, en considérant dans chaque cas les faciès les plus homogènes reconnus en pétrographie. Des échantillons supplémentaires pris dans les microbrèches de tempestites proximales et dans la matrice des micro-faciès 4 et 6 complètent les analyses.

##### III.1.2- Les éléments dolomitiques du Trias

Les échantillons proviennent des éléments dolomitiques de taille décimétrique contenus dans les marnes à gypse du Trias de la carrière principale (fig.3a) et dans les conglomérats à éléments dolomitiques du Trias remaniés à la base de la série albienne, au contact des évaporites du Trias (fig. 3b). Les analyses des conglomérats ont intéressé aussi bien les éléments que le ciment. Au microscope, les dolomies contenues dans les marnes bariolées à gypse du Trias se



Fig.3 - Aspects macroscopiques des dolomies du Trias analysées pour isotopes

#### Macroscopic aspects of the Triassic dolomite having been the subject of isotopic analyses

a- éléments chaotiques dolomitiques du Trias à marnes bariolées et à gypse. (*Triassic conglomerates within variegated marls with gypsum*).

b- Conglomérats à éléments dolomitiques du Trias (flèche) remaniés dans l'Albien (*Triassic conglomerates (arrow) in the Albian formation*).

LES ISOTOPES STABLES DU CARBONE ET DE L'OXYGÈNE DES CARBONATES (CALCAIRES ET SIDÉRITES)  
DU GISEMENT DE FER DE BOUKHADRA (ALGÉRIE NORD ORIENTALE)

présentent sous forme de dolomicrite baignant dans du gypse, alors que les éléments dolomitiques remaniés dans l'Albien montrent des perforations et sont cimentés par de la dolomicrosparte.

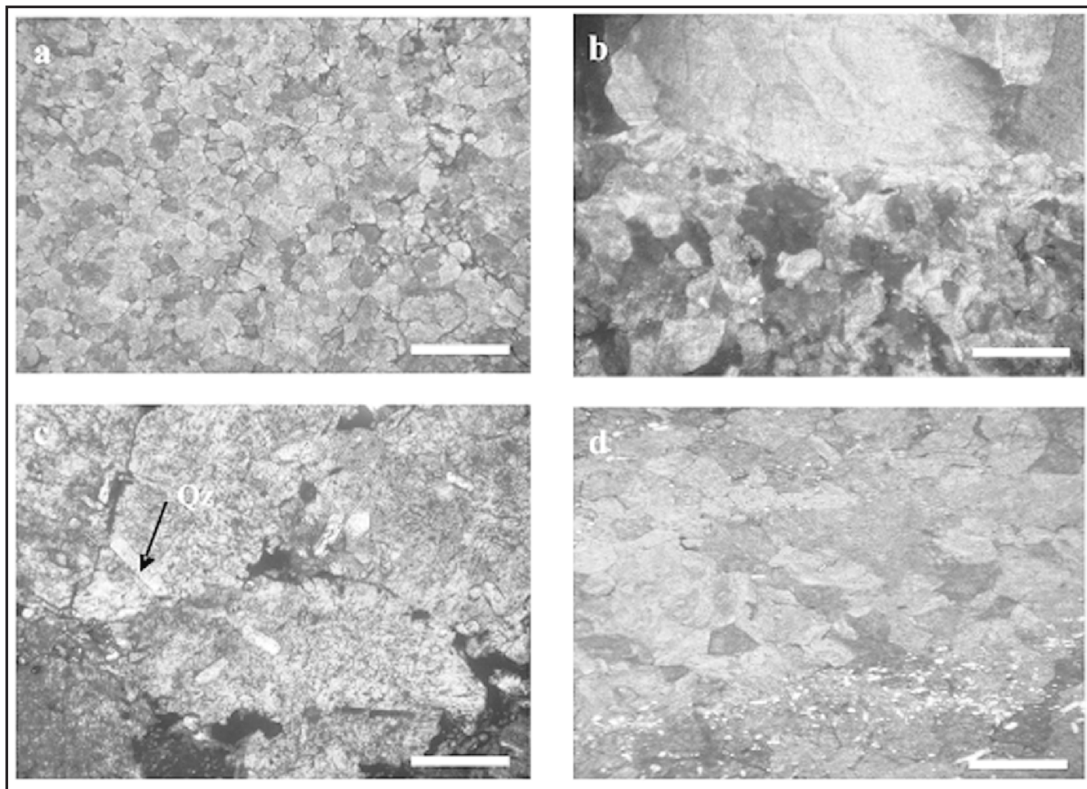
textures rythmiques sont également présentes avec des rythmes plurimillimétriques de sidérite finement grenue et des rythmes de sidérite moyennement grenue ou baroque. Des concentrations de très fins quartz bipyramidés s'observent aux limites des rythmes (fig.4d).

### III.1.3- Les sidérites

La sidérite de la carrière principale se présente sous forme finement grenue de 250 à 350 $\mu\text{m}$  (fig.4a), moyennement à fortement grenue (> 350 $\mu\text{m}$ ) et sous forme baroque (fig.4b). Les quartz bipyramidés souvent associés sont parfois remplacés par la sidérite (fig.4c). Des

### III.2- Analyses isotopiques

Les analyses isotopiques du carbone et de l'oxygène ont été effectuées sur un spectromètre de masse Thermo-Finnigan 252 à l'Université de Erlangen-Nürnberg (Allemagne) dans le laboratoire du Professeur M. Joachimski. Les



**Fig. 4** - Aspects microscopiques (lumière polarisée) des sidérites analysées pour isotopes du carbone et de l'oxygène

***Microscopic aspects of siderites having been the subject of carbone and oxygen isotopic analyses***

- a-** Sidérite finement grenue (***Fine-grained siderite***)
- b-** Sidérite moyennement grenue et baroque (***Spathic and fairly-grained siderites***)
- c-** Sidérite en remplacement de quartz bipyramidé (***Quartz crystal replaced by siderite***)
- d-** Sidérite laminaire avec concentration de quartz fins (***Laminated siderite with fine grains of quartz***). La barre d'échelle est de 390 microns (***Bar scale is 390  $\mu\text{m}$*** ).

méthodes d'analyse sont celles de Wachter et Hayes (1985) qui consistent à faire réagir la poudre de carbonate avec 100% d'acide phosphorique à 75°C (densité > 1,9). Les rapports isotopiques sont exprimés en ‰ par rapport au standard PDB pour le carbone et pour l'oxygène. La probabilité d'erreur des résultats est de +0,1‰. Les isotopes des dolomites et des sidérites sont corrigés en utilisant le fractionnement isotopique de Rosenbaum et Sheppard (1986).

## IV- RÉSULTATS

### IV.1- Les calcaires encaissant les minéralisations

Les calcaires clansayésiens montrent des compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène variables suivant l'environnement de dépôt (tabl. I). Les faciès d'avant-barrière et de barrière (MF4 et MF5) ont des compositions isotopiques moyennes de 1,71 ‰ pour le carbone et de -4,30 ‰ pour l'oxygène. Dans les

faciès de lagon (MF6 et MF7), les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont légèrement plus élevées ( $\delta^{13}\text{C} = 2,78$  ‰) et celles de  $\delta^{18}\text{O}$  légèrement plus faibles ( $\delta^{18}\text{O} = -4,71$  ‰). Les microfaciès du milieu supratidal (MF8) montrent une très légère diminution des valeurs du  $\delta^{13}\text{C}$  (2,54 ‰) et une augmentation du  $\delta^{18}\text{O}$  (- 4,07 ‰). Les faciès de sebkha ont des compositions isotopiques du carbone, identiques à celles du milieu supratidal (soit +2,50 ‰) et des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  plus négatives (- 5,38 ‰).

À l'Albien, les formations péri-récifales (MF4) enregistrent des compositions isotopiques du carbone relativement basses ( $\delta^{13}\text{C}$  variant de 0,41 ‰ à -3,66 ‰) et plus élevées en  $\delta^{18}\text{O}$ , par rapport aux calcaires clansayésiens ( $\delta^{18}\text{O}$  variant de -2,36 ‰ à -2,13‰). Les microfaciès du milieu hémipélagique (MF1) montrent des compositions isotopiques relativement appauvries en isotopes lourds aussi bien pour le carbone que pour l'oxygène ( $\delta^{13}\text{C} = -2,74$  ‰,  $\delta^{18}\text{O} = -2,36$  ‰).

**Tableau I-** Compositions isotopiques des échantillons triasiques, clansayésiens et albiens.

*Isotopic compositions of triassic, clansayesian and albian samples.*

Âge	Environnement	Microfaciès	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	n	Descriptions
Albien	Avant-barrière	MF4	-0,41‰ -10,17‰	-2,81 ‰ -0,77 ‰	n=2 n=1	Packstone et rudstone à corallinacées, coraux, rudistes et échinodermes
	Hémipélagique	MF1	-2,74‰	-2,36 ‰	n=2	Wackestone-packstone à globigérines
Clansayésien	Avant-barrière/Barrière	MF4 et MF5	1,71 ‰	-4,30 ‰	n=7	Floatstone-bafflestone et grainstone-rudstone à coraux, rudistes et échinodermes
	Lagon	MF6	2,84 ‰	-4,54 ‰	n=5	Packstone à orbitolines et rudistes
	Lagon (près du supratidal)	MF7	2,84 ‰	-4,99 ‰	n=3	Wackestone à miliolles et rudistes
	Supratidal	MF8	2,54 ‰	-4,07 ‰	n=6	Mudstone et wackestone loféritique
	Sebkha	MF9	2,50 ‰	-5,38 ‰	n=1	Microbrèches de type sebkha
Trias	Sebkha		2,43 ‰	-3,32 ‰	n=2	Éléments dolomitiques dans les marnes
	Sebkha		-1,11‰	-5,52 ‰	n=3	Conglomérats du Trias dans l'Albien
	Ciments		-5,33‰	-3,77 ‰	n=1	Ciments des conglomérats du Trias dans l'Albien



LES ISOTOPES STABLES DU CARBONE ET DE L'OXYGÈNE DES CARBONATES (CALCAIRES ET SIDÉRITES)  
DU GISEMENT DE FER DE BOUKHADRA (ALGÉRIE NORD ORIENTALE)

#### IV.2- Les dolomies du Trias

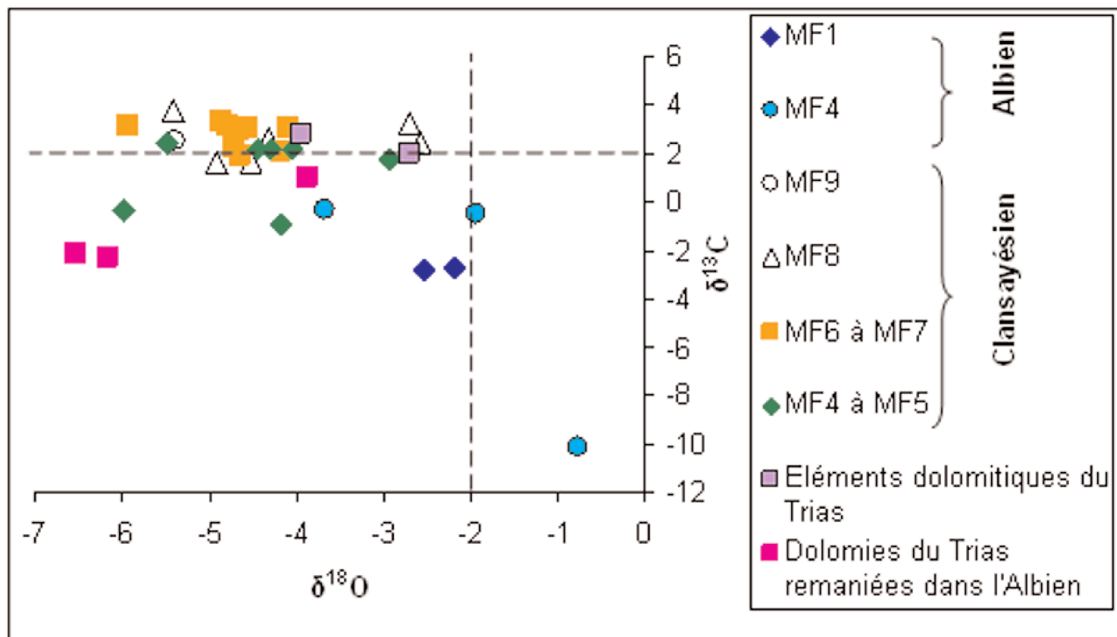
Les éléments dolomitiques du Trias contenus dans les marnes (carrière principale) ont une valeur moyenne du  $\delta^{13}\text{C}$  égale à 2,43 ‰ et du  $\delta^{18}\text{O}$  égale à -3,32 ‰. Les valeurs isotopiques des éléments dolomitiques du Trias remaniés dans les conglomérats de l'Albien sont légèrement différentes ( $\delta^{13}\text{C} = -1,11$  ‰ et  $\delta^{18}\text{O} = -5,52$  ‰) alors que le ciment enregistre des valeurs plus basses du  $\delta^{13}\text{C}$  (-5,33 ‰) et plus élevées du  $\delta^{18}\text{O}$  (tabl. I).

Les compositions isotopiques moyennes du carbone et de l'oxygène des échantillons triasiques, clansayésiens et albiens sont reprises dans le tableau I. La figure 5 donne leur répartition dans un diagramme  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^{13}\text{C}$ .

#### IV.3- Les carbonates de fer

Les compositions isotopiques obtenues sur les différentes textures des sidérites (finement grenue de couleur grise, moyennement grenue et baroque de couleur jaune) sont assez identiques. Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont comprises entre 0,48 ‰ et 1,05 ‰ (moyenne de 0,72 ‰), celles de  $\delta^{18}\text{O}$  varient de - 4,37 ‰ à -4,98 ‰ (moyenne de - 4,72 ‰) (fig.6).

Le tableau II et la figure 7 donnent, à titre comparatif, les compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone, des sidérites des gisements de l'Ouenza (Algérie) et de Jerissa et Hammeima (Tunisie).



**Fig. 5 -** Diagramme  $\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates triasiques, clansayésiens (avec les différents microfaciès) et albiens situés à proximité de la mine de Boukhadra. Les valeurs isotopiques du carbone et de l'oxygène du Crétacé inférieur mondial (traits discontinus) font référence aux valeurs moyennes données par Lohmann (1988), à savoir  $\delta^{13}\text{C} = 2$  ‰ et  $\delta^{18}\text{O} = -2$  ‰.

**$\delta^{13}\text{C}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  diagram values of Triassic, Clansayesian and Albian carbonates from Boukhadra. The Lower Cretaceous isotopic values of carbon and oxygen are from Lohmann (1988), they are  $\delta^{13}\text{C} = 2$  ‰ and  $\delta^{18}\text{O} = -2$  ‰.**

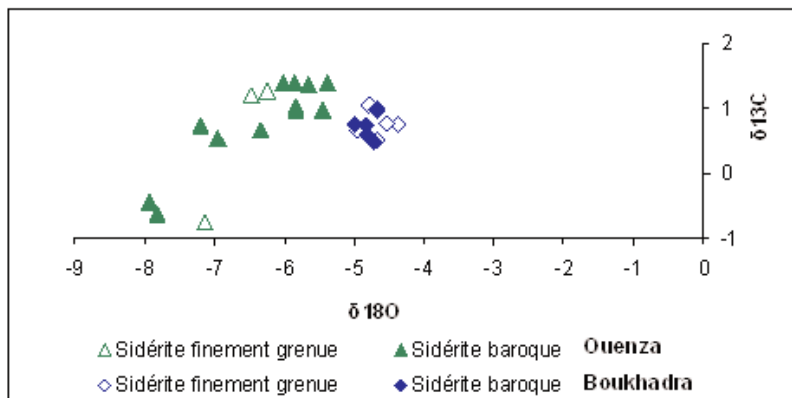


Fig. 6 - Isotopes du carbone et de l'oxygène des sidérites de Boukhadra et de l'Ouenza.

**Carbon and oxygen isotopes of Boukhadra and Ouenza siderites**

Tableau II - Compositions isotopiques moyennes du carbone et de l'oxygène (en ‰) des sidérites de quelques gisements de la région frontalière algéro-tunisienne (n : nombre de mesures).

**Carbon and oxygen average isotopic compositions of siderites from some iron ore deposits of Algeria and Tunisia (n: measure number).**

Gisement	Description	d <sup>13</sup> C	d <sup>18</sup> O	n
Boukhadra	Sidérite finement grenue	0,75	-4,65	5
	Sidérite baroque	0,71	-4,81	5
Ouenza	Sidérite finement grenue	0,71	-6,62	3
	Sidérite baroque	0,77	-6,35	12
Jerissa		0,55	-8,63	4
Hameima		1,2	-7,44	6

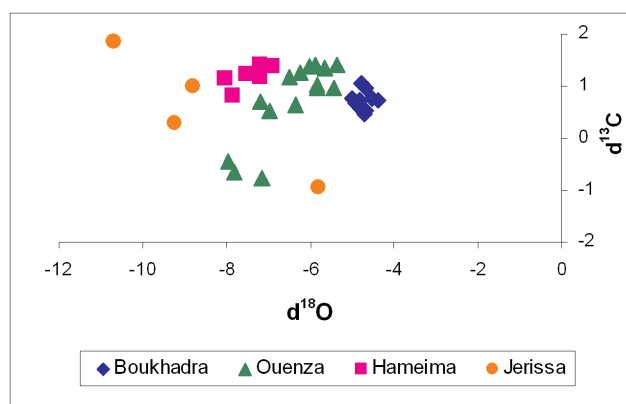


Fig. 7 -  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$  des sidérites de différents gisements des confins algéro-tunisiens. Les valeurs isotopiques pour le gisement d'Ouenza sont tirées de Bouzenoune, 1993; celles de Jerissa et Hameima de Adjali-Aïssaoui (1990).

**Carbon and oxygen stable isotopes of siderites from some iron ore deposits of Algeria and Tunisia.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  of Ouenza siderites are from Bouzenoune (1993) and those of Jerissa and Hameima are from Adjali-Aïssaoui (1990).**

## V- INTERPRÉTATIONS

### V.1- Les carbonates de l'encaissant clansayésien

Les compositions isotopiques du carbone des calcaires clansayésiens varient de -0,34 ‰ à +3,79 ‰ (moyenne de 2,40 ‰), celles du  $\delta^{18}\text{O}$  sont comprises entre -5,94 ‰ et -2,59 ‰ (moyenne de -4,82 ‰). Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  sont représentatives du signal marin du Crétacé inférieur qui présente une valeur moyenne  $\delta^{13}\text{C}$  de +2 ‰ (Lohmann, 1988). Les compositions isotopiques du carbone des séries apto-albiennes du bassin méditerranéen sont assez similaires : Grötsch et al. (1998), rapporte des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  comprises entre 1 et 3,50 ‰ et une moyenne des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  de -2,40 ‰ dans le mont Kanala (Nord-Ouest de la Grèce). À Monte Raggeto, au sud de l'Italie, Ferreri et al. (1997) obtiennent pour l'Aptien inférieur des compositions isotopiques du carbone de +3 ‰ et pour l'Aptien supérieur des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  de +4 ‰, quant à l'oxygène ses compositions isotopiques varient entre -0,80 et -2,25 ‰. Il faut noter que ces valeurs moyennes s'étendent au-delà de la Téthys puisque Uramoto et al. (2007) indiquent des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  comprises entre 1,50 et 3 ‰ à Hokkaido (Japon).

A Boukhadra, les valeurs moyennes des compositions isotopiques de l'oxygène des calcaires clansayésiens sont légèrement inférieures à celles du domaine marin du Crétacé inférieur avec une moyenne du  $\delta^{18}\text{O}$  de -4,80 ‰. Ces carbonates d'origine marine, sont légèrement appauvris en  $^{18}\text{O}$  et ne présentent plus la signature isotopique des carbonates marins de l'époque. Ces valeurs sont comparables à celles des calcaires de l'Aptien inférieur de Rio Argos (Espagne) présentant des  $\delta^{18}\text{O}$  variant de -4,60 ‰ à -1,80 ‰, valeurs liées à des températures relativement élevées (Gröcke et al., 2003).

La modification des compositions isotopiques de l'oxygène des calcaires clansayésiens de Boukhadra, encaissant principal des minéralisa-

tions, traduite par des valeurs plus négatives du  $\delta^{18}\text{O}$ , pourrait donc être liée soit à une recristallisation de ces calcaires sous l'action de fluides relativement chauds, en rapport avec les processus minéralisateurs qui ont induit la transformation en sidérites de ces carbonates calcitiques, soit à l'action d'eaux météoriques ou encore à l'influence simultanée de ces deux facteurs.

Les microfaciès montrent que le milieu lagunaire est celui qui présente un enrichissement en isotopes lourds du carbone, alors que les milieux supratidaux (y compris ceux de sebkha) et les milieux d'avant-barrière et de barrière en sont appauvris. Quant aux isotopes de l'oxygène, leurs valeurs augmentent légèrement de la mer ouverte vers la plate-forme externe et plus significativement dans le milieu de sebkha.

### V.2- Les carbonates de l'Albien

A l'inverse des calcaires clansayésiens, les calcaires albiens, dépourvus de concentrations minéralisées ferrifères, sont caractérisés par des compositions isotopiques négatives du  $\delta^{13}\text{C}$  (de -0,36 à -2,80 ‰) dans la gamme des valeurs caractéristiques des calcaires du Crétacé inférieur. On note, cependant, une valeur  $\delta^{13}\text{C}$  de -10,19 ‰ correspondant au calcaire albien à proximité du Trias. Ces signatures, appauvries en isotopes lourds du carbone, sont connues dans les calcites des «cap-rocks» coiffant les appareils diapiriques des confins algéro-tunisiens et de la «Gulf Coast» (USA) suite à une forte contribution d'un carbone d'origine organique (Hatira, 1988; Charaf et Sheppard, 1987; Posey et al., 1987). Les compositions isotopiques de l'oxygène des calcaires albiens de Boukhadra, correspondent aux signatures des calcaires marins francs du Crétacé inférieur mondial (Lohmann, 1988). Ils ne montrent pas de modifications des compositions isotopiques et ne sont pas affectés par les fluides ayant permis la mise en place des minéralisations ferrifères par remplacement des calcaires du Clansayésien.

### V.3- Les carbonates du Trias

Les valeurs isotopiques moyennes du carbone des mers triasiques sont comprises entre -1 ‰ et 4 ‰ (Corsetti *et al.*, 2005; Haas *et al.*, 2006; Horacek *et al.*, 2008). Ces valeurs centrées autour de 4 ‰ se rencontrent au Japon et dans la mer téthysienne en Italie, en Turquie, en Iran, en Oman et au Sud de la Chine (Horacek *et al.*, 2008). Les valeurs isotopiques de l'oxygène varient de - 6,5 ‰ à -10,8 ‰ en Hongrie (Haas *et al.*, 2006). Au vu des valeurs indiquées, les éléments dolomitiques du Trias de Boukhadra présentent la signature des mers triasiques.

### V.4- Les carbonates de fer

Les sidérites finement et moyennement grenues ainsi que la sidérite baroque de Boukhadra montrent des compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone similaires entre elles. Les sidérites spathiques étant postérieures aux sidérites fines, quel que soit le temps écoulé entre la mise en place des deux carbonates de fer, les fluides minéralisateurs, qui en sont à l'origine, n'ont pas subi de fortes variations dans leurs propriétés géochimiques. La précipitation des deux carbonates de fer s'est déroulée dans un environnement carbonaté, baigné de fluides relativement chauds et quantitativement importants pour avoir maintenu des conditions géochimiques (chimisme des fluides, compositions isotopiques, température) sensiblement constantes. Les compositions isotopiques du carbone des sidérites, sont conformes aux valeurs des  $\delta^{13}\text{C}$  des carbonates marins traduisant ainsi une origine minérale du carbone, elles sont dans la même gamme des valeurs des carbonates de l'encaissant clansayésien. Cette identité de compositions isotopiques du carbone, traduit une étroite relation génétique entre le carbone des calcaires et celui des carbonates de fer. Les sidérites de Boukhadra proviennent ainsi de la «métasomatose» des calcaires clansayésiens.

Cette filiation génétique du carbone a d'ailleurs été mise en évidence dans la plupart des gisements de fer en substitution dans les roches carbonatées et notamment dans les gisements encaissés, dans les faciès «urgoniens» du Crétacé inférieur de la province basco-cantabrique, au Nord de l'Espagne dans le gisement de Bilbao (Gil, 1991), et aux confins algéro-tunisiens comme à l'Ouenza (Bouzenoune et Lécolle, 1997) et Jerissa-Hameima (Adjalli-Aïssaoui, 1990). Ces gisements de sidérites présentent de nombreuses analogies qui renforcent leur classification dans un même groupe, à savoir celui «des sidérites métasomatiques hydrothermales» (Zitzmann et Neumann-Redlin, 1977) sans relations apparentes avec le magmatisme et/ou le métamorphisme.

Les compositions isotopiques de l'oxygène des sidérites de Boukhadra montrent un léger appauvrissement en isotopes lourds (fig.6). Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  sont négatives variant de -4,37 ‰ à -4,98 ‰, elles sont plus négatives que celles des carbonates d'origine marine. Comme pour les calcaires clansayésiens, cette différence pourrait être due soit, à une élévation de la température en relation avec les processus minéralisateurs, soit à une intervention significative d'eaux appauvries en isotope lourd de l'oxygène ou bien des deux.

Les sidérites fines et les sidérites baroques, indépendamment de leur position dans la succession chronologique, ne semblent pas se distinguer par leurs compositions isotopiques (fig.6). La dispersion des  $\delta^{18}\text{O}$  ne correspond donc à aucune logique chronologique. Les différents types pétrographiques de sidérites de Boukhadra ont du précipiter dans un fluide ayant gardé ses caractéristiques isotopiques, durant le processus de transformation des calcaires en carbonates de fer.

La comparaison des isotopes stables de l'oxygène et du carbone, des carbonates de fer des gi-

sements des confins algéro-tunisiens, montre que les sidérites de Boukhadra sont les moins appauvries en isotopes lourds de l'oxygène (fig.7). Elles présentent des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  légèrement supérieures à celles des sidérites de l'Ouenza pour lesquelles la mise en place s'est probablement effectuée à des températures comprises entre 100 et 120 °C à partir de fluides caractérisés par un  $\delta^{18}\text{O}$  de l'ordre de +6 ‰ SMOW (Bouzenoune et Lécolle, 1997; Bouzenoune et *al.*, 2006). On peut, par conséquent et en l'absence de données complémentaires sur les inclusions fluides, envisager pour les sidérites de Boukhadra des températures de cristallisation légèrement plus faibles, inférieures à 100 °C.

L'ensemble des données relatives aux observations de terrain et les études pétrographiques et minéralogiques, ainsi que l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone des calcaires apto-albiens et des carbonates de fer de Boukhadra militent pour des processus minéralisateurs impliquant des saumures géopressurées expulsées des sillons interdiapiriques lors des principales phases de diapirisme et de compressions néogènes. Ce modèle génétique, maintes fois proposé avec de légères différences a été admis pour de nombreux gisements de la frontière algéro-tunisienne (Rouvier et *al.*, 1985; Pohl et *al.*, 1986, Scheppard et *al.*, 1996).

## VI- CONCLUSION

Les minéralisations ferrifères de Boukhadra sont constituées d'un minerai carbonaté sidéritique situé sous le niveau hydrostatique et d'un minerai oxydé représenté principalement par des oxydes et hydroxydes de fer, issus de l'oxydation supergène des carbonates de fer. Ces minéralisations sont encaissées dans les calcaires clansayésiens constituant l'ossature d'un anticlinal orienté, nord-est - sud-ouest, plissé lors de la phase atlasique éocène.

L'ensemble des carbonates analysés montre des compositions isotopiques du carbone conformes à celles des calcaires marins du Crétacé inférieur, elles suggèrent notamment une origine minérale du carbone des sidérites à partir du carbone de l'encaissant carbonaté. Les calcaires du Clansayésien, encaissant les minéralisations, se distinguent par un léger appauvrissement en isotopes lourds de l'oxygène. Cet appauvrissement est attribué à une recristallisation de ces calcaires en relation avec les processus minéralisateurs impliquant des fluides minéralisateurs relativement chauds (60-100 °C), ayant permis la mise en place des sidérites par transformation de ces anciens carbonates calcitiques. Cette transformation a particulièrement affecté les microfaciès de lagon et ceux du milieu supratidal.

Les minéralisations sidéritiques sont épigénétiques et résulteraient de l'expulsion de fluides à partir des séries sédimentaires des bassins interdiapiriques durant les principales phases de diapirisme et de compressions néogènes.

## BIBLIOGRAPHIE

- ADJALI-AÏSSAOUI, S. 1990.** Structuration et genèse des gisements de fer carbonaté du djebel Jerissa et djebel Hameima (NW Tunisie). Pétrographie des carbonates, minéralogie et étude de la matière organique appliquées aux gîtes de couverture. *Thèse Doc. Univ. Tunis II*, 185p.
- AOUDJEHANE, M. 1991.** Distribution des gîtes à Pb-Zn et fer sidéritique dans le NE algérien. Source, Transport and Deposition of Metals, *Pagel & Leroy (eds). Balkema, Rotterdam.* ISBN 90 54 10 020 6, pp. 419-422.
- BOUZENOUNE, A. 1993.** Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). *Thèse UPMC (Paris VI)*, 207p.

- BOUZENOUNE, A., ROUVIER, H. ET THIBIÉROZ, J. 1995.** Trias de l'Ouenza : contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. *Bull. Serv. Carte géol., Algérie*, 6, 1, pp. 3-24.
- BOUZENOUNE, A. AND LÉCOLLE, P. 1997.** Petrographic and geochemical arguments for hydrothermal formation of the Ouenza siderite deposit (NE Algeria). *Mineralium deposita*, 32, pp. 189-196.
- BOUZENOUNE, A., ROUVIER, H. ET THIBIÉROZ, J. 2006.** Chronologie relative et conditions de mise en place des minéralisations du massif de l'Ouenza (Algérie NE). *Bull. Serv. Geol. National*, vol.17, n°1, pp. 3-27.
- CHAREF, A. AND SHEPPARD, S.M.F. 1987.** Pb-Zn mineralization associated with diapirism: fluid inclusions and stable isotope (H, C, O) : evidence for the origin and evolution of the fluid at Fedj-el-Adoum. *Tunisia. Chem. Geol.*, vol. 61, pp. 113-134.
- CORSETTI, F.A., BAUD, A., MARENCO, P.J. AND RICHOSZ, S. 2005.** Summary of Early Triassic carbon isotope records. General Paleontology (Paleoecology). *C. R. Palevol*, 4, pp. 473-486.
- DUBOURDIEU, G. 1956.** Etude géologique de la région de l'Ouenza (Confins algéro-tunisiens). *Publ. Serv. Carte Géol., Algérie*, n.s, 10, 659p.
- FERRERI, V., WEISSERT, H., D'AAGENI, B. AND BUONOCUNTO, F. P. 1997.** Carbon isotope stratigraphy: a tool for basin to carbonate platform correlation. *Terra Nova*, 9, pp. 57-61.
- GIL, P.P. 1991.** Las mineralizaciones de hierro en el anticlinal de Bilbao: mineralogia, geoquímica y metalogenia. *Thesis Doct., Univ.Pais Vasco, Bilbao*, 343p.
- GRÖTSCH, J., BILLING, I. AND VAHRENKAMP, V. 1998.** Carbon-isotope stratigraphy in shallow-water carbonates: implication for Cretaceous black-shale deposition. *Sedimentology*, 45, pp. 623-634.
- GRÖCKE, D.R., COCCIONI, R., PRICE, G.D. AND ARTHUR, M.A. 2003.** The Early Cretaceous carbon and oxygen isotope record. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 5, 1337p.
- HAAS, J., DEMÉNY, A., HIPS, K. AND VENNEMANN, T.W. 2006.** Carbon isotope excursions and microfacies changes in marine Permian–Triassic boundary sections in Hungary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, pp. 160–181.
- HATIRA, N. 1988.** Les concentrations de Zn, Pb, Sr, (Ba), dans le cortex des diapirs de Trias salifère; exemple du diapir de Sakiet-Koucha (Tunisie septentrionale). Comparaison avec d'autres massifs tunisiens et avec les cap rocks de la Gulf Coast (U.S.A). *Thèse Doc. Univ. Paris VI*, 212p.
- HORACEK, M., KOIKE, T. AND RICHOSZ, S. 2008.** Lower Triassic  $\delta^{13}\text{C}$  isotope curve from shallow-marine carbonates in Japan, Panthalassa realm: Confirmation of the Tethys  $\delta^{13}\text{C}$  curve. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 36, issue 6, pp. 481-498.
- LOHMANN, K.C. 1988.** Geochemical patterns of tectonic diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. *Paleokarst (Eds N.P. James and P.W. Choquette)*, Springer, Berlin. pp. 58–80.
- MASSE, J.P. ET THIEULOY, J.P. 1979.** Précisions sur l'âge des calcaires et des formations associées de l'Aptien du Sud-Est constantinois (Algérie). Conséquences paléogéographiques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, vol.7, n°1, pp.65-71.
- NEDJARI-BELLAHCENE, S. ET NEDJARI, A. 1984.** Le Boukhadra: esquisse paléogéographique aptienne. *5<sup>ème</sup> Séminaire National des Sciences de la Terre. Alger*, pp.102-103.
- OTHMANINE, A. 1987.** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et Fe sidéritique autour du fossé de Tébessa-Morsott. Relations entre la paléogéographie albo-aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. *Th. de doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris VI*, 200 p.

LES ISOTOPES STABLES DU CARBONE ET DE L'OXYGÈNE DES CARBONATES (CALCAIRES ET SIDÉRITES)  
DU GISEMENT DE FER DE BOUKHADRA (ALGÉRIE NORD ORIENTALE)

- PARAIRE-AKROUR, H. 1991.** Fluid inclusions of the F-Ba-Pb late paragenesis of borders of the Ouenza, Mesloul, Hameimat and Dahra diapires (N-E Algeria). *In* : Source, Transport and deposition of metals, *Pagel and Leroy (eds). Balkema, Rotterdam*, ISBN 90 54 10 020 6.
- POHL, W., AMOURI, M., KOLLI, O., SCEFFER, R. AND ZACHMANN, D. 1986.** A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. *Minera. Deposita*, 21, pp. 228-233.
- POSEY, H.H., KYLE, J.R., LIGHT, M.P.R AND PRICE, P.E . 1987.** Mixed carbon sources for calcite cap-rocks of Gulf Coast salt domes. *In*: I. Lerche and J.J O'Brien (editors). Dynamical geology of salt and related structures. *Academic Press, Orlando, Fla.*, pp. 593-630.
- ROSENBAUM, J. AND SHEPPARD, S.M. 1986.** An isotopic study of siderites, dolomites and ankerites at high temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, pp. 1147-1150.
- ROUVIER, H., PERTHUISOT, V. AND MANSOURI, A. 1985.** Pb-Zn deposits and salt bearing diapir in Southern Western Europe and North Africa. *Econ. Geol.*, vol. 80, pp. 666-687.
- SALMI-LAOUAR, S., LAOUAR, R., BOYCE, A.J., ZERDAZI, A. ET AROUCHE, Y.A. 2004.** Rapports isotopiques du soufre, de l'oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE algérien: origine des minéralisations à Pb-Zn-Ba et source des fluides. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, vol. 15, n° 1, pp. 3-25, 7 figs., 2 tabl.
- SHEPPARD, S.M.F., CHAREF, A. AND BOUHLEL, S. 1996.** Diapires and Zn-Pb mineralization : A general model based on Tunisia (N. Africa) and Gulf Coast (USA) deposits. *Society of Geol. Special Publication*, n°4, pp. 230-243.
- SMATI, A. 1986.** Les gisements de Pb-Zn-Ba et de Fe du jebel Sata (Tunisie du Centre-Nord) : Minéralisations épigénétiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un diapir de Trias. Gisements de Sidi Amor Ben Salem et de Sata-Fer. *Th. Doc. 3<sup>ème</sup> Cycle. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI*, 250p.
- URAMOTO, G., FUJITA, T., TAKAHASHI, A. AND HIRANO, H. 2007.** Cenomanian (Upper Cretaceous) carbon isotope stratigraphy of terrestrial organic matter for the Yezo Group, Hokkaido, Japan. Journal compilation. *Blackwell Publishing Asia Pty Ltd. Island Arc.*, pp. 1-14.
- WACHTER, E. AND HAYES, J.M. 1985.** Exchange of oxygen isotopes in carbon-dioxide - phosphoric acid systems. *Chemical Geology*, 52, pp. 365-374.
- WILDI, W. 1983.** La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Géogr. Phys.*, 24, 3, pp. 201-297.
- ZITZMANN, A. AND NEUMANN-REDLIN, C. 1977.** The iron deposits of Spain. *In* : H.W Walther and A. Zitzmann (eds): *The iron ore deposits of Europe and adjacent areas*, vol.1, pp. 269-278.