

# 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.

Sihem SALMI-LAOUAR\*, Rabah LAOUAR\*, Adrian J. BOYCE\*\*,  
Abdelhamid ZERDAZI\* et Yahia Eddine AROUCHE\*\*\*

## RESUMÉ

L'étude des isotopes du soufre a été réalisée sur le gypse triasique ainsi que sur les minéralisations à Pb-Zn-Ba du massif de Boujaber afin de reconstituer le mode de mise en place des formations triasiques et d'évaluer la contribution de leurs sulfates à la genèse de ces minéralisations. L'analyse isotopique de l'oxygène et du carbone, réalisée sur la calcite de gangue, a pour but de déterminer la source du carbone ainsi que l'origine des fluides minéralisateurs.

Les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  ( $\delta^{34/32}\text{S}_{\text{CDT}}$ ) du gypse des formations triasiques sont comprises entre +14,6 et +15,4‰:  $x = +15,1 \pm 0,3\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=3$ ). Elles sont semblables à celles des sulfates des eaux de mer triasique et n'indiquent, ainsi, aucun fractionnement isotopique depuis le Trias. L'origine diapirique de ces formations est, donc, confirmée.

Les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  des minéralisations sulfurées plombo-zincifères sont comprises entre +5,7 et +9,6‰:  $x = +7,7 \pm 1,3\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=5$ ). Elles indiquent une origine commune du soufre dérivé vraisemblablement des sulfates triasiques par remaniement hydrothermal: le  $\text{SO}_4^-$ , lessivé des masses triasiques, a été partiellement réduit en  $\text{H}_2\text{S}$  par processus thermochimique. Le  $\text{SO}_4^-$  restant en a été enrichi en  $^{34}\text{S}$  déterminant ainsi une augmentation de  $\delta^{34}\text{S}$ . C'est le cas de la barytine avec une valeur de  $\delta^{34}\text{S}$  qui s'élève à +22,6‰ tandis que la galène associée montre une valeur de +3,2‰. D'autre part, les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  de la pyrite, comprises entre +15,2 et +16,2‰:  $x = +15,9 \pm 0,5\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=3$ ), indiquent une origine syngénétique du minéral. Le soufre dériverait de la réduction bactérienne des sulfates marins dans un milieu fermé vis-à-vis du  $\text{SO}_4^-$ .

Le calcul de la température isotopique à partir de la paire minérale sphalérite-galène a donné une mesure de  $93 \pm 13^\circ\text{C}$ .

Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  de la calcite de gangue, variant entre +3,08‰ et +3,85‰, indiquent que la source du carbone est inorganique provenant vraisemblablement des roches carbonatées locales. Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  comprises entre +21,26 et +27,42‰ indiquent que la source des fluides n'est pas météorique; elle serait les eaux de formation.

**Mots clés :** Calcaire - Sulfates triasiques - Sulfures - Isotopes du soufre - Boujaber - Algérie.

\* Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mohtar Annaba, B.P. 12, 23000 Annaba, Algérie.

\*\* Isotope Geosciences Unit, S.U.E.R.C., East Kilbride, Glasgow G75 0QF, Scotland.

\*\*\* O.R.G.M., Division Ouest, Sidi Bel Abbès, Algérie.

- Manuscrit déposé le 28 Mars 2001, accepté après révision le 17 Mai 2003.

## SULPHUR, OXYGEN, AND CARBON ISOTOPES IN THE BOUJABER MASSIF, NE ALGERIA: ORIGIN OF THE Pb-Zn-Ba MINERALIZATION AND SOURCE OF THE FLUIDS.

### ABSTRACT

A Sulphur isotope study was carried out on the Triassic gypsum as well as the Pb-Zn-Ba mineralization of the Boujaber massif to assess the value of such data in understanding the emplacement style of the Triassic evaporitic formation and the potential contribution of its sulphate to the formation of the associated galena, sphalerite, pyrite, and barite mineralization. C- and O-isotopes are used to define the origin of carbon and oxygen, and consequently the source of the mineralising fluids.

Gypsum of the Triassic formation shows a narrow range of  $\delta^{34}\text{S}$  values, between +14.6 and +15.4‰:  $x = +15.1 \pm 0.3\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=3$ ). These data are comparable to those of the Triassic seawater sulphates and, therefore, indicate little or no isotopic modification since the Triassic. The classic diapiric nature of this formation is, therefore, confirmed.

Pb-Zn mineralization yielded also a narrow range of  $\delta^{34}\text{S}$  values, between +5.7 and +9.6‰:  $x = +7.7 \pm 1.3\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=5$ ), indicating a common source of sulphur derived most likely from the Triassic sulphates through hydrothermal processes. We suggest that  $\text{SO}_4^-$  leached from the Triassic masses was partly thermochemically reduced to  $\text{H}_2\text{S}$  and that the remaining  $\text{SO}_4^-$  was enriched in  $^{34}\text{S}$ , resulting in relatively high  $\delta^{34}\text{S}$  values. This is reflected in the barite  $\delta^{34}\text{S}$  value of +22.6‰ and the associated galena which gave a  $\delta^{34}\text{S}$  value of +3.2‰. Pyrite is closely associated with fossil replacement within the sedimentary strata.  $\delta^{34}\text{S}$  of pyrite are relatively high, ranging between +15.2 et +16.2‰:  $x = +15.9 \pm 0.5\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=3$ ) and indicating a sedimentary origin of sulphur produced by bacterial reduction of seawater sulphates in a closed system, typical of this style of diagenetic fossil replacement.

Isotopic temperature of the mineral pair sphalerite-galena is calculated at  $93 \pm 13^\circ \text{C}$ .

$\delta^{13}\text{C}$  values of calcite minerals, varying between +3.08 and +3.85‰, indicate an inorganic origin of carbon - most likely the host carbonate rocks.  $\delta^{18}\text{O}$  values comprised between +21.26 and +27.42‰ indicate that the source of the mineralising fluids is not of meteoric origin, formation water, however, is the most probable source of the fluids.

**Key words:** Limestone - Triassic sulphates - Sulphides - Sulphur isotopes - Boujaber - Algeria.

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

### INTRODUCTION

Recent studies on the Boujaber Massif located at the Algero-Tunisian border consider the Pb-Zn mineralization as concentrations of continental origin (Amouri, 1989) and the exposed Triassic evaporitic formation as large gravity flows spread over the sea floor during Cretaceous (Albian) times (Vila and Charrière, 1993). However, the tectonic evidence is not consistent with these models and support the hydrothermal origin of the mineralization and the diapiric character of the Triassic material as evoked by Rouvier *et al.*, (1985) and Perthuisot *et al.*, (1998). A sulphur isotope study was carried out on the Triassic sulphates (gypsum) as well as the Pb-Zn-Ba mineralization in order to assess the value of these data in understanding the emplacement style of the Triassic formation and the contribution of its sulphates for the formation of the associated galena, sphalerite, pyrite, and barite mineralization. C- and O-isotopic composition of calcite associated with Pb-Zn-Ba mineralization was used to define the origin of carbon and oxygen, and the source of the mineralising fluids.

### GEOLOGY

The Boujaber Massif is part of the Monts du Mellègue region located at the Algerian-Tunisian border. This zone is characterised by a Triassic evaporite formation carried to the surface under the effect of tectonic deformation, and a sedimentary cover of Lower Cretaceous to Miocene age. The latter is partly covered by Quaternary clastic material of continental origin. In this region, Pb-Zn-Ba mineralizations occur in the contact zone to the evaporitic formation and its surrounding Cretaceous limestone sediments.

Typical formations of the Triassic in this region are strongly deformed and consist of

chaotic masses of multicoloured gypsum-bearing marls, dolomites, limestones, sandstones, and associated rock fragments. The Cretaceous strata are composed of alternating marls and massive limestones. The Eocene consists of flint-marl-limestones. Finally, the Miocene formation, which is generally transgressive, is composed of marine conglomerate and sands. The whole sedimentary terrain experienced compressive and distensive tectonics during Tertiary to Quaternary times. This has developed NE-SW folds, and NW-SE graben structures (Blès, 1969; Vila, 1980; Kazi-Tani, 1986; Chihi *et al.*, 1984). This deformation is usually accompanied by the development of halokinetic structures of the Triassic formation.

The Boujaber massif represents a typical example of the described lithologies and structures of the Monts du Mellègue region. According to Bouhleb (1986) and Amouri (1989), the boundary between the Triassic formation and the Gargasian sediments, which is often covered by Quaternary material, is marked by a tectonic contact. However, Vila and Charrière (1993) pointed out that this contact is in fact concordant with the Cretaceous formations; thus putting forward the new interpretation of a "large submarine salt glacier" instead of the "diapiric" structures.

Biostratigraphic study indicates that the Cretaceous sediments are composed of two litho-stratigraphic formations:

1. The lower formation is composed of a Gargasian member which consists of alternating marls, sandstones and limestones; the second member of Upper Gargasian age consists mainly of bio-constructed limestones; and a third member, the Clansayesian (Vila and Charrière, 1993), is composed of alternating layers of marl, sandstone and limestone.

2. The upper formation is composed of an Albian member which consists of massive

limestones often showing karstic features, and an Upper Albian to Vraconian member composed mainly of marls and rare thin layers of limestone. The contact between the lower formation and the upper formation is marked locally by an unconformity.

### MINERALIZATION

At Boujaber, Pb-Zn-Ba mineralization, now being exploited, occurs mainly in the eastern part of the massif. Galena, sphalerite and occasionally chalcopyrite are associated with a gangue composed of barite, fluorite, calcite and rare quartz and dolomite. This mineralization occurs either as masses within karstic zones of the Albian and Aptian limestones or veins within fractures and tectonic faults. The ore bodies in the karstic zones are irregular and may reach 700m long, 1 to 15m thick and 20 to 30m deep. The veins are about 40m large, some hundreds of meters long and about 250m deep. A zonation can be distinguished within the ore bodies where galena, barite, fluorite and calcite contents increase towards the surface at the expense of sphalerite; the latter being most common at depth.

Fine-grained pyrite occurs as disseminations and in places as fossil replacement within the Aptian calcareous marls.

### STABLE ISOTOPES

Sulphur isotopic composition of three gypsum samples from the Triassic evaporitic formation shows values of +14,6, +15,3 and +15,4‰ (mean: +15,1‰). These values are comparable to those of the Triassic sulphates of the adjacent region (ex: Fedjel-Adoum - Tunisia; Charef, 1986) and of some Triassic sulphates throughout the world (Claypool *et al.*, 1980). The present isotopic data reflect, therefore, the  $\delta^{34}\text{S}$  values of the Triassic seawater sulphates and indicate little

or no isotopic modification since that period. We note that Cretaceous seawater sulphate would have  $\delta^{34}\text{S}$  ranging from +18.1 to 20.0‰ which would have resulted in heavier  $\delta^{34}\text{S}$  values of gypsum were sulphate of Cretaceous age to contribute. The classic diapiric nature of this formation is, therefore, confirmed.

Pb-Zn mineralisation yielded a narrow range of  $\delta^{34}\text{S}$  values, between +5.7 and +9.6‰ :  $x = +7.7 \pm 1.3\%$  ( $1\sigma$ ,  $n=5$ ), indicating a common source of sulphur derived most likely from the Triassic sulphates through hydrothermal processes. We suggest that  $\text{SO}_4^-$  leached from the Triassic masses was partly thermochemically reduced to  $\text{H}_2\text{S}$ . The later, depleted in  $^{34}\text{S}$ , crystallized as galena with a  $\delta^{34}\text{S}$  value of +3.2‰ whereas the remaining  $\text{SO}_4^-$ , enriched in  $^{34}\text{S}$ , crystallized as barite with a relatively high  $\delta^{34}\text{S}$  value of +22.6‰. Pyrite is disseminated within the sedimentary calcareous marls and sometimes shows fossil replacement phenomena. Three pyrite samples show relatively high  $\delta^{34}\text{S}$  values of +15.2, 16.2 and +16.2‰ (mean = +15.9‰) which indicate a sedimentary origin of sulphur produced by bacterial reduction of seawater sulphates in a closed system, typical of this style of diagenetic fossil replacement.

Isotopic temperature of the mineral pair sphalerite-galena is calculated at  $93 \pm 13^\circ \text{C}$ . This temperature is within the range of the temperatures obtained by fluid inclusion studies of Paraire-Akrour (1991).

$\delta^{13}\text{C}$  values of calcite minerals, varying between +3.08 and +3.85‰ ( $n = 3$ ), indicate an inorganic origin of carbon; the most likely source of carbon being the host carbonate rocks.  $\delta^{18}\text{O}$  values comprised between +21.26 and +27.42‰ indicate that the source of the mineralising fluids is not of meteoric origin; formation water, however, is the most probable source of the fluids.

## CONCLUSION

In the Boujaber Massif, Pb-Zn mineralization hosted in the fracture zones and karstic cavities of the Albo-Aptian limestones shows  $\delta^{34}\text{S}$  values ranging between +3.2 and +9.6‰; thus, indicating a hydrothermal origin of the sulphides. Kinematic analysis of the tectonic features controlling the mineralization suggests that Pb-Zn-Ba phases have been deposited during and just after the diapiric processes of the Triassic formation. Zn/Pb ratios increase with the depth indicating a distinct zoning with sphalerite enrichment at depth and a predominance of galena toward the surface. All these features suggest a similar model to the Mississippi Valley type deposits whose  $\delta^{34}\text{S}$  values (Ohmoto, 1986; Velasco *et al.*, 1994) are similar to those of the Boujaber deposit.

$\delta^{34}\text{S}$  values of pyrite, ranging between +15.2 and +16.2‰, indicate a sedimentary origin for this mineralization.

---

## INTRODUCTION

Les études géologiques effectuées dans la région des Monts du Mellègue, dont le massif de Boujaber fait partie, ont porté essentiellement sur la prospection des minéraux utiles. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories: l'une ponctuelle visant à mettre en évidence les potentialités minières du site (Madre, 1969; Othmanine, 1987; Bouzenoune, 1993; E.RE.M, 1990), l'autre régionale trop orientée pour apporter des explications satisfaisantes aux questions d'ordre structural posées (Dubourdieu, 1956; Vila, 1980; Zerdazi, 1990). Le retard accumulé en matière de recherche fondamentale, a été en partie comblé par les études effectuées sur le prolongement de la région en territoire tunisien (Charef et Cheppard, 1987; Perthuisot, 1978; Perthuisot et Rouvier, 1988; Rouvier *et al.*, 1985).

Le massif de Boujaber, situé à la frontière algéro-tunisienne, a fait l'objet d'études récentes

et ses minéralisations à Pb-Zn ont été considérées comme des concentrations d'origine continentale (Amouri, 1989) et les masses triasiques comme du matériel resédimenté sous forme de glacier de sel "sous-marin" (Vila et Charrière, 1993). Cependant, les observations de terrain en tectonique surtout contredisent cette conclusion. L'étude des isotopes du soufre du gypse triasique et des minéralisations à Pb-Zn-Ba du massif de Boujaber a eu pour but de préciser les modalités de mise en place des formations triasiques et la contribution de leur sulfates à la genèse de ces minéralisations. L'analyse isotopique du carbone et de l'oxygène effectuée sur la calcite de gangue a permis de déterminer l'origine du carbone, de l'oxygène et des fluides minéralisateurs.

## APERCU GEOLOGIQUE

La région est caractérisée par un Trias évaporitique porté à la surface suite à des déformations tectoniques souvent très violentes, et par une couverture qui va du Crétacé inférieur (Barrémien) au Miocène. Celle-ci est, en partie, recouverte par du matériel clastique quaternaire d'origine continentale.

Les marnes bariolées à gypse, les dolomies et les débris de roches de différentes natures constituent les formations typiques du Trias dans cette région. Les assises d'âge crétacé (Barrémien-Maestrichtien) sont représentées par des alternances de marnes et de calcaires. L'Eocène est constitué de calcaires marneux à silex et enfin les dépôts miocènes essentiellement conglomératiques et gréseux marins sont transgressifs sur les formations plus anciennes. L'ensemble des formations sédimentaires est plissé suivant une direction d'axe NE-SW. Les plis résultent d'une tectonique *compressive* correspondant à la phase atlasique d'âge éocène (Dubourdieu et Durozoy, 1950; Dubourdieu, 1956; Vila, 1980; Kazi-Tani, 1986). La partie méridionale de ces plis est recoupée par des

fossés d'effondrement (ex: Ouled Boughanem et Tébessa-Morsott) remplis par des formations quaternaires. Ces fossés, orientés NW-SE, résultent d'une tectonique *distensive* d'âge miocène (Dubourdiou, 1956; Castany, 1954; Chihi *et al.*, 1984). La succession des déformations (compression, distension) est accompagnée d'épisodes d'ascension et de percement des formations triasiques (diapirisme) depuis l'Aptien (Thibiéroz et Madre, 1976; Aoudjehane *et al.*, 1992; Pertuisot *et al.*, 1998) jusqu'à l'Actuel.

### I - Cadre géologique du massif de Boujaber

Le massif de Boujaber est situé à une quarantaine de km au Nord de Tébessa. Il est formé par des assises sédimentaires essentiellement crétacées et des formations triasiques affleurant en contrebas du versant nord du massif (fig. 1). Les assises crétacées, d'âges aptien, albien et vraconien forment une structure monoclinale redressée de direction NE-SW plongeant vers le Sud et affectée par d'importantes failles, souvent radiales. Cette structure, à fermeture périclinale au SW, épouse les structures générales des Monts du Mellègue.

#### *Biostratigraphie*

Le Trias est constitué d'une formation argilo-marno-gypseuse bariolée et versicolore à aspect plus ou moins compact et de débris de dolomies et de calcaires noirs lenticulaires. La discontinuité entre Trias et Gargasien est souvent matérialisée par un contact tectonique (Dubourdiou, 1956; Gharbi *et al.*, 1981; Bouhleb, 1986; Amouri, 1989). Cependant, Vila et Charrière (1993) ont signalé que le Trias est en "concordance" avec l'Albien calcaire et considèrent, donc, cette formation évaporitique comme un matériel résédimenté dans un milieu marin.

La série albo-aptienne à vraconienne est subdivisée en deux formations lithostratigraphiques :

#### *a - La formation I*

Le premier membre de cette formation, discordant sur le Trias, est d'âge gargasien inférieur. Il est représenté par des alternances de marnes grises ou jaunes, de petits bancs décimétriques à métriques de grès fins à ciment carbonaté et des calcaires lités à Orbitolines, Rudistes, Lamellibranches et rares Echinodermes. Le deuxième membre, d'âge gargasien supérieur, est constitué principalement par des calcaires massifs bioconstruits à rares passées dolomitiques au sommet formant la barre nord du massif. Ces calcaires, qui sont des packstones, grainstones et wackstones, renferment, dans leurs parties sommitales, des Miliolles, Cuneolines, Textularidae (*Textularia sp.*, *pseudotextulariella salvensis*), Orbitolinidés (*Orbitolina* (Mésorbitolina) *Texana*, *Orbitolina* (Mésorbitolina) *concava*, *Orbitolinopsis capuensis*), Ovalveolines (*Ovalveolina reicheli*), Dasycladacés, Pseudocyclamines ainsi que quelques débris d'Echinodermes (Salmi-Laouar, 1998). Le troisième membre, d'âge clansayésien (Vila et Charrière, 1993), est caractérisé par une alternance de marnes grises à Ostracodes et foraminifères benthiques, de grès fins à ciment argileux renfermant des Orbitolines, des débris de Lamellibranches et d'Echinodermes, et de calcaires et marno-calcaires à Orbitolines et Lamellibranches.

Le passage de la formation I à la formation II est marqué par une discontinuité locale représentée par une surface à polypiers abondants.

#### *b - La formation II*

Le premier membre de cette formation est représenté par les calcaires massifs d'âge albien (Vila et Charrière, 1993). Ces calcaires, à caractère récifal, forment la barre sud du massif et présentent des cavités karstiques parfois remplies par de la calcite et des oxydes et carbonates de fer. Ce sont des packstones et grainstones à Orbitolines, Cuneolines (*Cuneolina pavonia*

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

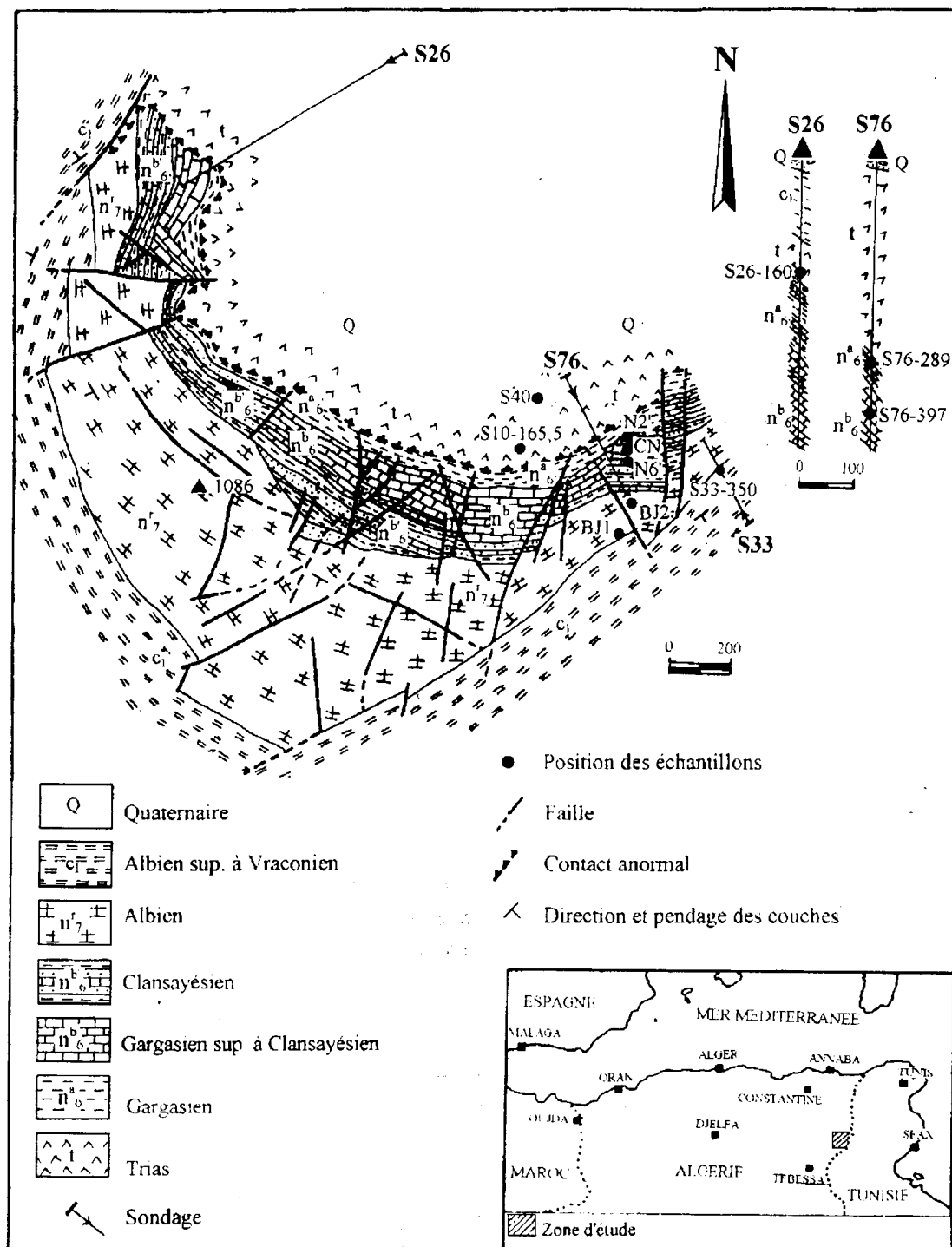


Fig. 1 - Carte géologique schématique du massif de Boujaber (D'après O.R.G.M., 1995; modifiée) montrant la localisation des échantillons pour l'analyse isotopique du soufre.

**Geological sketch map of the Boujaber Massif (After O.R.G.M., 1995; modified) showing sample location for S-isotopes.**

d'Orbigny). Miliolites, Ostracodes, Textularidae et quelques Pseudocyclamines (*Pseudocyclamina rugosa* d'Orbigny) et fragments de Lamellibranches.

Le deuxième membre, d'âge albien supérieur à vraconien, est représenté par une vire marneuse à intercalations centimétriques de marnocalcaires. Les marnes grises renferment des foraminifères planctoniques (*Hedbergella trocoida*, *Ticinella primula*, *Rotalipora gr. Appenninica*), des débris d'Echinodermes et de rares Ostracodes lisses (Salmi-Laouar, 1998). Le passage entre la barre calcaire albienne et la vire marneuse est marqué par une faible discontinuité angulaire.

### *Tectonique*

La structure du massif de Boujaber est expliquée par la poussée du diapir au Nord du massif (Dubourdiou, 1956). Les effets de cette poussée se traduisent également par: (1) l'amincissement des couches au niveau du centre de la structure; (2) la présence de failles majeures de direction NNW-SSE à l'Ouest du massif; et (3) de la "faille de Boujaber" de direction NE-SW qui a mis en contact les calcaires récifaux albiens et les marnes albo-vraconiennes (Dubourdiou, 1956). Notons, également, la présence d'accidents tectoniques plus récents orientés perpendiculairement à la structure principale, de direction N40° à N50°E. Ces accidents ont provoqué des déplacements verticaux et horizontaux des couches multipliant la formation de blocs isolés et contribuant ainsi à la complication de la structure globale.

## **II - Minéralisations**

La structure du massif de Boujaber peut être envisagée comme un champs minier où les principaux gîtes sont concentrés dans la partie est, actuellement en exploitation. La minéralisa-

tion est représentée essentiellement par la sphalérite, la galène et rarement la chalcopryrite, qui sont localisées dans une gangue constituée de barytine, fluorine, calcite et occasionnellement quartz et dolomite. Cette minéralisation se concentre en amas dans les poches de dissolution karstique des calcaires albiens à caractère récifal, et des calcaires bioconstruits de l'Aptien. Elle est également contrôlée par des accidents tectoniques de différentes directions (minéralisation filonienne). La pyrite en grains fins subautomorphes à automorphes est souvent disséminée dans les calcaires et les calcaires marneux de l'Aptien. Elle souligne, parfois, les coquilles de fossiles.

Le minerai en amas forme des poches d'environ 700m de longueur, 1 à 15m d'épaisseur et 20 à 30m de profondeur. Les principaux sulfures métalliques sont la galène et la sphalérite, la chalcopryrite est rare. Les minéraux de gangue sont représentés par la barytine, la fluorine et la calcite.

La minéralisation filonienne, généralement associée à une minéralisation disséminée, forme des zones jusqu'à 40m de largeur, quelques centaines de mètres de longueur avec une extension verticale qui peut atteindre 250m.

La répartition de ces minéraux présente une zonation verticale dans les différents types morphologiques; la quantité de galène, barytine, fluorine et calcite diminue en profondeur alors que la sphalérite augmente.

### *Isotopes stables*

#### *1 - Isotopes du soufre*

L'étude des rapports des isotopes du soufre des phases sulfurées et sulfatées est une méthode utilisée pour apporter des informations sur les conditions de genèse des gîtes sulfurés et/ou sulfatés. La composition isotopique du soufre



peut permettre de préciser l'origine du S et donner une idée sur la source des fluides (Jensen, 1967; Rye et Ohmoto, 1974; Ohmoto et Lasaga, 1982; Ohmoto et Goldhaber, 1997). Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la nature des processus qui amènent un fractionnement important des isotopes du soufre lors de l'histoire géologique des roches.

Dans le domaine des roches sédimentaires, l'échange isotopique durant les réactions d'oxydo-réduction, surtout celles qui font intervenir les espèces oxydées (ex :  $\text{SO}_4$ ) et réduites (ex :  $\text{H}_2\text{S}$ ), résulte d'une concentration de  $^{34}\text{S}$  dans le composé avec l'état d'oxydation le plus élevé du soufre. D'autre part, la réduction par bactéries anaérobiques du sulfate ( $\text{SO}_4$ ) produit un sulfure ( $\text{H}_2\text{S}$ ) enrichi en  $^{32}\text{S}$  par rapport au sulfate parent.

Les fractionnements isotopiques du soufre entre les minéraux sulfurés coexistants peuvent être utilisés pour estimer la température de formation des assemblages minéraux des minéralisations. L'application réussie de toute géothermométrie isotopique, pour tout gisement particulier, nécessite l'équilibre isotopique entre deux minéraux cogénétiques (ex: sphalérite-galène) lors du dépôt et que les deux minéraux ne doivent présenter aucun échange isotopiques depuis leur formation.

### Minéralogie

Les sulfates et sulfures du massif de Boujaber utilisés pour l'analyse isotopique du soufre sont: le gypse, la barytine, la pyrite, la galène et la sphalérite. Des échantillons représentatifs ont été systématiquement prélevés depuis le Trias jusqu'à l'Albien supérieur, aussi bien en surface suivant une coupe N-S qu'en profondeur à partir des carottes (cf. fig. 1).

Le gypse se présente en amas centimétriques à décimétriques souvent mélangé à des argiles

et des marnes bleutées, violacées et grises du Trias. Les cristaux de gypse sont soit xénomorphes soit en plaquettes ou en prismes allongés de couleur transparente à blanchâtre.

Au Nord du massif de Boujaber, la barytine forme un filon d'environ 100 à 150m de long, 1 à 2m d'épaisseur, qui disparaît à quelques dizaines de mètres de profondeur. Ce filon, d'orientation NE-SW, met en contact les calcaires du Gargasien inférieur et les calcaires bioconstruits du Gargasien supérieur à Clansayésien. La barytine se présente en cristaux automorphes à subautomorphes. On note ici la présence de fins filonnets de galène, d'environ 0,5 à 5 mm d'épaisseur, au niveau des plans de clivage de la barytine ainsi que la présence de carbonates de cuivre (malachite et azurite) en faibles quantités.

La sphalérite, dans une gangue calcitique, se présente en amas à cristaux automorphes à subautomorphes de couleur jaune-mielleuse et de dimensions allant de 1 à 10 mm. Elle est encaissée dans des calcaires gris du Gargasien supérieur.

La galène, associée souvent aux filonnets de calcite dans des calcaires à caractère récifal albiens, se présente essentiellement sous forme de cristaux automorphes cubiques de 1 à 4 mm d'arête.

La pyrite est souvent présente en grains fins (< 0,5 mm) disséminés dans les calcaires, calcaires marneux ou marno-calcaires ou en filonnets très fins soulignant les microfractures. Les grains fins de pyrite entourent, parfois, les coquilles fossilisées d'organismes et peuvent également se trouver à l'intérieur de ceux-ci.

## *2 - Isotopes de l'oxygène et du carbone*

### Minéralogie

Le carbonate utilisé pour l'analyse isotopique de l'oxygène et du carbone est la calcite. Trois échantillons ont été prélevés (1 échantillon en

surface et deux des sondages) dans les calcaires bioconstruits de l'Aptien et de l'Albien.

La calcite se présente en filonnets millimétriques à centimétriques sécants aux plans de stratification des calcaires micritiques grisâtres du Gargasien où sont présents également des oxydes et hydroxydes de fer ainsi que des disséminations de cristaux de barytine (échantillon S35-150 m). Elle se présente également en gros cristaux centimétriques associés à la galène dans des zones d'oxydation des calcaires massifs aptiens (échantillon BJII3). Elle est de couleur blanchâtre, présentant les formes rhomboédriques caractéristiques. Dans l'Albien (échantillon S33-540 m), la calcite en cristaux fins colmate des cavités et des fractures centimétriques irrégulières des calcaires massifs.

### 3 - Techniques analytiques

Les sulfures, sulfates et carbonates (calcite) ont été séparés manuellement sous binoculaire dans le but d'obtenir des phases minérales aussi pures que possible.

Les analyses isotopiques du soufre, du carbone et de l'oxygène ont été effectuées au laboratoire "Isotope Geosciences Unit", Scottish Universities Environmental Research Centre, EastKilbride, Glasgow, Grande-Bretagne.

#### Soufre

Le SO<sub>2</sub> est extrait des différentes phases sulfurées par combustion avec l'oxyde de cuivre (CuO) à 1075° C suivant la méthode décrite par Robinson et Kusakabe (1975). Les sulfates mélangés avec CuO ont été chauffés à 1120° C et tout le SO<sub>3</sub> produit est réduit en SO<sub>2</sub> en utilisant un mini-four en cuivre (Coleman et Moore, 1978). Les impuretés, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, sont séparées techniquement par congélation et dégagées par la ligne d'extraction sous vide. Les analyses

isotopiques du soufre ont été effectuées sur un spectromètre de masse Isospec 64 ou VG Isogas Sira 2. Tous les résultats sont reportés en notation standard  $\delta$  (‰) comme déviation par rapport au standard "Canon Diablo Troilite". La reproductibilité des résultats, basée sur des répétitions complètes d'analyses de standards (laboratoire et international) incluant la préparation des échantillons, s'est soldée par  $(1\sigma) \pm 0,3\%$ .

#### Carbone et oxygène

Les trois échantillons de calcite ont été analysés pour les isotopes de l'oxygène et du carbone. Les poudres d'échantillons ont été converti en CO<sub>2</sub> par réaction avec l'acide phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 100% à 25° C (McCrea, 1950). L'analyse isotopique de l'oxygène et du carbone du CO<sub>2</sub> préparé a été effectuée sur un spectromètre de masse Micomass 602D suivant la méthode décrite par Graig, (1957) et Swart *et al.* (1991). Les rapports des différences isotopiques sont exprimés en ‰ par rapport aux standards PDB pour le carbone et SMOW pour l'oxygène. La reproductibilité des résultats est de  $\pm 0,1\%$ .

### 4 - Résultats

La composition isotopique du soufre des sulfures et sulfates du massif de Boujaber est présentée dans le tableau I. Elle est comparée avec celle des réservoirs naturels (fig. 2) et schématisée dans la figure 3. Les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  présentent trois gammes principales:

- Les sulfates triasiques (gypse, 3 mesures) ont des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  de +14,6, 15,3 et +15,4‰ : (moyenne = +15,1‰).
- La galène (4 mesures), comme la sphalérite (1 mesure), présente des valeurs positives de  $\delta^{34}\text{S}$  variant entre +5,7 et +9,6‰ :  $x = +7,7 \pm 1,3\%$  (1 $\sigma$ ).
- L'analyse isotopique de la barytine filonienne (une mesure) a donné une valeur de +22,6‰ et celle de la galène associée +3,2‰.

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

**Tableau I - Composition isotopique du soufre des sulfures et sulfates de Boujaber**  
***Sulphur isotopic compositions of sulfides and sulphates from the Boujaber***

<b>Age</b>	<b>N°échant.</b>	<b>Minéral</b>	<b><math>\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})</math></b>	<b>Description minéralogique</b>
<b><i>Sulfates triasiques</i></b>				
Trias	S26 – 160	gypse	+15,3	gypse prismatique avec marnes rouges et grises et quelques fragments de dolomies.
Trias	S10 – 165,5	"	+15,4	gypse amorphe mélangé avec des marnes et dolomies du Trias.
Trias	S40	"	+14,6	pâte de gypse amorphe, marnes verdâtres et, dolomies noires du Trias.
<b><i>Filon de barytine</i></b>				
Gargasien Sup. à Clansayésien.	N2'	barytine	+22,6	filon de barytine marquant le contact entre Gargasien inférieur et Gargasien supérieur
	N2'	galène	+3,2	galène en filonnets au niveau des plans de clivage de la barytine.
<b><i>Minéralisation à pyrite</i></b>				
Gargasien sup. à Clansayésien	S76 – 397	pyrite	+16,2	pyrite en grains fins disséminés.
Gargasien	S76 – 289	"	+15,2	pyrite en grains très fins disséminés dans des calcaires gris. Elle forme parfois des filonnets d'environ 0,2mm de large.
Albo-Vraconien.	S33 – 350	"	+16,2	pyrite en veinules et en dissémination dans des marnes et marno-calcaires riches en matière organique.
<b><i>Minéralisation à Pb-Zn</i></b>				
Albien	Bj 1	galène	+5,7	galène en grains sub-automorphes de 1-4 mm dans des calcaires gris (galerie n° 727).
Gargasien sup. à Clansayésien	CN	"	+7,2	galène massive automorphe dans les calcaires aptiens. Elle est souvent associée à la calcite.
Albien	BJ2	"	+7,2	galène en grains sub-automorphes dans les calcaires albiens au dessus de la galerie n°727
Gargasien sup. à Clansayésien	N6'	"	+9,6	Galène, en grains grossiers, associée à la calcite dans des calcaires fins gris-claires de l'Aptien.
Gargasien sup. à Clansayésien	S75 - 450	sphalérite	+8,6	sphalérite massive de couleur mielleuse, à grains automorphes (1-5mm), associée à la calcite dans des calcaires gris à gains fins.

sulfures sédimentaires

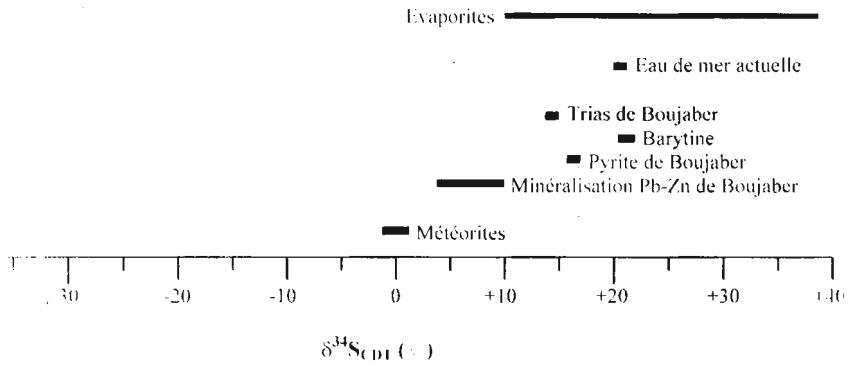


Fig. 2 - Composition isotopique du soufre du massif de Boujaber en comparaison avec quelques matériaux typiques terrestres.

**Sulphur isotopic composition of the Boujaber massif in comparison with some typical terrestrial materials.**

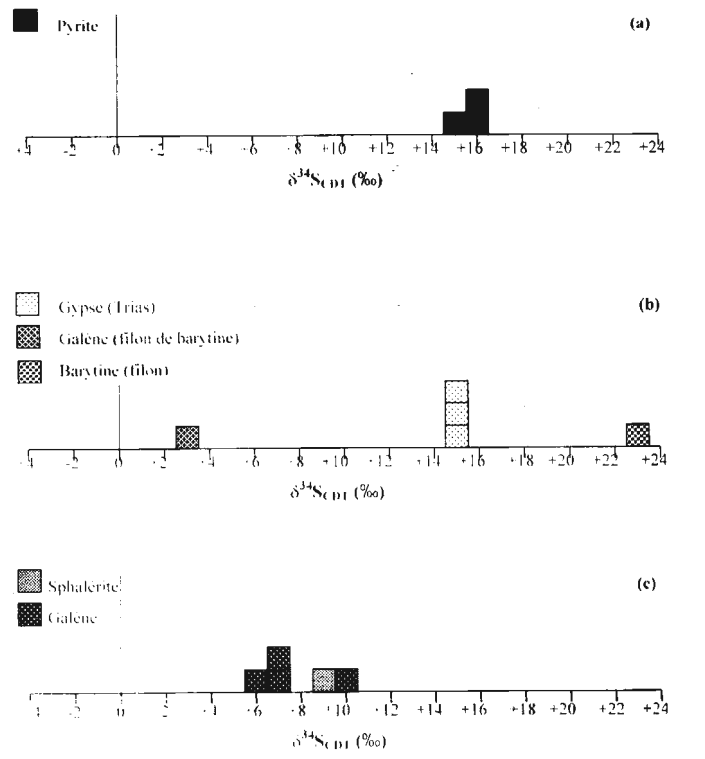


Fig. 3 - Histogrammes montrant la composition isotopique du soufre des différentes phases sulfurées et sulfatées du massif de Boujaber

**Histograms showing sulphur isotopic composition of different sulphide and sulphate phases of the Boujaber Massif**

(a) pyrite (*pyrite*); (b) gypse triasique, galène et barytine filoniennes (*Triassic gypsum, barite and galena vein*); (c) sphalérite et galène de la minéralisation en amas (*galena and sphalerite massive mineralisation*).

**Tableau II** - compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone de la calcite du massif de Boujaber.

**Oxygen and carbon isotopic compositions of calcites from the Boujaber Massif.**

Age	N° éch.	Minéral	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	Observation
Albien	S33 540m	calcite	+3.08	-7.8	+22.87	filonnets de calcite en cristaux fins subautomorphes
Albien	S33 540m	calcite	+3.31	-9.36	+21.26	"
Aptien (Gargasien)	S35 150m	calcite	+3.64	-3.92	+26.87	"
Aptien (Gargasien)	S35 150m	calcite	+3.77	-3.72	+27.07	"
Gargasien sup-Clansayésien	Bj113	calcite	+3.85	-3.39	+27.42	cristaux centimétriques automorphes
Gargasien sup-Clansayésien	Bj113	calcite	+3.85	-3.39	+27.42	"

- La pyrite (3 mesures) présente des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  variant entre +15.2, 16,2 et +16.2‰ (moyenne = +15.9‰).

Les résultats de l'analyse isotopique de l'oxygène et du carbone effectuée sur les trois échantillons de calcite (tableau II) présentent des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  variant entre +21,26 et +27,42‰, avec une moyenne de +25.10‰. Les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  obtenues varient de +3,08‰ à +3,85‰, avec une moyenne de +3,53‰.

## 5 - Discussion

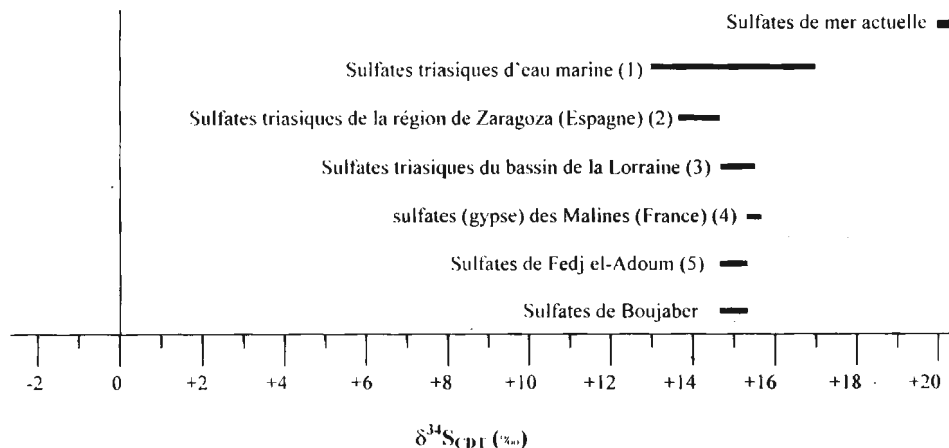
### Les sulfates et sulfures

#### Les sulfates triasiques

Les vastes affleurements des formations triasiques gypsifères de l'Est algérien et des confins algéro-tunisiens ont été souvent considérés comme source probable du soufre des minéralisations périadiapiriques (Charef, 1986). La composition isotopique du soufre des trois échantillons de gypse a donné des valeurs comprises entre +14,6 et +15,4‰ (avec une moyenne de +15,1 ± 0.3‰, 1 $\sigma$ ). Ces valeurs sont comparables à celles des sulfates triasiques de la zone

limitrophe (ex: Fedjel-Adoum - Tunisie; Charef, 1986) ainsi qu'à celles obtenues dans certaines formations triasiques dans le monde (fig. 4). La précipitation du gypse s'est produite par une augmentation de l'activité de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les eaux de mer à travers l'évaporation; les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  du gypse reflètent donc les valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  des eaux de mer triasique.

Sur la base des nouvelles observations géologiques et des données sédimentologiques sur les masses triasiques, Vila et Charrière (1993), Vila (1994) et Vila (1995) proposent un modèle de grand "glacier de sel triasique sous-marin" durant le Crétacé inférieur remettant ainsi en cause le modèle de diapir proposé précédemment par divers auteurs (ex: Bouzenoune, 1993; Rouvier *et al.*, 1985). Les données isotopiques du soufre du Trias du massif de Boujaber que nous avons évoquées viennent contredire le modèle de "glacier de sel sous-marin" dans la mesure où la composition isotopique des eaux de mer du Crétacé est nettement supérieure à celle du Trias d'autant plus que Claypool *et al.* (1980) ont donné des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  variant entre +18,1 et +20,0‰ pour les sulfates marins des séries du Crétacé de Libye. En effet, le modèle de glacier de sel sous-marin proposé



**Fig. 4** - Composition isotopique du soufre des sulfates triasique de Boujaber en comparaison avec celle des sulfates triasiques de l'Europe et de l'Afrique du nord

***Sulphur isotopic composition of the Triassic sulphates of Boujaber in comparison with that of the Triassic sulphates of Europe and North Africa***

(1) Thode et Monster (1965) (**Thode and Monster (1965)**); (2) Birnbaum et Coleman (1979) (**Birnbaum and Coleman (1979)**); (3) Fanlo et Ayora (1998) (**Fanlo and Ayora (1998)**); (4) et (5) Charef (1986) (**Charef (1986)**).

suppose une submersion du matériel triasique par la mer crétacée. Cette situation devrait changer la composition isotopique du soufre des sulfates triasiques vers celle des sulfates crétacés. Or, les résultats obtenus confirment l'absence de toute interaction du  $\text{SO}_4^{2-}$  triasique avec celui du Crétacé, d'où les résultats de  $\delta^{34}\text{S}$  du Trias.

Finalement, et sur la base des arguments émis ci-dessus, nous considérons la disposition structurale du matériel triasique comme relevant plutôt du modèle diapirique que celui d'une resédimentation sous forme de glacier de sel sous-marin.

#### Les minéralisations Zn-Pb

La composition isotopique du soufre de la galène et de la sphalérite présente une gamme assez serrée allant de +5,7 à +9,6‰ et une valeur relativement basse (+3,2‰) de galène dans le filon de barytine (voir Tableau I). Ces valeurs indiquent une source commune du soufre. Cette source est vraisemblablement le produit de la réduction thermochimique (non-bactérienne) du soufre des sulfates triasiques.

En effet, le gypse et l'anhydrite peuvent être dissous et les sulfates aqueux peuvent être réduits à des températures élevées sans bactéries catalysantes. La réduction non-bactérienne des sulfates prend place à des taux suffisamment élevés et à des températures supérieures à environ 175° C; elle peut, néanmoins, se produire à des températures plus basses ( $\approx 80^\circ\text{C}$ ) (Powell et Macqueen, 1984; Orr, 1974). Les effets isotopiques cinétiques accompagnant la réduction des sulfates sont aux environs de 10‰ à des températures variant entre 250 et 340° C (Kiyosu, 1980). Le  $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$  devient essentiellement identique au  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  suivant une réduction complète dans un système fermé aux sulfates et sulfures.

L'étude des inclusion fluides sur les gisements de Zn-Pb de Fedj-El-Adoum (Charef et Sheppard, 1987) et Bougrine (Orgeval, 1995) ainsi que ceux de F-Ba-Pb des diapirs de Ouenza-Hameimet-Dahra (Paraire-Akrour, 1991), qui se situent dans le même contexte géologique, a montré une phase gazeuse basse, une salinité élevée (9-25% pds eq. NaCl) et une

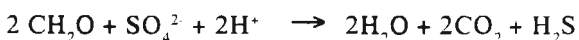
température d'homogénéisation de 80 à 150°C. De telles températures rendent l'activité bactérienne négligeable. En effet, la réduction des sulfates triasiques par processus thermo-chimique peut être importante lors du lessivage des évaporites, du transport ou encore à l'arrivée sur le site de formation des sulfures. L'origine sédimentaire de ces sulfures est, donc, exclue.

### La barytine

La réduction thermo-chimique partielle de  $\text{SO}_4^{2-}$  lessivé des évaporites triasiques donne un  $\text{H}_2\text{S}$  appauvri et un  $\text{SO}_4^{2-}$  enrichi en isotope lourd (processus de fractionnement isotopique cinétique). La précipitation de ce dernier ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) engendre des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  plus élevées que celles des sulfates triasiques. Ceci explique la valeur de  $\delta^{34}\text{S}$  de la barytine filonienne (+22,6‰) et celle de la galène associée ( $\delta^{34}\text{S} = +3,2‰$ ).

### La pyrite

La gamme des valeurs isotopiques du soufre (comprises entre +15,2 et +16,2‰) de la pyrite ne peut être expliquée que par une réduction bactérienne des sulfates des eaux de mer dans un milieu partiellement ou complètement fermé vis-à-vis du  $\text{SO}_4^{2-}$ . La présence de la matière organique dans les marnes et marno-calcaires du Gargasien tend à accélérer la réduction bactérienne de  $\text{SO}_4^{2-}$  de l'eau de mer par rapport au taux de diffusion de  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les sédiments. Une réaction généralisée pour la réduction des sulfates marins par de la matière organique peut être écrite comme suit :



Dans la nature, les bactéries qui réduisent le soufre (ex: *Desulfovibrio desulfuricans*) forment les principaux catalyseurs qui provoquent la réaction précédente à des températures ambiantes. Dans la plupart des

sédiments,  $\text{H}_2\text{S}$  ou  $\text{HS}^-$ , selon pH, réagit avec le fer pour former la pyrite. Dans la quasi-totalité des sédiments marins, la pyrite est formée durant la phase précoce de la diagenèse alors que les sédiments sont encore à un mètre environ de l'interface eau de mer - sédiments (Berner, 1980). Les sulfures formés dans de tels systèmes ont tendance à montrer des valeurs larges de  $\delta^{34}\text{S}$  variant entre 10 et 20‰ (Ohmoto, 1986).

### Géothermométrie

L'identification pétrologique de l'échantillon prélevé du filon de barytine indique que la formation de la galène est postérieure à celle de la barytine, d'où la non-atteinte de l'équilibre isotopique entre les deux phases (sulfate et sulfure), ce qui rend les résultats des méthodes géothermométriques isotopiques inutilisables. Cependant, les résultats des températures isotopiques entre sphalérite et galène qui paraissent en équilibre (échantillons S75-450 et Bj1) ont donné une mesure de  $93 \pm 13^\circ\text{C}$  et quatre mesures supérieures à  $200^\circ\text{C}$ . La température de  $93 \pm 13^\circ\text{C}$  est bien dans l'intervalle des températures obtenues par étude d'inclusions fluides dans les massifs de Mesloulou, M'Khiriga et Boujaber (Paraire-Akrou, 1991), et les régions limitrophes (Charef, 1987; Paraire-Akrou, 1991). Les températures supérieures à  $200^\circ\text{C}$  indiquent que l'équilibre isotopique entre les paires minérales n'est pas atteint.

### Les Carbonates

Les résultats de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  des calcites de Boujaber (+3,08‰ à +3,85‰) indiquent que l'origine organique (biogénique) du carbone est exclue car les valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  du carbone organique sont très pauvres en  $^{13}\text{C}$  (-25‰ >  $\delta^{13}\text{C}$  > -32‰) (Yeh et Epstein, 1981; Schoell, 1984). La source la plus probable du carbone serait donc les roches carbonatées locales. En effet, Mansouri (1980) a donné des valeurs

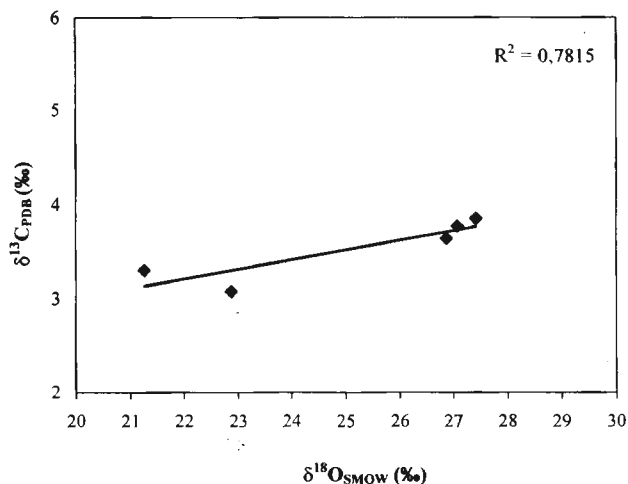
variant entre +1 et +8‰ sur les calcaires crétaqués des régions limitrophes (Tunisie). D'autre part, nos résultats sont comparables à ceux obtenus par Velasco *et al.* (1994) sur les calcites des gisements de fer et de Zn-Pb de type MVT du bassin Basque-Cantabrien du Nord de l'Espagne ( $\delta^{13}\text{C}$  variant entre +0,5 et +3,8‰). Ces auteurs relient l'origine du carbone aux calcaires encaissants (aptiens et albiens) qui ont donné des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  variant entre +1,65 et +4,02‰ (Bustillo *et al.*, 1992).

Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  comprises entre +21,26 et +27,42‰ de ces calcites dévient légèrement vers des valeurs plus basses que celles des calcaires du Crétacé supérieur (+28‰; Charef, 1986); elles indiquent, ainsi, que l'oxygène dérive des calcaires encaissants. La déviation vers des valeurs plus basses est due aux processus du fractionnement isotopique lors de la cristallisation de la calcite. En effet, le fractionnement isotopique augmente avec la diminution de la température et donc la profondeur. C'est ainsi que les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  de la calcite prélevée à 540 mètres de profondeur (+21,26 et +22,87‰) sont plus basses que les valeurs des calcites prélevées en surface

(+27,42‰). Ces carbonates montrent également une corrélation positive entre  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  et  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  (fig. 5), ce qui indique encore l'évolution du fractionnement isotopique en fonction de la profondeur, et donc de la température. La composition des premières phases cristallisées (en profondeur) serait pauvre en isotope lourd, alors que la composition des dernières phases (en surface) serait enrichi en  $^{13}\text{C}$  et  $^{18}\text{O}$  (voir Tableau II).

### Source des fluides

Supposant que les calcites de Boujaber ont été formé à une température moyenne semblable à celle obtenue par l'étude des inclusions fluides sur les massifs de Mesloula, M'Khiriga et Boujaber (115°C; Paraire-Akrou, 1991) ou une température isotopique moyenne de 93°C (voir ci-dessus), le diagramme température contre  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  du fluide, dans les deux cas, montre clairement que la source des fluides n'est pas météorique (les fluides d'origine météorique ont un  $\delta^{18}\text{O} < 0$ ‰; Sheppard, 1986). Les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  de ces fluides varient de +3 à +12‰ (fig. 6); il est donc fort probable que la source des fluides serait les eaux de formation. En

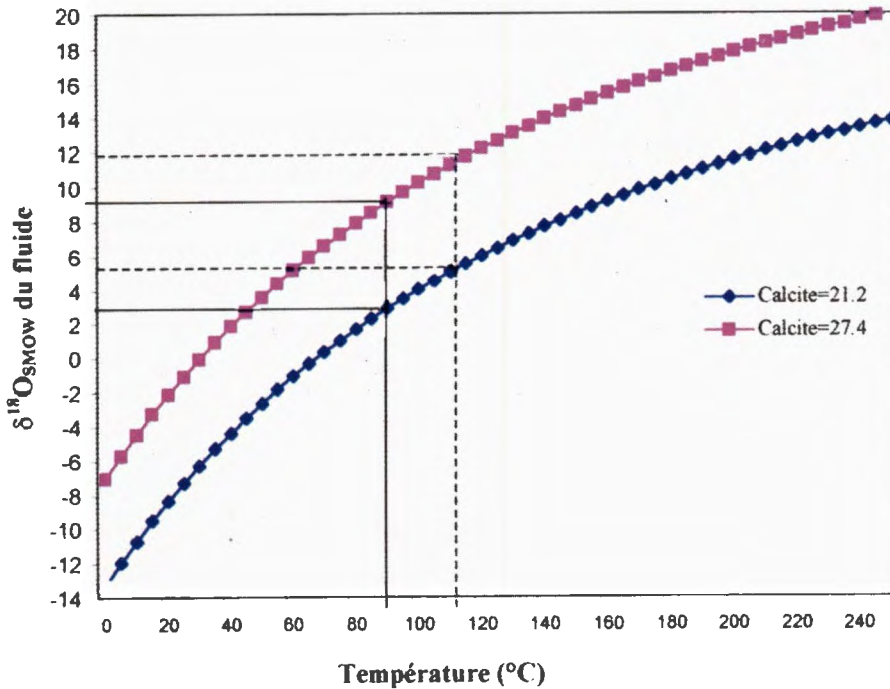


**Fig. 5** - Compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone des calcites de Boujaber. Les calcites montrent une corrélation positive qui se traduit par un enrichissement en isotope lourd en passant de la profondeur à la surface (voir texte pour explication)

**Oxygen and carbon isotopic compositions of the Boujaber calcites showing a positive correlation with heavy isotopes being enriched towards the surface (see text for explanation)**



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



**Fig. 6** - Courbes du fractionnement isotopique calculé des calcites de Boujaber sur le diagramme T (°C) contre  $d^{18}O_{SMOW}$  du fluide. L'équation du fractionnement isotopique de la paire calcite-eau (Friedman et O'Neil, 1977) est:  $10^3 \ln a = 2,78 (10^6/T^2) - 2,89$ ; où a est le coefficient du fractionnement de l'oxygène entre calcite et eau, et T la température en degré Kelvin. Ligne continue: température isotopique; ligne discontinue: température obtenue par étude d'inclusions fluides

**Calculated fractionation curves for the Boujaber calcites on the T (°C) versus  $d^{18}O_{SMOW}$  of fluid diagram. The fractionation equation of calcite-water (Friedman and O'Neil, 1977) is:  $10^3 \ln a = 2,78 (10^6/T^2) - 2,89$ ; where a is the oxygen fractionation factor between calcite and water, and T is the temperature in degrees Kelvin. Solid line: calculated isotopic temperature; dashed line: temperature obtained from fluid inclusion study**

effet, la compaction des séries sédimentaires sous l'effet de l'ascension du Trias, s'avère être responsable de la migration de ces eaux à travers les fractures et le long du contact Trias-couverture. L'interaction de ces fluides, généralement salés (Paire-Akrou, 1991) et légèrement acides, avec les roches carbonatées donnerait la composition isotopique observée sur les calcites.

## MODELE GENETIQUE ET CONCLUSIONS

Les concentrations en métaux (principalement Zn et Pb) dans les confins algéro-tunisiens sont situées d'une manière plus ou moins directe aux alentours des diapirs triasiques. Elles sont encaissées dans les calcaires et/ou dolomies

principalement crétacés. Ces gisements sont caractérisés par une minéralisation épigénétique à Pb-Zn-Ba-F liée aux fractures et cavités karstiques et une minéralisation pyriteuse syngénétique dans les sédiments généralement riches en matière organique. L'absence de toute manifestation magmatique dans la région exclue l'origine ignée de ces gisements.

Dès le début du siècle, plusieurs hypothèses génétiques ont été proposées pour la mise en place de ces minéralisations polymétalliques. Parmi ces hypothèses, certains auteurs (Laatar, 1980; Rouvier *et al.*, 1985; Smati, 1986; Pohl *et al.*, 1986; Bouzenoune *et al.*, 1995) suggèrent l'hypothèse hydrothermale (épigénétique) où la remontée du Trias évaporitique a joué un grand rôle dans la mise en place des minéralisations à Pb-Zn-Ba-F, d'autres (Fuchs, 1973; Amouri,

1986; 1989) adoptent l'idée d'une source continentale des métaux dans un haut-fond et paléotalus. Cependant, certaines caractéristiques de ces gisements péri-diapiriques (voir ci-dessous) sont semblables à celles du Mississippi Valley Type (Ohle, 1980; Velasco *et al.*, 1994). Cette comparaison est signalée dans une étude sur les "caps rocks" du Golf Coast (Price et Kyle, 1983).

Dans le massif de Boujaber, les concentrations plombo-zincifères (galène et sphalérite), encaissées dans des calcaires albo-aptiens, présentent des valeurs de  $\delta^{34}\text{S}$  variant entre +3,2 et +9,6‰ indiquant ainsi une origine épigénétique. La présence de la minéralisation dans les cavités karstiques des calcaires albiens indique qu'elle s'est déposée dans un milieu plus ou moins émergé. L'analyse cinématique des caractères tectoniques contrôlant la

minéralisation suggère que les concentrations à Pb-Zn-Ba ont été déposées durant et juste après les processus d'ascension du diapir triasique. Les rapports Zn/Pb augmentent avec la profondeur indiquant ainsi un zonage distinct avec un enrichissement en sphalérite en profondeur et une prédominance de galène vers la surface. Toutes ces caractéristiques suggèrent un modèle semblable à celui du type Mississippi Valley dont les compositions isotopiques du soufre des sulfates et sulfures, (fig. 7 et Ohmoto, 1986), de l'oxygène et du carbone des carbonates (Spangenberg *et al.*, 1996; Velasco *et al.*, 1994; Bustillo *et al.*, 1991) sont semblables à celles du gisement de Boujaber.

L'ascension du diapir triasique a provoqué une compaction des séries sédimentaires créta-cées d'où la migration des eaux de formations à travers les fractures et le long du contact Trias

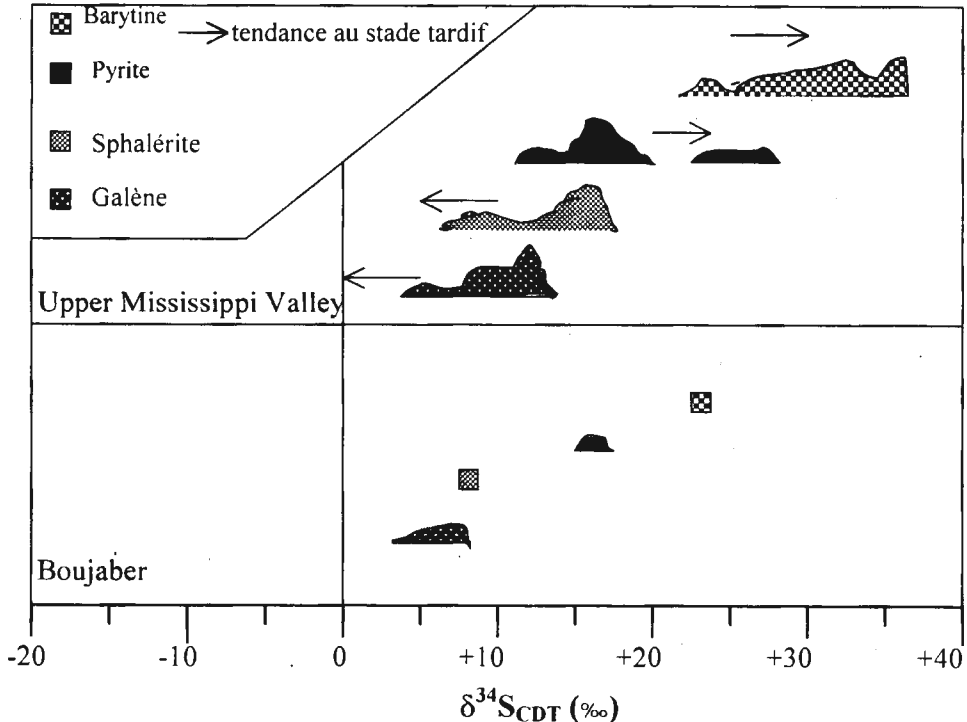


Fig. 7 - Représentation schématique des données isotopiques du soufre du massif de Boujaber en comparaison avec le gîte de Upper Mississippi Valley (McLimans, 1977).

*Schematic representation of S-isotopic data of the Boujaber massif in comparison the Upper Mississippi Valley deposit (McLimans, 1977).*

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

- Crétacé. Le gradient géothermique important en profondeur aurait provoqué un lessivage des sulfates triasiques (principalement le gypse) et une réduction thermochimique (non-bactérienne) du soufre. Les cations métalliques, notamment le  $Zn^{++}$  et  $Pb^{++}$ , lessivés vraisemblablement des séries sédimentaires traversées par ces eaux chaudes avec le soufre ainsi réduit, se sont déposés vers la surface en contact avec les eaux froides non-chargées sous forme de sulfures.

Le  $SO_4^{2-}$  (non réduit) restant en solution s'est déposé sous forme de sulfates, notamment de barytine, avec logiquement un  $\delta^{34}S = +22.6\%$  supérieur à celui des sulfates triasiques (+15.1%). Ce type de dépôt a été également signalé au niveau du gisement de M'zouzia (Othmanine, 1987), Mesloula (Paraire-Akrou, 1991).

Le  $\delta^{34}S$  des minéralisations pyriteuses, variant entre +15.2 et +16.2%, indiquent clairement une origine diagénétique où la pyrite a acquis le soufre à partir de la réduction bactérienne des sulfates marins dans un système fermé vis-à-vis du  $SO_4^{2-}$ . Ces minéralisations ont été donc déposées antérieurement dans un domaine de haut-fond. Cependant, et dans le cas du massif de Boujaber, ces minéralisations sont très pauvres et sans un intérêt économique. Les résultats obtenus confirment la rigueur de la méthode d'où l'intérêt de son utilisation systématique dans la reconnaissance des gisements périidiapiriques du Nord-Est algérien.

**Remerciements:** Nous exprimons nos remerciements à tous les responsables de l'O.R.G.M., principalement l'ex-DG Dr. B. Touahri, le Directeur de la Division Est M. A. Benhemmiche et à l'actuel DG Dr. M.T. Bouarroudj, qui n'ont pas hésité et cessé de nous aider à mener les travaux de terrain à terme. Notre gratitude s'adresse également aux responsables de l'Isotope Geosciences Unit, S.U.E.R.C., Glasgow: Prof. A.E. Fallick, Directeur du laboratoire, C. Taylor, N. Donnelly, et P. Gorman pour les analyses isotopiques et leur support technique. Nous remercions Dr. Y. Fuchs et Dr. O. Kollı pour leur précieuse lecture et leur critique du manuscrit.

## BIBLIOGRAPHIE

- AMOURI, M., 1986. Le gisement de Bou-jaber (Atlas tunisien central), un exemple de minéralisation Pb-Zn-Ba dans un paléokarst. *Revue des Sciences de la Terre*, Vol. 4, Tunisie.
- AMOURI, M., 1989. Les minéralisations Pb-Zn-Ba-F liées aux faciès carbonatés aptiens dans l'Atlas Tunisien Central. *Géologie Méditerranéenne, Marseille, XVI, N°2-3, 185-199.*
- AUDJEHANE, M., BOUZENOUNE, A., ROUVIER, H. ET THIBIÉROZ, J., 1992. Halocinèse et dispositifs d'extrusion du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien). *Géologie Méditerranéenne, Marseille, t. XIX, 273-287.*
- BERNER, R. A., 1980. Early Diagenesis: A Theoretical Approach. *Princeton University Press, Princeton, N. J., 241p.*
- BIRNBAUM AND COLEMAN, M. L., 1979. Source of sulphur in the Ebro Basin (Northern Spain). Tertiary non marine evaporite deposits as evidenced by sulphur isotopes. *Chemical Geology*, 25, pp. 163-168.
- BLÉS, J. L., 1969. Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois - Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. *Publications du Service Géologique de l'Algérie, (Série N° 11), Bulletin N° 39, pp. 7-17.*
- BOUHLEL, S., 1986. Données géologiques et gîtologiques du gisement de Boujaber (Tunisie). *Office National des Mines, Tunisie (Rapport inédit).*
- Bouzenoune, A., 1993. Minéralisations périidiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie Orientale). *Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 209 p.*
- BOUZENOUNE, A., ROUVIER, H. ET THIBIÉROZ, J., 1995. Trias de l'Ouenza: contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, Vol. 6, N°1, pp. 3-24.*

- BUSTILLO, M., FORT, R. AND ORDONEZ, S., 1992.** Genetic implications of trace-element distributions in carbonate and non-carbonate phases of limestones and dolostones from western Cantabria, Spain. *Chemical Geology*, 97, 273-283.
- CASTANY, G., 1954.** Les grands traits structuraux de la Tunisie. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (6), IV, pp. 151-173.
- CHAREF, A., 1986.** La nature et le rôle des phases fluides associées à la minéralisation Pb-Zn dans les Formations carbonatées et leurs conséquences métallogéniques: étude des inclusions fluides et des isotopes (H, C, O, S, Pb) des gisements des Malines (France), Jbel Hallouf-Sidi Bou Aouane et Fedj-el-Adoum (Tunisie). *Thèse d'Etat, INPL - CRPG, Nancy, France*, 291p.
- CHAREF, A. AND SHEPPARD, S. M. F., 1987.** Pb-Zn mineralization associated with diapirism: Fluid inclusion and stable isotope (H, C, O), evidence for the origin and evolution of the fluid at Fedj-el-Adoum, Tunisia. *Chemical Geology*, 61, pp. 113-134.
- CHIH, L., DLALA, M. ET BEN AYED, M., 1984.** Manifestations tectoniques synsédimentaires et polyphasées d'âge crétacé moyen dans l'Atlas Tunisien central (région de Kasserine). *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences, Paris*, t. 298, Série II, N° 4, pp. 141-146.
- CLAYPOOL, G. E., HOLSER, W. T., KAPLAN, I. R., SACHET, H. AND ZAK, I. 1980.** The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulphate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28, pp. 199-260.
- COLEMAN, M. L. AND MOORE, M. P., 1978.** Direct reduction of sulphates to Sulphur dioxide for isotopic analysis. *Analytical Chemistry*, 50, pp. 1594-1595.
- DUBOURDIEU, G., 1956.** Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). *Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, Vol. 1, 659 p.*
- DUBOURDIEU, G. ET DUROZOY G., 1950.** Observations tectoniques dans les environs de Tebessa et de l'Ouenza (Algérie). *Bulletin du Service Géologique de France, 5<sup>ème</sup> série, t. XX, pp.257-266.*
- E.RE.M., 1990.** Estimation des potentialités polymétalliques du dj. Boujaber. *E.RE.M., Algérie (Rapport inédit).*
- FANLO, I. AND AYORA, C., 1998.** The evolution of the Lorraine evaporate basin: implications for the chemical and isotope composition of the Triassic ocean. *Chemical Geology*, 146, 135-154.
- FRIEDMAN, I. AND O'NEIL, J.R., 1977.** Compilation of stable isotope fractionation factors of agrochemical interest. In: M. Fleisher (Editeur), *Data of Geochemistry. 6ème édition, USGS, Washington.*
- FUCHS, Y., 1973.** Sur les relations entre émergence et concentration métallifère (quelques exemples tunisiens). *Livre Jubilaire M. Solignac, Annales des Mines et de la Géologie (Tunis), N° 26, pp. 479-509.*
- GHARBI, M., BENAYED, N. ET BEN-SAÏD, E., 1981.** Essai d'interprétation tectonique du champ filonien de Boujabeur (Atlas tunisien central). *1<sup>er</sup> Congrès National des Sciences de la Terre, Tunis. In résumés.*
- JENSEN, M. L., 1967.** Sulfur isotopes and mineral genesis. In: H. L. Barnes (Editeur), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Holt, Rinehart et Winston, New York, pp.143-165.*
- KAZI-TANI, N., 1986.** Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine: le domaine interplaque nord-algérien. Approche mégaséquentielle. *Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Pau et des Pays de l'Adoure, 2 tomes.*
- KIYOSU, Y., 1980.** Chemical reduction and sulfur-isotope effects of sulfate by organic matter under hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, 30, pp. 47-56.

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

- LAATAR, E., 1980. Gisements de Pb-Zn et diapirisme du Trias salifère en Tunisie septentrionale. Les concentrations péridiapiriques du district minier de Nefate - Fedj-el-Adoum. *Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Université de Paris VI, France, 1280p.*
- MADRE, M., 1969. Contribution à l'étude géologique et métallogénique du djebel Ouenza (Est Algérien). *Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Université de Paris, 90 p.*
- MANSOURI, A., 1980. Gisements de Pb-Zn et karstification en milieu continental: le district du Djebel Hallouf-Sidi Bou Aouane (Tunisie septentrionale). *Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, Paris, 266 p.*
- MCLIMANS, R.K., 1977. Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the Upper Mississippi Valley zinc-lead district, southwest Wisconsin. *Thèse Ph.D. (inédit), The Pennsylvania State University, 175p.*
- OHLE, E. L., 1980. Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type. Part II. *Economic Geology, 75, pp. 161-172.*
- OHMOTO, H., 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits. In: Valley J.W., Taylor H.P. and O'Neil J.R. (editors). *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 16, pp. 491-555.*
- OHMOTO, H. AND GOLDBABER, M. B., 1997. Sulfur and carbon isotopes. In: Barnes, H. J. (editor) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 3<sup>rd</sup> edition, Wiley-Interscience, New York, pp. 517-611.*
- OHMOTO, H. AND LASAGA, A. C., 1982. Kinetics of reactions between aqueous sulfates and sulfides in hydrothermal systems. *Geochimica and Cosmochimica Acta, 46, pp. 1727-1745.*
- ORGEVAL, J. J., 1995. Peridiapiric metal concentration at Bou Grine (Tunisian Atlas): Some Geochemical characteristics. In: Pasava, Kribek et Zak (editors). *Mineral Deposits. Balkema, Rotterdam. pp. 299-302.*
- O.R.G.M. (OFFICE NATIONAL DE RECHERCHE GÉOLOGIQUE ET MINIÈRE)., 1995. Carte géologique du Dj. Boujaber au 1/50 000. *Carte inédite, O.R.G.M., Tébessa, Algérie.*
- ORR, W. L., 1974. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation-Study of Big Horn basin Paleozoic oils. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58, pp. 2295-2318.*
- OTHMANINE, A., 1987. Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. *Thèse de 3<sup>ème</sup> Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221 p.*
- PARAIRE-AKROUR, H., 1991. Fluid inclusion of the F-Ba-Pb late paragenesis of borders of the Ouenza, Mesloul, Hameimet ed Dahra diapirs (N-E Algeria). In: Pagel and Leroy (editors). *Source, Transport, and Déposition of Metals. Balkema, Rotterdam, pp. 219-222.*
- PERTHUISOT, V., 1978. Dynamique et pétrogenèse des extrusions triasiques en Tunisie septentrionale. Annexes: Histoires du diapirisme, les dômes de sel. *Travaux du Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, Paris 12, France, 312p.*
- PERTHUISOT V. ET ROUVIER, H., 1988. Les relations métal - soufre - eau - hydrocarbures -micro-organismes et la genèse des concentrations de sulfures et de soufre des diapirs évaporitiques. In: H. Pelissonier et J. F. Sureau (éditeurs). *Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires-Manifestations, mécanismes, prospections. Document du B.R.G.M., N° 183, pp. 269-278.*
- PERTHUISOT, V., AOUJJEHANE, M., BOUZENOUNE, A., ATIRA, N., LAATAR, E., MANSOURI, A., ROUVIER, H., SMATI, A. ET THIBIÉROZ, J., 1998. Les corps triasiques des monts du Mellègue (confins algéro-tunisiens) sont-ils des diapirs ou des «glaciers de sel»? *Bulletin de la Société Géologique de France, t.169, N°1, pp. 53-61.*

- POHL, W., AMMOURI, M., KOLLI, O., SCHEFFER, R. AND ZACHMANN, D., 1986. A new genetic model for the north african metasomatic siderite deposits. *Mineralium Deposita*, pp. 228-233.
- POWELL, T. G. AND MACQUEEN, 1984. Precipitation of sulfide ores and organic matter: Sulfate reactions at Pine Point, Canada. *Science*, 224, pp. 63-66
- PRICE, P. E. AND KYLE, J. R., 1983. Metallic sulfide Deposits in Gulf Coast salt-dome caprocks. *Gulf Coast Association. Geol. Soc. Trans.*, vol. 33, pp. 189-193.
- Robinson, B. W. and Kusakabe, M., 1975. Quantitative preparation of sulfur dioxide, for  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  analyses, from sulfides by combustion with cuprous oxide. *Analytical Chemistry*, 47, pp.1179-1181
- ROUVIER, H., PERTUISOT, V. AND MANSOURI, A., 1985. Pb-Zn Deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 80, pp. 666-687
- RYE, R. O. AND OHMOTO, H., 1974. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review. *Economic Geology*, 69, pp. 826-842.
- SALMI-LAOUAR, S., 1998. Le Massif de Boujaber (NE Algérien): Sédimentologie, biostratigraphie et contribution des isotopes du soufre à la reconnaissance du mode de mise en place des masses triasiques et minéralisation à Pb-Zn-Ba. *Thèse de Magister, Université de Annaba, Algérie*. 92p.
- SHEPPARD, S.M.F., 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters. In: Valley J.W., Taylor H.P. and O'Neil J.R. (editors). Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 16, pp. 165-183.
- SCHOELL, M., 1984. Recent advances in petroleum isotope geochemistry. *Organic Geochemistry*, 6, 645-663.
- SMATI, A., 1986. Les gisements de Pb, Ba et Fe du Dj. Slata (Tunisie du centre-nord). Minéralisations épigénétiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un diapir de Trias. Gisements de Sidi-Amour, Ben-Salem et de Slata Fer. *Thèse de 3ème Cycle, Université de Paris VI, France*, 250 p.
- SPANGENBERG, J., FONTBOTÉ, L., SHARP, Z.D., AND HUNZIKER, J., 1996. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, central Peru: a quantitative modeling on mixing processes and  $\text{CO}_2$  degassing. *Chemical Geology*, 133, 289-315.
- THIBIÉROZ, J. ET MADRE, M., 1976. Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 67, 3-4, pp.
- THODE, H.G. AND MONSTER, J., 1965. Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporites, and ancient seas. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 4, pp. 367-377
- VELASCO, F., HERRERO, J.M., GIL, P.P., ALVAREZ, L. AND YUSTA, I., 1994. Mississippi Valley-Type, Sedex, and iron deposits in lower Cretaceous rocks of the Basque-Cantabrian basin, northern Spain. In: Fontboté, L., Boni, M. (Editors). Sediment-Hosted Zn-Pb Ores. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. *Special Publication, No. 10 Soc. Geology Applied to Mineral Deposits*. 246-270.
- VILA, J. M., 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France*, 665 p.
- VILA, J. M., 1994. Mise au point et données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens: Trias allochtone "glacier de sel" sous marins et vrais diapirs. *Mémoire du Service Géologique de l'Algérie*, N° 6, pp. 105-152.
- VILA, J. M., 1995. Première étude de surface d'un grand "glacier de sel" sous-marin: l'Est de la structure Ouenza-Ladjebel-Meridef (confins algéro-tunisiens). Proposition d'un scénario de mise en place et comparaisons. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 166, n° 2, pp. 149-167.
- Vila, J. M. et Charrière, A. 1993. Découverte d'Albien calcaire et du Trias resédimenté au Dj. Boujaber (partie ouest Algérie); corrélation avec les forages et conséquences sur l'organisation du Crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, t.316, Série II, pp. 243-249.

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

YEH, H.W. AND EPSTEIN, S., 1981. Hydrogen and carbon isotopes of petroleum and related organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 753-762.

ZERDAZI, A., 1990. Etude gravimétrique du môle d'Ain M'lila et de l'Atlas saharien septentrional. *Thèse de Doctorat des Sciences, Faculté des Sciences, Université de Lausanne*, 227p., inédit.