



Géomatériaux (métallogénie)
**Origine du soufre associé aux minéralisations Pb-Zn
de type Mississippi Valley de la chaîne des
Beni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental)**

Mohammed Bouabdellah*, Lahbib Boudchiche,
Benali Ouahhabi, Tayeb Naciri

*Laboratoire des gîtes minéraux, hydrogéologie et environnement, département de géologie, faculté des sciences,
BP 524, 60000 Oujda, Maroc*

Reçu le 16 janvier 2007 ; accepté après révision le 1^{er} septembre 2008

Disponible sur Internet le 8 novembre 2008

Présenté par Zdenek Johan

Résumé

Les données des isotopes de soufre mesurées sur les cristaux de galène prélevés des principaux *prospects* de type Mississippi Valley de la chaîne des Beni Snassen orientaux sont incompatibles avec une origine magmatique du soufre, suggérant plutôt une origine sédimentaire. Les valeurs négatives de $\delta^{34}\text{S}$ sont interprétées comme résultant d'une réduction bactériogénique des sulfates de l'eau de mer du Jurassique, les valeurs positives suggèrent l'intervention d'un soufre hydrothermal transporté avec le fluide minéralisateur enrichi en métaux. Le mélange entre ces deux types de fluides aurait déclenché la précipitation des concentrations métallifères. *Pour citer cet article : M. Bouabdellah et al., C. R. Geoscience 340 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Origin of sulfur associated to the eastern Beni Snassen Pb-Zn Mississippi Valley-type deposits (northeastern Morocco). Sulfur isotope data measured on samples of galena from the main Mississippi Valley-type prospects of the eastern Beni Snassen belt preclude an igneous source for sulfur, pointing instead to a sedimentary source. Negative $\delta^{34}\text{S}$ values are interpreted to be derived from bacteriogenic reduction of Jurassic seawater sulphate. Positive $\delta^{34}\text{S}$ values are considered to be hydrothermal sulfide transported with metal-bearing fluid. Mixing of these two fluids resulted in the deposition of the Pb ore. *To cite this article: M. Bouabdellah et al., C. R. Geoscience 340 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Maroc ; Beni Snassen ; Isotopes de soufre ; Sulfures ; Mélange

Keywords : Morocco; Beni Snassen; Sulfur isotopes; Sulfides; Mixing

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : mbouabdellah2002@yahoo.fr (M. Bouabdellah).

Abridged English version

Introduction

Numerous sub-economic Pb-Zn Mississippi Valley-type (MVT) prospects are documented in the Atlasic Beni Snassen belt located in northeastern Morocco (Fig. 1). These deposits yielded approximately 100,000 t of metal. The mineralization occurs either as disseminated or open space filling sulfide ore in the Lower Liassic-Carixian carbonate rocks. The close spatial association of the ore bodies to the Late Hercynian Beni Snassen granite led some authors to consider these MVT prospects to be genetically related to the intrusions [3,10]. The objectives of this sulfur isotope study were to determine the source of sulfur and the process responsible for the deposition of lead-zinc ores.

Regional geologic setting

The Beni Snassen Atlasic belt extends for over 100 km in an east-northwestern direction and is about 25 km wide (Fig. 1). The belt consists of two major lithostratigraphic units: a Paleozoic basement which is unconformably overlain by a thick sequence of Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks. The Paleozoic basement rocks contain Devonian schists and intercalated sandstones that are folded, metamorphosed and intruded by the Late Hercynian Beni Snassen granite. The Mesozoic sequence consists of a succession of thick Triassic continental and marginal-marine sedimentary rocks and basaltic lavas. These rocks are followed by Lower and Middle Jurassic marine carbonates which pass gradually upward into a varied sequence of Upper Jurassic marls, calcareous shales and subordinate shallow-water carbonates. The youngest rocks which mark the onset of the Miocene transgression are made of mollassic horizons of conglomerates, limestones and fluvial-lacustrine continental sediments locally intruded by alkaline Plio-Quaternary volcanic rocks. These rocks remain unmetamorphosed, although locally they were hydrothermally altered.

The deformational history of the region is divided into Hercynian (Late Paleozoic) and Atlasic (Mesozoic to Tertiary) cycles. At least three stages of ductile Hercynian deformation affected the Paleozoic basement rocks, producing a variety of steeply inclined faults and folds [6]. The dominant ENE-trending faults inherited from the Hercynian cycle were reactivated at various times (Triassic to Middle Jurassic, Cretaceous to Oligocene and Pliocene-Quaternary) [15]. These reactive faults played a crucial role in focusing the flow of

ore-forming fluids, as suggested by their proximity to ore bodies and by the general elongation of mineralized veins and ore zones in an ENE and east-west directions.

Mineralogy

The MVT lead-zinc mineralization is hosted by massive weakly dolomitized Lower Liassic-Carixian fine-grained limestones. Ore occurs as replacement and as open space filling (hydrothermal karsts, dissolution collapse breccias, vugs and veins). Most of the ore is contained within veins along a dextral strike-slip fault system.

The ore mineralogy is simple and consists of galena and/or sphalerite, pyrite with local chalcopyrite. Supergene oxidation minerals include malachite, azurite, cerussite, smithsonite and goethite. Calcite is the major nonsulfide mineral.

Sampling and analytical procedures

Sulfur isotope compositions were determined for 14 mineral separates of galena collected from the most mineralized prospects along an almost ENE-WSW transect. Purity of the analyzed sulfide was about 99%. The analyses were performed at the U.S. Geological Survey of Denver (Colorado) using a Micromass Optima mass spectrometer. The analytical uncertainty (2σ) was $\pm 2\%$. The data are reported as per mil (‰) deviations relative to Cañon Diabolo Troilite (CDT) standard. The sulfur isotope data are reported in Table 1 and shown in Fig. 2.

Results

Galena crystals yield a large spread in $\delta^{34}\text{S}$ values that range between -10.1 and $+10.1\%$. Two dominant groups of $\delta^{34}\text{S}$ values are present. The first group contains $\delta^{34}\text{S}$ values that range from -10.1 to -4.2% (Isarhdaouen and Bellaiane prospects, respectively). The second group, represented by Sidi Bou Hria prospect, is dominated by $\delta^{34}\text{S}$ values varying from $+9.7$ to $+10.3\%$.

Discussion and conclusion

The differences in sulfur isotope ratios can be explained by two hypotheses:

- precipitation of galena from a single sulfur-bearing fluid;
- mixing of two or more different sulfur sources.

Precipitation of sulfide from a single hydrothermal fluid require fluctuations in intensive parameters including either temperature, pH, fO_2 , fH_2S , Cl^- content or a combination of these [12,13]. In order to explain the large range in sulfur isotope fractionation by the processes mentioned above it would require unrealistic variations that are unlikely at the scale of the studied prospects. Furthermore, available fluid inclusions data show that the temperatures of ore fluids were uniform and low ($<120\text{ }^\circ\text{C}$) [4]. At these temperatures, the ore-forming fluid has limited ability to transport sufficient metal and reduced sulfur in the same solution to form an economic base metal deposit [1]. It is therefore concluded that the spread in the isotopic data cannot be explained by a single fluid that carries both reduced sulfur and metals. Alternatively, we suggest that the wide range of $\delta^{34}\text{S}$ values is best explained by mixing of at least two fluids containing isotopically different sulfur. The distribution of $\delta^{34}\text{S}$ values along a linear array interpreted as a mixing line (Fig. 2) suggests that two end-members source of reduced sulfur were involved in the precipitation of the ore: a heavy sulfur source represented by sulfides of Sidi Bou Hria prospect with a $\delta^{34}\text{S}$ of $\sim 10\text{‰}$ and a light sulfur source typified by the Isarhdaouen prospect with a $\delta^{34}\text{S}$ of $\sim -10\text{‰}$. Intermediate isotopic compositions with a $\delta^{34}\text{S}$ of $\sim -4\text{‰}$ (Bellaïane prospect) are obtained where both sources were involved. The negative $\delta^{34}\text{S}$ values are interpreted as resulting from a source of reduced sulfur derived from the bacteriogenic reduction (BSR) of the Jurassic sulfate source (13–20‰), with a fractionation around 20 to 30‰ away from sulfate. BSR which can be efficient at low temperature (80–110 °C) could produce $\delta^{34}\text{S}$ values up to $40 \pm 20\text{‰}$ lighter than the parent sulfate [5,14] or close to the starting sulfate if reduction is rapid or the system closed. Rapid sulfate reduction is mainly a function of availability of nutrient.

In contrast, the positive $\delta^{34}\text{S}$ data was most likely obtained either through a thermochemical sulfate reduction (TSR) process or possibly through the mixing of the reduced sulfur from multiple sources. Temperatures at which TSR is effective are determined by kinetic inhibition and high activation energies and the process is generally considered to be too slow to be an effective mechanism for sulfate reduction below temperatures of approximately 100–140 °C [7,9] as those that prevailed during the deposition of Beni Snassen sulfides. We propose, in agreement with the model suggested for the Irish Pb–Zn deposits [2], that the isotopically heavy sulfur component corresponds to hydrothermal sulfide transported with the metal-bearing fluid. The heavy sulfur, possibly derived from the

deeper parts of graben sub-basins, infiltrated into the underlying Paleozoic rocks and aquired metals and heat. The ENE, east-west trending deep-seated faults acted as conduits for ascending hydrothermal fluids. Mixing the acid metal-rich H_2S -poor hydrothermal fluid with intrabasinal cool, oxidized fluid resulted in the deposition of the Pb–Zn ore.

In conclusion, sulfur isotope data show that the eastern Beni Snassen MVT deposits formed by a hydrothermal system that was not initiated during Hercynian igneous activity as has been previously proposed. Mineral deposition took place as a result of mixing of two distinct fluids: an acid metal-rich, sulfur-poor hydrothermal fluid with cool, metal-poor, sulfur-rich modified seawater.

1. Introduction

Les gisements Pb–Zn de type Mississippi Valley (MVT) constituent une classe de gisements épigénétiques dont les mécanismes de genèse relèvent de l'évolution spatiotemporelle des bassins hôtes [8]. La chaîne des Beni Snassen, à l'instar de l'ensemble des chaînes atlasiques du Maroc, abrite bon nombre de gisements et prospects de type MVT dont les plus importants sont ceux de Sidi Bou Houria (BH), Bellaïane (BL), Isarhdaouen (SR), Zegzel (ZEG), Foughal (FG) et Oued Bou Hfier (OBH) (Fig. 1).

L'association spatiale des MVT avec les granitoïdes tardi-hercyniens a poussé bon nombre d'auteurs à considérer ces gisements comme étant issus des processus épithermaux, directement ou indirectement connectés à la mise en place des corps magmatiques [3,10].

Nous proposons ici de caractériser l'origine du soufre ainsi que les mécanismes de précipitation des sulfures à l'origine de la mise en place des gîtes de type MVT des Beni Snassen orientaux ; et ce, dans le but ultime d'évaluer le degré de parenté entre les granitoïdes tardi-hercyniens et les minéralisations associées.

2. Contexte géologique régional

Le massif des Beni Snassen est une chaîne intracontinentale dont les unités morphostructurales ont été modélées au cours de l'orogénèse atlasique. La colonne lithostratigraphique synthétique montre la superposition de deux unités majeures dont un socle paléozoïque recouvert en discordance majeure d'une épaisse série mésozoïque et cénozoïque (Fig. 1). Le socle, affleurant sous forme de boutonnières, est

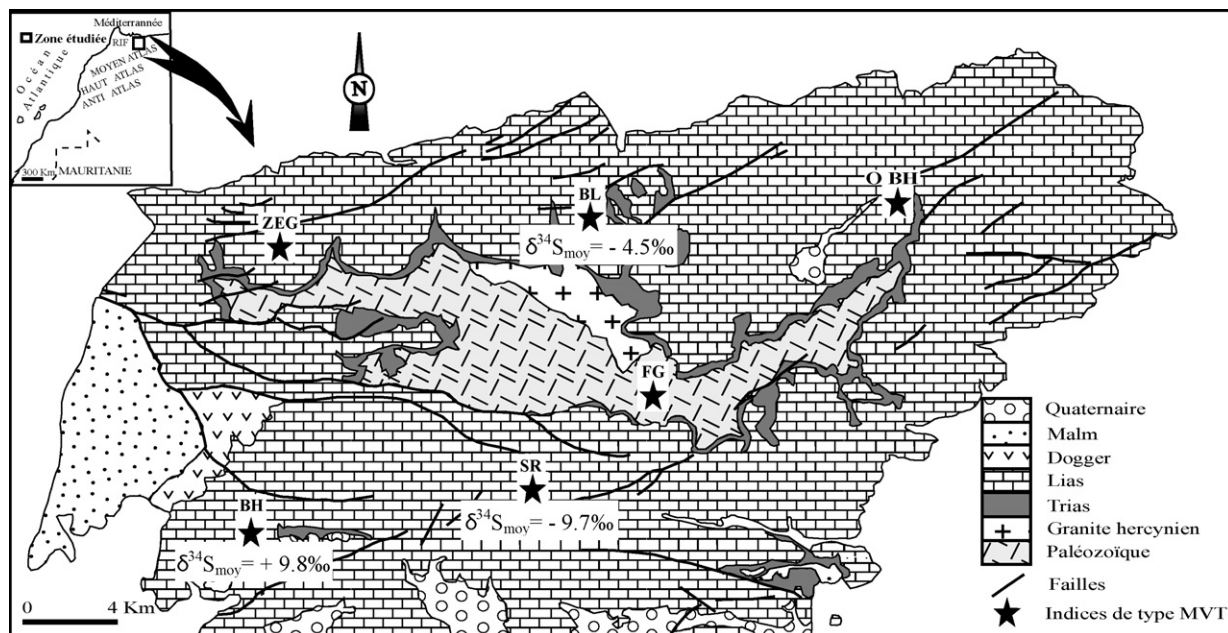


Fig. 1. Carte géologique et localisation des principaux prospects de type MVT de la chaîne des Beni Snassen orientaux.

Fig. 1. Geological map of the eastern Beni Snassen Belt showing the location of the main MVT prospects.

constitué pour l'essentiel d'une série schistogréseuse, d'âge Dévonien, localement recoupée de stocks granitiques tardi-hercyniens dont le granite des Beni Snassen.

Le cycle mésozoïque débute par des faciès transgressifs du Trias ou de l'Infra-Lias. Le Lias, transgressif sur les terrains antérieurs, montre une série carbonatée à stromatolites, oncolithes, *bird-eyes*, bioclastes et à ammonites au sommet. Au Callovo-Oxfordien, s'installe un édifice deltaïque succédant aux dépôts de marnes à faune pélagique du Bajocien-Bathonien. Au Kimméridgien et au Tithonique, se développe à nouveau une plate-forme carbonatée. Après une grande lacune sédimentaire comprenant tout le Crétacé, le Paléogène et la base du Néogène se dépose, en discordance angulaire sur le Jurassique et le Trias, une assise molassique (conglomérats, grès et argiles) annonçant la transgression miocène. Le Quaternaire, s'exprimant sous forme de faciès fluvio-lacustres localement recoupés de roches volcaniques et volcano-clastiques à affinité alcaline, termine la colonne lithostratigraphique.

Les formations du socle paléozoïque et de sa couverture méso-cénozoïque ont subi respectivement les effets des orogénèses hercynienne et atlasique. Trois phases de déformation hercynienne associées à un métamorphisme de type schistes verts y sont reconnues [6]. Les formations méso-cénozoïques ont subi pour

leur part les contre-coups de six phases de déformations dont une phase distensive débutant au Trias supérieur, relayée par cinq phases compressives d'âge Cénozoïque [15]. Les directions structurales ENE et est-ouest, héritées de l'orogénèse hercynienne et ayant rejoué ultérieurement lors des phases atlasiques, auraient canalisé le trajet des fluides minéralisateurs, comme l'attestent la morphologie et les directions des corps minéralisés.

3. Minéralogie

L'essentiel des minéralisations sulfurées se localise au niveau des formations calcaro-dolomitiques du Lias inférieur-Carixien. Les corps minéralisés se présentent, soit sous forme de fines disséminations en remplacement des tests de fossiles et des figures sédimentaires, soit sous forme de remplissage d'espaces ouverts (karsts hydrothermaux, brèches de dissolution, veines et veinules). La paragenèse minérale primaire est constituée des sulfures suivants : galène ± sphalérite ± pyrite ± chalcopirite. Les minéraux d'oxydation supergène, localement abondants, sont représentés par la calamine (mélange de smithsonite et d'hydrozincite), la cérusite, la malachite, l'azurite, la goéthite et l'hématite. Quant aux minéraux de gangue, ils sont représentés exclusivement par la calcite.

Tableau 1

Compositions isotopiques $\delta^{34}\text{S}$ des cristaux de galène prélevés des prospectes de Sidi Bou Hria, Bellaïane et Isarhdaouen.

Table 1

Sulfur isotopic compositions for galena samples from the studied Sidi Bou Hria, Bellaïane and Isarhdaouen prospects.

Prospect	Sulfure analysé et description de l'échantillon	$\delta^{34}\text{S}$
Sidi Bou Hria	Galène massive avec traces de goëthite	10,1
	Galène massive en remplissage de fracture	9,7
	Galène en disséminations dans un encaissant calcaro-dolomitique	9,9
	Galène saccharoïde regroupée en amas	9,6
	Galène associée à un chapeau de fer	10,3
Bellaïane	Galène en forme d'œil de pigeon	9,1
	Galène en remplissage de fracture	-4,2
	Galène en remplissage de fracture associée à de la calcite	-4,6
	Galène en remplissage de petits filonets associée à de la calcite	-4,3
	Galène associée à de la calcite blanche	-4,7
Isarhdaouen	Galène en remplissage de fracture	-4,5
	Galène en disséminations dans un calcaire gris sombre	-10,1
	Galène associée à de la calcite blanche	-9
	Galène en remplissage de fracture associée à de la calcite	-10

4. Échantillonnage et procédure analytique

Les analyses des isotopes de soufre ont été réalisées à l'*U.S. Geological Survey* de Denver (Colorado) au moyen d'un spectromètre de masse de type Micromass Optima. Les valeurs $\delta^{34}\text{S}$ normalisées par rapport à la troilite de Cañon Diabolo (CDT) sont exprimées en pour mille (‰_{CDT}). Les incertitudes analytiques (2σ) sont de l'ordre de $\pm 2 \text{ ‰}$. Quatorze échantillons de galène prélevés des prospectes de BH, SR et BL ont été sélectionnés. Les cristaux analysés ont été isolés, à la main, sous la loupe binoculaire, afin de s'assurer de leur pureté. Le choix des gisements se justifie d'une part, par leur importance économique et d'autre part, par le fait qu'ils sont alignés le long d'un transect orienté ENE-WSW à des distances croissantes du granite des Beni

Snassen et ce, dans l'objectif de déceler toute zonalité éventuelle.

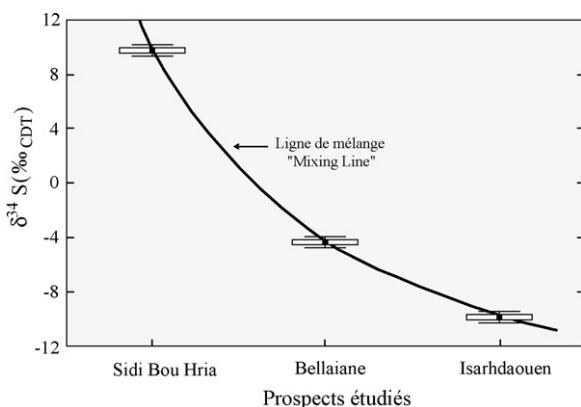
5. Résultats

Les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ sont assez contrastées (Tableau 1, Fig. 2), variant de $-10,1$ à $+10,3 \text{ ‰}$. Pour un même indice minier, les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ sont assez uniformes. Les plus fortes valeurs sont enregistrées au niveau de l'indice de BH (valeur moyenne $\delta^{34}\text{S} = +9,8 \text{ ‰}$; $n = 6$). Les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ les plus faibles sont relevées au niveau des indices d'SR et de BL, où les rapports moyens $\delta^{34}\text{S}$ sont respectivement de $-9,7 \text{ ‰}$ ($n = 3$) et $-4,5 \text{ ‰}$ ($n = 5$).

6. Discussion et conclusion

Le dépouillement des rapports $\delta^{34}\text{S}$ révèle deux intervalles distincts de valeurs. Le premier intervalle montre des rapports isotopiques oscillant entre $-10,1$ et $-4,2 \text{ ‰}$, alors que dans le deuxième intervalle, les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ varient entre $+9,7$ et $+10,3 \text{ ‰}$. Les valeurs moyennes sont respectivement de $-6,4$ et $+9,8 \text{ ‰}$. Ces données sont incompatibles avec une origine magmatique du soufre excluant, donc, toutes relations génétiques entre les minéralisations Pb-Zn et le granite des Beni Snassen, quoique l'implication de ce dernier, en tant que source du plomb par lessivage des feldspaths, demeure possible. En revanche, les fortes variations des rapports $\delta^{34}\text{S}$ pourraient être attribuées :

- soit à l'effet du fractionnement isotopique résultant de l'évolution d'un seul fluide minéralisateur enrichi en soufre ;

Fig. 2. Diagramme en « boîte à moustache » montrant les variations des valeurs $\delta^{34}\text{S}$ des cristaux de galène, prélevés des prospectes étudiés.Fig. 2. Box plot of the sulfur isotope ratios for galena from the studied prospects showing the variations in $\delta^{34}\text{S}$ values.

- soit au processus de mélange entre deux ou plusieurs fluides contenant des sources différentes de soufre.

La précipitation des sulfures à partir d'un seul fluide est déclenchée, en réponse aux changements des facteurs suivants : température, pH, fO_2 , fH_2S et teneur en Cl^- [12,13]. À l'échelle des Beni Snassen orientaux, il paraît peu probable que ces facteurs aient fluctué de manière à provoquer les disparités observées dans les valeurs de $\delta^{34}S$, du fait que les principaux indices étudiés appartiennent au même district minier et que les corps minéralisés sont encaissés, tant lithologiquement que stratigraphiquement, dans un même niveau porteur (carbonates du Lias). De plus, les données des inclusions fluides montrent des températures d'homogénéisation assez uniformes ($< 120^\circ C$) pour l'ensemble des gîtes prospectés [4].

Compte tenu des observations présentées plus haut, il paraît peu probable que les variations $\delta^{34}S$ soient reliées à l'effet du fractionnement isotopique résultant de l'évolution d'un seul fluide, mais plutôt à l'effet de mélange entre deux ou plusieurs fluides contenant différentes sources de soufre. En effet, on remarque sur le diagramme de la Fig. 2 que les valeurs de $\delta^{34}S$ s'alignent le long d'une droite à pente négative, interprétée comme une ligne de mélange entre deux réservoirs distincts (*end-members*), à savoir un premier réservoir enrichi en soufre lourd, représenté par le gisement de BH avec des valeurs de $\delta^{34}S$ de $\sim 10\%$ et un deuxième réservoir, d'ordre bactériogénique, représenté par le gisement de d'SR avec des rapports $\delta^{34}S$ de $\sim -10\%$. Le gisement de BL, montrant des valeurs de $\delta^{34}S$ intermédiaires ($\sim -4\%$), matérialiserait l'intervention, à des proportions presque égales, des deux types de réservoirs.

En outre, les valeurs de $\delta^{34}S$ fortement négatives sont interprétées comme résultant d'une réduction bactériogénique, en milieu ouvert, des sulfates de l'eau de mer du Jurassique ($\sim 15\%$). En effet, la réduction bactériogénique intervenant à des températures inférieures à $100^\circ C$ produirait des sulfures dont les valeurs de $\delta^{34}S$ sont, soit inférieures de $40 \pm 20\%$ au sulfate parent [5,14], soit proches du sulfate parent, si le système est fermé ou la réduction sulfatée rapide ; cette dernière est principalement fonction de la disponibilité des nutriments. À l'opposé, les valeurs de $\delta^{34}S$ supérieures à 0 suggèrent l'intervention d'un soufre lourd issu, soit de la réduction thermochimique des sulfates de l'eau de mer du Jurassique, soit d'une source hydrothermale enrichie en métaux.

Les calculs thermocinétiques montrent qu'à des températures inférieures à $100\text{--}140^\circ C$, telles que celles

enregistrées dans le cas de nos gisements, les vitesses des réactions impliquées dans la réduction thermochimique sont trop lentes pour produire, dans des délais géologiques raisonnables, les quantités de soufre réduit, requises pour la formation d'un gisement métallifère [7,9]. De plus, dans le cas d'une réduction thermochimique, les valeurs de $\delta^{34}S$, variant ici de neuf à 10% , devraient être proches ou supérieures à celle du sulfate parent, matérialisé par l'eau de mer du Jurassique ($13\text{--}20\%$). Aussi, compte tenu de toutes les contraintes étayées plus haut, le modèle de la réduction thermochimique est écarté favorisant l'hypothèse, selon laquelle le soufre lourd serait d'origine hydrothermale, en accord avec le modèle proposé pour les MVT d'Irlande [2].

Le soufre hydrothermal, libéré des parties les plus profondes du bassin, serait transporté par un fluide chaud enrichi en métaux. Les directions de filons minéralisés, de même que l'emplacement des gîtes étudiés le long ou à proximité des failles majeures de direction ENE-WSW et est-ouest, qui juxtaposent les formations mésozoïques et les formations paléozoïques (Fig. 1) suggèrent que la mise en place des minéralisations a été structurellement contrôlée. Les reconstitutions paléogéographiques [11] montrent que le bassin des Beni Snassen a été morcelé en une succession de zones effondrées (grabens) et de zones surélevées (horsts), à l'aplomb desquelles se localisent les gisements étudiés. Les fluides minéralisateurs auraient été canalisés au cours de leur ascension, le long des failles majeures traversant les roches du socle paléozoïque et une partie des roches de la couverture mésozoïque dont les lithologies gypsifères du Trias. Au cours de leur périple vers leur site de dépôt final, les fluides acquièrent chaleur et métaux à partir d'un large réservoir crustal. À ces importantes profondeurs de circulation où les conditions de température sont extrêmes, la capacité de transport, en quantités suffisantes, des métaux et du sulfure d'hydrogène, ensemble dans la même solution, demeure possible et ce, indépendamment du pH des solutions minéralisatrices. Le mélange entre le fluide hydrothermal ascendant porteur des métaux et le fluide météorique et oxydant contenant du soufre bioréduit présent dans les roches carbonatées liasiques serait à l'origine de la précipitation des sulfures.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier les programmes Fulbright et PROTARS II (P23/33) pour leur appui financier.

Références

- [1] G.M. Anderson, Some geochemical aspects of sulfide precipitation in carbonate rocks, in : G. Kisvarsanyi, S.K. Grant, W.P. Pratt, J.W. Koenig (Eds.), International Conference on Mississippi Valley Type Lead-Zinc Deposits, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, 1983, pp. 61–67.
- [2] I.K. Anderson, J.H. Ashton, A.J. Boyce, A.E. Fallick, M.J. Russel, Ore Depositional Processes in the Navan Zn-Pb Deposit, Ireland, *Econ. Geol.* 93 (1998) 535–563.
- [3] A. Benabdellah, Étude géologique et métallogénique de la partie orientale des Beni Snassen, Serv. Geol. Maroc, Rabat 321 (1952) 13.
- [4] M. Bouabdellah, B. Ouahhabi, L. Boudchiche, T. Naciri, M. Benalla, M. Chaieb, Métallogénèse des gisements de type Mississippi Valley du Lias des Beni Snassen orientaux : apports des isotopes stables. Deuxième colloque sur le Jurassique marocain (CJM2), Marrakech, Maroc, 2004 pp. 36–37.
- [5] M. Goldhaber, A.D. Nicholson, Thermochemical sulfate reduction as a source of sedimentary H₂S, *Geological Soc. Am. Abstr. Programs* 25 (1993) A21–22.
- [6] C. Hoepffner, La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc, Thèse d'État, institut Louis-Pasteur, université de Strasbourg, Strasbourg, 1987, 280 p.
- [7] Y. Kiyosu, H.R. Krouse, The role of organic acid in the abiogenic reduction of sulfate and the sulfur isotope effect, *J. Geochem.* 24 (1990) 21–27.
- [8] D.L. Leach, D.F. Sangster, Mississippi Valley-type lead-zinc deposits, in R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke (Eds.), *Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada, Special Paper 40*, (1993) 289–314.
- [9] H.G. Machel, H.R. Krouse, R. Sassen, Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction, *Appl. Geochem.* 10 (1995) 373–389.
- [10] S. Makhoukhi, J.M. Schmitt, M. Bouabdelli, A. Bastoul, Ch. Marignac, Modelling of an MVT deposit: Touissit-Bou Beker district (eastern Morocco), *J. Geochem. Explor.* 69–70 (2000) 109–113.
- [11] T. Naciri, Évolutions sédimentaires, environnements et contrôles dans le Lias-Dogger des Beni Snassen orientaux (Maroc nord-oriental). Thèse d'État, université Mohammed I^{er}, Oujda (Maroc), 1994.
- [12] H. Ohmoto, Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits, *Econ. Geol.* 67 (1972) 551–579.
- [13] H. Ohmoto, R.O. Rey, Isotopes of sulfur and carbon, in : H.L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edition, Wiley, New York, 1979, pp. 509–567.
- [14] H. Ohmoto, C.J. Kaiser, K.A. Geer, Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient-sediment hosted base metal deposits, In Hebert HK, Ho SE (Eds), *Proc Conf. on Stable isotopes and fluid processes in mineralization*, 1990, pp. 70–120.
- [15] A. Torbi, J.P. Gélard, Paléocontraintes enregistrées par la microfracturation, depuis l'Hercynien jusqu'à l'Actuel, dans les Monts du Sud-Est d'Oujda (Meseta orientale), *C. R. Acad. Sci. Paris Ser II* 318 (1994) 131–135.