

Géomatériaux (Métallogénie)

# Le gisement Ag–Hg de Zgounder (Jebel Siroua, Anti-Atlas, Maroc) : un épithermal néoprotérozoïque de type Imiter

Éric Marcoux <sup>a,\*</sup>, Ahmed Wadjinny <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut des sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Géosciences, université d'Orléans, BP 6749, 45067 Orléans cedex 2, France

<sup>b</sup> Compagnie minière de Touissit (CMT), 279, bd Zerktouni, Casablanca, Maroc

Reçu le 18 janvier 2005 ; accepté après révision le 13 septembre 2005

Disponible sur Internet le 25 octobre 2005

Présenté par Zdenek Johan

## Résumé

Le gisement argentifère de Zgounder (Anti-Atlas, Maroc) est encaissé dans une série volcano-sédimentaire protérozoïque, rapportée aux PII et PIII. La minéralisation disséminée est à argent natif mercurifère (2 à 30% Hg) dominant, sulfosels d'argent (acanthite, pearcélite), arsénopyrite et sulfures de métaux de base. La teneur en arsenic de l'arsénopyrite, ainsi que les températures d'homogénéisation des fluides précoces témoignent de conditions initiales de haute température (plus de 400 °C). Les compositions isotopiques du plomb confirment un âge fini-Protérozoïque et tracent une origine crustale des métaux. Les similitudes avec le gisement argentifère proche d'Imiter sont fortes et amènent à considérer Zgounder comme un autre exemple d'épithermal néoprotérozoïque dans l'Anti-Atlas marocain, qui apparaît ainsi de plus en plus comme une province métallogénique argentifère. **Pour citer cet article :** *É. Marcoux, A. Wadjinny, C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**The Ag–Hg Zgounder ore deposit (Jebel Siroua, Anti-Atlas, Morocco): a Neoproterozoic epithermal mineralization of the Imiter type.** The Zgounder ore deposit (Anti-Atlas, Morocco), is hosted in a PII–PIII Proterozoic volcanosedimentary series. Disseminated mineralization is dominated by mercuriferous native silver (2 to 30 wt.% Hg), with few silver sulfosalts (acanthite, pearcélite), arsenopyrite and base-metal sulfides. Arsenic grade of arsenopyrite and homogenisation temperatures of fluid inclusions indicate initial conditions of high temperature (above 400 °C). Lead isotope compositions comfort a Late-Proterozoic age and a crustal origin for metals. Similarities are obvious with the neighbouring silver ore deposit of Imiter and lead to consider Zgounder as another example of Neoproterozoic epithermal deposit in the Anti-Atlas of Morocco, a region that appears more and more as a silver metallogenic province. **To cite this article:** *É. Marcoux, A. Wadjinny, C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Argent natif ; Épithermal ; Néoprotérozoïque ; Imiter ; Maroc

*Keywords :* Native silver; Epithermal; Neoproterozoic; Imiter; Morocco

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [eric.marcoux@univ-orleans.fr](mailto:eric.marcoux@univ-orleans.fr) (É. Marcoux).

## Abridged English version

### 1. Introduction

The Zgounder ore deposit is located in the Moroccan Anti-Atlas Mountains, 150 km south of Marrakech, on the flanks of the Precambrian massif of Siroua (Fig. 1). Its metal content is estimated to 435 000 t of ore-grading 385 g/t Ag, i.e. about 167 t of silver (BRPM). Preliminary geological and mineralogical investigations given in this paper indicate a strong similitude between Zgounder and the huge silver mine of Imiter (4 Mt grading 800 g/t Ag), located 200 km ENE in a similar geological framework [3,12].

### 2. Geological and ore deposit framework

#### 2.1. Regional framework

In the Anti-Atlas Range, the Siroua Massif occupies a transitional position, located between two major structural domains: a northern domain belonging to the mobile Panafrican, and a southern Eburnean domain, part of the stable West-African Craton [7]. The Siroua massif is composed of geological formations belonging to Precambrian I, II and III, each separated from the others by major discontinuities.

Precambrian III (Final Neoproterozoic) is characterized by a huge calc-alkaline volcanic activity, with a tholeiitic trend, interpreted as the beginning of a rifting announcing the large Infracambrian–Cambrian transgression [1]. Associated granodioritic calc-alkaline magmatism has been dated at  $572 \pm 5$  Ma by U/Pb method on zircon in Imiter ore deposit [3,12].

The Anti-Atlas domain is rich in various ore deposits: cobalt, gold and silver at Bou Azzer, silver at Imiter, polymetallic at Boumadine, manganese at Tiouine...

#### 2.2. Zgounder geology

Geological series are composed of a volcano-sedimentary formation, attributed to the Precambrian II (PII), overlying an andesitic basement outcropping in the north of the district (Fig. 1). This series is limited to the west by a granodioritic massif (PIII), and overlain to the east by volcano-detritic series of the Upper Precambrian (PIII), and Neogene phonolites and tuffites.

The Zgounder volcanosedimentary series is striking east–west and overfolded to the south. It is composed by three formations: two with a major clastic component with volcanic intercalations (called ‘blue’ and ‘brown’ formations) overlain by an acid ignimbritic volcanic complex (‘black formation’).

The Zgounder district is cut by four fractures systems: east–west, north–south, and two conjugated systems NE–SW and NW–SE.

### 3. Silver ore deposit

#### 3.1. Ore deposit anatomy

Silver-bearing zones are all located at the top of the brown formation.

Silver mineralization occurs as lenticular disseminations of various sizes (10- to 25-m wide and 20- to 60-m long), mainly located along east–west fractures and in the intersections of east–west crushing zones with northeast and northwest fractures. Ore disseminations extend laterally over more than 1000 m and dip south. The known vertical extension reaches 300 m.

Ore mineralization is accompanied by a strong chloritic alteration, giving greenish facies.

#### 3.2. Paragenetic sequence

The paragenetic sequence shows two successive stages: an early Fe–As stage, followed by an Ag-bearing polymetallic (Zn–Pb–Cu–Hg) stage (Fig. 2).

The early stage is composed of pyrite (main sulphide representing 70.3% wt of the ore) – arsenopyrite (6.1 wt% of ore). Pyrite very seldomly shows silver micropatches (20  $\mu$ m).

The late polymetallic stage is composed of dominant sphalerite (17.9 wt% of ore). Electronic microprobe data suggest the presence of two generations of sphalerite: a Fe-free one (seldom, less than 1 wt% Fe) and a Fe-rich one (7–8 wt%, very common). No silver grade has been detected in sphalerite.

Chalcopyrite is rare (1.8 wt%), carrying very rare Ag-poor grey copper patches (< 40  $\mu$ m), as well as Ag-free galena (2.3 wt%).

Native silver is by far the most common silver minerals, representing 1.07 wt% of ore concentrate, and 65 to 90% of Zgounder silver amount. It is not pure silver but a Ag–Hg amalgam, forming patches 25 to 480  $\mu$ m in size (average 150–250  $\mu$ m). Electronic microprobe analyses establish the presence of two generations (Table 1 and Fig. 3): large Ag-rich patches (85–95 wt% Ag, average structural formula  $\text{Ag}_{17}\text{Hg}$ ) likely correspond to a remobilization slightly posterior to the major silver deposition, characterized by smaller silver patches, less rich in silver (72 to 80 wt% Ag, average structural formula  $\text{Ag}_5\text{Hg}$ , close to that of eugenite). Native silver patches show irregular variation of Hg grade, but without regular zoning (Fig. 4).

Acanthite ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) is the main silver sulfide, by far less abundant than native silver. Patches are of various

size (up to 1920  $\mu\text{m}$ ) and often carry myriads of native silver micropatches (less than 5  $\mu\text{m}$ ). It is rarely associated to small patches of polybasite ( $\text{Ag}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ ) and pearceite ( $\text{Ag}_{16}\text{As}_2\text{S}_{11}$ ).

Tennantite and tetrahedrite are very seldom; their silver grade is varying, but remains low (average: 4 wt% Ag).

#### 4. Fluid geochemistry and depositional conditions

Paragenetic sequence and mineral intergrowths strongly suggest that the two ore deposits stages belong to a single hydrothermal event.

Early pyrite – arsenopyrite stage is associated with aqueous  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$  ( $\pm\text{N}_2$ ) fluids, trapped in high temperature (450–300 °C) conditions, in a fairly wide pressure range (50–190 MPa) [5]. Temperature condition fit well with arsenopyrite geothermometer: 33.5 to 36.5 at% As, suggesting a crystallisation temperature ranging between 400 and 550 °C [10].

Paragenesis of the silver-bearing stage suggests lower temperature conditions (about 200 °C) and few reducing fluids, according well with the circulation of  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$  oversaturated brines ranging 24–40 wt.% NaCl +  $\text{CaCl}_2$ , under moderated pressure ( $P < 100$  MPa) [5].

Lead isotopic composition of two galenas (Table 2) are close to 17.89 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratio) and 15.57 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratio), which gives a lead model age close to 510 Ma (Stacey–Kramers model [16]), fitting well with the Late-Proterozoic age of the ore deposit.

Using the Stacey–Kramers model [16], these isotopic compositions give  $\mu$  ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) ratios of 9.71 (with an assumed age of 500 Ma), and 9.83 (assumed age of 550 Ma), two values clearly locating the metal source in the continental crust, without visible mantle contribution. Lead isotopic ratios are close to those measured in Imiter: 18.10 to 18.17 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios) and 15.55 ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios) [15], giving more crustal values for the  $\mu$  ratio (10.12 to 10.23 with 550 Ma), thus confirming the relationship between the two deposits. This result disagrees with those of Re/Os geochemistry performed at Imiter [12,13], which suggests a mantle origin for the metal. But it is in good agreement with the upper crustal Pb-isotope signature performed in the huge Hg deposit of Almaden (Spain) [11], which suggests that, in the western Europe province, notable amount of mercury would be linked with an upper-to-medium crustal environment. A discrepancy between Pb/Pb and Re/Os results has to be noticed, but cannot be solved in the frame of the paper.

#### 5. Discussion – conclusion

Zgounder is an Ag–Hg ore deposit very rich in silver. Its high mercury grade of native silver demonstrates that, similarly to Imiter, this mineral is a primary hypogene one and not a secondary mineral belonging to a cementation zone.

Zgounder shows strong geological, structural, mineralogical and geochemical analogies with the few distant Imiter ore deposit.

Imiter has recently been dated at  $550 \pm 3$  Ma and interpreted as an epithermal Neoproterozoic ore deposit [3]. This epithermal nature fit well with the presence of silver and mercury, two metals typical of epithermal environments. Nevertheless, Imiter has no gold, which is a major difference with Cenozoic epithermal ore deposits (much more common) [8,9,14], and a high salinity, which could be viewed as intermediary between acid and neutral epithermal deposit types.

This epithermal nature can easily be extended at the Zgounder ore deposit. Moreover, it is in good agreement with fluids characteristics, showing an early high-temperature stage of likely magmatic origin, followed by a rapid decrease, suggesting a mixing with surficial highly saline waters (basinal brines?).

Zgounder and Imiter could thus be two expressions of a single epithermal Neoproterozoic event extending in the Anti-Atlas domain, beginning to draw a silver-rich metallogenic belt.

#### 1. Introduction

Le gisement argentifère de Zgounder est situé dans les montagnes de l'Anti-Atlas marocain, à 150 km environ au sud de Marrakech. Il s'étage entre 2000 et 2150 m sur les flancs du massif précambrien du Siroua (Fig. 1). Exploité par les Anciens entre le X<sup>e</sup> et le XII<sup>e</sup> siècle, ce gisement a fait l'objet d'investigations minières depuis 1950 (SNAM, BRPM), qui ont débouché sur une exploitation par le BRPM, arrêtée en 1992, puis par une reprise de recherches par la CMT (Compagnie minière de Touissit) pour retrouver les extensions du corps en partie exploité. Son potentiel est estimé à 435 000 t de minerai à 385 g/t Ag, soit environ 167 tonnes d'argent (chiffres BRPM). Les études géologiques et minéralogiques préliminaires rapportées dans cet article montrent de fortes analogies entre Zgounder et la grande mine d'argent d'Imiter (4 Mt à 800 g/t Ag, dont 2 Mt exploitées), située 200 km à l'est-nord-est, dans un contexte similaire [3,12].

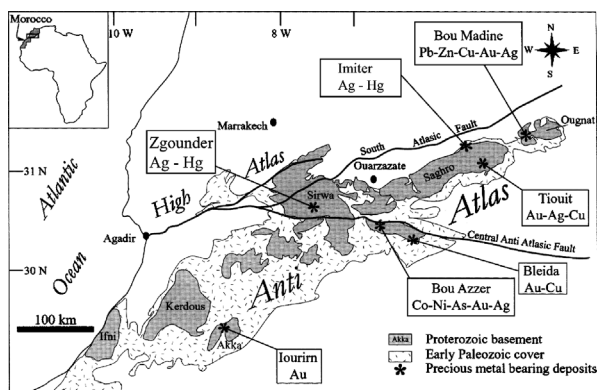


Fig. 1. Carte de localisation du gisement Ag–Hg de Zgounder (d'après [3]).

Fig. 1. Location map of Ag–Hg Zgounder ore deposit (adapted from [3]).

## 2. Contexte géologique et métallogénique

### 2.1. Cadre régional

Dans la chaîne orogénique de l'Anti-Atlas, le massif de Siroua et son prolongement oriental, le Saghro, occupent une position géodynamique de transition entre deux domaines structuraux majeurs : un domaine septentrional, rattaché à l'ensemble panafricain mobile, et un domaine méridional éburnéen, rattaché au craton ouest-africain stable [4,7]. Le massif du Siroua est composé de formations appartenant aux Précambrien I, II et III, séparées entre elles par des discontinuités majeures.

Le Précambrien III (Néoprotérozoïque terminal) est marqué sur le plan structural par un régime de déformation transtensif sénestre, intéressant l'ensemble de la bordure nord du craton ouest-africain. Sur le plan magmatique, cet événement se marque par une importante activité volcanique, de nature calco-alcaline, avec des tendances tholéitiques, interprétées comme le signe d'un *rifting* annonciateur de la transgression infracambrienne et cambrienne [1]. Le magmatisme granodioritique calco-alcalin associé a été daté à  $572 \pm 5$  Ma par U/Pb sur zircons à Imiter [3,12].

Sur le plan métallogénique, l'Anti-Atlas est particulièrement riche en minéralisations souvent exploitées : cobalt, or et argent à Bou Azzer, argent à Imiter, minéralisations polymétalliques à Boumadine, manganèse à Tiouine, etc.

### 2.2. Géologie de Zgounder

En se localisant au centre de cette zone de transition entre Panafricain et Éburnéen, le secteur de Zgounder bénéficie d'une situation privilégiée sur le passage

de la suture panafricaine, qui forme ici l'accident anti-atlasique.

Les terrains y sont constitués d'une série volcano-sédimentaire, la série de Zgounder, attribuée au PII et qui repose sur un socle andésitique affleurant au nord du secteur (Fig. 1). Cette série est bordée, à l'ouest, par un massif granodioritique (PIII) et couverte, à l'est, par des formations volcano-détritiques du Précambrien terminal (PIII) et par des phonolites et tuffites du Néogène.

La série volcano-sédimentaire de Zgounder est orientée est-ouest et redressée en un monoclin, également est-ouest, et déversé vers le sud (Fig. 1). Elle occupe une aire d'environ 3 km sur 2,8 km, et se compose de trois formations :

- la formation bleue, à la base, puissante de 300 à 400 m, à grès, grauwwacks et pélites, avec des niveaux de tufs, l'ensemble étant coiffé par un niveau de rhyolite orange ;
- une formation brune intermédiaire, d'une puissance de 300 à 400 m, se composant de schistes micacés et gréseux, et de brèches et pélites à fragments de verres volcaniques. Cette formation, est coiffée par un *sill* de dolérite, de plusieurs dizaines de mètres de puissance ;
- une formation noire au sommet, puissante de 900 m environ, composée d'un complexe volcanique acide (ignimbrites, brèches rhyolitiques), qui forme le toit des niveaux minéralisés. Au sud, cette formation s'achève par des grès et grauwwacks, avec des niveaux intercalaires de conglomérat.

Le secteur de Zgounder est affecté par quatre systèmes de fractures : est-ouest, nord-sud, et deux systèmes conjugués, NE-SW et NW-SE.

## 3. La minéralisation argentifère

### 3.1. Morphologie du gisement

Les zones minéralisées argentifères se situent au sommet de la formation brune, indifféremment dans les niveaux pélitiques, les brèches tuffacées et la dolérite

La minéralisation argentifère se présente en disséminations lenticulaires de dimensions variables (10 à 25 m de large et 20 à 60 m de long), préférentiellement situées à l'intersection des zones de broyage est-ouest et des fractures nord-est et nord-ouest. Les lentilles minéralisées suivent cependant les fractures est-ouest. Les disséminations se succèdent d'ouest en est sur une extension supérieure à 1000 m, avec un plongement général vers le sud. Leur enracinement, reconnu jusqu'à

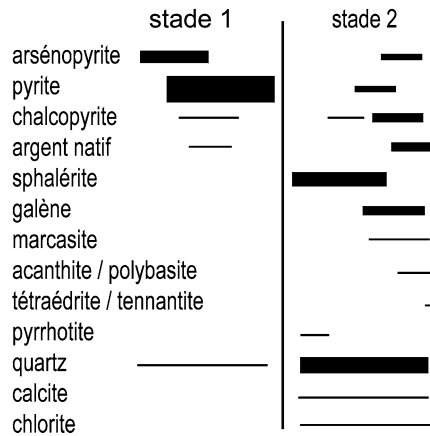


Fig. 2. Succession paragenétique de Zgounder.

Fig. 2. Paragenetic sequence of Zgounder ore deposit.

300 m, est perturbé par des failles subhorizontales, de 10 à 30 m de rejet vers le nord.

Au sein des corps minéralisés, la minéralisation se présente en lits millimétriques, essentiellement pyriteux, en fines disséminations, ainsi qu'en fissures (moins de 2 mm de puissance) et filonnets centimétriques, à quartz et sulfures. L'argent natif est commun, en disséminations, ainsi qu'en placages et veinules, occupant des réseaux de microfissures sécantes sur la stratification.

Une forte altération chloriteuse (chlorite non analysée), donnant naissance à des faciès verdâtres tachetés, accompagne la minéralisation.

### 3.2. Succession paragenétique

Les observations au microscope métallographique ont porté sur le minerai brut et sur des concentrés gravimétriques, ce qui a permis d'établir le mode minéralogique du minerai de Zgounder.

La succession paragenétique montre deux stades successifs : un stade précoce à Fe–As, suivi d'un stade argentifère polymétallique à Zn–Pb–Cu–Ag–Hg (Fig. 2).

Le stade précoce est à pyrite–arsénopyrite. La pyrite est le sulfure dominant de la minéralisation (70,3% pds) ; elle montre, rarement, des inclusions de microplages d'argent (20 µm). L'arsénopyrite (FeAsS) est également abondante (6,1% en poids de la minéralisation).

Le stade polymétallique tardif est plus complexe. La sphalérite domine et constitue le second sulfure le plus abondant de la minéralisation (17,9% en poids) ; elle montre couramment des exolutions de chalcopyrite. Les analyses à la microsonde électronique suggèrent la présence vraisemblable de deux générations de sphalé-

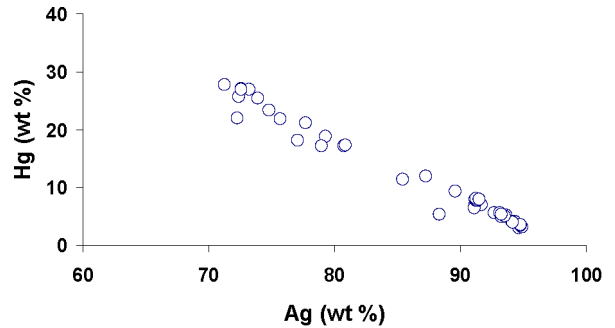


Fig. 3. Corrélations Ag–Hg dans l'argent mercurifère.

Fig. 3. Correlation Ag–Hg in the mercuriferous native silver.

rite : une minoritaire pauvre en fer (moins de 1%) et une majoritaire riche en fer (de 7 à 8% en poids). La sphalérite possède par ailleurs des teneurs constantes en cadmium (de 0,07 à 0,57%), mais aucune teneur en argent.

La chalcopyrite, rare (1,8% pondéral), comporte sporadiquement de petites plages (moins de 40 µm) de cuivre gris peu argentifère, mais celles-ci restent rares. La galène est peu abondante (2,3% pds), souvent en plages d'assez grande taille, et admet sporadiquement de petites plages d'acanthite ; ses analyses à la microsonde ont montré l'absence d'argent dans le réseau.

L'argent natif est le plus commun des minéraux d'argent : il représente 1,07% en poids du concentré et intervient à hauteur de 65 à 90% du stock argentifère du gisement. Il s'agit, non pas d'argent pur, mais d'un amalgame Ag–Hg, en plages allant de 25 à 480 µm, avec un mode aux alentours de 150–250 µm. Les analyses à la microsonde électronique ont mis en évidence la présence de deux populations (Tableau 1 et Fig. 3) : de grandes plages plus riches en argent (95 à 85% Ag, formule structurale voisine de Ag<sub>17</sub>Hg), correspondant vraisemblablement à des remobilisations légèrement plus tardives que le dépôt de la minéralisation, et des petites, ne titrant que 72 à 80% Ag (formule structurale moyenne de Ag<sub>5</sub>Hg, proche de l'eugénite), qui représentent l'essentiel de l'argent natif du gisement. Les plages montrent des variations irrégulières des teneurs en mercure, sans zonage régulier (Fig. 4).

L'acanthite (Ag<sub>2</sub>S) est le principal sulfure d'argent, mais reste quantitativement bien moins abondante que l'argent natif. Ses plages, de taille variable (jusqu'à 1920 µm), sont souvent constellées de microplages d'argent natif (moins de 5 µm) ; elle accompagne fréquemment des plages de galène. Elle est également parfois associée à de petites plages de polybasite (Ag<sub>16</sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>11</sub>) et de pearcrite (Ag<sub>16</sub>As<sub>2</sub>S<sub>11</sub>), deux minéraux présents en faibles quantités.

Tableau 1

Compositions de l'amalgame Ag–Hg. Au et As n'ont pas été détectés (analyses microsonde électronique SX 50 CAMECA, Orléans)

Table 1

Compositions of silver alloy; Au and As have not been detected (analyses: electronic microprobe CAMECA SX 50, Orléans, France)

|              |              |              |              |               |               |               |               |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ag           | 88,33        | 89,63        | 85,43        | 79,27         | 75,71         | 77,73         | 93,68         | 93,64        | 92,71        | 93,60        | 93,16        |
| S            | 0,23         | 0,00         | 0,29         | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,33          | 0,20         | 0,15         | 0,21         | 0,15         |
| Hg           | 5,38         | 9,38         | 11,37        | 18,80         | 21,86         | 21,20         | 5,11          | 5,15         | 5,58         | 4,96         | 5,63         |
| Sb           | 0,00         | 0,00         | 0,03         | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,88          | 0,94         | 0,84         | 0,94         | 1,00         |
| <b>Total</b> | <b>93,93</b> | <b>99,01</b> | <b>97,12</b> | <b>98,07</b>  | <b>97,57</b>  | <b>98,93</b>  | <b>99,99</b>  | <b>99,93</b> | <b>99,28</b> | <b>99,70</b> | <b>99,94</b> |
| Ag           | 93,42        | 93,65        | 74,82        | 72,59         | 73,90         | 93,53         | 93,30         | 91,30        | 91,34        | 91,73        |              |
| S            | 0,36         | 0,09         | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,48          | 0,50          | 0,00         | 0,13         | 0,00         |              |
| Hg           | 4,92         | 5,19         | 23,41        | 27,02         | 25,43         | 5,08          | 5,33          | 6,89         | 7,29         | 7,05         |              |
| Sb           | 1,00         | 0,97         | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,58          | 0,75          | 1,02         | 1,00         | 0,95         |              |
| <b>Total</b> | <b>99,70</b> | <b>99,90</b> | <b>98,23</b> | <b>99,61</b>  | <b>99,33</b>  | <b>99,68</b>  | <b>99,88</b>  | <b>99,21</b> | <b>99,76</b> | <b>99,74</b> |              |
| Ag           | 91,20        | 91,17        | 91,35        | 91,20         | 91,34         | 91,29         | 91,51         | 87,29        | 80,76        | 80,88        |              |
| S            | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00         | 0,37         | 0,00         |              |
| Hg           | 7,11         | 6,52         | 7,67         | 7,98          | 7,86          | 8,13          | 7,96          | 11,99        | 17,22        | 17,36        |              |
| Sb           | 0,97         | 1,00         | 0,96         | 0,98          | 0,91          | 0,90          | 0,78          | 0,05         | 0,35         | 0,00         |              |
| <b>Total</b> | <b>99,28</b> | <b>98,69</b> | <b>99,97</b> | <b>100,16</b> | <b>100,11</b> | <b>100,31</b> | <b>100,25</b> | <b>99,33</b> | <b>98,70</b> | <b>98,24</b> |              |

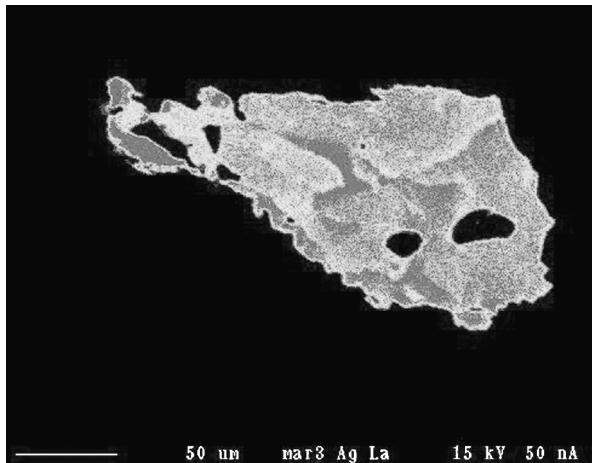


Fig. 4. Particule d'argent natif mercurifère extraite du concentré montrant l'irrégularité des teneurs en mercure; les zones grises sont les plus riches en argent (95% Ag), tandis que les zones blanches sont les plus riches en mercure (jusqu'à 15% Hg) (Photo MEB électrons rétrodiffusés).

Fig. 4. Hg-bearing native silver from heavy concentrate showing irregularities of mercury distribution: grey zones are silver-rich ones (less than 5% Hg), while white zones are the richest in mercury (up to 15% Hg) (photograph SEM, backscattered electrons).

La tennantite et la tétraédrite ont été observées en plages assez rares, souvent associées à la chalcopryrite; leurs teneurs en argent sont fluctuantes, mais restent faibles (moyenne aux alentours de 4% en poids).

Pyrrargyrite, proustite et cinabre, signalés dans les anciens rapports, n'ont pas été retrouvés dans les échantillons étudiés.

#### 4. Géochimie des fluides et conditions de dépôt

La succession minéralogique et les relations interminérales suggèrent fortement que les deux stades minéralisés relèvent d'un seul événement minéralisateur biphasé.

La phase précoce à arsénopyrite–pyrite est associée à des fluides aqueux à  $H_2O-CO_2-CH_4 (\pm N_2)$ , piégés dans des conditions de haute température (450–300 °C) dans une gamme de pressions assez large, due à des fluctuations entre la pression hydrostatique (50–80 MPa) et lithostatique ( $P_{min}$  : 65–190 MPa) [5]. Ces conditions de température sont cohérentes avec les valeurs déduites de la composition de l'arsénopyrite, dont les fortes teneurs en As (33,5 à 36,5 at% As) suggèrent des températures de cristallisation de l'ordre de 400 à 550 °C [10].

La paragenèse du stade argentifère polymétallique suggère des conditions de plus basse température et des fluides peu réducteurs, qui traduiraient la circulation de saumures sursaturées à  $H_2O-NaCl-CaCl_2$ , avec 24–40% en poids de  $NaCl + CaCl_2$ , sous des pressions modérées ( $P < 100$  MPa) et des températures faibles (vers 200 °C) [5]. Étant donné cette composition, on peut penser que le méthane présent au premier stade influe pour provoquer une précipitation en conditions réductrices.

La composition isotopique du plomb a été mesurée sur deux galènes du stade polymétallique argentifère (Tableau 2). Les rapports isotopiques  $^{206}Pb/^{204}Pb$ , proche de 17,89, et  $^{207}Pb/^{204}Pb$ , proche de 15,57, permettent de calculer un âge modèle voisin de 510 Ma (modèle de Stacey–Kramers [16]), assez cohérent avec un âge fini-Protérozoïque pour la minéralisation.

Tableau 2

Composition isotopique du plomb de la galène (analyses par spectrométrie de masse TIMS, J.-J. Peucat, CAREN, université de Rennes, France)

Table 2

Lead isotopic composition of galena (analyses: J.-J. Peucat, CAREN, University of Rennes, France)

| $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |       | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |       | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |       |
|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| 17,896                            | 0,002 | 15,576                            | 0,003 | 37,819                            | 0,008 |
| 17,884                            | 0,003 | 15,577                            | 0,003 | 37,803                            | 0,007 |

Ces compositions isotopiques permettent de calculer des rapports  $\mu$  ( $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) de 9,71 pour un âge de la minéralisation de 500 Ma, et de 9,83 pour un âge de 550 Ma (modèle de Stacey–Kramers [16]), des valeurs qui signent une origine des métaux dans la croûte continentale moyenne, sans participation mantellique perceptible. Ces compositions sont proches de celles mesurées à Imiter :  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  entre 18,10 et 18,17, et  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vers 15,55 [15], ce qui donne des valeurs de  $\mu$  encore plus crustales, comprises entre 10,12 à 10,23 pour un âge de 550 Ma, et conforte la similarité des deux gisements. Ce résultat est en désaccord avec l'origine mantellique proposée à Imiter sur la base de la géochimie isotopique Re/Os [12,13]. Il est cependant cohérent avec la signature isotopique Pb de croûte supérieure, mesurée dans le grand gisement de mercure d'Almaden en Espagne [11], qui tend à montrer que, dans la province ouest-européenne, la présence notable de mercure serait en relation avec un environnement de croûte moyenne à supérieure. L'antagonisme entre les résultats de géochimie Pb/Pb et Re/Os est un problème très intrigant, qui ne peut cependant être tranché dans le cadre de cette étude.

## 5. Discussion – Conclusion

Zgounder est une minéralisation Ag–Hg exceptionnellement riche en argent. Les fortes teneurs en mercure de l'argent démontrent qu'il s'agit, comme à Imiter, de minéraux hypogènes et non pas de minéraux supergènes issus d'une enrichissement en argent dans la zone de cimentation.

Zgounder possède de fortes analogies avec le gisement d'argent, peu éloigné, d'Imiter, sur les plans géologique (association d'une minéralisation argentifère et de formations rhyolitiques PIII), structural (fractures est–ouest préférentiellement minéralisées), minéralogique (abondance d'argent mercurifère hypogène et de sulfures d'argent), et géochimique (similitude au moins partielle de fluides).

À Imiter, la minéralisation argentifère résulterait du mélange de deux fluides : un fluide chaud (290 et 180 °C), peu salé, considéré comme d'origine volcanique, et un fluide plus froid (températures d'homogénéisation comprises entre 190 et 110 °C), hypersalin, d'origine superficielle (saumures de bassin) [2].

Imiter a récemment été interprété comme un événement épithermal néoprotozoïque daté à  $550 \pm 3$  Ma [3], ce qui est cohérent avec les volcanites acides de sub-surface et la géochimie de la minéralisation, riche en argent et en mercure, deux métaux caractéristiques des environnements épithermaux. Par rapport aux épithermaux cénozoïques [8,9,14], beaucoup plus répandus, ces rares épithermaux protérozoïques se singularisent par l'absence d'or et par une salinité importante, qui suggère une nature intermédiaire entre les deux types, neutre et acide, définis dans le Cénozoïque.

Cette origine épithermale peut s'étendre à Zgounder. Elle est, par ailleurs, cohérente avec les caractéristiques des fluides, qui montrent un stade précoce de haute température (près de 500 °C), suggérant une nette influence magmatique, suivie d'une décroissance rapide, suggérant une arrivée en sub-surface et un éventuel mélange avec des eaux superficielles hypersalines (saumures de bassin ?), comme cela a déjà été noté ailleurs dans l'Anti-Atlas [6]. Dans tous les gisements épithermaux, le dépôt des métaux précieux, or et/ou argent, s'effectue lors de ce stade tardif de basse température.

Zgounder et Imiter pourraient être deux expressions d'un même épisode épithermal néoprotozoïque, qui s'étendrait dans l'Anti-Atlas, au moins sur le Siroua et le Sarho, commençant à définir ce qui pourrait bien être une province métallogénique argentifère.

## Références

- [1] M.R. Azizi-Samir, A. Saquaque, A. El Boukhari, La transition néoprotozoïque dans l'Anti-Atlas marocain, un continuum géodynamique particulièrement minéralogène, in : Abstr. Vol. Colloque Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisation Associées, Marrakech, Maroc, 2001, p. 6.
- [2] Z. Baroudi, H. Beraouz, A. Rahimi, A. Saquaque, M. Chouhaidi, Minéralisations polymétalliques argentifères d'Imiter, (Jbel Sarho, Maroc) : minéralogie, évolution des fluides minéralisateurs et mécanismes de dépôts, Chronique Recherche Minière 531–532 (1999) 77–92.
- [3] A. Cheilletz, G. Levresse, D. Gasquet, M.R. Azizi-Samir, R. Zyadi, D.A. Archibald, E. Farrar, The giant Imiter silver deposit: Neoproterozoic epithermal mineralization in the Anti-Atlas, Morocco. Deposita 37 (2002) 772–781.
- [4] N. Ennih, J.-P. Liégeois, E. Errami, D. Laduron, L'accident sud-atlasique : une structure lithosphérique majeure, limite nord du craton ouest-africain, in : Résumé Coll. int. 3MA, Casablanca, Maroc, 8–10 mai 2003, p. 25.

- [5] S. Essaraj, Circulations de fluides associées aux minéralisations argentifères de l'Anti-Atlas central; exemples des gisements de Zgounder (Ag–Hg) et Bou-Azzer (Co–Ni–As–Au–Ag), thèse d'État, université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc, 1999, 358 p.
- [6] S. Essaraj, Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou-Azzer (Morocco): evidence from fluid inclusions, *J. Afr. Earth Sci.* 14 (1–2) (2005) 25–39.
- [7] A. Fekkak, A. Pouclet, H. Ouguir, L. Badra, D. Gasquet, Géochimie et signification géotectonique des volcanites du Cryogénien inférieur du Saghro (Anti-Atlas oriental, Maroc), *Geodin. Acta* 14 (2001) 373–385.
- [8] P. Heald, N.K. Foley, D.O. Hayba, Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia types, *Econ. Geol.* 82 (1987) 1–26.
- [9] J.W. Heddenquist, J.B. Lowenstern, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits, *Nature* 370 (1994) 519–527.
- [10] U. Kretschmar, S.D. Scott, Phase relation involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application, *Can. Mineral.* 14 (1976) 364–386.
- [11] M. Jébrak, P. Higuera, É. Marcoux, S. Lorenzo, Geology and geochemistry of high-grade, volcanic hosted, mercury mineralization in the Nuevo Entredicho deposit, Almaden district, Spain, *Miner. Deposita* 37 (2002) 421–432.
- [12] G. Levresse, Contribution à l'établissement d'un modèle génétique des gisements d'Imiter (Ag–Hg), Bou Madine (Pb–Zn–Cu–Ag–Au), Bou-Azzer (Co–Ni–As–Au–Ag) dans l'Anti-Atlas marocain, thèse, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2001, 190 p.
- [13] G. Levresse, A. Cheilletz, D. Gasquet, L. Reisberg, E. Deloule, B. Marty, K. Kyser, Osmium, sulphur, and helium isotopic results from the giant Neoproterozoic epithermal Imiter silver deposit, Morocco: evidence for a mantle source, *Chem. Geol.* 207 (2004) 59–79.
- [14] É. Marcoux, Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 321 (1995) 723–735.
- [15] J. Pasava, Geochemistry and the role of anoxic sediments in the origin of the Imiter silver deposit in Morocco, *Vestník Českého geologického ústavu* 69 (1994) 1–11.
- [16] J.S. Stacey, J.D. Kramers, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model, *Earth Planet. Sci. Lett.* 26 (1975) 207–221.