

RESUME

Petrovitsa est un gisement de type skarn distal à Pb-Zn localisé dans le district de Madan dans le sud de la Bulgarie. Le district est situé dans les Rhodopes Centrales qui appartiennent à la province Alpine-Balkan-Carpathes-Dinaride de la ceinture métallogénique Alpo-Himalayenne. La région fut une des plus importants producteurs de Pb-Zn d'Europe. La minéralisation à métaux de base est encaissée dans un complexe à noyau métamorphique composé de gneiss, amphibolites, micaschistes et de trois horizons majeurs de marbres (nommés I, II, et III). Les dépôts minéralisés sont contrôlés structurellement par six failles majeures, jusqu'à 10-15 km de longueur, d'orientation NNO-SSE. Deux principaux types morphologiques de corps minéralisés sont distingués dans le district : des veines polymétalliques simples (1-3 m de puissance ; jusqu'à 7 km de longueur) et des skarns à sulfures localisés à l'intersection de failles avec les horizons marbrés. La minéralisation à sulfures des veines et des corps métasomatiques est uniformément composée de galène, sphalérite, pyrite et chalcopryrite comme principaux minéraux. Ces deux types de minéralisation, veines et corps de remplacement métasomatique, ont été étudiés dans le gisement de Petrovitsa.

Une cartographie détaillée de terrain et un large panel de techniques analytiques (pétrographie optique, cathodoluminescence optique et électronique, tomographie par rayons X, QEMSCAN, microsonde électronique et LA-ICP-MS) ont été appliqués dans le but de comparer les processus génétiques conduisant à la formation des veines minéralisées (comme conduits pour la minéralisation de type skarn) et des corps métasomatiques. Deux niveaux souterrains – 668 et 845 – du gisement de Petrovitsa ont été étudiés. Des différences importantes ont été observées en terme de distribution des sulfures, rapport Pb/Zn, textures minérales, température de formation, rapport fluide/roche,

et concentrations en éléments majeurs et traces entre les minéralisations des veines et des remplacements métasomatiques.

La comparaison des résultats analytiques à partir d'une large base de données indique que le rapport Pb/Zn est plus élevé dans les veines par rapport aux corps métasomatiques. De manière générale, les corps métasomatiques minéralisés du gisement de Petrovitsa ont des concentrations en métaux plus élevées que les veines, celles-ci augmentant avec la profondeur.

L'étude géochimique des minéraux porteurs de la minéralisation et des minéraux d'altération montre que la température de formation des sulfures au niveau 845 est supérieure à celle du niveau 668. La géothermométrie de la sphalérite basée sur le rapport Fe/Zn indique des températures de cristallisation de 330°C au niveau supérieur et d'environ 280°C au niveau inférieur. Les concentrations en éléments mineurs et traces de minéraux tels que l'épidote, la chlorite, la chalcopyrite et la pyrite sont également plus élevées dans le corps métasomatique situé au niveau 845.

Une attention particulière a été accordée pour la caractérisation détaillée de l'altération hydrothermale associée aux veines minéralisées du niveau 668. La roche encaissante a subi une intense altération potassique proximale à la veine, qui a été oblitérée au cours du stade de minéralisation sulfurée par un assemblage pervasif à séricite, quartz, kaolinite et carbonates, affectant principalement les feldspaths et les micas du gneiss.

Pour la première fois, cette étude a permis de distinguer le stade de minéralisation précoce des veines qui consiste en un assemblage à quartz, épidote, chlorite et adulaire. Ces minéraux sont associés avec une faible quantité d'hématite, ce qui indique des conditions oxydantes pendant le stade précoce de formation des veines.

Une nouvelle méthode reposant sur l'analyse texturale des bandes de croissance du quartz a été utilisée dans ce travail afin de caractériser la direction et la vitesse des paléo-circulations de fluides dans les veines hydrothermales. Les échantillons de quartz étudiés

correspondent aux derniers stades hydrothermaux associés au dépôt des sulfures. Les résultats obtenus indiquent l'existence de deux directions de paléo-circulations avec des changements mineurs au cours du temps et des vitesses fluides variant de 10^{-8} m.s⁻¹ à 10^{-4} m.s⁻¹. Ces résultats démontrent que le système hydrothermal était très dynamique à ce stade de son évolution.

Le modèle génétique proposé vise à établir le lien entre les processus fluides responsables des minéralisations de type veine et métasomatique aux niveaux 668 et 845 de la mine. Le mélange entre des fluides magmatiques et météoriques est proposé comme ayant joué un rôle décisif pour le dépôt des sulfures.

Mots-clés : *skarn distal, gisements de Pb-Zn, veines hydrothermales, corps minéralisés par remplacement, Bulgarie*

ABSTRACT

Petrovitsa is a Pb-Zn distal skarn deposit, located in the Madan district in South Bulgaria. The district is situated in the Central Rhodopes, which is part of the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride province of the Alpine-Himalayan metallogenic belt. The region was one of the most important Pb-Zn producers in Europe in the past. The base-metal mineralization is hosted by a metamorphic core complex, consisting of gneisses, amphibolites, mica schists and three major marble horizons (labelled I, II, and III). The deposits are structurally controlled by six large, up to 10-15 km-long, NNW-SSE-striking faults. Two main morphological types of ore bodies occur in the district: simple polymetallic veins (1-3 m wide; up to 7 km-long) and skarn-sulphide bodies formed in the intersections of ore-controlling faults with marble lenses/layers. Sulfide mineralization in the veins and in the metasomatic bodies is uniform, with galena, sphalerite, pyrite and chalcopyrite as main minerals. Both mineralization styles: a rich vein and metasomatic replacement body were studied in the Petrovitsa deposit.

A detailed field mapping alongside with a large set of analytical techniques (optical petrography, cold-CL, SEM-CL, X-ray computed tomography, QEMSCAN, EPMA and LA-ICP-MS) have been used to compare the main ore-forming processes in the deposit leading to the formation of the vein (as feeders for the skarn-type mineralization) and the metasomatic bodies. Two mine levels - 668 and 845 at Petrovitsa deposit were studied. Significant difference in terms of sulfide distribution, Pb/Zn ratio, mineral textures, temperature of formation, fluid/rock ratio, major and trace elements concentrations between vein and metasomatic replacement mineralizations were distinguished.

Analytical comparison based on large dataset reveals that the Pb/Zn ratio is higher in the veins compared to the metasomatic bodies. Generally speaking, the metasomatic ore bodies in Petrovitsa deposit has higher metal concentrations than veins and both become richer at depth.

Mineral geochemistry study on ore and alteration minerals reveals that the sulfide formation temperature at level 845 is higher compared to level 668. Sphalerite geothermometry based on the Fe/Zn ratio shows crystallization temperature of 330°C at the upper level and around 280°C at the lower one. Minor and trace element contents in minerals like epidote, chlorite, chalcopyrite and pyrite are also higher in the metasomatic body at level 845

A special attention has been paid to characterize properly the hydrothermal alteration associated with the vein mineralization at level 668. The wall rock had suffered intense K-alteration proximal to the vein, which was overprinted during the sulfide stage of mineralization by a pervasive sericite-quartz-kaolinite-carbonate assemblage affecting mainly the feldspars and micas from the gneiss.

For the first time, this study distinguished the earliest mineralization stage in the veins which consists of a quartz-epidote-chlorite-adularia assemblage. These minerals are associated with minor quantity of hematite which is indicative of oxidizing conditions during the early stage of vein formation.

New method was used during this work which represents textural analysis of quartz growth banding to decipher paleo-fluid flow direction and fluid velocity in the hydrothermal veins. The studied quartz samples belong to one of the latest hydrothermal stages and they are also associated with sulphides. The results of the study show two dominant fluid flow directions with some additional minor changes with time and fluid velocities varying from 10^{-8} m.s⁻¹ to 10^{-4} m.s⁻¹. These results demonstrate that in this stage of its history the hydrothermal system was very dynamic.

The proposed genetic model aims to make a link between fluid processes responsible for vein and metasomatic mineralization at levels 668 and 845 of the mine. Mixing between magmatic and meteoric fluids is proposed to play a major role for sulfide precipitation.

Keywords: *Distal skarn, Pb-Zn deposits, hydrothermal veins, replacement ore bodies, Bulgaria*