



Géomatériaux (Métallogénie)

# Connexion porphyre cuprifère–épithermaux de type *low-sulfidation* : analyse structurale et représentation 3D du secteur de Bolcana, monts Apuseni, Roumanie

Olivier Cardon <sup>a,\*</sup>, Anne-Sylvie André-Mayer <sup>a</sup>, Judith Sausse <sup>a</sup>, Viorica Milu <sup>b</sup>,  
Alain Chauvet <sup>c</sup>, Jacques L. Leroy <sup>a</sup>, Marc Lespinasse <sup>a</sup>, Sorin Udubasa <sup>d</sup>

<sup>a</sup> « Géologie et gestion des ressources minérales et énergétiques », UMR CNRS 7566 G2R, université Henri-Poincaré, BP 239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France

<sup>b</sup> Department of Mineral Resources and Environmental Geology, Geological Institute of Romania, 1 Caransebes Str., 78344 Bucarest, Roumanie

<sup>c</sup> Laboratoire « Dynamique de la lithosphère », UMR 5573, ISTEEM, université Montpellier-2, CC 60, 34095 Montpellier cedex 5, France

<sup>d</sup> Department of Mineralogy, Faculty of Geology and Geophysics, University of Bucarest, 1 N. Balescu Blv., 70111 Bucarest, Roumanie

Reçu le 9 novembre 2004 ; accepté après révision le 15 mars 2005

Disponible sur Internet le 28 avril 2005

Présenté par Zdenek Johan

## Résumé

Les gisements épithermaux de type *low-sulfidation* à Au et Pb–Zn de Troita, Trestia et Magura (monts Apuseni, Roumanie) sont spatialement associés au porphyre cuprifère de Bolcana. Dans l'objectif d'étudier la connexion entre ces minéralisations, une étude géométrique a été réalisée à partir de mesures structurales et d'une représentation 3D des différents gisements à l'aide du géomodeleur GOCAD<sup>®</sup>. Cette étude montre qu'il existe une répartition zonaire des différents filons épithermaux à Au et Pb–Zn autour du porphyre, qui ne peut être due à un télescopage des différents systèmes. **Pour citer cet article : O. Cardon et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

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

## Abstract

**The link between porphyry copper and low-sulfidation epithermal deposit: structural study and 3D representation of the sector of Bolcana, Apuseni Mountains, Romania.** The Au–Pb–Zn low-sulfidation epithermal ore deposits of Troita, Trestia, and Magura (Apuseni Mountains, Romania) are spatially related to the Bolcana Cu-porphyry. In an attempt to demonstrate the connection between these mineralizations, a geometric study was made based on structural measurements and GOCAD<sup>®</sup> geomodeller 3D representation of deposits. This study indicates that a specific spatial distribution of the different Au and Pb–

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [olivier.cardon@g2r.uhp-nancy.fr](mailto:olivier.cardon@g2r.uhp-nancy.fr) (O. Cardon).

Zn veins of the epithermal deposits occurs around the Cu-porphyry, which cannot result from telescoped systems. **To cite this article:** O. Cardon et al., C. R. Geoscience 337 (2005).

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

*Mots-clés:* GOCAD; Modélisation 3D; Épithermal; Porphyre cuprifère; Gisement; Monts Apuseni; Roumanie

*Keywords:* GOCAD; 3D modelling; Epithermal; Porphyry copper; Ore deposit; Apuseni Mountains; Romania

## Abridged English version

### 1. Introduction

Epithermal ore deposits result from the overprinting of magmatic, tectonic, and hydrothermal processes in both time and space. Recent studies [8,10,11,17,20] have shown that magmas play a significant role in the formation of epithermal deposits as source of heat, fluids and metals [6], even if the connection between Cu-porphyry deposits (magmatism) and low-sulfidation epithermal vein systems (hydrothermalism) remains a subject of debate. It has been proposed that such associations can either be genetic or result from the telescoping or the collapse of the epithermal/magmatic system [16].

The Bolcana Cu-porphyry (Apuseni Mountains, Romania), is associated over a small area (8 km<sup>2</sup>) with several low-sulfidation epithermal deposits [13]. The close association between these deposits is a good opportunity to investigate the possible genetic link between porphyry and low-sulfidation epithermal deposits. In addition, the presence of numerous mining galleries extending from the epithermal deposits to the porphyry core can be used to carry out a comprehensive structural study as well as exhaustive sampling. A structural study combined with a 3D modelling of the Bolcana area has been performed in order to determine the relation between all deposits (telescoped systems or not).

### 2. Geologic setting

The studied area is located in the Apuseni Mountains (Romania), which includes numerous Neogene andesitic intrusions. These represent the final stage of Alpine magmatism, and contain several low-sulfidation epithermal deposits and Cu-porphyry type deposits, many of which have been used for the production of ore [2,19] (Fig. 1A). Several low-sulfidation

epithermal mineralizations are located around the Bolcana Cu-porphyry, including the Pb–Zn deposit of Trestia towards the northwest, the Au deposit of Magura towards the south, and the Au and Pb–Zn Troita deposits towards the west. Au mineralization forms the western part of the Troita mine, whereas the Pb–Zn ore is located in the eastern part. Such zoned deposits have been observed in other epithermal ore deposit and geothermal systems [1,4,17,18], but in the present case they are additionally spatially associated with a Cu-porphyry deposit.

### 3. Structural study and 3D representation

#### 3.1. Structural study

Nearly 200 veins and fractures have been measured in the field [3], all of which concern to Troita-Bolcana and Magura sites. These structures are organised according to two average N150°E and N20°E trends at Troita-Bolcana, and an average N170°E trend at Magura (Fig. 1D). The fact that the directions of the veins are similar in all deposits strongly suggests a synchronous formation through a mechanism that should be related to a regional state of stress, assumed to be extension [15].

#### 3.2. GOCAD model

The GOCAD software (©2004, Earth Decisions Sciences) is herein used to represent the 3D relations between the Cu-porphyry and the epithermal deposits, as well as of the mine galleries and types of mineralization (Au, Pb–Zn). The GOCAD software is also used to carry out a volumetric interpolation of punctual information. As mentioned above, the question is to know whether or not the spatial association of the various ore deposits results from a telescoping phenomenon [16].

The input data consist of both own field data and other information from the literature. Data from active

mining galleries [12,13], and older mining works operated prior to 1941 [5] are used. All this information concerns a 2-km-wide, 3-km-long, and approximately 300-m-high volume.

The first stage characterizes numerically each type of object by its  $x$ ,  $y$  and  $z$  coordinates, compatible with the input format of the GOCAD software. Additional information (such as type of mineralization type or host rock nature) is associated with these coordinates as a property. The punctual data consisting of approximately 900 data points have subsequently been interpolated using a discrete smooth interpolation technique (DSI) [9] over a grid, the dimensions of which are  $X = 1800$  m,  $Y = 2900$  m,  $Z = 264$  m, consisting of 22,050 parallelepipedic meshes ( $x = 36$  m,  $y = 60$  m,  $z = 30$  m) (Fig. 2B). The model contains both surface objects (such as the porphyry) and successive cross-sections deduced from the grid, allowing an estimation of the volume distribution of the different features. The mine galleries are represented by a three-dimensional network of discrete points (Fig. 2A). With the Gocad software camera, all the objects can be visualized simultaneously and their spatial relations identified.

Representations in a horizontal plane as well as in a flat projection on a vertical plane show that the Au and Pb–Zn ore deposits are spatially distinct. It can be inferred from Fig. 2A that the Pb–Zn epithermal deposits are closer to the porphyry and located deeper compared to the Au epithermal veins which are more distant from the porphyry and closer to the surface (Fig. 2A).

Field observations indicate no evidence of telescoping between the epithermal deposits and the porphyry. Indeed, results of the model are in agreement with the field observations, and indicating a 3D zonality of the Au and Pb–Zn epithermal deposits centred on the porphyry (Fig. 2B). This zonality appears relatively cylindrical, and the 3D distribution of the mineralizations seems homogeneous around the contour of the intrusive body. The model further indicates that the gold bearing epithermal deposit only occurs at a certain distance from the porphyry. This distance is anisotropic and organized according to an ellipse, whose long axis is N150°E oriented and 1500-m long, and short axis is 1000-m long. Within this elliptic sector centred on the porphyry, only Pb–Zn epithermal ore deposits are found. Although this epithermal mineralization zoning

centered on the porphyry is not a significant argument for the demonstration of a genetic relation between the porphyry and the low-sulfidation epithermal deposits, this relation clearly undermines the hypothesis of telescoped systems.

#### 4. Conclusion

This preliminary study indicates that the epithermal deposits of Troita, Trestia and Magura (Apuseni Mountains, Romania) are organized according to directions that are compatible with regional constraints, and that there is no spatial superposition of the various objects. In addition, a zoning of the epithermal deposits around the porphyry has been demonstrated indicating that the spatial association of the deposits cannot be the result of a collapse or telescoped systems.

Therefore, the Bolcana deposits constitute an excellent case of study to demonstrate a potential genetic relation between porphyry and epithermal deposits.

Finally, in a methodological point of view, this preliminary study demonstrates that the interpretation of structural data collected in the field with the aid of 3D modelling software as GOCAD can constitute a powerful tool for ore-deposit prospection. Many other parameters can be incorporated in the model, including the composition and the temperature of hydrothermal fluids, the extent of the hydrothermal alteration, the isotopic data, and the age of the mineralisations, which will make it possible to observe the distribution and evolution of these parameters in a 3D space.

## 1. Introduction

Les gisements épithermaux sont des objets complexes qui résultent de la superposition temporelle et spatiale de processus magmatiques, tectoniques et hydrothermaux. Les mécanismes responsables de leur formation ne sont pas tous bien connus, en particulier leurs effets à l'échelle de l'ensemble de la lithosphère. Il est admis que les magmas peuvent jouer un rôle important dans la formation des gisements épithermaux comme source d'énergie, de fluides et de métaux [6,8,10,11,17,20]. Cependant, bien que l'existence d'une relation spatiale entre magma (à l'origine des porphyres) et système hydrothermal (gisements

épithermaux de type *low-sulfidation*) soit évidente sur le terrain, leurs relations temporelles et génétiques ne sont toujours pas clairement démontrées. La résolution de cette problématique s'avère pourtant importante, tant sur un plan scientifique que pour ses conséquences en termes économiques.

Une étude des mécanismes de formation de ces types de gisements a été entreprise à partir de l'exemple des gisements d'or et de plomb–zinc des monts Apuseni (Roumanie). De nombreux gisements hydrothermaux de type porphyre et épithermal de type *low-sulfidation* y sont décrits et exploités, en association avec des intrusions andésitiques [2,19]. L'association de ces gisements sur une très faible superficie (8 km<sup>2</sup>), comme c'est le cas sur notre secteur d'étude, est très rarement observable en continu sur le terrain. Cette zone s'avère donc propice à l'étude de la connexion génétique supposée par Simmons [17] ou Hedenquist et Lowenstern [8] entre les gisements de type porphyre et épithermal de type *low-sulfidation*. Cependant, si l'association spatiale de ces deux types de gisement y est évidente, elle pourrait être interprétée comme résultant d'un phénomène de télescopage [16] entre les filons épithermaux et le porphyre.

Avec l'objectif de se situer entre ces deux hypothèses, une représentation 3D de la zone d'étude a été réalisée avec le logiciel GOCAD (©2004, *Earth Decisions Sciences*) à partir de données structurales de terrain et d'une compilation des nombreuses informations concernant les travaux passés [5].

## 2. Contexte géologique

Les gisements cibles se trouvent en Roumanie, au cœur de la région des monts Apuseni (Fig. 1A), aux pieds de la chaîne des Carpates. Les monts Apuseni présentent de nombreuses intrusions andésitiques néogènes représentant le stade final du magmatisme alpin. Leur mise en place est interprétée comme étant le résultat de la rotation de la plaque Tisia entre 15 et 11 Ma, associée à une fracturation résultante N120°E (Fig. 1B) [15]. Il faut noter que de nombreuses intrusions s'alignent selon cette direction et montrent une chronologie de mise en place depuis les plus anciennes, au nord-ouest, vers les plus récentes, au sud-est (Fig. 1C) [14]. De nombreux gisements hydrothermaux de type porphyre et épithermal de type *low-*

*sulfidation* sont décrits et exploités en association avec ces intrusions [2,19]. Le porphyre cuprifère à or de Bolcana (Roumanie) [12,13] possède la particularité d'être bordé par un ensemble de filons épithermaux de type *low-sulfidation* minéralisés à plomb–zinc (mines de Troita et Trestia), mais aussi à or (mine de Magura). Cette diversité de minéralisations se concentre sur un secteur de 8 km<sup>2</sup> (Fig. 1D). De nombreuses galeries de mines existent, reliant entre eux les différents systèmes, et permettent un échantillonnage sur différents niveaux verticaux et de manière continue du porphyre vers les différents indices ou gisements épithermaux en exploitation.

## 3. Les gisements de Trestia, Troita-Bolcana et Magura

La mine de *Trestia*, au nord-ouest (épithermal de type *low-sulfidation* [19]), est constituée de quatre filons principaux exploités pour le plomb–zinc (Fig. 1D). Leur puissance est très variable, allant de quelques centimètres à un mètre. Leurs épontes, fortement kaolinisées, témoignent d'une altération importante [5].

La mine de *Troita*, à l'ouest (épithermal de type *low-sulfidation* [19]), est exploitée pour l'or dans sa partie ouest et pour le plomb–zinc dans sa partie est (Fig. 1D). Cette zonation, déjà observée dans d'autres gisements épithermaux de type *low-sulfidation* et dans des systèmes géothermiques [1,4,7,18] présente ici l'intérêt d'être spatialement associée à un porphyre. Dans ce gisement, les travaux miniers n'ont pas permis de mettre en évidence de zonalité verticale. Les galeries d'exploitation se prolongent vers l'est sur 1 km rejoignant la partie souterraine du porphyre minéralisé de **Bolcana** exploité pour le cuivre (Fig. 1D). Cette galerie recoupe plusieurs filons sub-verticaux d'orientation nord–sud, pentés ouest. En galerie, la proximité du porphyre minéralisé est caractérisée par la présence d'un *stockwork* anisotrope, dont les veines sont pentées majoritairement à l'est, vers le cœur du porphyre [3].

La mine de *Magura* (épithermal de type *low-sulfidation* à or), située au sud du secteur d'étude, est constituée de plusieurs filons sub-verticaux aurifères, parallèles et de direction nord–sud (Fig. 1D). D'après les informations minières récoltées sur place,

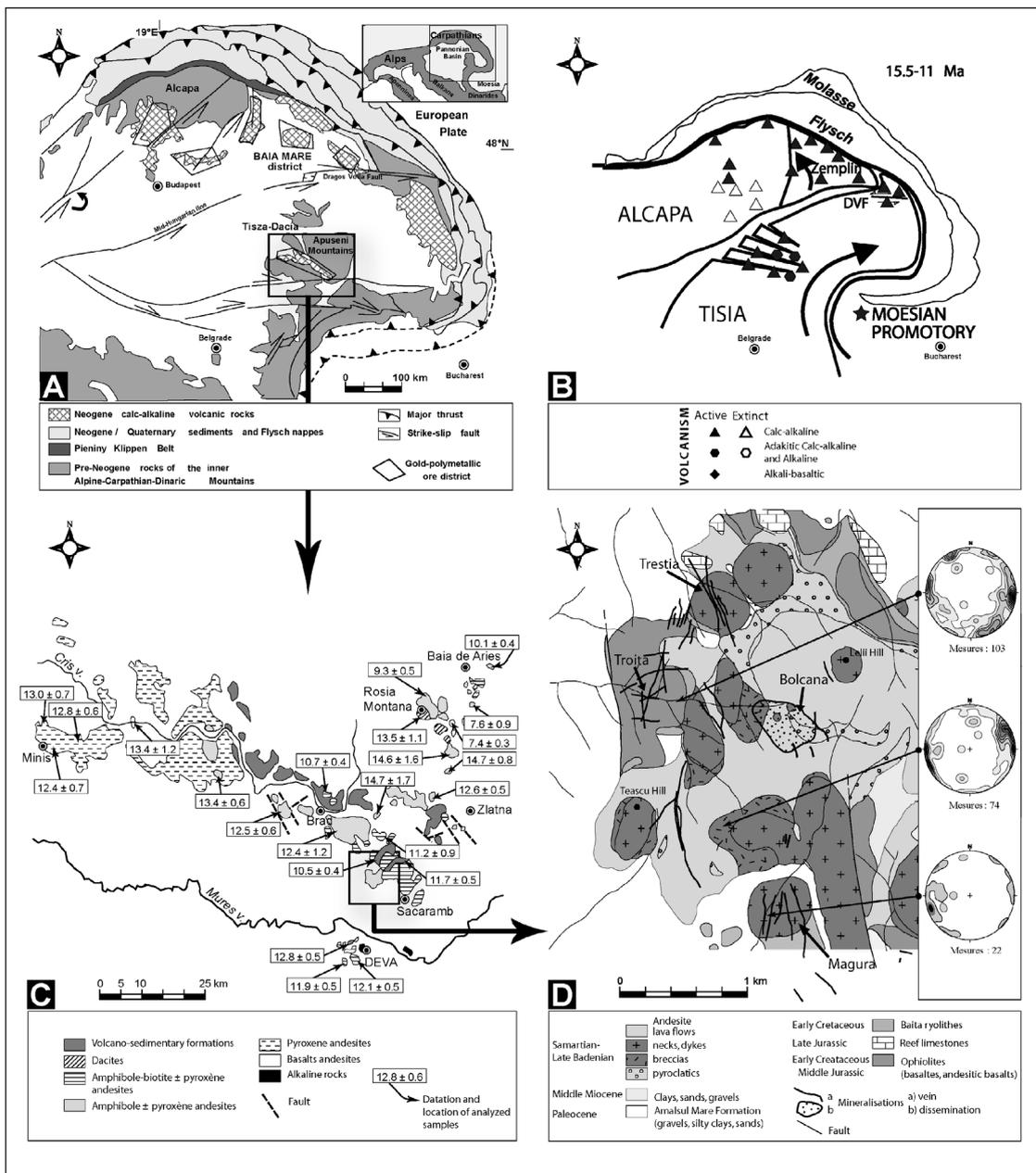


Fig. 1. (A) Carte géologique simplifiée de la chaîne des Carpates. La zone d'étude dans les monts Apuseni (D) est limitée par le carré. (B) Modèle géotectonique de mise en place de l'activité magmatique vers 15,5–11 Ma dans la région des Carpates et du bassin pannonien (d'après Seghedi et al. [15]). (C) Carte du volcanisme néogène des monts Apuseni et âges K–Ar des différents corps intrusifs (d'après Pecsckay et al. [14]). (D) Carte géologique du secteur d'étude où figurent les principales galeries de mine et les stéréogrammes d'orientation des pôles des filons en différents sites d'observation.

Fig. 1. (A) Simplified geologic map of the Carpathian arc. The square in the Apuseni Mountains (D) is limited by the square. (B) Geotectonic model of volcanic activity in the Carpathian–Pannonian region at 15.5–11 Ma (after Seghedi et al. [15]). (C) Map of the Neogene volcanism in the Apuseni Mountains and K–Ar dating of the magmatic activity (after Pecsckay et al. [14]). (D) Geologic map of the studied area. The main mine galleries and the stereograms of pole's directions of veins in several observation site are reported.

il a été observé dans cette mine une zonalité verticale des minéralisations avec, en profondeur, le Pb–Zn et, au sommet, l’Au.

Tous les filons sont généralement encaissés dans des faciès andésitiques, appartenant à un appareil volcanique complexe. Ils sont assez bréchiques et limités par des épontes argilisées.

Des blocs siliceux de 3 à 5 m de haut, créant un relief dans la topographie, ont pu être observés en surface entre les mines de Magura et de Troita.

La minéralogie des filons dans les différents épithermaux est similaire d’un gisement à l’autre. La minéralisation sulfurée, pyrite, chalcopryrite, sphalérite, galène, tennantite, tétraédrite, est associée à une gangue constituée de quartz, adulaire et une phase tardive à barytine.

Les caractéristiques structurales de ces différents filons ont été relevées lors d’une campagne de mesures en septembre 2003 [3].

## 4. Étude structurale et représentation 3D

### 4.1. Étude structurale

Les directions, pendages, épaisseurs et remplissages ont été systématiquement mesurés sur près de 200 structures (filons minéralisés, fractures, failles...) en mine et en surface (Fig. 1D). Les filons s’organisent en deux familles essentiellement orientées N150° et N20° E sur le site de Troita-Bolcana. Les filons de Magura présentent quant à eux une orientation moyenne autour de N170°E. Cette similitude entre les systèmes de filons et de fractures du Nord et du Sud du secteur coïncide avec les structures régionales. Ceci suggère fortement une formation synchrone, les venues siliceuses ayant été favorisées par la réouverture de fractures lors de la phase d’extension accompagnant la mise en place des différentes intrusions dans les monts Apuseni [14]. En allant vers le sud-est, l’âge des intrusifs diminue (Fig. 1D), ce qui correspondrait à une ouverture progressive depuis le nord-ouest vers le sud-est, lors d’un épisode extensif régional NW–SE [15]. L’ensemble des données structurales a permis de préciser la représentation 3D des minéralisations dans la zone étudiée.

### 4.2. Représentation 3D

Le logiciel GOCAD (©2004, *Earth Decisions Sciences*) a été utilisé d’une part pour permettre la visualisation en 3D des différents objets observés sur le terrain (porphyre, galeries de mine, veines épithermales minéralisées) en les différenciant en fonction de leurs caractéristiques (type de minéralisation : Au, Pb–Zn, Cu, roche encaissante,...), d’autre part pour réaliser une représentation volumique des données, afin de préciser si l’association spatiale des différents gisements était liée ou non à un phénomène de télescopage [16].

Les données d’entrée du modèle proviennent en partie de Ghitulescu et Socolescu [5]. Ces auteurs ont recensé tous les gisements connus à cette époque dans la région, avec les plans précis des galeries minières, leur altitude ainsi que la description minéralogique du minerai exploité. Depuis la publication de cet ouvrage en 1941, de nouvelles galeries ont été ouvertes, mais les zones exploitées ont assez peu changé. Ce document apporte donc des informations sur les anciens niveaux inaccessibles à l’heure actuelle. Le seul objet non décrit à cette époque est le porphyre de Bolcana qui, n’affleurant pas, n’a été découvert que lors de la phase d’exploration de la mine dans les années 1970. Les informations concernant les filons découverts depuis et le porphyre proviennent des travaux récents de Milu [12,13]. Enfin, de nouvelles données géoréférencées ont été obtenues lors de la mission de terrain de septembre 2003.

Pour réaliser le modèle, chaque type d’objet a été caractérisé numériquement par ses coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ , compatibles avec le format du logiciel GOCAD. Des informations supplémentaires, comme le type de minéralisation du gisement, ont été associées à ces données sous forme de propriétés. Ces données initialement ponctuelles (900 points) ont été interpolées (DSI, *Discrete Smooth Interpolation* [9]) dans une grille stratigraphique régulière 3D de dimensions  $x = 1800$  m,  $y = 2900$  m,  $z = 264$  m, comportant des mailles parallélépipédiques ( $x = 36$  m,  $y = 60$  m,  $z = 30$  m) (Fig. 2B). Le modèle comporte donc au final des objets surfaciques tels que le porphyre, mais également des coupes sériées déduites de la grille permettant de visualiser la répartition des propriétés dans le volume d’étude. Les galeries de mine sont figurées par un ensemble tridimensionnel de points discrets

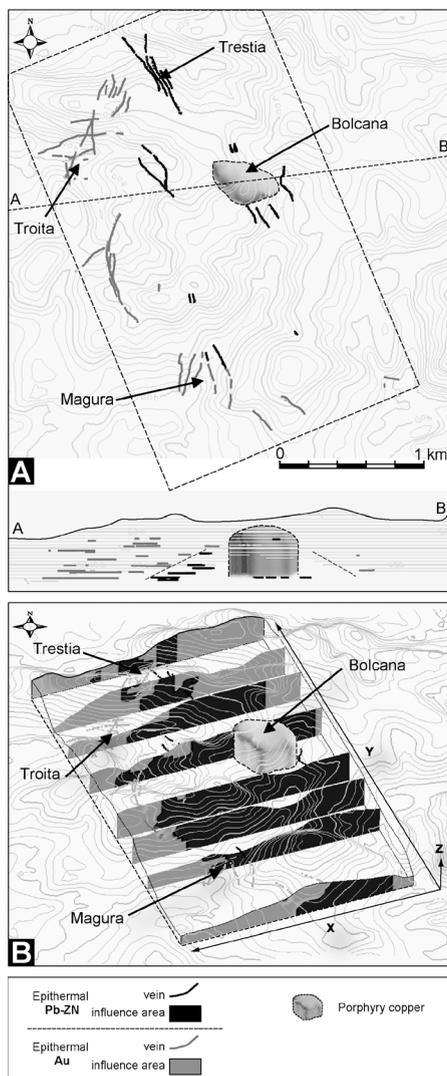


Fig. 2. Modélisation géométrique des gisements grâce au logiciel GOCAD (©2004, Earth Decisions Sciences). (A) Représentation en plan et projection horizontale sur un plan vertical AB de la répartition des différentes galeries de mine par rapport au porphyre de Bolcana. (B) Représentation en perspective de la zonation à Au et à Pb–Zn, obtenue grâce à l’interpolation du logiciel.

Fig. 2. Geometric deposit modelling with GOCAD software (©2004, Earth Decisions Sciences). (A) Horizontal plane and horizontal projection in a vertical AB plane of the epithermal exploitation mine galleries around the porphyry of Bolcana. (B) Au and Pb–Zn zonation represented in a prospect plan, obtained by software interpolation.

(Fig. 2A). La caméra du logiciel GOCAD permet alors de visualiser tous les objets simultanément et d’estimer leurs relations spatiales.

La représentation en plan et en coupe montre que les gisements à Au et à Pb–Zn sont spatialement distincts. En effet, les épithermaux à Pb–Zn sont plus proches du porphyre et situés plus en profondeur que les épithermaux à Au qui sont plus distants et plus proches de la surface (Fig. 2A). Sur le terrain, peu de recouvrements ont été observés entre le système porphyrique et les veines épithermales. Les rares secteurs où les deux systèmes ont pu être observés montraient plutôt une continuité que des recouvrements. Toutefois, cette observation nécessite d’être confirmée par une étude plus approfondie. Les résultats du modèle confirment ces premières observations et montrent qu’il existe une zonalité 3D des filons épithermaux à Au et à Pb–Zn, centrée autour du porphyre (Fig. 2B). La distribution 3D de la minéralisation est homogène autour du contour de l’intrusif. Ce modèle met en évidence que les occurrences épithermales minéralisées à or n’apparaissent qu’à une certaine distance du porphyre et s’organisent selon une ellipse de grand axe orienté N150°E mesurant 1500 m et de petit axe mesurant 1000 m. À l’intérieur de cette ellipse, centrée sur le porphyre, on ne trouve que des minéralisations épithermales à plomb–zinc. Cette zonalité de répartition des minéralisations centrée sur le porphyre n’est toutefois pas une preuve de relation génétique entre le porphyre et l’épithermal de type *low-sulfidation*, mais elle permet d’écarter l’hypothèse d’un télescopage.

## 5. Conclusion

Cette étude préliminaire indique que les filons minéralisés s’organisent selon les directions compatibles avec les contraintes régionales, qu’il n’y a pas de superposition spatiale des différents objets et qu’il existe une zonalité des filons épithermaux autour du porphyre. Cette association spatiale de ces différents gisements ne peut donc résulter d’un télescopage.

Cette approche confirme la pertinence de la cible retenue avec un porphyre à Cu, des épithermaux à Pb–Zn, puis des épithermaux à Au, l’ensemble sur une surface restreinte permettant des études détaillées à l’échelle de la zone.

Enfin, sur le plan méthodologique, cette étude préliminaire montre que le couplage d’une étude structurale avec un logiciel de modélisation 3D comme

GOCAD se révèle être un outil performant en métallogénie, d'autant que de nombreux autres paramètres tels que la composition et la température du fluide hydrothermal, le positionnement des auréoles d'altération, les données isotopiques ainsi que des datations vont pouvoir être incorporés dans le modèle. À terme, il sera possible d'observer la répartition et l'évolution de ces paramètres et de mieux comprendre les connexions génétiques entre les gisements de type porphyre et épithermal de type *low-sulfidation*.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet financé par le GdR TRANSMET (Thème 1). Les auteurs remercient les sociétés DEVA Gold et Minvest d'avoir favorisé l'accès aux différents gisements ainsi que d'avoir apporté leur soutien logistique sur le terrain.

## Références

- [1] A.S. André-Mayer, J.L. Leroy, L. Bailly, A. Chauvet, E. Marcoux, L. Grancea, F. Llosa, J. Rosas, Boiling and vertical mineralization zoning: a case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, southern Peru, *Mineral. Deposita* 37 (2002) 452–464.
- [2] M. Borcos, H.G. Kräutner, G. Udubasa, M. Sandulescu, S. Nastaseanu, C. Bitoiianu, Map of mineral resources of Romania, Institute of Geology and Geophysics, Bucharest, 1983.
- [3] O. Cardon, Gisements de type porphyre et épithermal *low-sulfidation* : Relation spatiale ou génétique ? Exemple du secteur de Bolcana (monts Apuseni, Ouest Roumanie), DEA, université Henri-Poincaré, Nancy, 2004, 54 p.
- [4] G.R. Ewers, R.R. Keays, Volatile and precious metal zoning in the broadlands geothermal field, New Zealand, *Econ. Geol.* 72 (1977) 1337–1354.
- [5] T.P. Ghitulescu, M. Socolescu, Étude géologique et minière des monts Métallifères, *Ann. Inst. Geol. Rom.*, Bucarest XXI (1941) 1–284.
- [6] L. Grancea, Magmas et fluides hydrothermaux, relations entre volcanisme et gisements de type épithermal et porphyre, thèse, université Henri-Poincaré, Nancy, 2001, 263 p.
- [7] J.W. Hedenquist, R.W. Henley, Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand, *Econ. Geol.* 80 (1985) 1640–1668.
- [8] J.W. Hedenquist, J.B. Lowenstern, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits, *Nature* 370 (1994) 519–527.
- [9] J.-L. Mallet, *Geomodeling*, Applied Geostatistical Series, Oxford University Press, Oxford, UK, 2002.
- [10] E. Marcoux, Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 321 (1995) 723–735.
- [11] E. Marcoux, M. Jébrak, Butte, Montana, USA : un exemple de télescope et de district métallogénique stationnaire, *Chronique de la recherche minière* 535 (1999) 45–58.
- [12] V. Milu, Alteratii hidrotermale asociate zacamintelor de tip porphyry copper Bolcana si Rosia Poeni (Muntii Apuseni de Sud), PhD thesis, Facultea de geologie si goe fizica catera de mineralogie, Universitatea din Bucuresti, Bucuresti, 1999, 250 p.
- [13] V. Milu, J.-L. Leroy, P. Piantone, The Bolcana Cu–Au ore deposit (Metaliferi Mountains, Romania): first data on the alteration and related mineralisation, *C. R. Geoscience* 335 (2003) 671–680.
- [14] Z. Pecskey, J. Lexa, A. Szakacs, K. Balogh, I. Seghedi, V. Konecny, M. Kovacs, E. Marton, M. Kaliciak, V. Szeky-Fux, T. Poka, P. Gyarmati, O. Edelstein, E. Rosu, B. Zec, Space and time distribution of Neogene–Quaternary volcanism in the Carpatho-Pannonian Region, *Acta Vulcanol.* 7 (1995) 15–28.
- [15] I. Seghedi, H. Downes, A. Szakacs, P.R.D. Mason, M.F. Thirlwall, E. Rosu, Z. Pecskey, E. Marton, C. Panaiotu, Neogene–Quaternary magmatism and geodynamics in the Carpathian–Pannonian region: a synthesis, *Lithos* 72 (2004) 117–146.
- [16] R.H. Sillitoe, Erosion and collapse of volcanoes: Causes of telescoping in intrusion-centered ore deposits, *Geology* 22 (1994) 945–948.
- [17] S.F. Simmons, Magmatic contributions to low-sulfidation epithermal deposits, in: J.F. Thompson (Ed.), *Magmas, Fluids, and Ore Deposits*, Mineral Deposit Research Unit, Victoria, 1995, pp. 455–477.
- [18] S.F. Simmons, P.R.L. Browne, Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands–Ohaaki geothermal system: implications for understanding low-sulfidation epithermal environments, *Econ. Geol.* 95 (2000) 971–999.
- [19] G. Udubasa, R.O. Strusievicz, E. Dafin, G. Verdes, Mineral occurrences in the Metaliferi Mts., Romania (Excursion Guide), *Rom. J. Mineral.* 75 (1992) 3–35.
- [20] N.C. White, J.W. Hedenquist, Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration, *Soc. Econ. Geol. Newslett.* 23 (1995) 8–13.