

RÉSUMÉ

Pour faire face à la demande croissante de matières premières, la découverte de nouveaux gisements est essentielle pour l'avenir. Des études multidisciplinaires impliquant la géophysique et la géochimie permettent de mieux comprendre les systèmes hydrothermaux complexes. Ce projet se concentre sur l'est de l'île d'Elbe, célèbre pour ses gisements de fer exploités depuis l'Antiquité. Deux acquisitions (2D et 3D) de tomographie de résistivité électrique profonde (DERT) ont été réalisées pour explorer le skarn ferrique de Calamita afin de comprendre la structure du gisement et de montrer le potentiel de la DERT pour l'exploration des ressources minérales. Nous avons utilisé la technologie innovante Fullwaver, un système quasi sans fil qui permet une distribution flexible des récepteurs, résultant en une imagerie 3D complète des structures souterraines et de la distribution des corps minéralisés à une plus grande profondeur.

Le gisement de Calamita est constitué de corps minéralisés massifs (magnétite-hématite) et conducteurs, encaissés dans des marbres skarnifiés, recouvrant des micaschistes très résistifs de l'unité Toscane. De forts contrastes de résistivité indiquent la présence de conduits subverticaux conducteurs et non chargeables, reliant les différents corps skarnifiés en profondeur. Ces structures sont interprétées comme des zones de remontée paléo-hydrothermale, pointant vers la coupole d'une potentielle intrusion magmatique. En outre, des anomalies positives de chargeabilité prouvent la présence de corps minéralisés massifs cachés et de minéralisation disséminée en profondeur.

Le modèle génétique proposé consiste en : (1) l'intrusion d'un corps magmatique générant une extension locale entraînant des failles normales; (2) la remontée des fluides à l'origine

des skarns et le minerais dans les zones perméables et fracturées ; (3) la circulation latérale des fluides dans les marbres, formant le skarn et la minéralisation ; (4) l'interaction entre des fluides météoriques et des fluides magmatiques, après une remontée du système, formant les veines hydrothermales.

Dans un deuxième temps, l'étude se concentre sur les veines hydrothermales tardives présentes dans plusieurs gisements de l'île d'Elbe. Ces veines sont caractérisées par un assemblage adulaire + quartz + chlorite \pm calcite \pm titanite \pm anatase \pm albite \pm hématite. L'absence de zonations sur les images CL, une composition similaire proche de l'orthose pure pour toutes les veines et la teneur homogène en éléments majeurs dans les cristaux d'adulaire suggèrent un événement hydrothermal commun pour l'est de l'île d'Elbe.

L'analyse des isotopes de l'oxygène a été réalisée sur des minéraux provenant de veines hydrothermales. Les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ pour l'adulaire varient entre +8,3 et +9,7 à Calamita et de +7,0 à +10,8 pour d'autres localités de la côte orientale. La géothermométrie, basée sur l'analyse isotopique de l'oxygène sur des paires quartz-adulaire donne une température de formation de 180-220°C. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ pour le fluide coexistant varient entre -1 et +3 à 200°C, suggérant une origine mixte entre des fluides magmatiques et météoriques pour cet événement tardif.

Cette étude démontre le potentiel de la DERT pour la recherche fondamentale et l'exploration minière et souligne que les nouvelles technologies peuvent changer la donne pour l'exploration minière. Elle met également en évidence la circulation des paléo-fluides dans plusieurs gisements, apportant de nouveaux éléments sur la genèse complexe des gisements de fer et les veines hydrothermales sur l'île d'Elbe.

Mots clés : DERT, Fe-skarn, circulation des fluides, isotopes de l'oxygène, veines hydrothermales, île d'Elbe.

ABSTRACT

To face the growing demand for raw materials, the discovery of new mineral deposits is essential for the future. Multidisciplinary studies involving geophysics and geochemistry provide new insights to understand complex mineral systems. As a case study, this project focuses on Eastern Elba Island, famous for its Fe-ore deposits exploited since ancient times.

A 2D and 3D Deep Electrical Resistivity Tomography (DERT) survey has been conducted to explore the Calamita Fe-skarn deposit to decipher the subsurface structure of the deposit and evaluate the potential of DERT for mineral exploration. We used the innovative Fullwaver technology, a quasi-wireless system that enables a flexible distribution of receivers, resulting in a comprehensive 3D imaging of subsurface structures and ore bodies distribution at greater depth.

The Calamita deposit consists of conductive massive magnetite-hematite ore bodies hosted in skarnified marbles, overlying highly resistive micaschists of the Tuscan Units. Strong resistivity contrasts indicate the presence of sub-vertical conductive and non-chargeable pipes, connecting the various skarn bodies at depth. The pipes are interpreted as paleo-hydrothermal upflow zones, pointing towards the cupola of a potential causative magmatic intrusion. Additionally, high chargeable anomalies provide evidence for the presence of hidden massive ore bodies and disseminated mineralization at depth.

The proposed genetic model consists of: (1) intrusion of a magmatic body generating a local extension resulting in normal faulting; (2) vertical circulation of skarn and ore-forming fluids in the permeable and fractured zones; (3) lateral circulation of the fluids in the marbles, forming the skarn bodies and the economic mineralization ; (4) interaction between meteoric

fluids and magma-derived fluids, after an uplift of the system, to form the hydrothermal veins.

In a second time, the study focuses on late hydrothermal veins present in several deposits on Elba. They are characterized by an assemblage adularia + quartz + chlorite \pm calcite \pm titanite \pm anatase \pm albite \pm hematite. The lack of zoning on CL-images, similar composition close to pure K-feldspar for all the veins and the homogeneous content in major elements within adularia crystals suggest a common late low-temperature hydrothermal event for Eastern Elba. Oxygen isotope analysis was performed on minerals from hydrothermal veins. $\delta^{18}\text{O}$ values for adularia range between +8.3 and +9.7 in Calamita and from +7.0 to +10.8 for other locations along the Eastern coast. Oxygen isotope-based geothermometry on quartz-adularia pairs indicates temperature of formation of 180-220°C. $\delta^{18}\text{O}$ values for the coexisting fluid range between -1 and +3 at 200°C, suggesting a mixed magmatic-meteoric origin for the mineralizing fluids for this late hydrothermal event.

This study demonstrates the potential of DERT for fundamental research and mineral exploration purposes and highlights that new technologies may be a game changer for the exploration of ore deposits. It also highlights the paleo-fluid circulation in several deposits, bringing new insights into the complex genesis of hydrothermal Fe-ores and veins on Elba Island.

Keywords : Deep Electrical Resistivity Tomography, Fe-skarn, fluid flow, Oxygen isotope analysis, hydrothermal veins, Elba Island