

# MINERAL SYSTEMS WITH IOCG AND AFFILIATED DEPOSITS: PART 3 – METAL PATHWAYS AND ORE DEPOSIT MODEL

**LOUISE CORRIVEAU**

*Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Québec, Canada  
louise.corriveau@NRCan-RNCan.gc.ca*

**JEAN-FRANCOIS MONTREUIL**

*Red Pine Exploration, Ontario, Canada*

**ERIC POTTER**

*Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Ontario, Canada*

**OLIVIER BLEIN**

*Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, France*

**ANTHONY DE TONI**

*SOQUEM Inc., Québec, Canada*

*Recommended citation: Corriveau, L., Montreuil, J.-F., Potter, E.G., Blein, O., and De Toni, A.F., 2022, Mineral systems with IOCG and affiliated deposits: part 3 – metal pathways and ore deposit model, in Corriveau, L., Potter, E.G. and Mumin, A.H., eds., Mineral systems with iron oxide copper-gold (IOCG) and affiliated deposits: Geological Association of Canada, Special Paper 52, p. 205-245.*

## Abstract

Metasomatic iron-oxide and alkali-calcic alteration systems form a wide range of iron-oxide copper-gold (IOCG), iron oxide-apatite (IOA) and primary critical metal deposits. Economic resources include Ag, Au, Bi, Co, Cu, F, Fe, Mo, Nb, Ni, Pb, Pd, Pt, Re, rare earth elements (both heavy and light REE), U, V, W and Zn. Metal enrichments or byproducts include: Al, As, Ba, Cd, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Y and Zr. The ascent of voluminous saline to hypersaline fluid plumes in tectonically and magmatically active continental upper crust triggers these metasomatic systems. High disequilibrium between fluids and host rocks drives metasomatism and self-sustains the formation of consecutive iron-oxide and alkali-calcic alteration facies, each having distinct mineral assemblages and deposit types. This paper links alteration facies to the spectrum of deposit types using examples from the global districts examined in the companion Parts 1 and 2 papers and other contributions from this volume.

The ascent of a metal-laden hypersaline fluid plume first triggers regional-scale albitization in the upper crust (Facies 1 with Na alteration and transitional Facies 1–2 with Na-Ca-Fe alteration). Barren albitite corridors develop above sub-volcanic intrusions and along fault zones, and skarn forms amongst albitite in the presence of carbonate rocks. These steps recharge the fluid plume with metals, volatiles and other elements through extensive decarbonation and dissolution of minerals from host rocks. Proximal to the thermal cores of the systems, metal-rich fluids outflowing from Facies 1 trigger the onset Facies 2 (high-temperature Ca-Fe) alteration under very high temperatures, reaching 800 to 900°C in the presence of coeval intrusions. Iron skarn (e.g. Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt in China), IOA deposits (e.g. Southeast Missouri district, US) and their Fe-REE ± P, F, Nb or Fe-Ni variants also form at this stage, including REE ores formed through subsequent remobilization of primary REE endowment (e.g. Josette REE deposit, Québec). Crosscutting relationships between iron mineralization and albitite indicate that albitite precipitates first and is not linked to magnetite precipitation (e.g. Great Bear magmatic zone in Canada and the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt in China).

Fluids outflowing from Facies 2 form a transitional Facies 2–3 HT Ca-K-Fe alteration. Precipitation of Co, Bi, Au (± Cu, Ni) may form cobalt-bismuth deposits rich in iron silicates, iron sulphides or iron oxides. Tungsten, initially deposited in earlier skarn, can be remobilized to form additional mineralized zones in which Sb, Se, and Te are potential byproducts (e.g. NICO deposit in Canada). In most systems, Facies 2 directly evolves to Facies 3 (high-temperature K-Fe), which marks the onset of extensive brecciation and formation of magnetite-group IOCG deposits (Ernest Henry copper-gold deposit in Australia, Sue Dianne Cu-Au-Ag deposit in Canada). Palladium and platinum are enriched in some biotite-rich magnetite-group IOCG deposits (Dahongshan Fe-Cu-Au-Ag-Co-Pd-Pt deposit in China). Facies 4 alteration consists of locally mineralized K-skarn and barren K-felsite breccia (commonly as haloes around IOCG breccias or within K-skarn). These alteration types may subsequently host polymetallic deposits (Punt Hill in Australia) or form components of magnetite-to-hematite group IOCG deposits (e.g. Candelaria Cu-Au-Ag deposit, Chile). Facies 5 alteration zones (low-temperature K-Fe and Ca-Mg-Fe and their Ca-F-Fe and Si-Fe ± Ba variants) host a wide range of polymetallic deposits, including 1) hematite-group IOCG deposits with Ag, Au, Cu and U resources and LREE mineralization (e.g. Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit in Australia), and 2) an emerging group of iron oxide- to iron-poor deposits, including Au-Co, Mo-Re ± Cu ± Au and Au-Pb-Zn (e.g. Merlin, Mount Dore and Tick Hill deposits in Australia; Scadding deposit in Canada). Facies 6 (K, Si, Al) comprises epithermal mineralization and polymetallic vein systems (including late-stage ones).

Syn-metasomatic magma emplacement, tectonic and volcanic activity, and mixing of external fluids with the main fluid plume can induce a cyclical build-up or telescoping of alteration facies as well as retrogression of higher temperature mineral assemblages. The overprinting of albitite corridors by Facies 3 and Facies 5 fluids may generate albitite-hosted U and Au-Co  $\pm$  U deposits (e.g. Southern Breccia albitite corridor in Canada; Valhalla in Australia). Reactivation of systems via renewed fluid circulation driven by orogenesis, magmatism or burial periodically remobilize early metal endowments into mineralized veins and breccias; five-element (Ag, As, Bi, Co, Ni,  $\pm$  U) veins are an example of such processes. The paragenetic ore system model presented herein provides a framework to classify the variety of ore deposits encountered in these systems while providing effective and predictive mapping and exploration tools for IOCG and affiliated deposits, including their primary critical metal deposits. It also enables to better frame alteration facies and mineralization that are low in iron oxides but rich in iron silicates, iron carbonates and iron sulphides as well as those poor in iron within metasomatic iron and alkali-calcic (MIAC) systems.

#### Résumé

Les systèmes métasomatiques à altération alcali-calcique et à oxydes de fer forment un large éventail de gîtes primaires à métaux de base, critiques et précieux dont ceux à oxydes de fer-cuivre-or (IOCG), à oxydes de fer-apatite (IOA) et à métaux critiques. Ces gîtes contiennent des ressources économiques en Ag, Au, Bi, Co, Cu, éléments des terres rares (légères et lourdes), F, Fe, Mo, Nb, Ni, Pb, Pd, Pt, Re, U, V, W et Zn. Des enrichissements significatifs ou des sous-produits en Al, As, Ba, Cd, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Y et Zr sont aussi présents. L'ascension de volumineux panaches de fluides salins ou hypersalins dans des environnements continentaux à tectonique et magmatisme actifs déclenche les systèmes. Un déséquilibre important et persistant entre les fluides et l'encaissant provoque le métasomatisme et forme des séries successives de faciès d'altération alcali-calcique et à oxydes de fer. Chaque faciès précipite ses propres assemblages de minéraux et types de gîtes. Cet article relie le tout en utilisant les exemples de districts mondiaux examinés dans les Parties 1 et 2, dans cet article et dans les autres contributions de ce volume.

L'ascension d'un panache de fluides hypersalins chargés de métaux provoque d'abord une albitisation régionale dans la croûte supérieure (l'altération du Faciès 1 avec Na et du Faciès transitionnel 1-2 avec Na-Ca-Fe). Des couloirs d'albitite stérile se forment au-dessus des intrusions sub-volcaniques et le long des zones de failles. Du skarn se forme parmi l'albitite en présence de roches carbonatées. Ces étapes rechargent le panache de fluide en métaux, volatiles et autres éléments par la dissolution massive des minéraux des encaissants et leur décarbonation. Près des noyaux thermiques du système, les fluides sortants déclenchent une altération au Faciès 2 (Ca-Fe de haute température) à des températures très élevées, atteignant 800 à 900°C en présence d'intrusions syn-métasomatiques. Ce faciès donne lieu à des gîtes de skarn ferrifère (p. ex. ceinture métallogénique du fleuve Yangtsé moyen inférieur en Chine), à des IOA (p. ex. le district du sud-est du Missouri aux États-Unis) et de leurs variantes à Fe-ETR-( $\pm$ P, F, Nb) ou Fe-Ni résultant d'une remobilisation de l'enrichissement primaire en ETR (p. ex. le gîte à ETR Josette au Québec). Les relations de recoupement entre la minéralisation à fer et les couloirs d'albitite (p. ex. la zone magmatique du Grand lac de l'Ours au Canada et la ceinture métallogénique du fleuve Yangtsé moyen inférieur en Chine) indiquant que l'albitite se forme en premier et n'est pas une conséquence de la précipitation des oxydes de fer.

Dans les panaches où le potassium est disponible, les fluides s'échappant du Faciès 2 au sein de séquences sédimentaires forment une altération transitionnelle (Faciès 2-3 Ca-K-Fe à haute température). Le Co, Bi, Au ( $\pm$  Cu, Ni) y précipitent et peuvent former des gîtes de cobalt et bismuth à silicates, sulfures ou oxydes de fer. Le tungstène, ayant précipité dans du skarn, peut être remobilisé et enrichi tandis que Sb, Se et Te sont des sous-produits potentiels (p. ex. le gisement NICO au Canada). Dans la plupart des systèmes, le Faciès 2 évolue directement vers le Faciès 3 (K-Fe de haute température), une bréchification extensive et la formation de gîtes IOCG du groupe à magnétite (le gîte Ernest Henry en Australie et Sue Dianne au Canada). Des ressources de palladium et de platine sont connues au sein de gîtes IOCG du groupe à magnétite riches en biotite (p. ex. le gîte de Dahongshan en Chine). Le Faciès 4 est constitué de skarn potassique localement minéralisé et de brèche de felsite potassique stérile (généralement sous forme de halos autour de brèches IOCG ou dans du skarn potassique). Ces types d'altération peuvent encaisser des gîtes polymétalliques (Punt Hill en Australie) ou constituer des composantes de gîtes IOCG du groupe à magnétite vers hématite (p. ex. Candelaria au Chili). Le Faciès 5 (K-Fe et Ca-Mg-Fe de basse température ainsi que leurs variantes Ca-F-Fe et Si-Fe  $\pm$  Ba) précipitent un large éventail de gîtes polymétalliques. Cela comprend les gisements IOCG du groupe à hématite avec des ressources en Ag, Au, Cu et U et une minéralisation en ETR légères (p. ex. le gisement Olympic Dam en Australie), et un groupe émergent de gisements pauvres en oxyde de fer à pauvres en fer, y compris des gisements à Au-Co, Mo-Re $\pm$ Cu $\pm$ Au et Au-Pb-Zn (p. ex. les gisements Merlin, Mount Dore et Tick Hill en Australie; le gisement Scadding au Canada). Le Faciès 6 (K, Si, Al) comprend une minéralisation épithermale et des systèmes de veines polymétalliques, certaines tardives et issues de la remobilisation des métaux des systèmes mêmes.

La mise en place de magmas ou du tectonisme et volcanisme syn-métasomatiques ainsi que le mélange de fluides externes avec le panache de fluide principal peuvent induire une cyclicité dans la précipitation des faciès d'altération ou leur télescopage ainsi qu'une rétrogradation des assemblages de minéraux de plus haute température. La circulation de fluides aux conditions des Faciès 3 et Faciès 5 dans des couloirs d'albitite peut conduire à la formation de gîtes d'uranium ou à Au-Co $\pm$ U encaissés dans de l'albitite (p. ex. les indices du corridor d'albitite de la Southern Breccia au Canada et le gîte de Valhalla en Australie). La réactivation des systèmes, via de nouveaux épisodes de circulation de fluides lors d'orogénèses ou de mises en place de magmas, remobilise périodiquement les métaux des systèmes dans de nouvelles zones minéralisées. Des veines à cinq éléments (Ag, As, Bi, Co, Ni,  $\pm$  U) sont un exemple de tels processus. Le modèle métallogénique basé sur les faciès d'altération cadre la variété de gîtes minéraux rencontrés dans ces systèmes tout en fournissant des outils de cartographie et d'exploration efficaces et prédictifs pour les gisements IOCG et affiliés, y compris leurs variantes à métaux critiques. Le modèle permet aussi de mieux cadrer les faciès d'altération et les types de minéralisation pauvres en oxydes de fer mais riches en silicates de fer, carbonates de fer et sulfures de fer ainsi que ceux pauvres en fer au sein de système métasomatiques alcali-calciques et à fer.