



HAL
open science

Géodynamique et ressources minérales

Laurent Guillou-Frottier, Thierry Augé, Guillaume Bertrand

► **To cite this version:**

Laurent Guillou-Frottier, Thierry Augé, Guillaume Bertrand. Géodynamique et ressources minérales. Géosciences, 2012, 15, pp.22-27. hal-00723228

HAL Id: hal-00723228

<https://brgm.hal.science/hal-00723228>

Submitted on 8 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La dynamique interne de la Terre s'exprime en surface par la tectonique des plaques. Les sollicitations thermiques et mécaniques du manteau terrestre sur la lithosphère produisent des conditions favorables – *via* les fluides magmatiques – à la formation de gisements métallifères ou de pierres précieuses. Les études détaillées sur le fonctionnement des zones de subduction ou sur les interactions entre panaches mantelliques et cratons archéens apportent des éléments de réponses à des questions métallogéniques soulevées depuis plusieurs décennies.

Au large de Futuna, en contexte de volcanisme d'arrière-arc, les fumeurs noirs rejettent des fluides riches en sulfures. L'accumulation de ces minéraux forme les amas sulfurés que l'on retrouve quelques centaines de millions d'années après, mis en place sur les continents par la tectonique des plaques.

© J. Gouin, membre de la campagne Futuna 2010.

Black smokers off the Futuna Islands, located in a back-arc volcanic setting, release sulphide-rich fluids. The piling-up of these minerals leads to massive sulphide deposits that reappear several hundred million years after, once plate tectonics has accreted them on continents.

© J. Gouin, member of the Futuna 2010 campaign.



Géodynamique et ressources minérales



Laurent Guillou-Frottier

GÉOPHYSICIEN
BRGM, DIRECTION DES GÉORESSOURCES
l.guillou-frottier@brgm.fr

Thierry Augé

MÉTALLOGÉNISTE
BRGM, DIRECTION DES GÉORESSOURCES
t.auge@brgm.fr

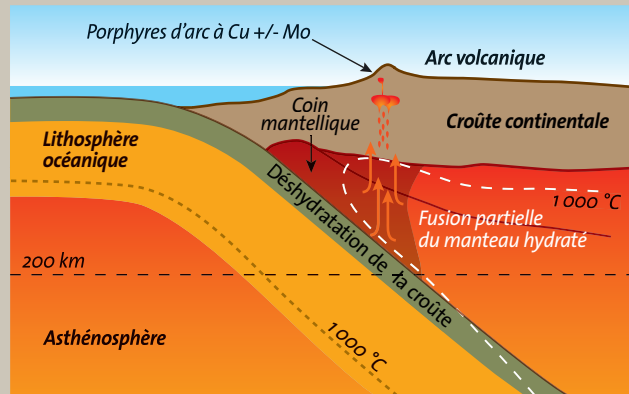
Guillaume Bertrand

GÉODYNAMICIEN
BRGM, DIRECTION DES GÉORESSOURCES
g.bertrand@brgm.fr

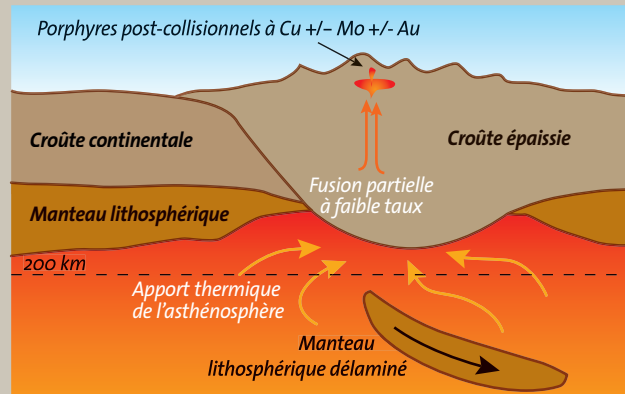
Métallogénie et géodynamique

Bien que de nombreux gisements métallifères trouvent leur origine dans des mécanismes sédimentaires ou superficiels (*encadré page 24*), plusieurs auteurs, en application de la tectonique des plaques, ont démontré dans les années 1970 les relations entre géodynamique et métallogénie. Sillitoe (1972) souligne que les porphyres cuprifères se concentrent préférentiellement au voisinage des zones de subduction, là où s'enfonce la lithosphère océanique dans le manteau (*figure 1a*). En 1977, Wright rassemble plus d'une quarantaine d'articles traitant des relations entre métallogénie et géodynamique. Si la théorie de la tectonique des plaques a permis de suggérer des relations génétiques entre dynamique de la lithosphère, du manteau et formation des gisements (*figure 1*), il aura fallu attendre plusieurs décennies pour que ces propositions soient mieux quantifiées et plus largement acceptées. Parallèlement au développement des techniques expérimentales au cours des années 1970-1990, d'importants progrès dans la compréhension de la géodynamique ont été réalisés grâce à l'arrivée d'ordinateurs plus performants. Les données métallogéniques issues du terrain et du laboratoire permettent aujourd'hui de mieux contraindre ces modèles.

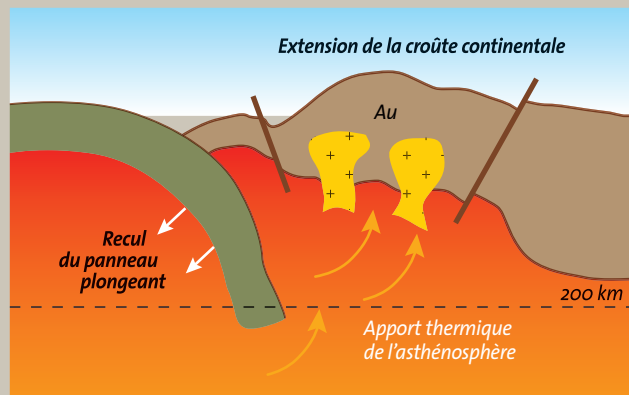
a) Subduction



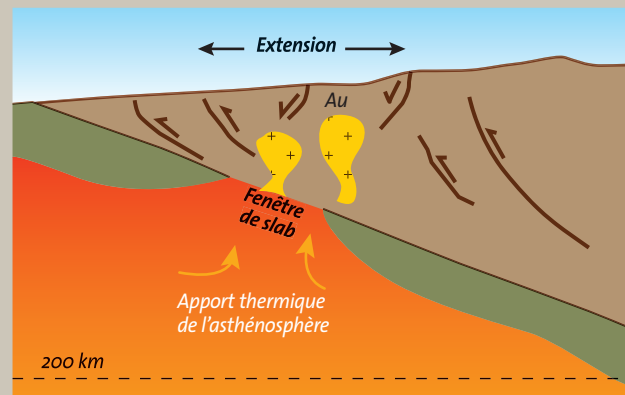
b) Épaississement crustal et délamination



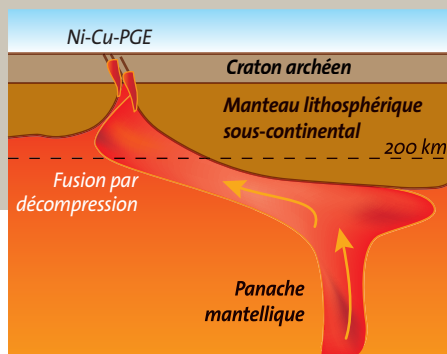
c) Slab Rollback : recul du panneau plongeant



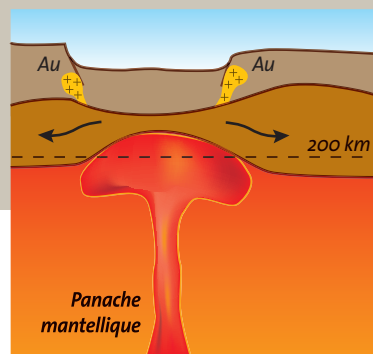
d) Slab Window : subduction d'une dorsale



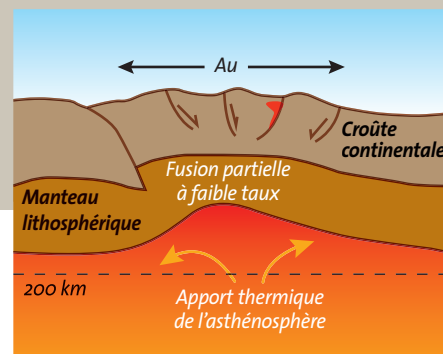
e) Interactions panaches-cratons



f) Érosion de la lithosphère



g) Extension post-collision



Panaches mantelliques

Les panaches mantelliques correspondent à l'une des manifestations convectives du manteau terrestre. Ces remontées de matériau profond, qui prennent la forme de champignons (*figures 1e-1f*), atteignent des vitesses pouvant dépasser le mètre par an. L'arrivée rapide de magmas à très haute température (1 500 à 2 000 °C) et l'impact mécanique du panache sur la lithosphère, engendrent des conditions favorables à la remontée, au travers de failles lithosphériques, de magmas ultramafiques (riches en fer et magnésium, représentatifs du manteau).

Fig. 1 : Exemples de contextes géodynamiques contrôlant la formation des gisements. Les schémas ne respectent pas nécessairement les échelles horizontales mais la profondeur approximative de 200 km est indiquée, et la largeur de chaque schéma est de l'ordre de 500 à 1 000 km.

D'après Goldfarb et al. (2001), Begg et al. (2010) et Richards (2011).

Fig. 1: Examples of geodynamics contexts determining the genesis of ore deposits. Diagrams are not necessarily scaled horizontally, but the approximate depth of 200 km is indicated, and the width of each diagram is approximately 500 to 1000 km.

From Goldfarb et al. (2001), Begg et al. (2010) and Richards (2011).

► DES MÉCANISMES DE BASSE TEMPÉRATURE À L'ORIGINE DE GISEMENTS MÉTALLIFÈRES

Thierry Augé – BRGM, Direction des Géoressources – t.auge@brgm.fr

La dynamique terrestre joue un rôle majeur dans la formation de nombreux gisements, notamment parce qu'elle génère des fluides qui collectent et transportent les métaux. Ainsi, certains gisements peuvent être directement issus de magmas ou de fluides hydrothermaux dérivant de magmas. De plus, les anomalies thermiques liées à la dynamique terrestre peuvent provoquer des transformations métamorphiques de la croûte, avec libération de fluides métamorphiques qui, à leur tour, pourront transporter et déposer des métaux. Il existe cependant des processus de minéralisation où la géodynamique est moins directement, voire pas du tout impliquée. Les formations de fer rubanées (BIF⁽¹⁾) qui constituent les principaux gisements de fer d'Afrique sont des roches sédimentaires d'origine chimique, formées lors du passage du fer ferreux (soluble) à l'état ferrique (insoluble), liée à l'oxydation progressive des océans. Certains gisements de manganèse sont dus au même processus. Le fer oolithique (minette) est également d'origine sédimentaire. De même, les phosphates sédimentaires représentent 85 % de la production mondiale. La phosphatisation est un processus complexe. Les phosphates se forment dans des contextes

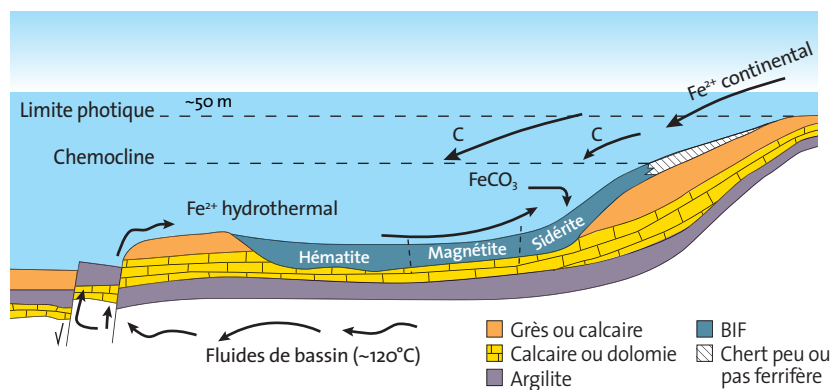
riches en carbonates, le phosphore provenant de restes d'organismes et des eaux océaniques. Des déjections d'oiseau (guanos) peuvent également former des gisements exploitables. Les processus diagénetiques qui conduisent à la consolidation des sédiments avec migration des fluides résiduels peuvent également, selon la nature des sédiments, la composition et les conditions physico-chimiques des fluides, engendrer des gisements métallifères (article Cathelineau et al., Géosciences n° 13 p. 56-63). On peut citer par exemple les grès à cuivre et uranium, les carbonates à plomb-zinc, les gisements de barytine et fluorine. L'altération supergène, qui déstabilise les minéraux dans des conditions de subsurface, peut également conduire à des enrichissements résiduels en certains métaux, jusqu'à former des gisements. C'est le cas du nickel latéritique (cf. schéma dans article Robineau,

Géosciences n° 14, p. 55), de l'aluminium des bauxites, ou du manganèse supergène. Dans certains cas, l'altération supergène a comme effet de rendre économique une concentration qui ne l'est pas dans un gîte primaire. C'est le cas de certains BIF, de gisements d'or ou du niobium et des terres rares dans les carbonatites.

Enfin, dans les conditions favorables, les minéraux lourds stables, libérés à la faveur de l'altération de la roche hôte, peuvent se concentrer pour former des placers, qui pourront donner des concentrations exploitables (or, platine, diamant, ilménite, cassitérite, zircon...). Selon les environnements, on distingue des placers éluviaux (minéraux restés en place), fluviaux ou marins (sables de plage). ■

(1) BIF : Banded Iron Formations : formations de fer rubanées.

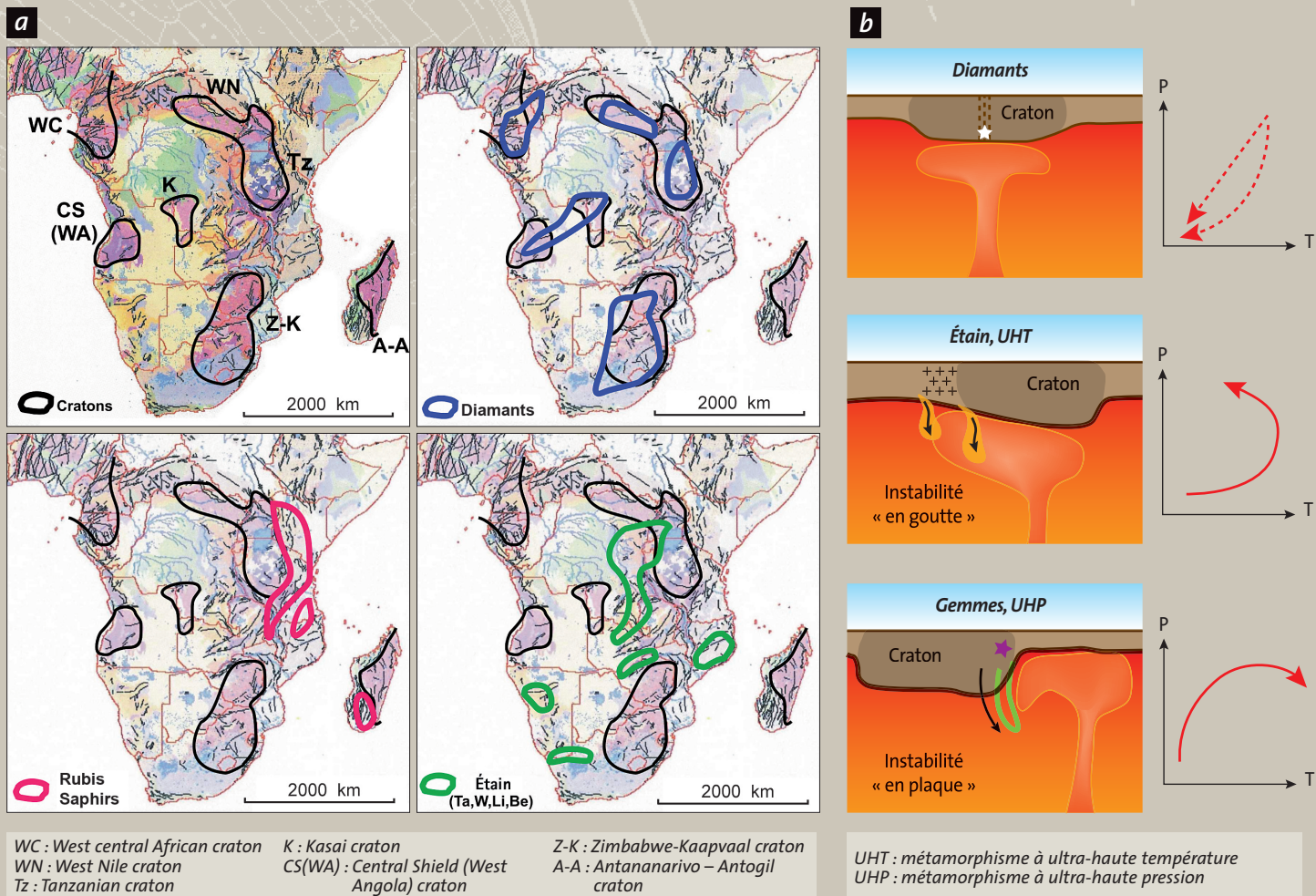
Genèse et environnement de dépôt des formations de fer rubanées (BIF).
Genesis and deposition environment of banded iron formations (BIF).
D'après Klein et Beukes, 1989.



Alors que les cratons archéens (noyaux anciens des blocs continentaux) ont résisté au recyclage de la croûte par la dynamique mantellique, leurs ceintures protérozoïques sont le lieu de grandes discontinuités crustales et de fortes déformations. C'est au voisinage de ces sutures que l'on retrouve les minéralisations à platinoïdes, associées aux gisements de nickel-cuivre (Ni-Cu-PGE) : les gisements de Thompson, Duluth, Sudbury, Voisey's Bay, Norilsk, Jinchuan ou Pechenga se situent tous en bordure d'un craton [Begg et al. (2010)]. L'arrivée d'un panache sous un craton se traduit par la remontée de matériau mantellique jusqu'au niveau des bordures fracturées, où le taux de fusion des roches mantelliques est important (figure 1e).

La corrélation entre régions diamantifères et cratons archéens est également reconnue. La dissymétrie dans la répartition des gemmes en Afrique de l'Est est troublante. Cette « ceinture de gemmes » (rubis, saphirs, grenats, tourmalines) s'étend sur près de 3 000 km, de la bordure est du craton Tanzanien à la bordure ouest du craton de Madagascar (figure 2a). Des modélisations

“ La corrélation entre régions diamantifères et cratons archéens est reconnue. ”



▲ Fig. 2 : a) Répartition des cratons archéens du sud de l'Afrique, des gisements de diamants, de rubis et saphirs (bordure est de la Tanzanie et ouest de Madagascar), et des gisements d'étain. b) Selon la position du panache mantellique par rapport au craton, des instabilités dynamiques particulières sont créées et expliquent l'asymétrie observée ainsi que les données thermobarométriques. D'après Guillou-Frottier et al. (2012).

Fig. 2: a) Spatial distribution of Archean cratons in southern Africa, diamond, ruby and sapphire deposits (eastern margin of Tanzania and western margin of Madagascar), and of tin deposits. b) Depending on the location of the mantle plume with respect to the cratonic block, particular dynamic instabilities are created and explain the observed asymmetry as well as the thermobarometric data. From Guillou-Frottier et al. (2012).

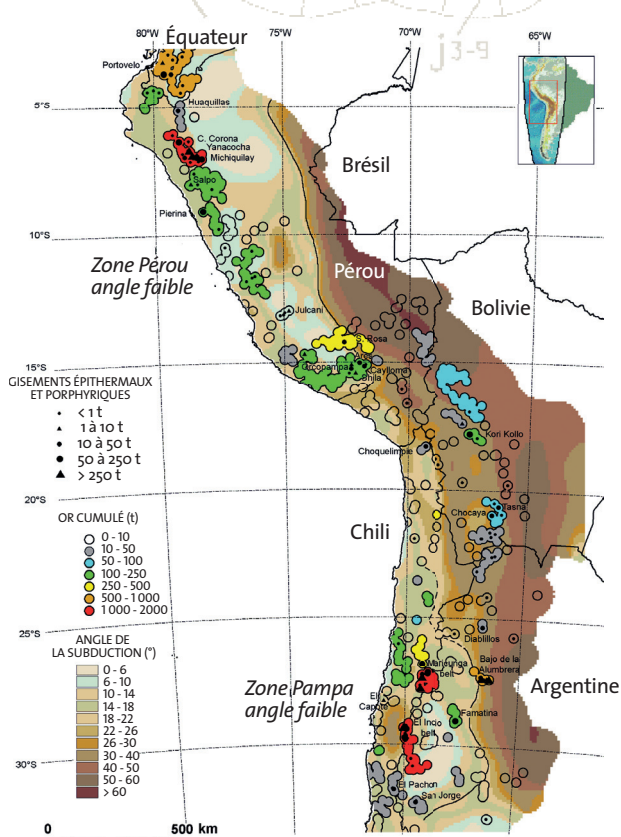
numériques de l'interaction panache-craton montrent que les panaches favorisent soit la fusion crustale, associée à des gisements d'étain par exemple, soit l'enfouissement profond et isotherme du matériau crustal, comme l'enregistrent les roches porteuses de gemmes (figure 2b). Des instabilités gravitationnelles « en goutte » ou « en plaque » sont associées à ces interactions, et les données thermobarométriques confirment ces deux comportements [Guillou-Frottier et al. (2012)].

Dorsales, rifts continentaux et failles lithosphériques

Les déchirures de la lithosphère permettent à la chaleur de la Terre profonde de s'évacuer au travers de zones fortement perméables, comme le montrent les fumeurs noirs (photo d'entrée) qui rejettent des minéraux sulfurés ainsi que les gisements géothermiques situés sur dorsales émergées en contexte salin (Saltion Sea, USA ; Asal, Djibouti).

Sur les continents, les failles crustales majeures s'étendent sur plusieurs centaines de kilomètres. Elles représentent des zones fortement perméables, propices à la migration des fluides minéralisateurs. Si la répartition de ces gisements est contrôlée par des subtilités structurales au sein de la zone faillée, ce sont bien les discontinuités majeures, donc reliées à la géodynamique régionale, qui concentrent les minéralisations (failles d'Ashanti au Ghana, de Cadillac au Canada ou de Boulder-Lefroy en Australie).

Lorsqu'une plaque continentale est sur le point de se rompre par écartement de 2 blocs, l'apport thermique de l'asthénosphère et le réseau des failles majeures associées (figures 1f-1g) favorisent la mise en place de minéralisations. Ces épisodes de rifting, comme actuellement en Tanzanie, peuvent être associés à des éruptions de laves carbonatitiques, pauvres en silice mais particulièrement riches en terres rares, phosphore, niobium, uranium, thorium, etc.



Subduction océanique

L'enfoncement de la lithosphère océanique dans le manteau montre une variété de comportements liés à l'angle de subduction, à la vitesse et à l'âge de la plaque. Ces caractéristiques dynamiques vont ainsi déterminer la nature du magma généré dans le coin mantellique (figure 1a) et donc la typologie des gisements associés [Richards (2011)].

La géométrie tridimensionnelle de la plaque plongeante influence également son potentiel à générer des fluides minéralisateurs. À grande échelle, les zones à faible pendage de la plaque plongeant sous les Andes (au niveau du Pérou et au centre du Chili) correspondent aux zones aurifères les plus fertiles, comme le montre la figure 3 [(Billa et al., 2004) et SIG Andes, <http://gisandes.brgm.fr>].

“ Les zones à faible pendage de la plaque plongeant sous les Andes correspondent aux zones aurifères les plus fertiles. ”

Fig. 3 : Position et fertilité des districts aurifères en fonction de l'angle de la plaque en subduction (plan de Benioff). Le contenu en or est cumulé sur des distances de 25 km. On note la corrélation entre districts fertiles et subduction à faible pendage.

◀ D'après Billa et al. (2004).

Fig. 3: Location and potential of gold districts with respect to subduction dip angle (Benioff zone). Cumulative gold content is calculated over buffer zones of 25 km. Note the correlation between districts of high gold content and zones with shallow subduction dip angle.

From Billa et al. (2004).

Le panneau plongeant peut également reculer au sein du manteau – on parle de « slab rollback » (figure 1c). Dans ce cas, la croûte chevauchante se retrouve en régime extensif. Alors que les gisements associés à un panneau plongeant relativement immobile par rapport au manteau seront à dominante porphyrique, ceux associés au plongement d'une plaque de petite dimension qui recule dans le manteau seront plutôt de type épithermal (Bertrand et al., 2011, encadré ci-après).

Obduction océanique

Dans certaines conditions, la plaque océanique peut se trouver à l'affleurement en position de chevauchement sur une plaque continentale. On parle alors d'obduction et de nappes ophiolitiques (Oman, Nouvelle-Calédonie, Chypre...). Les concentrations minérales formées *in situ* en contexte océanique deviennent alors accessibles, comme les sulfures massifs à Chypre ou en Oural. De même, des concentrations de chromite formées dans le manteau supérieur se retrouvent à l'affleurement (gisements de Nouvelle-Calédonie ou de Kempersai au Kazakhstan). Si le manteau ultramafigue affleure, son altération en contexte tropical peut donner lieu à la formation de gisements de nickel supergène (l'enrichissement est alors relié aux processus physico-chimiques de la surface, comme par exemple en Nouvelle-Calédonie, figure 4).

Fig. 4 : Semelle serpentinisée de la péridotite de Nouvelle-Calédonie, site de Vavouto, projet Koniambo.

Fig. 4: Serpentinized base of the New Caledonian peridotite, Vavouto area, Koniambo Project.

© BRGM – L. Bailly.



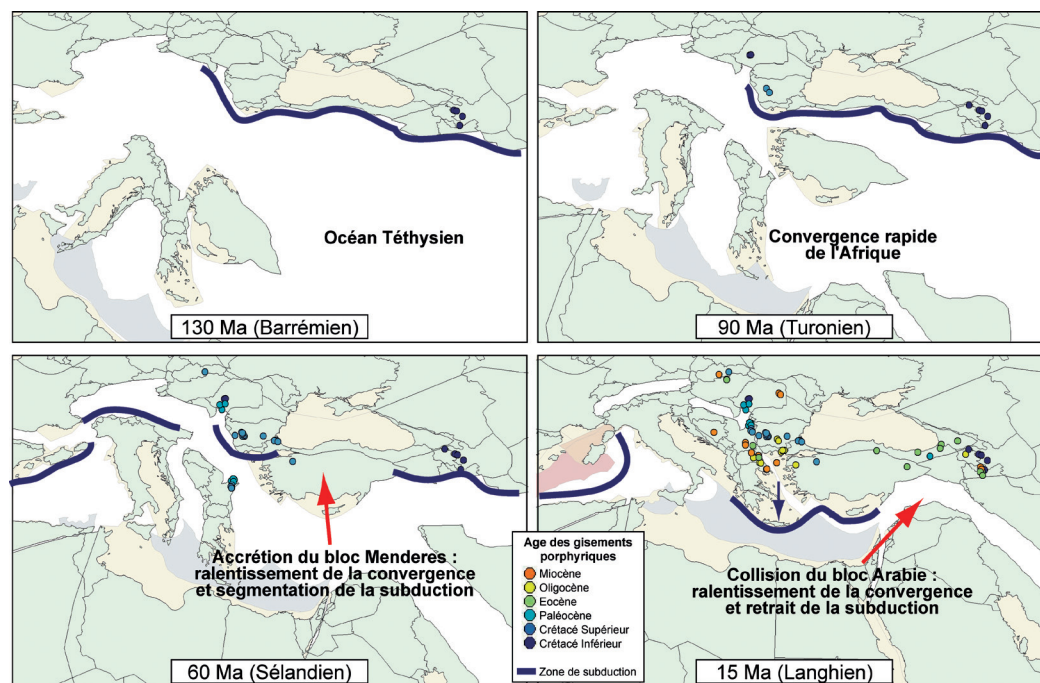
▶ ÉTUDE 4D DE LA DISTRIBUTION DES MINÉRALISATIONS : L'APPROCHE PALÉOGÉOGRAPHIQUE

Guillaume Bertrand – BRGM, Direction des Géoressources – g.bertrand@brgm.fr

L'étude des liens entre processus géologique et distribution des minéralisations est une étape essentielle pour comprendre la formation des gisements et améliorer leur prospection. Pour ce faire, il est important de s'affranchir des déformations ultérieures qui compliquent les interprétations. Un nouvel axe de recherche, qui permet le développement des outils de calcul et de nouveaux modèles géodynamiques, est l'étude paléotectonique de la genèse des gisements. Cette approche permet, au travers de reconstructions

paléogéographiques, de comprendre la formation des gisements dans un contexte géodynamique. À titre d'exemple, une étude récente du BRGM [Bertrand (2011)] montre que les porphyres cuprifères de l'Europe du sud-est se sont mis en place en plusieurs étapes dans des contextes cinématiques spécifiques (voir aussi carte du SIG Europe, couverture de ce numéro).

Corrélativement, les minéralisations peuvent à leur tour servir de marqueurs des contextes géodynamiques qui se sont succédés durant l'histoire de la Terre. ■



▲ Reconstructions paléogéographiques de la fermeture de l'océan téthysien occidental montrant l'influence du contexte géodynamique sur la mise en place des gisements porphyriques d'Europe du sud-est du Crétacé au Néogène (130 à 15 Ma). D'après Bertrand (2011).

Paleogeographic reconstructions of the western Tethyan Ocean closure showing the influence of the geodynamic context on the occurrence of southeastern European porphyry deposits from Cretaceous to Neogene times (130 to 15 My).

From Bertrand (2011).

Perspectives

Depuis une vingtaine d'années, quelques équipes dans le monde étudient des modèles géodynamiques de grande échelle dans un objectif de recherche métallogénique. Parallèlement, les progrès réalisés dans la compréhension des crises géologiques et climatiques de la planète ont été appliqués aux crises métallogéniques. Aujourd'hui, la démarche réciproque, à savoir l'utilisation

des données métallogéniques pour la compréhension de la dynamique du globe, correspond à une voie de recherche originale, d'autant plus réalisable que les reconstructions paléogéographiques et les simulations tridimensionnelles de la dynamique terrestre sont de plus en plus performantes (encadré Jébrak, page 88 ce numéro). ■



Geodynamics and mineral resources

The genesis of an ore deposit requires specific physical and chemical conditions. While concentration processes are controlled by small-scale mechanisms, conditions favourable to forming an ore deposit are driven by thermo-mechanical processes that operate at the mantle and lithospheric scales. Mineralization processes involve the presence of drains and thermal and mechanical traps, which result from thermo-mechanical anomalies. Depending on the large-scale phenomenon involved (e.g. impact of a mantle plume beneath a craton, fast subduction of a hydrated oceanic lithosphere), heat transfer processes could lead to a particular form of magmatism and atypical rheological behaviour favouring the formation of specific ore deposits. Although it has long been recognized that porphyry copper deposits are located mainly around the Pacific "Ring of Fire", new metallogenic models detailing these relationships are still being proposed. For example, when an oceanic trench retreats, the formation of Au-epithermal deposits would occur rather than that of porphyry-Cu deposits, which are more easily generated when the oceanic trench is stationary. Today, studies on spatial and temporal distribution of mineral resources represent a new tool for improving our understanding of mantle and lithosphere dynamics.

Bibliographie : Begg G.-C., Hronsky J.-A.-M., Arndt N.-T., Griffin W.-L., Reilly S.-Y.-O., Hayward N. (2010) – Lithospheric, cratonic and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulphide deposits, *Economic Geology*, 105, 1057-1070. Bertrand G., Loiselet C., Guillou-Frottier L., Billa M., Pelletier E., Maldan F., Cassard D. (2011) – Anomalous gold deposits along SE Europe Tethyan margin: a signature of return-induced upper mantle flow around hellenic slab edges, presented at 2010 Fall Meeting, AGU, San Francisco, USA, 13-17 December. Bertrand G. (2011) – Reconstructions paléogéographiques : un nouveau domaine de recherche au service de la prédictivité des ressources minérales au BRGM. Rapport BRGM/RP-60651-FR, 65 p., 40 Fig., 1 Ann. Billa M., Cassard D., Lips A.-L.-W., Bouchot V., Tourlière B., Stein G., Guillou-Frottier L. (2004) – Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS, *Ore Geology Reviews*, 25, 39-67. Goldfarb R.-J., Groves D.-I., Gardoll S. (2001) – Orogenic gold and geologic time: a global synthesis, *Ore Geology Reviews*, 18, 1-75. Guillou-Frottier L., Burov E., Cloetingh S., le Goff E., Deschamps Y., Huet B., Bouchot V. (2012) – Plume-induced dynamic instabilities near cratonic blocks: implications for P-T-t paths and metallogeny, *Global Planetary Change*, in press. Klein C., Beukes N.-J. (1989) – Geochemistry and sedimentology of a facies transition from limestone to iron-formation deposition in the Early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Economic Geology*, 84, 1773-1774. Richards J.-P. (2011) – Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins, *Ore Geology Reviews*, 40, 1-26. Sillitoe R.-H. (1972) – A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits, *Economic Geology*, 67, 184-197. Wright J.-B. (ed.) (1977) – Mineral deposits, continental drift and plate tectonics. Benchmark papers in geology; Vol. 44, Dowdon, Hutchinson and Ross, Inc., 418p.