

Les techniques d'exploration minière utilisées pour la recherche de l'or

Par Jérémie MELLETON
Éric FOURNIER
et Éric GLOAGUEN

Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

L'or est un métal précieux et sidérophile généralement présent en très faible concentration (de l'ordre du ppb) dans des roches de la croûte continentale terrestre. Les processus métallogéniques à l'origine de la formation de gisements économiquement exploitables, principalement par le biais de circulations hydrothermales, peuvent parfois atteindre des taux d'enrichissement de l'ordre de 10 000. La classification des gisements d'or est complexe, mais les connaissances acquises sur les principaux types permettent d'élaborer des guides servant à leur recherche, tenant compte notamment de leurs contextes géologiques particuliers, des altérations accompagnatrices ou de leurs signatures géochimiques spécifiques. Les approches d'exploration reposent sur la géologie, la géochimie et la géophysique. Aujourd'hui, le Canada, l'Australie, l'Amérique latine et l'Afrique concentrent les efforts d'exploration.

Introduction

Comme pour toute substance métallique, l'exploration, premier stade de la recherche d'un gisement d'or économiquement exploitable, repose sur une succession d'étapes permettant de se focaliser sur une ou des cibles minières, partant d'une ou de plusieurs occurrences minérales favorables pour aller vers des concentrations suffisamment élevées et techniquement exploitables pour permettre l'ouverture d'une mine. Ainsi, la phase d'exploration, qui correspond à l'acquisition de données de plus en plus fines, débute par le stade du prospect à partir de quelques occurrences aurifères identifiées. La phase suivante a pour but de définir une enveloppe minéralisée (ressource) par l'estimation du tonnage et de la teneur possibles à partir d'une connaissance large, reposant sur une représentation du gisement en trois dimensions réalisée grâce à des sondages. Enfin, l'exploration s'achève avec la définition des corps minéralisés (réserve) dont le tonnage et la teneur sont prouvés grâce à la réalisation d'une étude complète de faisabilité qui démontre, entre autres, que l'or peut être extrait du minerai pour un coût qui rend le projet rentable économiquement. Même après l'ouverture d'une mine, l'activité d'exploration est généralement maintenue dans le but d'augmenter les ressources et les réserves, ainsi que la durée de vie de l'exploitation.

Avant d'engager la phase d'exploration *stricto sensu*, le choix est fait d'une zone plus ou moins large à prospecter qui repose sur les connaissances disponibles sur la métallogénie de l'or (c'est-à-dire des processus géolo-

giques formant les gisements) et sur les différentes données disponibles dans la littérature (contexte géologique, historique minier). La concaténation de ces informations, qui peut aussi être réalisée par le biais d'une approche de favorabilité s'appuyant sur différentes méthodes probabilistes, permet d'identifier des zones présentant des caractères géologiques susceptibles d'être propices à la présence du type de gisement recherché. Ces dernières années, les méthodes numériques d'analyse et de traitement des données massives (« *big data mining* ») ont pris une place de plus en plus importante dans cette phase de recherche et de choix de cibles, notamment dans les districts historiquement connus (exploration « *brownfield* » des Anglo-Saxons).

La seconde étape consiste en la mise en œuvre d'une succession de méthodes d'exploration, basées sur la géologie, la géophysique et la géochimie. Il n'en demeure pas moins que la majorité des découvertes réalisées reposent sur une compréhension géologique des gisements, aussi bien pour des environnements miniers historiques que pour des secteurs vierges (SILLITOE et THOMPSON, 2006).

Où trouver l'or ?

Généralités et propriétés chimiques de l'or

Élément chimique de symbole Au et de numéro atomique 79, l'or est un métal noble (il est résistant à la corrosion et à l'oxydation). Un seul isotope naturel (^{197}Au) est connu. L'or est un élément sidérophile et modérément volatil.



Photo © A©Emile LUIDER/REA Instructions

Super Pit, mine d'or à ciel ouvert située près de Perth, Australie occidentale.

« Comme pour toute substance métallique, l'exploration, premier stade de la recherche d'un gisement d'or économiquement exploitable, repose sur une succession d'étapes permettant de se focaliser sur une ou des cibles minières, partant d'une ou de plusieurs occurrences minérales favorables pour aller vers des concentrations suffisamment élevées et techniquement exploitables pour permettre l'ouverture d'une mine. »

Son état d'oxydation le plus commun est 0, mais il peut aussi varier de -I à +IV, Au(I) et Au(III) étant les deux états d'oxydation majoritaires. Cette propriété lui permet de pouvoir former plusieurs composés. Les ions aureux monovalents Au(I) et trivalents auriques Au(III) ne sont en effet pas des états connus sous la forme aqueuse. En solution, l'or est donc présent sous forme de différents complexes : par exemple, $[AuHS]^-$, $[Au(CN)_2]^-$, $[AuCl_2]^-$, $[AuCl]^0$, $[Au(OH)_4]^-$, $[AuCl_4]^-$, $[Au(NH_3)_2]^+$ (BOYLE, 1979 ; BENEDETTI, 1989).

Quelques grands traits géochimiques de l'or

En contexte hydrothermal, la solubilité de l'or est contrôlée soit par des complexes sulfurés, soit par des complexes chlorurés, en fonction des conditions des milieux dans lesquels on le trouve (température, acidité, concentrations importantes en Cl ou H_2S et HS). Aussi, la précipitation de sulfures à partir d'une solution suite à des changements de conditions physico-chimiques entraîne généralement la précipitation contemporaine de l'or. Pour la plupart des gisements, celui-ci précipite à partir de fluides hydrothermaux riches en sulfures présentant des températures supérieures à 200 °C (PHILIPPS et EVANS, 2004). Une forte concentration du CO_2 dans le fluide, liée aux réactions métamorphiques de décarbonatation ou du dégazage

du manteau, contrôle aussi fortement la solubilité de l'or (tamponnage du pH). Dans des contextes supergènes, l'or présente une bonne affinité avec la matière organique, il peut ainsi se retrouver un peu enrichi dans des roches en présentant une forte proportion, comme dans le cas des schistes noirs.

L'or se trouve le plus souvent à l'état natif, mais on peut aussi le trouver sous la forme d'un alliage, principalement avec l'argent (il forme ainsi l'électrum), voire éventuellement le cuivre ou les métaux du groupe du platine. Il peut aussi être présent dans d'autres minéraux, comme des tellurures, des sélénures, des antimoniures ou des bismuthiures. L'Association internationale de minéralogie (IMA) reconnaît ainsi l'existence de trente-quatre espèces minérales porteuses d'or.

Les teneurs en or rencontrées dans les roches sont généralement très basses. Ainsi, les concentrations varient de 0,05 à 20 ppb dans les roches ignées, sédimentaires ou métamorphiques non minéralisées (PITCAIRN, 2011). À une échelle plus globale, la valeur moyenne pour la croûte continentale supérieure est de 1,5 ppb (ng/g), celle de la croûte moyenne est de 0,85 ppb et est de 1,6 ppb pour la croûte inférieure (RUDNICK et GAO, 2003). De plus, les chondrites contenant cent fois plus d'or que la croûte

continentale moderne, certains auteurs en ont conclu que la plus grande part de l'or sur Terre s'est concentrée dans le noyau au cours de la différenciation de la Terre primitive (McDONOUGH et SUN, 1995 ; WOOD *et al.*, 2006). Les concentrations en or diminuent systématiquement avec l'accroissement du degré de métamorphisme (PITCAIRN, 2011), ce qui souligne l'importance des processus métamorphiques dans la mobilisation de l'or. Ainsi, les sources de l'or sont attribuées à des metabasaltes et/ou à des métasédiments (PITCAIRN *et al.*, 2015) desquels l'or est libéré par les fluides issus des réactions métamorphiques lors du passage du faciès schiste vert au faciès amphibolite (augmentation de la pression et de la température). Ces fluides sont ensuite drainés et focalisés par des failles d'échelle crustale et piégés dans les lithologies qui permettent la réduction des complexes aurifères (PHILLIPS et POWELL, 2010). Ces processus se dérouleraient principalement dans les zones de convergences ayant impliqué la subduction d'une croûte océanique, c'est le modèle « or orogénique » (GROVES et SANTOSH, 2016).

Les gisements d'or exploités peuvent aujourd'hui présenter des teneurs inférieures à 3 g/t (BRADY, 2017), même si localement les valeurs atteintes peuvent être comprises entre 30 et 100 g/t, ce qui implique des processus métallogéniques permettant des enrichissements de 100 à 10 000 fois (FRIMMEL, 2008).

Les principaux types de gisements d'or

L'or est présent dans un large spectre de types de gisements. Pour cette contribution, nous nous en tiendrons aux types présentant le plus d'intérêt sur le plan économique. La classification des gisements d'or est un exercice complexe, et dans certains cas elle est encore discutée (ROBERT *et al.*, 2007). En effet, elle intègre des paramètres divers comme l'environnement géologique de formation (par exemple, des gisements de type « orogénique », la roche hôte (par exemple, le type « *sediments hosted* »), une association paragenétique (par exemple, du type IOCG – Iron Oxyde Copper-Gold) ou une localité type (le type « Carlin »). On peut cependant identifier des gisements d'or de façon plus simple, ce peut être des gisements formés par des fluides issus de réactions métamorphiques (or orogénique *lato sensu*) ou des gisements génétiquement associés à du magmatisme principalement felsique (intrusions, porphyres, carlin, épithermaux).

Robert *et al.* (2017) distinguent les principaux types de gisements parmi les 103 gisements les plus importants (ceux dont les réserves sont supérieures à 10 millions d'onces, soit 283 tonnes) :

- Les gisements de type orogénique (GROVES *et al.*, 2016), que l'on trouve dans les contextes de collision entre deux plaques lithosphériques. Ces gisements se présentent généralement sous la forme de veines de quartz et de carbonates ou de disséminations de ces mêmes minéraux, en association avec des sulfures comme la pyrite ou l'arsénopyrite. Le contexte structural constitue l'élément majeur du contrôle de la mise en place de la minéralisation, notamment les zones de cisaillement. Plusieurs sous-types sont décrits selon les

roches encaissantes : les roches vertes, principalement des domaines archéens ou protérozoïques, les sédiments détritiques de type turbidite⁽¹⁾, et les formations de fers rubanés (BIF).

- Les gisements associés aux intrusions magmatiques réduites (différents sous-types en fonction de la profondeur de mise en place et des caractéristiques des zones de convergence lithosphérique) ou oxydées. Les gisements associés à ce dernier type sont symptomatiques des contextes d'arcs volcaniques : ils comprennent les porphyres⁽²⁾, les skarns⁽³⁾ et les épithermaux qui correspondent à des gisements formés à des profondeurs proches de la surface (< 1,5 km) dans des arcs volcaniques.
- Les gisements de type Carlin (Nevada, États-Unis) : une dissémination de l'or dans des calcaires ou siltites décalcifiés dans des contextes de marges continentales passives. L'or est généralement inclus dans le réseau de la pyrite.
- Les gisements de type Witwatersrand (Afrique du Sud), qui constituent les plus grosses réserves mondiales et ont entraîné la construction des mines les plus profondes du monde (près de quatre kilomètres de profondeur pour la mine de Mponeng) et correspondraient à des paléoplacers⁽⁴⁾ métamorphisés et localisés dans des bassins bordés de failles.
- Les amas sulfurés aurifères, dans des environnements d'arrière-arcs ou de ceintures de roches vertes.

Sans entrer dans le détail de ces différents types de gisements, il est néanmoins possible de distinguer différents contextes géologiques favorables à leur formation. Cette connaissance pourra ainsi guider les prospecteurs dans leur recherche d'une zone propice à la découverte d'un gisement. Les altérations et signatures géochimiques typiques pourront constituer les principaux critères de leur recherche.

D'un point de vue économique, les gisements de type Witwatersrand représentent les ressources les plus importantes. Ils sont suivis par les gisements associés aux intrusions magmatiques oxydées, notamment les porphyres et les skarns.

Les méthodes d'exploration

Les méthodes d'exploration géologique

Les méthodes d'exploration géologique reposent principalement sur la recherche sur le terrain, par un géologue prospecteur, de signes pouvant indiquer la présence d'une occurrence minéralisée. Il s'agit dans ce cas, à partir d'itinéraires préparés, d'étudier les affleurements, les éboulis

(1) Roche sédimentaire détritique mise en place sous l'effet de l'écoulement des sédiments le long d'une pente sous-marine.

(2) Roche magmatique caractérisée par des cristaux de grandes tailles (feldspath) dans une matrice beaucoup plus fine.

(3) Roche issue de la transformation d'une roche carbonatée au contact d'une intrusion magmatique.

(4) Un placer est un gisement issu d'un processus de concentration minérale détritique dans des sédiments alluviaux par des eaux courantes.

et les volantes afin d'y déceler d'éventuels marqueurs de minéralisations. Ces marqueurs peuvent correspondre à la présence d'or natif, de pyrite et/ou d'arsénopyrite, à la présence d'un système de veines de quartz dans un contexte favorable ou de signes d'altération d'origine hydrothermale (transformation localisée d'une roche encaissante associée à une structure particulière). On fait référence ici à la silicification, à la carbonatation, à la sulfuration ou encore à la présence d'une tourmalinite⁽⁵⁾. Cette approche est généralement mobilisée après la mise en évidence d'une anomalie géochimique ou géophysique.

En parallèle, la cartographie géologique pourra permettre d'affiner les connaissances sur les lithologies et structures présentes sur la zone d'étude.

Une autre méthode est la prospection alluvionnaire, qui consiste en la recherche de minéraux indicateurs ou d'or dans les sédiments de cours d'eau. Le prospecteur utilise dans ce but une batée d'orpaillage pour concentrer les minéraux lourds en vue de procéder à une étude minéralogique plus poussée en laboratoire. Généralement, cette approche est mise en œuvre parallèlement à la prospection géochimique sur sédiments de ruisseaux, en réalisant un échantillonnage systématique sur la base d'une grille prévue à l'avance pour obtenir une représentativité cohérente des bassins versants.

Lorsqu'une minéralisation est identifiée, celle-ci fera par la suite l'objet de sondages dans le but de réaliser des échantillonnages et d'en étudier la géométrie. La répétition de ces sondages, qui peuvent être couplés à des approches géophysiques, permettra de définir d'abord des ressources, puis des réserves.

Les méthodes d'exploration géochimique

Les méthodes d'exploration géochimique consistent en l'échantillonnage d'un média et en l'analyse chimique de celui-ci en vue de mettre en évidence des concentrations anormales pouvant indiquer la présence de minéralisations. La substance recherchée étant rarement seule dans les occurrences minéralisées, le spectre d'éléments analysés est généralement large et comprend les potentiels accompagnateurs de la substance d'intérêt. Dans le cas de l'or, il peut s'agir, par exemple, de l'arsenic, du sélénium, de l'antimoine, de l'argent ou du tellure. Les développements analytiques permettent aujourd'hui d'analyser en routine des éléments présents à des teneurs extrêmement faibles, de l'ordre du ppb.

À large maille d'échantillonnage, les échantillons sont généralement des sédiments de ruisseaux ou de fond de vallon, voir des tills⁽⁶⁾ ou de l'eau de source, de rivière ou de l'eau souterraine.

Sur des surfaces d'investigation plus restreintes, le média est le plus souvent un sol. Mais de bons résultats ont pu aussi être obtenus à partir de végétaux ou de gaz.

L'analyse des échantillons est communément réalisée par spectrométrie de masse à partir d'une dissolution totale ou quasi totale de l'échantillon. Depuis le début des années 2000, les méthodes d'extraction sélective sont néanmoins de plus en plus utilisées, notamment du fait qu'elles per-

mettent d'évaluer le porteur minéralogique des éléments et donc d'extrapoler les processus à l'origine des anomalies observées. Un effort de recherche est mené depuis plusieurs années pour développer ces approches dans le but de mettre en évidence des minéralisations localisées plus profondément, notamment sous couverture allochtone. Les analyses réalisées directement sur site, principalement à l'aide d'analyseurs portables XRF, sont aussi de plus en plus utilisées. Cependant, cet appareillage ne permet pas de mesurer les très faibles concentrations d'or généralement présentes. Il se révèle en revanche beaucoup plus efficace pour mettre en évidence certains accompagnateurs, comme l'arsenic.

Les méthodes d'exploration géophysique

L'or n'a pas de signature géophysique particulière directement détectable. La mise en œuvre des méthodes géophysiques correspond donc à l'utilisation d'outils indirects et vise à modéliser des structures géologiques ou des altérations. Les méthodes utilisées sont principalement des méthodes magnétiques ou électriques (résistivité et polarité induite).

Les méthodes géophysiques peuvent être appliquées en mode aéroporté ou au sol. La miniaturisation des capteurs devrait permettre à assez court terme le développement de l'utilisation des drones.

Les concentrations importantes en sulfures comme la pyrrhotite ou d'autres minéraux magnétiques, comme la magnétite, peuvent induire des variations détectables du champ magnétique terrestre. Des concentrations métalliques ou la présence de discontinuités peuvent aussi provoquer des anomalies de résistivité ou un délai de restitution face à un courant électrique.

La gravimétrie fournit aussi des informations importantes sur la géométrie et les structures pouvant porter des minéralisations, ainsi que sur les altérations.

La cartographie hyperspectrale donne de bons résultats pour la mise en évidence des altérations. Cette technique combine imagerie et spectroscopie par l'acquisition d'images sur un très grand nombre de bandes, allant du visible à l'infrarouge.

En outre, les grandes avancées réalisées récemment en géophysique portent sur les processus de traitement des données : ce sont notamment les méthodes d'inversion qui permettent la visualisation en 3D des résultats. Les méthodes électriques ont particulièrement bénéficié de ces avancées.

L'exploration de l'or : qu'en est-il aujourd'hui ?

D'après S&P Global Market Intelligence, le budget global attribué à l'exploration de l'or aurait été en 2017 d'environ 3,6 milliards d'euros, ce qui est en nette augmentation par

(5) Roche issue du remplacement des feldspaths et biotites par la tourmaline suite à une altération par un fluide hydrothermal.

(6) Roche sédimentaire détritique issue du dépôt du matériel transporté par les glaciers.

rapport à 2016. Ces budgets ont été majoritairement investis au Canada (600,6 M€), en Australie (562,6 M€), en Amérique latine (936,0 M€) et en Afrique (584,8 M€). Ces investissements concernent majoritairement des sites miniers actifs ou interviennent dans les derniers stades de l'exploration et de l'étude de faisabilité. Pour près des deux tiers, ces investissements sont financés par les compagnies dites majors.

Références bibliographiques

BENEDETTI M. (1989), « Géochimie de l'or : mécanismes de transport et dépôt », thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 150 p.

BOYLE R. W. (1979), "The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element)", *Bulletin de la Commission géologique du Canada* 280, 20 p.

BRADY T. (2017), "Thoughts on global gold mine supply", *Gold Investor*, september, pp. 26-29.

GROVES David I. & SANTOSH M. (2016), "The Giant Jiaodong gold province: The key to a unified model for orogenic gold deposits?", *Geoscience Frontiers*, Special Issue: Giant Mineral Deposits 7, pp. 409-417.

FRIMMEL H. E. (2008), "Earth's continental crustal gold endowment", *Earth and Planetary Sciences Letters* 267, pp. 45-55.

McDONOUGH W. F. & SUN S.-S. (1995), "The composition of the Earth", *Chemical Geology* 120, pp. 225-253.

PHILLIPS G. N. & EVANS K. A. (2004), "Role of CO₂ in the formation of gold deposits", *Nature* 429, pp. 860-863.

PHILLIPS G. N. & POWELL R. (2010), "Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model", *Journal of Metamorphic Geology* 28, pp. 689-718.

PITCAIRN I. K., OLIVO G. R., TEAGLE D. A. H. & CRAW D. (2010), "Sulfide Evolution during Prograde Metamorphism of the Otago and Alpine Schists", New Zealand, *The Canadian Mineralogist* 48, pp. 1267-1295.

PITCAIRN I. K., CRAW D. & TEAGLE D. A. H. (2015), "Metabasalts as Sources of Metals in Orogenic Gold Deposits", *Mineralium Deposita* 50, pp 373-390.

ROBERT F., BROMMECKER R., BOURNE B. T., DOBAK P. J., McEWAN C. J., ROWE R. R. & ZHOU X. (2007), "Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types", Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, pp. 691-711.

RUDNICK R. L. & GAO S. (2003), *Composition of the Continental Crust. Treatise of Geochemistry*, 3, pp. 1-64.

SILLITOE R. H. & THOMPSON J. F. H. (2006), "Changes in mineral exploration practice: consequences for discovery", *Society of Economic Geologists*, Special Publication, 12, pp. 193-219.

WOOD B. J., WALTER M. J. & WADE J. (2006), "Accretion of the Earth and segregation of its core", *Nature* 441, pp. 825-833.