

Les grands problèmes de la métallogénie : quelles perspectives pour le futur ?

Michel Jébrak et Éric Marcoux.

On ne peut dire que les grandes questions que se posaient De Launay, dès 1913, ont fondamentalement changé. Il s'agissait alors de comprendre les gisements et leur genèse et de fournir des guides pratiques dans l'art des mines. Ces thèmes sont toujours pleinement d'actualité. Si nous entrons plus avant dans la question des processus en cause dans la genèse des gisements, on pouvait distinguer trois questions majeures : la source des éléments : d'où viennent les métaux ; le transport des éléments ; et les conditions de dépôt des éléments. À ces questions se rajoute un débat sur l'actualisme, c'est-à-dire la référence aux processus actuels pour comprendre ceux qui sont intervenus dans le passé.

Avant d'aborder les enjeux qui se posent pour le XXI^e siècle, nous présenterons les grandes avancées du siècle précédent.

Les grandes avancées du XX^e siècle

Il faut d'abord noter qu'entre De Launay et la fin de la 2^{ème} guerre mondiale les *avancées* sur ces sujets sont restées modestes et que les progrès ont commencé à se concrétiser à partir des *années 50*. Les avancées ont essentiellement porté sur les points suivants : la nature des fluides, l'origine de l'eau, les températures et les conditions de dépôt.

Sur la *nature des fluides* impliqués dans la genèse des minéralisations, beaucoup de progrès ont été réalisés grâce aux études d'inclusions fluides et aux études isotopiques. Une stratification globale des fluides peut être reconnue dans la lithosphère. Dans la partie supérieure, la quasi-totalité des fluides hydrothermaux est reconnue comme des fluides salés, l'exemple extrême étant celui des amas sulfurés dont les isotopes du soufre ont confirmé que les fluides correspondaient principalement à de l'eau de mer. Dans la partie profonde, à l'eau salée s'ajoute du gaz carbonique, voire du méthane. Cette stratification a des conséquences sur la présence de minéralisation en profondeur puisque les capacités de transport de l'eau salée et du CO₂ sont bien différentes.

Sur la question de l'*origine de l'eau*, ce sont surtout les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène qui ont permis des avancées. Cela a notamment permis de confirmer que les fluides à l'origine des porphyres

cuprifères étaient bien d'origine magmatique. Pour revenir aux amas sulfurés, ce type d'études a aussi montré que même si l'eau de mer dominait dans les fluides, c'était le faible pourcentage de fluides magmatiques (estimé à 1%) qui apportait les métaux. Dans le cas des gisements épithermaux, on observe un mélange d'eau magmatique et d'eau superficielle (météorique) parce que ces gisements sont mis en place à faible profondeur et que la précipitation des métaux résulte en particulier du mélange entre ces deux types d'eaux.

Les études d'inclusions fluides ont été essentielles pour déterminer les *températures* de formation et elles restent aujourd'hui largement utilisées à cette fin. Parmi les surprises, figure sans aucun doute la grande variation des flux géothermiques sur la planète, qui conduit à former des gisements de même température à des profondeurs très différentes : ainsi, des gisements épithermaux, formés en contexte volcanique au voisinage de la surface, peuvent se former à la même température que des gisements mésothermaux, formés à plus de 10 km de profondeur.

L'étude des conditions de *dépôt* des minéralisations est un autre secteur qui a beaucoup progressé, en s'appuyant sur la géochimie et les études expérimentales destinées à recréer les conditions de précipitation. Ces travaux ont ainsi permis de faire progresser la typologie des gisements, sur la base d'une meilleure connaissance des mécanismes de précipitation. Ces résultats doivent être intégrés dans la connaissance sur les époques et les provinces métallogéniques, encore que, dans ce domaine, on a surtout progressé au niveau de la description de ces ensembles, plus que dans la connaissance ultime de compréhension des mécanismes à l'échelle globale.

Dans d'autres domaines, les progrès sont moins probants. C'est d'abord la question des *sources*, des constituants majeurs notamment, et de la discrimination entre les sources superficielles et profondes. Pour certains éléments (Be, B, Li) la source magmatique est claire. Pour les composés du plomb, la géochimie isotopique s'est avérée relativement discriminante quant à l'origine de ce métal, ce qui a pu conduire abusivement à tirer des conclusions analogues pour d'autres métaux. Pour les autres éléments mineurs, le problème reste entier. Cette difficulté pour déterminer la ou les sources des éléments vaut aussi pour les majeurs (C, Ca, Na, K) qui sont largement

distribués dans de nombreux types de roches, à des teneurs allant du ppm à des milliers de ppm, ce qui empêche de bien cerner les sources, sauf si le contexte géologique est relativement simple.

Sur le thème du **transport** des métaux, ce sont les études des systèmes hydrothermaux actuels qui ont permis des avancées, en particulier en ce qui concerne la détermination des facteurs (couple pression – température, gradient thermique, perméabilité, pompage osmotique, variation de densité...) qui jouent un rôle. Il reste par contre à comprendre la pondération entre ces facteurs et les durées de fonctionnement des systèmes.

Quelles pistes pour avancer au XXI^e siècle ?

Nous reprendrons les principales entrées abordées au chapitre précédent. Il faut cependant souligner les changements d'échelle majeurs qui se sont produits. Les métallogénistes sont restés très longtemps collés sur les gisements, examinant la minéralogie ou les contrôles structuraux de détail. Ils travaillent maintenant dans un contexte beaucoup plus global, à l'échelle de la Terre, et pas seulement au niveau de circulations simplement crustales. La dynamique mantellique joue un rôle croissant et de grands phénomènes comme les « plumes » mantelliques doivent être pris en compte dans les explications génétiques proposées, à l'image des hypothèses avancées pour la genèse des grands gisements de Ni-Cu (Yakubchuk et Nikishin, 2004) ou celle des amas sulfurés géants (Barrie et Hannington, 2000). Condie (2001) et Pirajno (2000) évoquent même le rôle de superplumes susceptibles de bouleverser les paysages, du fond des océans à la composition de l'atmosphère.

De même, dans l'échelle des temps, on prend en compte de plus en plus des causes spécifiques aux époques géologiques considérées et on ne se limite plus à la transposition de l'actualisme dans le passé. Enfin, le climat est de plus en plus pris en compte, comme jouant un rôle majeur dans la métallogénie générale, à l'image des formations ferrifères (« *Banded Iron Formations* », BIF) du Précambrien, déposées en atmosphère de gaz carbonique.

Au niveau de l'étude des **sources**, une première évolution est la prise en compte d'un plus grand nombre d'isotopes : Re-Os, isotopes du cuivre, du fer, du calcium ou du molybdène. Ces approches permettent de progresser dans la comparaison entre les minéralisations et les roches potentiellement riches dans les métaux correspondants.

Des progrès sont à attendre également de l'**extraction des métaux**. La question posée est la façon dont une

roche devient une source et comment les métaux s'en libèrent, c'est-à-dire la physico-chimie de la dissolution. On est ici dans le domaine des études expérimentales. Ces approches doivent maintenant être intégrées dans des mécanismes globaux de fonctionnement de la Terre, intégrant les roches de la lithosphère inférieure et les ressources potentielles du manteau, donc une stratification des métaux. Il faudra des progrès significatifs dans la géochimie des magmas, en valorisant les marqueurs minéralogiques associés aux xénolithes remontés de la profondeur comme les grenats.

L'approche globale se traduit aussi en matière de **dynamique** superficielle et profonde. La taille des systèmes hydrothermaux doit être appréhendée de façon plus globale en intégrant l'ensemble des systèmes. Les cellules hydrothermales peuvent présenter des tailles considérables, sauf dans des contextes comme les dorsales océaniques, comme le montrent les isotopes de l'hélium.

Les sondages profonds comme celui de Kola en Russie et le KTB en Allemagne ont montré l'existence de circulations au moins jusqu'à 11 km de profondeur et peut-être jusqu'à une trentaine de kilomètres. Ces résultats contribuent à ce que l'on prenne aujourd'hui en compte des systèmes considérablement élargis.

Comment progresser sur le **transport** ? À l'image de ce que font les pétroliers pour étudier la migration des fluides dans les bassins, c'est de la modélisation que pourraient venir des progrès, d'autant que plusieurs écoles sont en débat. Certains pensent qu'il faut distinguer des fluides qui extraient et d'autres qui transportent. D'autres considèrent qu'il s'agit du même fluide qui évolue au fil des interactions eau – roche ; le changement serait permanent. La question de la durée des phénomènes n'est pas non plus résolue. Là encore, la modélisation peut faire progresser, encore faut-il trouver les bonnes données à entrer. Enfin, l'évolution des outils analytiques permettra des déterminations de plus en plus fines. La nano-métallogénie est à nos portes, et permettra peut-être de franchir l'espace entre l'approche géochimique sur les fluides et celle basée sur la minéralogie des particules solides.

Sur la question du **dépôt**, on a progressé dans la détermination des mécanismes et des conditions de dépôt, mais également dans l'évaluation de la durée des phénomènes, grâce aux datations argon-argon. Sur de nombreux gisements, notamment des porphyres cuprifères de la ceinture pacifique, on a ainsi pu prouver que la durée pour que la concentration minérale se forme ne dépassait pas un million d'années, et souvent moins de 200 000 ans. Pour aller plus loin, c'est-à-dire rechercher des pas de temps plus fins, la méthode reste à déterminer. Il est

probable que l'on devra s'intéresser à des gisements récents, susceptible d'une géochronologie permettant des échelles de datations de quelques dizaines de milliers d'années.

Liée à cette problématique du dépôt se pose la question du **piégeage** et de son **efficacité**. Quelle quantité de métaux le piège a-t-il retenu et quelle est l'importance des fuites ? Dans les fumeurs noirs, les études ont montré que 3% des métaux étaient piégés dans le fumeur en croissance et 97% partaient dans le panache. Certes, on se trouve ici en milieu océanique ouvert et la situation est différente en contexte terrestre de circulation dans des zones de faiblesse ; il n'en reste pas moins que l'aptitude d'un piège à capter plus ou moins de métaux reste posée. La question de la méthode à utiliser pour aborder ce problème reste ouverte : modélisation pour quantifier les fluides et les flux, études de système actuel...

Comme nous l'avons déjà évoqué, le **contexte** pris en compte est devenu de plus en plus **global**. À titre d'exemples, on peut citer :

- l'impact des phénomènes climatiques globaux, par exemple le gel de la Terre (« *Snowball* ») qui a dû se produire au moins une fois au Protérozoïque (2,2 à 2,3 Ga) ;
- le lien entre ces périodes de refroidissement et la géochimie océanique, à l'origine de dépôts de fer et de manganèse ;
- l'impact de chutes de météorites qui a entraîné de fortes ruptures dont les traces ne sont pas forcément très lisibles aujourd'hui ;
- la composition chimique de l'atmosphère, qui influence sur la composition chimique des formations géologiques ;
- l'existence d'époques et de provinces métallogéniques dont il faut chercher les causes à de vastes échelles, dans des événements majeurs.

Au cours de ces dernières années, on a multiplié les études de cas, à la demande de l'industrie minière la plupart du temps. Ces études descriptives ont permis de disposer aujourd'hui d'une base de données considérable. En corollaire, il est devenu de plus en plus difficile de faire des découvertes novatrices en utilisant les méthodes traditionnelles sur des gisements même récemment découverts. Ces études ont néanmoins permis de préciser la typologie existante, voire de définir des sous-types ou encore de trouver de nouveaux gisements à partir des modèles proposés. C'est ainsi, à titre d'exemple, que le modèle IOGC (« *Iron Oxide Gold Copper* ») a pu être récemment défini et que des gisements, antérieurement rattachés à d'autres types ont pu s'y retrouver, du

producteur historique du fer scandinave, Kiruna en Suède, à des concentrations d'or et de cuivre dans des environnements latéritiques au Brésil (Igarape Bahia par exemple). L'étude détaillée de l'environnement des gisements a permis également de mettre en évidence des caractéristiques particulières des magmas métallogéniques tels les magmas adakitiques, riches en strontium et pauvres en yttrium.

Science appliquée, la métallogénie est donc à la fois poussée par la recherche fondamentale, productrice de concepts novateurs, de nouveaux outils analytiques, ou de liens avec d'autres disciplines, et tirée par l'exploration minière, l'industrie des ressources. La rencontre entre ces deux approches se fait sur le terrain. La technologie nous permet maintenant une meilleure qualité des prélèvements et un ancrage plus fort dans la réalité. Les géologues explorateurs et les scientifiques métallogénistes se retrouvent pleinement dans cette évolution. De plus, la formation des explorateurs miniers s'est accrue considérablement au cours de ces dernières années. Ainsi, au Canada, la plupart des géologues d'exploration étaient titulaire d'un baccalauréat il y a 20 ans (niveau Bac+4 européen). Ils doivent maintenant disposer d'une maîtrise (Bac+6 européen), et donc acquérir une bien meilleure connaissance des modèles de gisement. On peut donc soutenir aujourd'hui que l'exploration minière, tant par son contexte risqué, sa dynamique enthousiaste, la durée des efforts requis, et sa forte intensité intellectuelle présente des caractéristiques qui la rapproche beaucoup du monde des biotechnologies. L'image publique de cette profession devra donc s'infléchir considérablement au fil des futures découvertes.

Pour en savoir plus

- Barrie C.T. et Hannington M.D., éd. (2000) Volcanic-associated massive sulfide deposits: processes and examples in modern and ancient settings. Review in Economic Geology 8, 408 p.
- Condie K.C. (2001) Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge, 320 p.
- Dardenne M.A. et Schobbenhaus C. (2001) Metalogenese do Brasil. Brasília : Editora Universidade de Brasília, 392 p.
- De Launay, L. (1913) Traité de métallogénie - Gîtes minéraux et métallifères. Gisement, recherche, production et commerce des minéraux utiles et minerais. Description des principales mines. Paris et Liège : Librairie Polytechnique Ch. Béranger.
- Edward R. et Atkinson K. (1986) Ore deposit geology,

CONNAISSANCE DES GÎTES MINÉRAUX

- and its influence on mineral exploration. Chapman and Hall, London, 466 p.
- Guilbert J.M. et Park C.F.Jr. (1986) The geology of ore deposits. W.H. Freeman and Co.
 - Hedenquist J.W., Thomson J.F.H., Goldfarb R.J., et Richard J.P. (2005) One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geology, 1136 p.
 - Hutchinson C.S. (1982) *Economic Deposits and their Tectonic setting*. John Wiley and Sons, 365 p.
 - Jébrak M. (2006) Economic Geology: Then and Now. Geoscience Canada, 33, 2, 81-93.
 - Kesler, S.E., (1994) Mineral Resources, Economics, and the Environment: Macmillan, 391 p.
 - Kirkham R.V., Sinclair W.D., Thorpe R., et Duke J.M. (1995) Mineral deposit modeling. *Geological Association of London, special pub.*, 798 p.
 - Laznicka P. (1985) Empirical metallogeny; depositional environments, lithologic associations and metallic ores: Phanerozoic environments, associations and deposits, 2 vol. Elsevier Science, New York, 1758 p.
 - Lunar R. et Oyarzun R., *coord.* (1991) Yacimientos minerales. Técnicas de estudio Tipos Evolucion metalogénica Exploracion. Editorial centro de Estudios, Raman Arces, S.A, 938 p.
 - Misra K.C. (2000) Understanding mineral deposits. Kluwer Academic Publishers, 845 p.
 - Mitchell A.H.G. et Garson M.S. (1981). Mineral deposits and global tectonic setting. Academic Press. Geology Series, London. 405 p.
 - Nicolini P. (1990) Gîtologie et exploration minière. *Lavoisier*, Paris. 589 p.
 - Pélissonnier H. (2001) Réflexions sur la métallogénie. Les ouvrages de l'Industrie Minérale, Paris. 431 p.
 - Pirajno, F. (2000) Ore deposits and mantle plumes. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic, 556 p.
 - Robb L. (2004) Introduction to Ore-Forming Processes. Blackwell. Pub., 373 p.
 - Routhier P. (1980) Où sont les métaux pour l'avenir ? Les provinces métalliques. Essai de métallogénie globale. Mémoire BRGM 105, 410 p.
 - Sawkins F.J. (1984) Metal deposit in relation to plate tectonics. Springer Verlag, 325 p.
 - Skinner B.J., *ed.* (1981) Economic Geology Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980. El Paso, TX: The Economic Geology Publishing Co, 964 p.
 - Solomon M. et Groves D.I. (1994) The geology and origin of Australia's Mineral deposits. Oxford Monographs on geology and geophysics, 24, Oxford Science Publication, New-York, 951 p.
 - Yakubchuk A. et Nikishin A. (2004) Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE deposits: a revisited model. Mineralium Deposita 39, 125-142.