



Explorer pour le molybdène au Québec

Mai 2007

Résumé

Les prix du molybdène ont connu une croissance spectaculaire depuis le début de la décennie et les cours semblent se stabiliser à des niveaux bien plus élevés que ceux des années 1990. Il s'agit évidemment d'un contexte très favorable à l'exploration pour le molybdène, jusqu'ici relativement négligée au Québec.

La majorité de la production mondiale demeure un sous-produit des porphyres cuprifères, le reste provenant des porphyres à molybdène. On trouve plusieurs porphyres cuprifères au Québec, notamment dans les Appalaches (Mines Gaspé, un ancien producteur de Mo) et dans le Supérieur. On remarque aussi plusieurs minéralisations en molybdène de type porphyrique. Bien qu'aucun gisement de ce type n'ait été exploité au Québec jusqu'à maintenant, le potentiel de découverte apparaît favorable dans plusieurs régions.

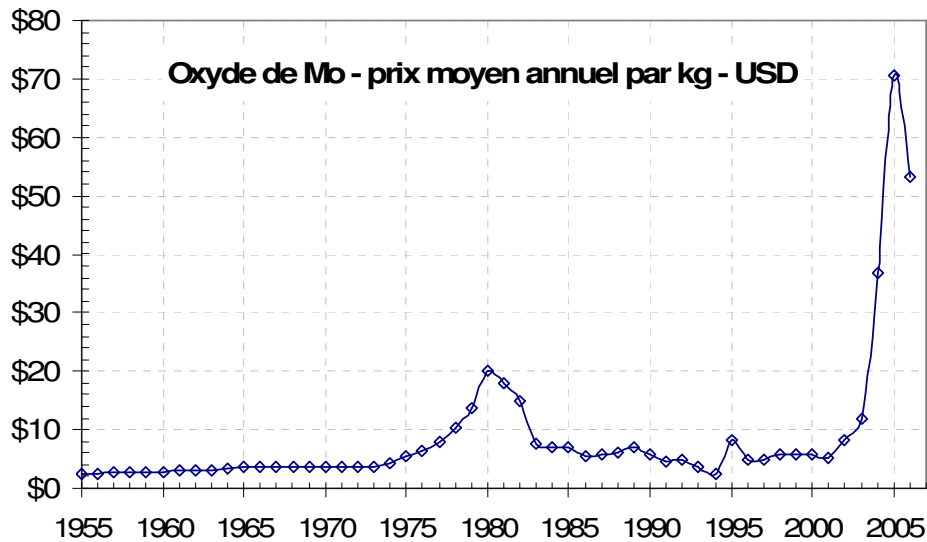
Une courte synthèse du marché du molybdène, de sa géologie, des techniques d'exploration et des secteurs d'intérêt est présentée.

SIDEX a pour mission d'investir dans les entreprises engagées en exploration minière au Québec afin de diversifier l'inventaire minéral et d'ouvrir de nouveaux territoires à l'exploration.

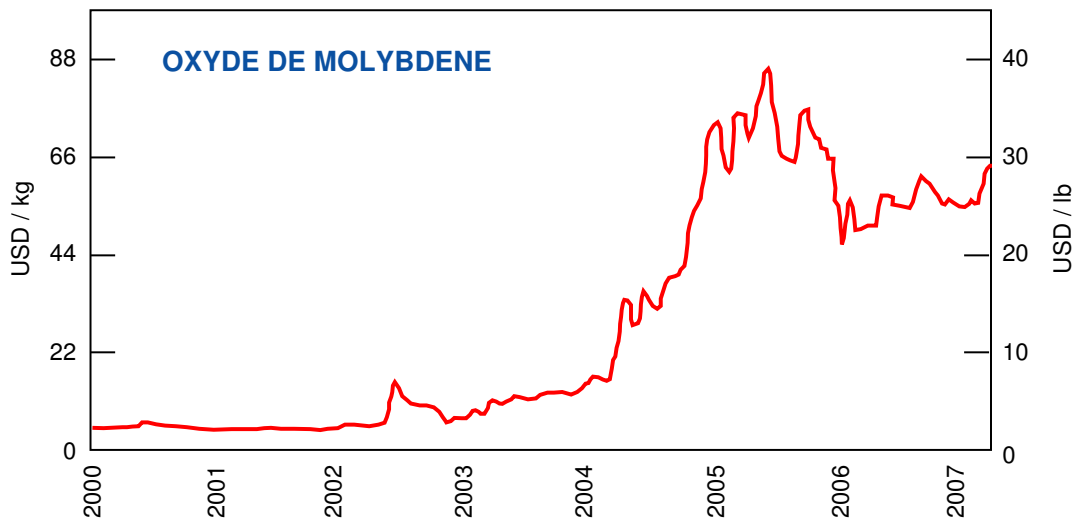
ÉCONOMIE

Le molybdène (Mo) est un élément d'alliage très efficace dans la fabrication de l'acier, auquel il confère résistance mécanique, trempabilité, soudabilité, résistance aux hautes températures, et résistance à la corrosion (www.moly.imoa.info). L'industrie de l'acier consomme ainsi quelque 80 % de la production annuelle de Mo – entre autres pour l'acier inoxydable. Les nombreuses applications du Mo dans l'acier et les alliages incluent les pipelines à haute pression pour le transport du pétrole et du gaz naturel sur de longues distances, l'exploitation du pétrole *offshore*, les usines de désalinisation, les centrales nucléaires, l'industrie aéronautique, les blindages militaires, etc. Le molybdène est aussi utilisé pour les pigments, les lubrifiants, et comme agent de désulfuration pour les produits pétroliers, par exemple pour produire le diesel à faible teneur en soufre. Plusieurs de ces applications sont en forte croissance (http://www.sprott.com/pdf/Structural%20Change_Denis%20Battrum_March27.pdf).

Les cours du molybdène ont conséquemment explosé depuis le début de la décennie, le prix moyen d'un kilogramme d'oxyde passant de 5,20 USD en 2001 à plus de 70 USD pour 2005. Il s'agit d'une augmentation de plus de 1 000 %. Le prix moyen pour 2006 a été de 53,10 USD, ce qui demeure largement au delà des valeurs historiques et rend très rentable l'exploitation de certains gisements de Mo.



Prix moyen annuel des concentrés de molybdène depuis 1955, en dollars U.S. Source des données : “Metal Prices in the United States through 1998” (U. S. Geological Survey) et “Mineral Commodity Summaries” (USGS)



Cours hebdomadaire de l'oxyde de molybdène depuis 2000, en dollars U.S. Source des données : CIBC World Markets. Le ferromolybdène est aussi un produit qui se transige couramment

Les prix élevés des dernières années s'expliquent par plusieurs facteurs en plus de la demande chinoise pour l'acier, dont un problème de capacité au niveau des « fours de grillage » (*roasters*) aux États-Unis (le « grillage » est le procédé par lequel on transforme le MoS₂ en oxyde; <http://www.moly.imoa.info/Default.asp?page=62>). La production de la région de Huludao en Chine a été aussi problématique en 2005 et 2006. La région de Huludao représenterait les deux tiers de la production chinoise de ferromolybdène selon American Metal Market (<http://www.amm.com>); la Chine produit environ 20 % du Mo dans le monde selon l'USGS. Par ailleurs, les plus récentes rumeurs veulent que le gouvernement chinois impose des quotas d'exportation, ce qui aurait pour effet de diminuer davantage les exportations de Mo en provenance de ce pays.

Un rapport récent intitulé « *Structural Changes in Molybdenum Demand* », rédigé pour le compte de Sprott Asset Management, suggère que les prix pourraient se stabiliser aux niveaux actuels (http://www.sprott.com/pdf/Structural%20Change_Denis%20Battrum_March27.pdf). Sprott a lancé en avril 2007 une compagnie d'investissement spécialisée, « *Sprott Molybdenum Participation Group* », dont les actions se transigent à la bourse de Toronto (symbole MLY; <http://www.sprottmoly.com>). L'activité de ce groupe pourrait influencer les cours du molybdène dans l'avenir, dans la mesure où MLY planifie d'accumuler des réserves du métal.

Le plus grand producteur mondial est Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), avec environ 80 millions de livres de Mo en 2005. La production aurait diminué en 2006. Suit Phelps Dodge Corp., des États-Unis (maintenant Freeport-McMoRan), avec 68,2 millions de livres de Mo en 2006. Les autres pays producteurs importants sont la Chine, le Pérou et le Canada. La production de Mo de Codelco vient entièrement des porphyres cuprifères, alors que la majorité de la production de Phelps Dodge vient de la mine d'Henderson, un porphyre à molybdène de type « rift ». A l'échelle mondiale, la production totale de l'ordre de 400 millions de livres annuellement provient à 65 % des porphyres cuprifères. Le reste du molybdène provient essentiellement des porphyres à molybdène (producteurs primaires), alors que la contribution des autres types de gîtes demeure négligeable.

GÎTOLOGIE-EXPLORATION

Les porphyres cuprifères étant comparativement bien connus, ce bulletin se concentre sur la gîtologie des porphyres à molybdène, avec quelques commentaires sur les autres types de gîtes.

Porphyres à molybdène

Du côté des producteurs primaires, la production historique vient surtout des porphyres à molybdène de type 'rift', qui sont plus riches que les porphyres à Mo de type 'arc'. En contrepartie, les porphyres à Mo type 'arc' contiennent davantage de cuivre et apparaissent également intéressants aux prix actuels des deux métaux. Les deux types de porphyres à molybdène diffèrent non seulement par leurs teneurs en Mo et Cu, mais aussi par leur contexte tectonique, la géochimie des intrusions associées, et leurs associations métalliques.

Classification des porphyres à molybdène

| | TYPE RIFT | TYPE ARC |
|--------------------------|---|--|
| Teneurs moyennes | 0,25-1,0 % MoS ₂ | <0, 25 % MoS ₂ |
| Association métallique | Cu pratiquement absent, mais davantage de W, U, Nb | Présence de Cu |
| Teneur en fluor | Riche en F (fluorite, topaze, micas) | Pauvre en F |
| Géochimie des intrusions | multiples intrusions à chimie rhyolitique (>75 % SiO ₂), souvent alcaline | Intrusions calco-alcalines : monzogranite - monzonite à quartz |
| Paysage | Magmatisme intraplaque régional, de longue durée – association avec calderas, volcanisme felsique | Arcs magmatiques |
| Tectonique | Extension intraplaque | Zones de subduction |
| Exemples | Climax (Colorado), Henderson (Colorado), Questa (Nouveau Mexique) | Endako (Colombie-Britannique), Quartz Hill (Alaska) |

Sources: Sillitoe (1980); Carten et al. (1993).

Tous les types de gisements porphyriques se forment à faible profondeur dans la croûte (probablement 3-4 km ou moins). Dans le cas des porphyres à Mo, la plupart des gîtes se situent juste au dessus ou dans le sommet d'une coupole intrusive porphyrique ou aplitique. Si l'intrusion affleure largement, il est probable que le gisement ait été érodé (en l'absence d'un basculement des strates géologiques avant l'érosion). Le niveau d'érosion idéal pour les gisements de type porphyrique est donc de quelques centaines de mètres au dessus du pluton.

Dans le cas de séquences peu basculées, les plutons enfouis deviennent ainsi plus intéressants que les plutons affleurants comme cible d'exploration. On localisera les plutons enfouis grâce à des anomalies géophysiques ou des cartes de densité de dykes felsiques (ex. Doyon, 1995). Dans les roches sédimentaires peu ou pas métamorphisées, la cartographie des minéraux des argiles ou de la cristallinité des illites pourrait être utilisée pour montrer un possible paléo-flux de chaleur (ex. William-Jones et Duba, 1985). C'est notamment le cas pour la partie peu métamorphisée de la Gaspésie (la ceinture de Gaspé).

**Comparaison détaillée des porphyres à Mo de type ‘rift’ et de type ‘arc’,
compilée par Rowe (2005)**

| Characteristic | TYPE ‘RIFT’ | TYPE ‘ARC’ |
|------------------------------|---|--|
| Source Intrusion | Granite porphyry | Quartz monzonite porphyry |
| Geochemistry | High silica, peralkaline, F-rich (>0.1% F), Rb, Y and Nb are high, Ba, Sr and Zr are low | Calc-alkaline, low F content (<0.1% F) |
| Deposition | Multiple intrusions of granite | Composite intrusions of diorite to quartz monzonite in orogenic belts |
| Age range | Paleozoic to Tertiary, but mainly Mid-Tertiary | Archean to Tertiary, but most commonly Mesozoic and Tertiary |
| Tectonic Setting | Rift zones in areas of thick cratonic crust | Subduction zones related to arc-continent or continental collision |
| Associated ore deposit types | Ag-base-metal veins and polymetallic replacement deposits, possibly rhyolite-hosted Sn deposits and porphyry W deposits; possibly Mo, Sn, and W greisen systems | Porphyry Cu-Mo, Cu skarn, volcanic-hosted Cu-As-Sb deposits |
| Mineralogy | Molybdenite, quartz, K-feldspar, fluorite, fluorine-rich biotite and topaz, pyrite, calcite, rutile, anhydrite, sericite, clays, wolframite, cassiterite, rhodochrosite, sphalerite, galena | Molybdenite, pyrite, scheelite, chalcopyrite, argentian tetrahedrite, quartz, K-feldspar, biotite, calcite, sericite, clays, galena |
| Alteration | Intense silicification and potassic alteration, upper zones of phyllic propylitic alteration, quartz-sericite-pyrite alteration, minor greisen below orebody | Potassic outward to propylitic, phyllic and propylitic overprint, minor peripheral argillic |
| Texture | Predominantly in veinlets and fractures; minor disseminations; breccias | Disseminated and in veinlets and fractures; breccias |
| Ore controls | Stockwork ore zone draped over small stocks; multiple stages of intrusion and mineralization | Stockwork in felsic porphyry and surrounding country rock; multiple stages of mineralization are common |
| Geochemical signature | Mo, Sn, W and Rb anomalies near ore zones; Pb, Zn, F, and U anomalies in periphery up to 2 km | Mo, Cu, W, and F anomalies near ore zones; Pb, Zn, Au and Ag anomalies in periphery up to several km |
| Average ore grade | 0.3-0.45% MoS ₂ | 0.1-0.2% MoS ₂ |
| Cu:Mo ratio | 1:100 to 1:50 | 1:30 to 1:1 |
| Examples of deposit type | Colorado: Climax, Henderson, Silver Creek, Urad, Mount Emmons, Redwell Basin; New Mexico: Questa ; Utah: Pine Grove; Greenland: Malmbjerg, Erzberg; Norway: Nordli | British Columbia, Canada: Endako, Boss Mountain, Kitsault, Adanac, Carmi, Bell Moly, Red Bird, Trout Lake, Storie Moly, Ajax; Yukon, Canada: Boswell River, Red Mountain; Alaska: Quartz Hill; Montana: Cannivan; Idaho: Thomson Creek, White Cloud, Cumo; Nevada: Nevada Moly, Pine Nut, Buckingham; Peru: Compaccha; Russia: East Kounrad; Mexico: Creston; China: Jinduicheng |

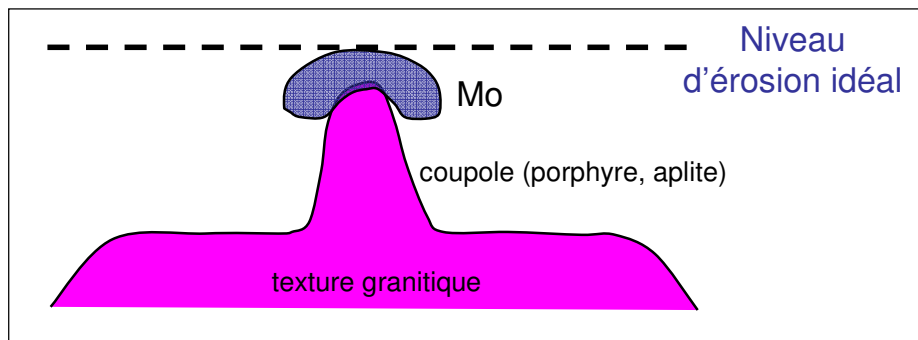


Schéma montrant le niveau d'érosion idéal dans une perspective d'exploration pour des porphyres à Mo de type ‘rift’. La minéralisation en ‘tasse de thé inversée’ est située juste au dessus de la coupole de porphyre ou d’aplite porphyrique

Historiquement, l'exploration pour les gisements porphyriques a surtout été menée dans les ceintures relativement jeunes, puisque le niveau d'érosion y est moins élevé. Néanmoins, des minéralisations porphyriques sont connues dans les roches de tous âges, y compris à l'Archéen. Parmi les caractéristiques générales des gisements porphyriques intéressantes du point de vue de l'exploration, citons l'abondance de pyrite et l'altération propylitique à l'extérieur des zones économiques. Pour les deux types de porphyres à Mo:

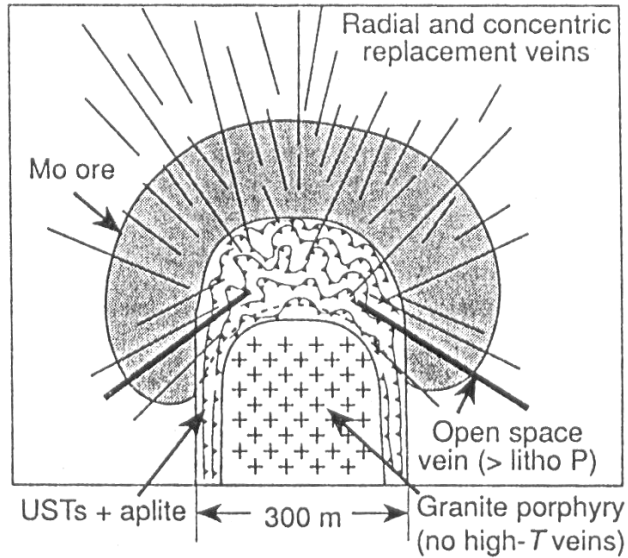
- La ferrimolybdite, de couleur jaune, est le produit d'oxydation de la molybdénite, et pourrait être présente en surface;
- Des veines de type Ag-Pb-Zn se remarquent parfois en périphérie des gisements;
- Dans les régions couvertes de matériaux glaciaires, comme presque tout le Québec, le till de base peut être échantillonné pour mesurer sa concentration en Mo; on peut aussi considérer la géochimie des sédiments de fond de lac (Trudel, 1980, p. 14).

Nous spécifions maintenant les paramètres métallogéniques et les critères d'exploration uniques à chaque type de porphyre à molybdène.

Porphyres à Mo de type « rift »

Les porphyres à Mo de type 'rift' constituent un type de gîte relativement bien compris, en termes de caractéristiques et de modèle génétique. Les gisements de ce type sont clairement associés à des intrusions très différenciées (plus de 75 % SiO₂), riches en fluor, mises en place dans un contexte d'extension intraplaque. Le molybdène provient de l'intrusion, est concentré par des processus magmatiques (différenciation, etc.) et est transporté par des fluides magmatiques-hydrothermaux (éventuellement dilués par l'eau météoritique) vers le sommet d'une coupole et vers l'encaissant. La nature de l'encaissant de l'intrusion semble avoir assez peu d'importance (granites à Henderson, andésites à Questa, etc.).

Le « type Climax » est un sous-type des porphyres à Mo de type 'rift' dans la classification de Carten et al (1993). Le corps minéralisé typique pour ces gisements est un stockwerk de veinules de quartz-molybdénite (MoS₂) ayant une forme convexe, situé au sommet d'une coupole porphyrique ou aplitique. Des textures de solidification unidirectionnelle, formant parfois une roche nommée « *brain rock* » se rencontrent au sommet de la coupole intrusive. À la mine Henderson, Carten et al. (1988) ont démontré la superposition latérale et verticale de plus dix corps minéralisés, chacun étant associé à une coupole intrusive. C'est cette superposition qui a donné un gisement si riche et si gros (800 Mt @ 0,28 % MoS₂; Carten et al., 1988). À Climax, plusieurs corps minéralisés ayant une forme convexe se superposent verticalement (White et al., 1981).

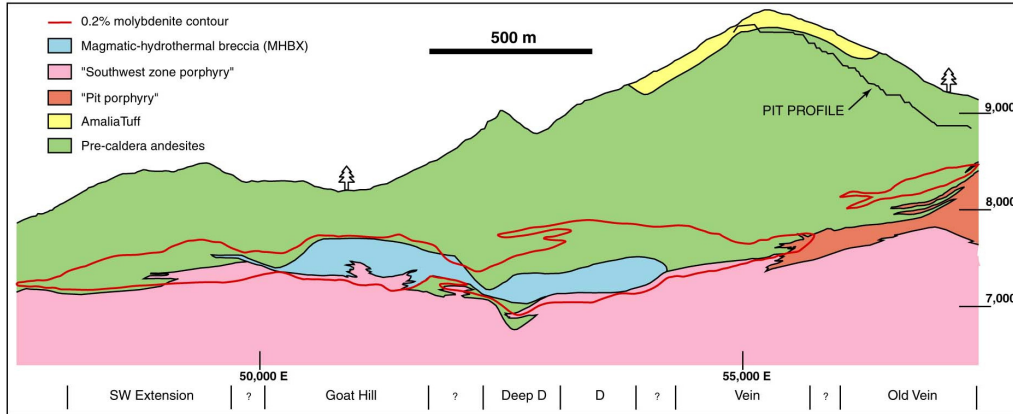


Section schématique d'un corps minéralisé et d'une coupole felsique dans un porphyre à Mo de sous-type 'Climax' (ex. Henderson, Climax), d'après Shinohara et al. (1995). 'UST' signifie « unidirectional solidification textures »; ces textures sont typiques du sous-type 'Climax', pas nécessairement des autres porphyres à Mo de type 'rift'



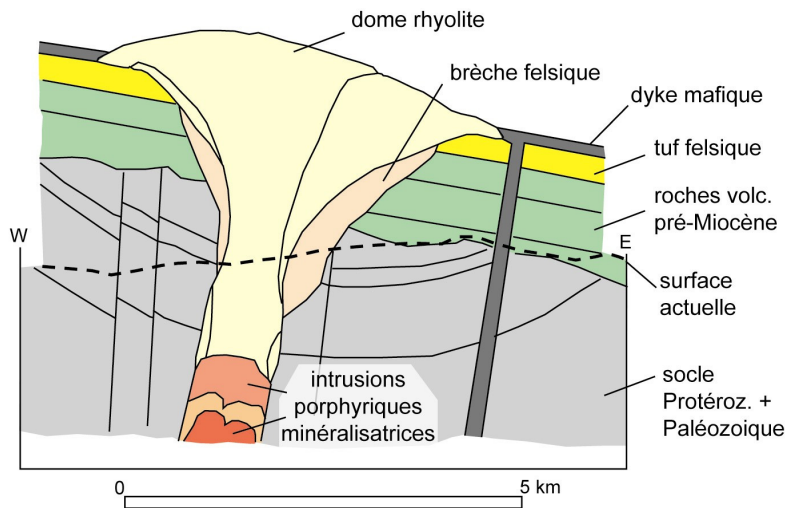
Texture de solidification unidirectionnelle (photo D. Sinclair, CGC)

Dans les gisements n'appartenant pas au sous-type « Climax », les textures de solidification unidirectionnelle peuvent être absentes, et la minéralisation n'a pas toujours la forme convexe typique. Par exemple à Questa (277 Mt @ ~0,25 % MoS₂; Carten et al., 1993), un contrôle structural important génère une série de corps minéralisés allongés horizontalement. Sur une section longitudinale, on observe également deux importantes zones de brèche hydrothermales minéralisées, situées juste au dessus du contact avec les intrusions porphyriques (« *Southwest Zone porphyry* »). Ces brèches sont recoupées par un stockwerk à quartz-molybdénite plus classique.



Section longitudinale à Questa, d'après Ross et al. (2002). La minéralisation est montrée par le contour rouge (teneur de coupure de 0,2 % MoS₂)

Le gisement de Pine Grove en Utah (125 Mt @ 0,3 % MoS₂; Sillitoe, 1980) illustre bien la relation entre le volcanisme felsique et les porphyres à Mo de type 'rift' (voir aussi Sillitoe et Bonham, 1984). Une section schématique – reconstituée pour tenir compte de l'érosion de la partie supérieure du système – montre un conduit volcanique important, duquel a fait éruption le tuf felsique de Pine Grove. Ce même conduit a servi à la mise en place de dômes de rhyolite et, plus en profondeur, d'intrusions porphyriques associées au gisement.



Section schématique du conduit volcanique de Pine Grove et des unités extrusives associées, modifiée d'après Keith et al. (1986). Le même conduit a été utilisé pour l'éruption du tuf felsique, pour la mise en place des dômes de rhyolite, et par les intrusions porphyriques minéralisatrices; toutes ces roches font partie de la même série magmatique selon Keith et al.

En résumé, les paramètres géologiques, géochimiques et géophysiques favorables incluent :

- Une croûte continentale épaisse (pas toujours nécessaire);
- Des intrusions porphyriques ou aplitiques très évoluées et riches en fluor (>75 % SiO₂, Rb/Sr >>1), mises en place dans un contexte d'extension;

- De façon plus générale, les manifestations d'un volcanisme felsique intraplaque comme des calderas, des dômes de rhyolite;
- Des anomalies en Mo, Sn, W (F, Cu, Pb, Zn) dans les sédiments de ruisseaux;
- La silicification et l'altération potassique. Dans les gisements américains, ce sont les altérations proches de la minéralisation; ces altérations devraient bien survivre au métamorphisme;
- Mo, Sn, W, Rb, Mn et F peuvent être anomalux dans les roches près des zones minéralisées; des anomalies en Pb, Zn, F et U se rencontrent parfois dans les roches jusqu'à des kilomètres des gisements;
- Des minéraux riches en fluor;
- Les intrusions associées aux corps minéralisés peuvent créer des creux magnétiques, à cause de l'absence de magnétite (partiellement inspiré de : <http://www.em.gov.bc.ca/mining/Geosurv/metallcminerals/MineralDepositProfiles/PROFILES/L08.htm>).

Porphyres à Mo de type « arc »

Les porphyres à molybdène de type « arc » ressemblent davantage aux porphyres à Cu-Mo que ceux de type « rift ». On les rencontre dans un environnement d'arc magmatique et ils sont associés à des intrusions calco-alkalines comme des diorites ou des monzonites à quartz. Il s'agit donc de magmas moins évolués que ceux des porphyres à Mo de type « rift ». L'altération ressemble à celle des porphyres cuprifères (potassique au cœur, puis phyllique et propylitique vers les bordures). Les teneurs typiques sont de 0,1-0,2 % MoS₂ et les tonnages vont jusqu'à plusieurs centaines de millions de tonnes. La Colombie Britannique compte de nombreux exemples comme Endako (336 Mt), Glacier Gulch (125 Mt), Kitsault (108 Mt) et Adanac (94 Mt). Le plus gros porphyre à Mo de type « arc » connu est Quartz Hill en Alaska (793 Mt) (voir aussi les tableaux ci-dessus).

Le contexte géologique à rechercher pour les porphyres à Mo de type « arc » est donc différent de celui des porphyres à Mo de type « rift ». Les indices favorables incluent

- Un magmatisme d'arc, avec des intrusions calco-alkalines porphyriques;
- Des anomalies en Mo, W, F, Cu, Pb, Zn et Ag dans les sédiments de ruisseaux;
- L'altération potassique et phyllique (possiblement repérable par des levés radiométriques);
- Les accumulations de pyrite présentes en périphérie des zones à Mo sont détectables par des levés de polarisation provoquée et de résistivité;

- Les éléments Mo, Cu, W, et F peuvent être anomaux dans les roches près des zones minéralisées; des anomalies Pb, Zn, Ag se rencontrent parfois jusqu'à des kilomètres des gisements (<http://www.em.gov.bc.ca/mining/Geosurv/metallicminerals/MineralDepositProfiles/PROFILES/L05.htm>).

Autres types de gisements

À part les porphyres à Cu-Mo et les porphyres à Mo qui sont les deux sources dominantes de molybdène, certains porphyres à tungstène contiennent du Mo, par exemple à Mount Pleasant au Nouveau Brunswick ou à Logtung au Yukon. Bien que les gisements non-porphyriques comptent pour une fraction négligeable de la production mondiale de molybdène, nous les mentionnons pour compléter cette section. Ces autres gîtes incluent :

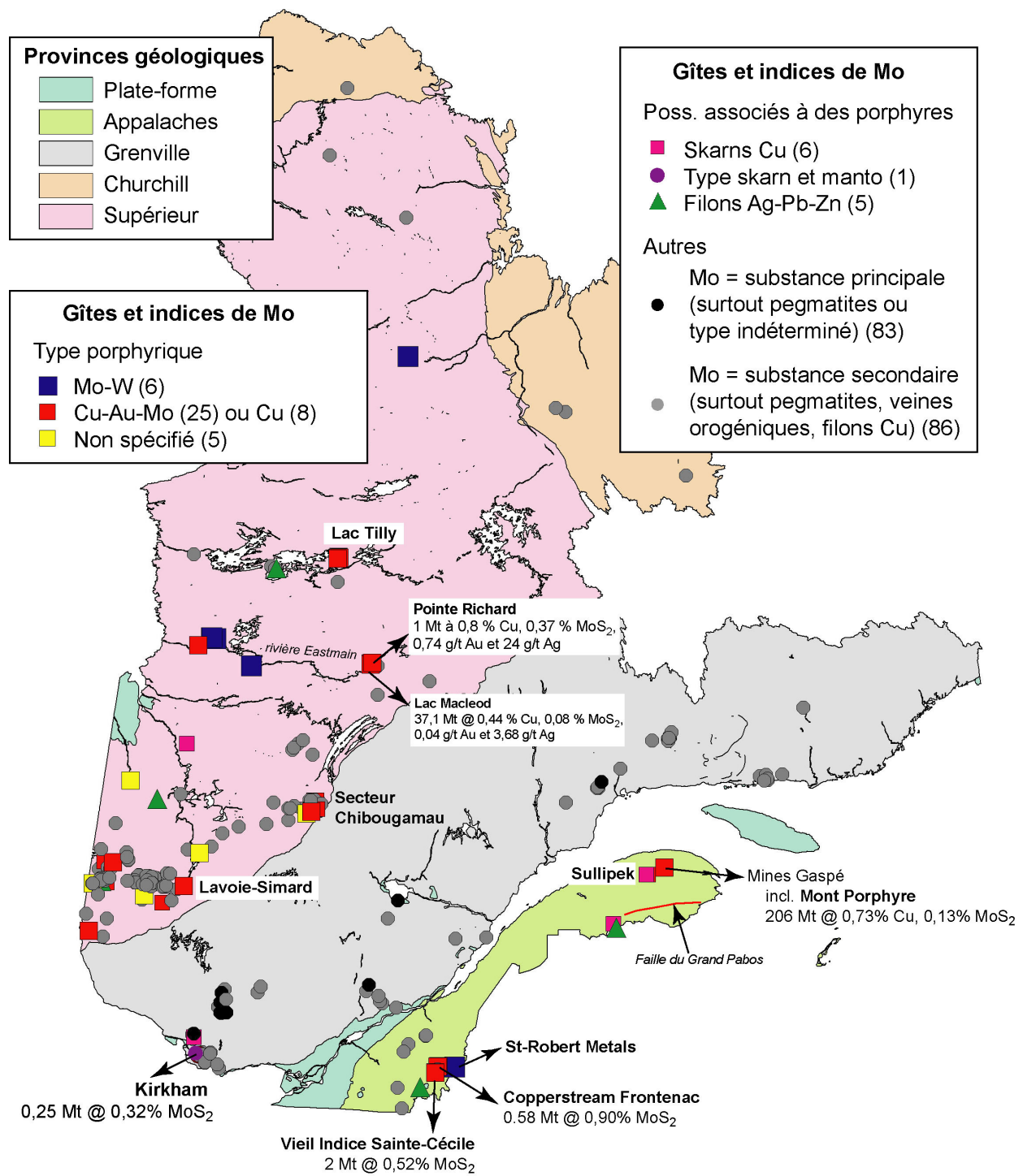
- Les skarns à Mo [dans les séquences carbonatées au contact avec des intrusions; tonnages jusqu'à 2 Mt; voir <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geosurv/MetallicMinerals/MineralDepositProfiles/PROFILES/K07.htm>]; au Québec, certains indices de la ceinture de Mont-Laurier peuvent être rapportés à ce type;
- Les gîtes de Ni-Zn-Mo-EGP dans les shales [minces horizons de shale noir enrichis en pyrite, vaesite (NiS₂), jordisite (MoS₂ amorphe) et sphalérite, dans des ceintures orogéniques post-Archéennes; présentement non-économiques; voir <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geosurv/MetallicMinerals/MineralDepositProfiles/Profiles/E16.htm> pour plus de détails et une liste de références sur les dépôts chinois];
- Les dykes de pegmatite et d'aplite [gisements de petites dimensions dont la teneur est irrégulière; exemple type dans la sous-province de l'Abitibi, ou ils sont associés à des teneurs en bismuth; voir « potentiel au Québec »];
- Les veines de quartz-molybdénite [peuvent être associées à des gîtes de type porphyrique, comme à Questa].

POTENTIEL AU QUÉBEC

Le Québec fut le plus important producteur canadien de molybdène entre la seconde guerre mondiale et 1965, grâce à l'exploitation de trois gisements de type « pegmatite » en Abitibi puis celle de Mines Gaspé à partir de 1963 (Trudel, 1980). La Colombie Britannique a depuis pris le dessus grâce à des porphyres à Cu-Mo et des porphyres à Mo de type « arc » comme Endako.

Le Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) répertorie 122 indices minéralisés, gîtes, gisements et mines fermées dont le molybdène constitue une substance principale, et 103 pour lesquels le Mo représente une substance secondaire; ceux-ci sont localisés sur la carte de la page suivante. Cette figure met l'accent sur les minéralisations de type porphyrique, puisque ce type de gîte produit la quasi-totalité du Mo dans le monde actuellement, et qu'il s'agit de gisements à fort tonnage. Notons que plusieurs fiches indiquent « indéterminé » dans la typologie et que certaines minéralisations de ce lot pourraient aussi être de type

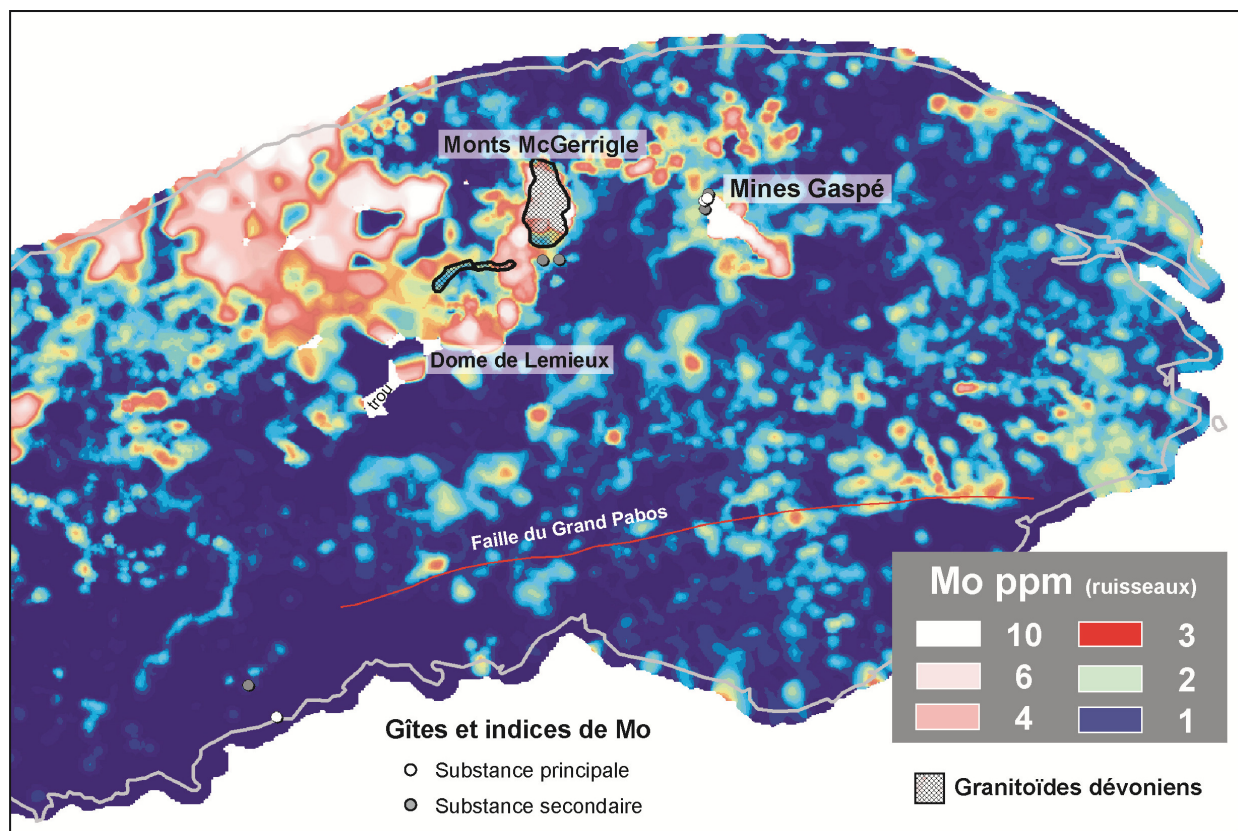
porphyriques. Le potentiel pour les gîtes porphyriques au Québec semble le meilleur dans les Appalaches et dans la province du Supérieur.



Carte géologique simplifiée du Québec (modifiée du DV 2002-06) montrant la localisation des gîtes et indices de Mo connus (tonnages et teneurs : fiches de gîtes du MRNF). Les teneurs de Mo ont été converties en MoS₂ en divisant par 0.599

Appalaches

Deux secteurs ressortent pour les minéralisations de type porphyre à Cu-Mo ou porphyre à Mo dans les Appalaches: la Gaspésie et l'Estrie-Beauce. La principale exploitation minière en Gaspésie (« Mines Gaspé ») a eu lieu près de Murdochville, où plusieurs gisements de type skarn et porphyrique à Cu-Mo (Allcock, 1982; Wares et Berger, 1995) ont été minés pendant plusieurs décennies. Les teneurs en Mo augmentaient en profondeur à Mines Gaspé (Hollister et al., 1974) et il resterait des concentrations de Mo non exploitées, par exemple au Mont Porphyre. Ces gisements sont associés à des granitoïdes dévoniens qui n'affleurent que très peu, mais qui forment une anomalie magnétique positive sur une carte du champ total. Wares et William-Jones (1993a) indiquent que l'intrusion principale, en profondeur, est une granodiorite porphyrique à biotite, syn-tectonique par rapport à la déformation acadienne.



Carte du molybdène dans les sédiments de ruisseaux en Gaspésie (interpolation, cellule de 200 m, rayon de recherche 4 km). Le 99^e percentile correspond à des teneurs en Mo de 6 ppm, alors que le 95^e percentile est entre 2 et 3 ppm. Notez les anomalies isolées dans le centre de la Gaspésie, la traînée vers le SE à partir de Mines Gaspé (dispersion en partie due à l'exploitation minière), et les zones anomales au dessus des Monts McGerrigle (un massif granitique dévoniens), dans le sud du secteur du dôme de Lemieux et le long de la faille du Grand Pabos. Le secteur en blanc au sud-ouest du dôme de Lemieux correspond à un trou dans la couverture géochimique (pas d'échantillons analysés) plutôt qu'à une anomalie positive.

Des intrusions dévoniennes sont présentes ailleurs en Gaspésie, par exemple dans le secteur du dôme de Lemieux (Pilote, 2005) et aux Monts McGerrigle. Le dôme de Lemieux constitue une structure circulaire - possiblement une ancienne caldera - contenant des roches sédimentaires plus anciennes que les volcanites situées en périphérie. Cette configuration incite à penser qu'une intrusion dévonnaise, non affleurante, pourrait avoir bombé les strates vers le haut (ex. Bellehumeur et Valiquette, 1993). Des anomalies en Mo sont visibles dans les sédiments de ruisseau dans le secteur sud du dôme.

Autour du massif des Monts McGerrigle, mis en place à environ 6 km de profondeur, on trouve une auréole métamorphique de 1,5 à 3 km de large (de Römer, 1977). La Mine Madeleine, située dans cette auréole, représente une minéralisation cuprifère sans Mo exploitée de 1969 à 1982 (Wares et William-Jones, 1993b). On remarque une forte anomalie en Mo dans les sédiments de ruisseaux directement au dessus du massif granitique, et aussi vers le sud.

Enfin Exploratech Ltée (1979) présente la faille du Grand Pabos dans le sud de la Gaspésie comme un secteur qui pourrait être intéressant pour le Mo en raison des dykes et « petites masses » rhyolitiques qui s'y trouvent. Trudel (1980) note également des « intrusions de porphyre » dans ce secteur. Enfin, on remarque le long de cette faille quelques minéralisations filoniennes à Ag-Pb-Zn, comme le gîte de Reboul (Savard, 1985; non montré sur la carte); rappelons que de telles veines peuvent être distales des porphyres à Mo.

Beaucoup plus au sud, plusieurs granitoïdes dévoniens affleurent dans le secteur du lac Mégantic (Cheve, 1990). Plusieurs de ces intrusions sont considérées comme 'mésazonales', avec des profondeurs de cristallisation de l'ordre de 8 km; elles sont entourées d'auréoles de métamorphisme de contact atteignant 4 km de large (Gauthier et al., 1989). Néanmoins, on recense deux secteurs minéralisés en Mo en bordure de l'intrusion de Sainte-Cécile/Saint-Sébastien: le gîte de Copper Stream-Frontenac, au nord (propriété « Gayhurst » de Globex Mining), et les indices Sainte-Cécile, au sud (propriété actuelle de Ressources Appalaches). L'intrusion est de forme elliptique, possiblement syn-tectonique, alors que les autres plus au nord ou à l'ouest sont plus circulaires, apparemment stériles, et possiblement tardi-tectoniques.

A Copper Stream-Frontenac, on trouve deux zones minéralisées importantes: 300 x 140 x 180 m (zone nord) et 300 x 110 x 200 m (zone sud), avec des teneurs dépassant 0,2 % MoS₂. Le gîte a été brièvement exploité pendant la seconde guerre mondiale; pour les deux zones combinées, les réserves probables (pré 43-101) sont de l'ordre de 0,6 Mt @ 0,54 % Mo (fiche de gîte Cogite 21E/15-1000). D'autres indices existant dans le même secteur, dont les indices Sainte-Cécile, produisent un « corridor à molybdène » de plus de 20 km de long, orienté NE, centré sur l'intrusion de Sainte-Cécile/Saint-Sébastien. Un « corridor à tungstène » parallèle, comprenant le gîte de St-Robert, existe environ 15 km plus à l'est (Gauthier et al., 1989).

Au « Nouvel Indice Sainte-Cécile » (propriété Maheu), on trouve des « dykes felsiques (aplites et granites) localement porphyriques (quartz) ainsi que des veines de quartz » (fiche de gîte). La minéralisation « se retrouve préférentiellement dans ces dykes et veines mais peut aussi être présente dans les cornéennes » (fiche de gîte). Pour le « Vieil Indice Sainte-Cécile » il est question de réserves probables (pré 43-101) de 2 Mt @ 0,52 % MoS₂ (fiche de gîte Cogite 21E/10-0014). Kelly (1975) donne les résultats d'une campagne publique de géochimie en environnement secondaire (surtout les sédiments de ruisseau) dans cette région. Selon Trudel

(1980), cette campagne a permis de définir des anomalies en Mo le long du contact est de l'intrusion de Sainte-Cécile/Saint-Sébastien.

Enfin au gîte St-Robert Metals, la minéralisation de Zn-Pb-W-Cu±Mo±Au est portée par des veines de quartz-calcite-séricite et par des dykes porphyriques, le tout étant encaissé dans des cornéennes à biotite. Ces cornéennes sont repérables par une anomalie magnétique et pourraient refléter la présence d'une intrusion en profondeur.

De façon plus spéculative, des minéralisations en molybdène pourraient être liées à des intrusions ordoviciennes ou siluriennes en Estrie-Beauce. En effet, l'indice Standard Asbestos (pas de fiche de gîte Sigéom; non localisé sur la carte) est un stockwerk à quartz-molybdénite « qui recoupe des granitoïdes compris dans un copeau de gneiss de type 'Chain Lakes' de la zone de mélange de Saint-Daniel » (Gauthier et al., 1989). Le stockwerk remplit une faille et son épaisseur est d'au plus 30 cm. L'intérêt de cet indice réside toutefois dans une certaine ressemblance avec les porphyres à Cu-Mo de Cathart Mountain et Sally Mountain dans le nord-ouest du Maine. A Cathart Mountain, la minéralisation est associée à une granodiorite porphyrique d'âge Silurien précoce qui recoupe une granodiorite ordovicienne (« *Attean granodiorite* ») à l'intérieur du massif de Chain Lakes (Hollister et al., 1974; Schmidt et Ayuso, 1993).

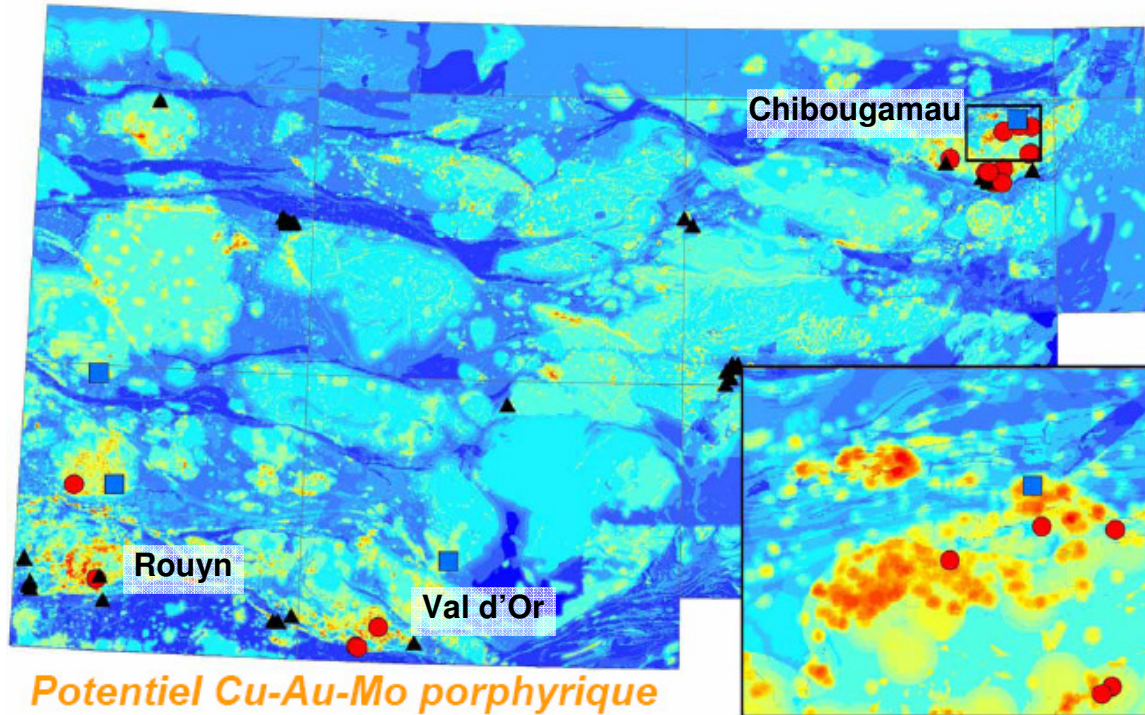
Province du Supérieur

Abitibi : porphyres

Dans la sous-province de l'Abitibi, plusieurs secteurs montrent un potentiel pour les minéralisations de type porphyrique, notamment dans les régions de Chibougamau, Val d'Or et Rouyn-Noranda (Mine Don Rouyn). Labbé et al. (2006) présentent d'ailleurs des cartes de potentiel minéral pour ce type de gîte en Abitibi.

La région de Chibougamau semble la plus prometteuse selon plusieurs auteurs (ex. Morin et al., 1999). Plusieurs gîtes et indices y rappellent en effet une minéralisation porphyrique, par exemple:

- Le prospect Queylus, sur le flanc sud de l'anticlinal de Chibougamau (grande envergure de l'altération, brèches hydrothermales, minéralisations de type stockwerk et disséminées; Pilote et al., 1996; Pilote et Guha 1998; Furic, 2006);
- Le gîte Devlin, dans le pluton de Chibougamau (veines partiellement encaissées dans des zones bréchiques, altération étendue; Pilote et al., 1996);
- Le gîte du lac Clark, sur le flanc nord de l'anticlinal, dans le Complexe du Lac Doré (dykes porphyriques et aphanitiques, veinules de quartz-molybdénite dans le cœur de la zone minéralisée, plusieurs types de brèches; Pilote et al., 1998).



Potentiel pour les gîtes de type Cu-Au-Mo porphyrique en Abitibi selon un modèle de logique floue (voir Labbé et al., 2006; image modifiée de http://www.quebecexploration.qc.ca/pdf/session1_10h30_labbejean-yves.pdf). Les gîtes connus illustrés sur cette figure n'ont pas nécessairement le Mo comme substance principale

Trudel (1980) nomme également la mine Grandroy, le Dôme du Radar, et la « zone de Rio Tinto » dans sa revue des indices de Mo et cite plusieurs facteurs montrant une similitude entre le secteur de Chibougamau et les gisements porphyriques plus jeunes : « présence de complexes intrusifs acides caractérisés par plusieurs phases d'intrusion, caractère épizonal marqué par des brèches intrusives, minéralisation associée à des porphyres quartzo-feldspathiques, altération hydrothermale intense, et localisation des venues dans des réseaux de fractures (type stockwerk) ».

Le secteur de l'indice Lavoie-Simard, près de Senneterre, est classé comme un « secteur d'intérêt premier » par Exploratech Ltee (1979). Des veines de quartz contenant de la molybdénite, de la chalcopryrite et de la sphalérite s'y rencontrent dans une « bande de tuf altéré » qui pourrait en fait représenter un « dyke de porphyre cisailé et altéré » selon Trudel (1980). La minéralisation se trouve près d'un batholite granitique.

Enfin Jébrak et Doucet (2002) décrivent une minéralisation porphyrique Au-Mo, l'indice Messaguay, en lien avec le pluton de Launay. L'altération est sodique, potassique et à magnétite. Il s'agit d'une propriété d'Osisko Exploration depuis 2005.

Abitibi : autres

Des pegmatites et des veines de quartz à Mo-Bi, de même que des pegmatites à béryl, à colombo-tantalite et à spodumène, sont associées au Batholite de Preissac-La Corne, dans le sud de l'Abitibi (Ste-Croix et Doucet, 2001). Spécifiquement, deux petits gîtes de Mo-Bi ont été exploités dans le Pluton de Preissac au cours des années 1960 (Boily, 1995) :

- la mine Cadillac Molybdenite, avec une production de 2 Mt @ 0,36 % MoS₂ et des réserves (pré 43-101) de 0,51 Mt @ 0,19 % MoS₂ et 0,03 % Bi;
- la mine Preissac Molybdenite, qui comptait des réserves pré-production de 1,25 Mt @ 0,53 % MoS₂.

Le gisement de Moly Hill, dans le pluton du même nom, posséderait des réserves (pré 43-101) de 0,27 (?) Mt @ 0,21 % MoS₂ et 0,08 % Bi (Boily, 1995) mais n'a jamais été exploité (Trudel, 1980). Finalement, la mine Molybdénite Corporation (Morono) dans le Pluton de La Corne exploitait des veines de quartz et quartz-muscovite-feldspath potassique minéralisées en Mo-Bi (réserves pré 43-101 de 0,2 Mt @ 0,07 % Mo et 0,019 % Bi; Trudel, 1980).

Selon Ste-Croix et Doucet (2001), les pegmatites à molybdène associées au Batholite de Preissac-La Corne « sont restreintes aux veines hydrothermales en bordure interne des faciès à muscovite-grenat (surtout dans le cas des plutons de Preissac et de Moly Hill). La molybdénite est surtout concentrée dans des dykes d'albitites et des veines de quartz associées avec les pegmatites à spodumène de l'encaissant. » Golden Valley mines a acquis plusieurs propriétés dans ce secteur en 2005.

Bien que ces gisements aient fourni une partie de la production historique de molybdène du Québec, les pegmatites à Mo ne possèdent pas autant d'intérêt pour l'exploration que les gîtes porphyriques en raison de la petite taille des gîtes et du caractère très variable des teneurs.

Reste du Supérieur

Il existe également un potentiel pour les minéralisations porphyriques dans le reste de la province du Supérieur. Ce potentiel est illustré notamment par la mine Troilus, 175 km au nord de Chibougamau (Inmet Mining Corp.); il s'agit d'un gisement d'or et de cuivre porphyrique (sans Mo) ayant produit depuis 1995 près de 56 Mt @ 0,1 % Cu et 1,1 g/t Au (Goodman et al., 2005; MRNF, affiche au PDAC 2007).

Plusieurs indices et gîtes de type porphyrique contenant du Mo se remarquent le long de la rivière Eastmain. Le gîte McLeod de Western Troy contient 23,7 Mt @ 0,52 % Cu, 0,08 %

Mo, 0,5 g/t Au, et 4,0 g/t Ag en ressources indiquées et 3,8 Mt de ressources inférées pour la zone principale (ressources 43-101) Ce gîte serait d'âge Protérozoïque, vers 2,0 Ga (GM 62037).

Un autre secteur prometteur à la Baie James est celui du lac Tilly (Sirios). Il s'agit d'un système porphyrique polymétallique (Mo-Cu; avec localement Cu-Au-Ag-Bi-Te) vraisemblablement archéen, caractérisé par un groupement de larges brèches hydrothermales hydrauliques et de zones de veines conjuguées (N100°-040°-140°) dans une tonalite à porphyres de quartz et biotite (GM 58969).

La Baie James et le nord représentent donc la nouvelle frontière pour l'exploration du molybdène au Québec.

RÉFÉRENCES

- Allcock, J.B. (1982) Skarn and porphyry copper mineralization at Mines Gaspé, Murdochville, Quebec. *Economic Geology*, v. 77, p. 971-999
- Bellehumeur, C. et Valiquette, G. (1993) Synthèse métallogénique du centre nord de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources (Québec), ET 92-03, 65 p.
- Boily, M. (1995) Pétrogenèse du batholite de Preissac-La Corne : implications pour la métallogénie des gisements de métaux rares. Ministère des Ressources naturelles (Québec), ET 93-05, 69 p.
- Carten, R.B., Geraghty, E.P., Walker, B.M. et Shannon, J.R. (1988) Cyclic development of igneous features and their relationship to high-temperature hydrothermal features in the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado. *Economic Geology*, v. 83, p. 266-296
- Carten, R.B., White, W.H. et Stein, H.J. (1993) High-grade granite-related molybdenum systems: classification and origin. Dans Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. et Duke, J.M., eds., *Mineral deposit modeling*. Geological Association of Canada Special Paper 40, p. 521-544
- Cheve, S.R. (1990) Étude tectono-stratigraphique, pétrologique et métallogénique de la région de Lac-Mégantic (Québec). Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1096 p.
- de Römer, H.S. (1977) Région des Monts McGerrigle. Ministère des Richesses naturelles (Québec), RG 174, 233 p.
- Doyon, M. (1995) Exploration des gîtes minéraux associés aux intrusions porphyriques de la Gaspésie : nouvelles avenues. Ministère des Ressources naturelles (Québec), PRO 95-09, 6 p.
- Exploratech Ltee (1979) Évaluation du potentiel en molybdène au Québec. Ministère des Richesses naturelles (Québec), DPV 619, 40 p.
- Furic, R. (2006) Genèse et organisation interne des brèches de Queylus, Chibougamau. Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Université du Québec à Montréal
- Gauthier, M., Auclair, M., Bardoux, M., Blain, M., Boivert, D., Brassard, B., Chartrand, F., Darimont, A., Dupuis, L., Durocher, M., Gariépy, C., Godue, R., Jébrak, M. et Trottier, J. (1989) Synthèse métallogénique de l'Estrie et de la Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources (Québec), MB 89-20, 681 p.
- S. Goodman, S., Williams-Jones, A.E., et Carles, P. (2005) Structural controls on the Archean Troilus gold-copper deposit, Quebec, Canada. *Economic Geology*, v. 100, p. 577-582
- Hollister, V.F., Potter, R.R. et Barker, A.L. (1974) Porphyry-type deposits of the Appalachian orogen. *Economic Geology*, v. 69, p. 618-630
- Jébrak, M. et Doucet, P. (2002) Geology and gold-molybdenum porphyry mineralisation of the Archean Taschereau-Launay plutons, Abitibi, Quebec. *Precambrian Research*, v. 115, p. 329-348
- Keith, J.D., Shanks, W.C., Archibald, D.A. et Farrar, E. (1986) Volcanic and intrusive history of the Pine Grove porphyry molybdenum system, southwestern Utah. *Economic Geology*, v. 81, p.553-577
- Kelly, R. (1975) Région des monts Saint-Cécile et Saint-Sébastien. Ministère des Richesses naturelles (Québec), RG 176, 30 p.
- Labbé, J.Y., Pilote, P., et Lamothe, D. (2006) Évaluation du potentiel minéral pour les gîtes porphyriques de Cu-Au-Mo de l'Abitibi. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, EP 2006-03
- Morin, R., Pilote, P., et Gosselin, C. (1999) Potentiel minéral du district minier de Chibougamau. Ministère des Ressources naturelles (Québec), PRO 99-02, 13 p.

- Pilote, P. (2005) Métallogénie de la région du Dôme de Lemieux – partie centre-nord de la Gaspésie. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Québec), ET 2004-05, 53 p.
- Pilote, P., et Guha, J. (1998) Métallogénie de l'extrémité Est de la sous-province de l'Abitibi. *Dans* Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau, nouvelle vision du potentiel de découverte. Ministère des Ressources naturelles (Québec), DV 98-03, p. 29-43.
- Pilote, P., Dion, C., et Morin, R. (1996) Géologie et évolution métallogénique de la région de Chibougamau : des gîtes de type Cu-Mo-Au porphyriques aux gisements filoniens mésothermaux aurifères. Ministère des Ressources naturelles (Québec), MB 96-14, 178 p.
- Pilote, P., Robert, F., Kirkham, R.V., Daigneault, R., et Sinclair, W.D. (1998) Minéralisations de type porphyriques et filoniennes dans le complexe du lac Doré – les secteurs du lac Clark et de l'île Merrill. *Dans* Géologie et métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau, nouvelle vision du potentiel de découverte. Ministère des Ressources naturelles (Québec), DV 98-03, p. 71-90
- Ross, P.-S., Jébrak, M. et Walker, B.M (2002) Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and concomitant formation of a stratified breccia zone at the Questa porphyry molybdenum deposit, New Mexico. *Economic Geology*, v. 97, p. 1679-1699
- Rowe, A. (2005) Fluid evolution of the magmatic hydrothermal breccia of the Goat Hill orebody, Questa Climax-type porphyry molybdenum system, New Mexico – A fluid inclusion study. Mémoire de maîtrise, New Mexico Institute of Mining & Technology, Socorro, New Mexico, 134 p.
- Savard, M. (1985) Indices minéralisés du sud de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources (Québec), ET 83-08, 92 p.
- Schmidt, R.G. et Ayuso, R.A. (1993) Porphyry Cu and Cu-Mo mineralization in New England: examples from Cathart Mountain and Debouillie plutons and implications for future exploration in the northern U.S. *Appalachian Mountains. Exploration and Mining Geology*, v. 2, p. 411-412
- Shinohara, H., Kazahaya, K. et Lowenstern, J.B. (1995) Volatile transport in a convecting magma column: implications for porphyry Mo mineralization. *Geology*, v. 23, p. 1091-1094
- Sillitoe, R.H. (1980) Types of porphyry molybdenum deposits. *Mining Magazine*, v. 142, p. 550-553
- Sillitoe, R.H. et Bonham, H.F. (1984) Volcanic landforms and ore deposits. *Economic Geology*, v. 79, p. 1286-1298
- Ste-Croix, L. et Doucet, P. (2001) Potentiel en métaux rares dans les sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Ministère des Ressources naturelles (Québec), PRO 2001-08
- Trudel, P. (1980) Métallogénie et prospection du molybdène au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources (Québec), DPV 733, 57 p.
- Wares, R.P. et William-Jones, A.E. (1993a) Porphyry copper-skarn mineralization at Mines Gaspé, Québec. *Exploration and Mining Geology*, v. 2, p. 414-415
- Wares, R.P. et William-Jones, A.E. (1993b) Overview of granitoid-related copper deposits of the Gaspé peninsula, Québec. *Exploration and Mining Geology*, v. 2, p. 412-414
- Wares, R.P. et Berger, J. (1995) Contrôles structuraux des gisements cuprifères de Mines Gaspé. Ministère des Ressources naturelles (Québec), MB 95-44
- White, W.H., Bookstrom, A.A., Kamilli, R.J., Ganster, M.W., Smith, R.P., Ranta, D.E. et Steininger, R.C. (1981) Character and origin of Climax-type molybdenum deposits: *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, p. 270-316
- William-Jones, A.E. et Duba, D. (1985) Cartographie de la cristallinité de l'illite dans le nord-est de la Gaspésie. Ministère de l'Énergie et des Ressources (Québec), MB 84-17, 52 p.