

## Les gisements de platinoïdes : une situation mondiale exceptionnelle

Thierry Augé<sup>1</sup>.

Les éléments du groupe du platine, ou « platinoïdes » sont au nombre de 6 (par numéro atomique croissant : ruthénium (Ru), rhodium (Rh), palladium (Pd), osmium (Os), iridium (Ir), platine (Pt), mais seuls Pt, Pd et Rh ont une importance économique significative.

Contrairement aux métaux de base, pour les platinoïdes, la situation mondiale est exceptionnelle car leur production est dominée par deux grandes formations géologiques :

- Le Bushveld en Afrique du Sud (NE de Pretoria) qui produit 77% du platine, 30% du palladium et 82 % du rhodium mondial ;
- Norilsk en Russie (Sibérie nord) qui, à l'inverse, produit 55% du palladium mondial et 14% du platine.

Une des principales utilisations de ces métaux est la catalyse (principalement les pots catalytiques des véhicules pour lesquels le platine a pris la 1<sup>ère</sup> place devant le palladium depuis la fin des années 90 avec le développement du diesel). La 2<sup>ème</sup> utilisation est dans la bijouterie ; le solde se partage entre la chimie, la dentisterie, l'électronique et divers autres secteurs.

En 2005 (selon Johnson Matthey, Platinum 2006), le Bushveld a produit 158,9 t de platine, 80,6 t de palladium et 19,5 t de rhodium, les chiffres correspondants pour Norilsk étant respectivement de 27,7 t, 143,7 t et 2,8 t. Au total, ces deux gisements produisent donc 91% du platine mondial, 85% du palladium et 95% du rhodium. Cela relativise la production des autres gisements (complexe de Stillwater aux États-Unis ; Sudbury et Lac des Îles, Canada ; Grand Dyke, Zimbabwe), de même que l'exploration pour de nouveaux gisements qui reste relativement marginale et, bien entendu, très tributaire de la demande et des cours, dont l'évolution est donnée dans la figure 1.

### Typologie des gisements

Le complexe du Bushveld (Photo 1), comme celui de Stillwater (Montana, États-Unis, à proximité de Saint-Paul), relève de la catégorie des **complexes mafiques-ultramafiques stratiformes**, correspondant à de grandes chambres magmatiques dans lesquelles les minéraux s'accumulent par gravité. Tous d'âge protérozoïque (Bushveld : 2060 Ma), ils se différencient en deux types principaux.

Le type *fennoscandien* est représenté par des gabbros à sulfures disséminés surmontant une base

ultramafique parfois porteuse de gîtes de chromite. Il ne se forme pas de concentration massive de sulfure, le minerai de platinoïdes est assez pauvre, sur des puissances de plusieurs mètres. Le gisement de chromite de Kemi (côte nord du golfe de Botnie, à proximité de la frontière suédoise), est situé dans la base ultramafique d'un de ces types de complexes, dont seule la partie inférieure est préservée. L'âge des complexes fennoscandiens est Paléoprotérozoïque (entre 2 500 et 2 400 Ma).

Le type *Bushveld* est relativement pauvre en roches ultramafiques et les concentrations de sulfures, tout comme celles de chromite, plus haut dans la série, sont associées aux pyroxénites et gabbros dans la zone critique (*Critical Zone*). Deux principaux horizons minéralisés sont reconnus, un niveau de chromite riche en platinoïdes, « UG2 » et un niveau relativement enrichi en sulfure, le « Merensky Reef ». Le complexe de Stillwater se rattache à ce modèle.

**Sudbury** (environ 400 km N-NW de Toronto, Ontario, Canada), après avoir constitué le modèle de l'intrusion mafique-ultramafique minéralisée en sulfure, objectif d'exploration en lui-même, est devenu l'exception. En effet, même si ce gisement, de nickel-cuivre principalement, résulte d'une différenciation magmatique par fusion du manteau, comme les complexes stratiformes ci-dessus, le phénomène déclenchant est un impact météoritique qui fait consensus aujourd'hui. Les métaux ne proviendraient pas de l'astéroïde lui-même.

Dans le **modèle Norilsk**, un panache mantellique a généré un magma basaltique qui s'est mis en place sous forme de grands empilements de coulée basaltiques

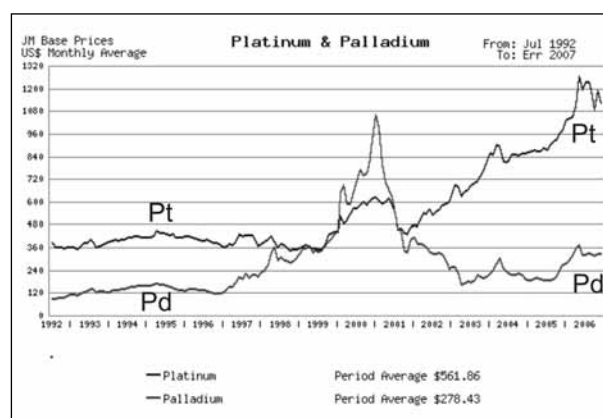


Figure 1. Évolution des cours du platine et du palladium (source : Johnson Matthey).

1. Courriel : t.auge@brgm.fr

(Photo 2), mais également de sills de gabbros et dolérites insérés dans l'encaissant sous les basaltes, ou parfois en intrusion dans les basaltes eux-mêmes. Les dépôts de sulfures disséminés et massifs auxquels sont associées les minéralisations en platinoïdes se trouvent à la base des sills. Le complexe est daté à 225 Ma, soit à la limite Permien-Trias.

Quelques mots sur des types de gisement de moindre importance économique. Dans les **complexes alaskéens** (Australie, Sibérie, Oural, Alaska, Colombie), les platinoïdes se trouvent principalement sous forme d'alliages Fe-Pt, dans les chromites ou les phases silicatées, sans sulfure. Le complexe de Guli, (Sibérie) présente cependant la particularité de n'avoir que de l'osmium. Dans les **complexes ophiolitiques** (Chypre, Nouvelle-Calédonie, cf. "Géologues" n° 138, 2003), le platine est aussi associé à la chromite. Les gîtes associés aux **komatiites** (basaltes archéens de composition ultramafique) s'apparentent au modèle Norilsk dans la mesure où les platinoïdes sont ici associés aux sulfures de nickel et de cuivre concentrés à la base des coulées. Les concentrations de platinoïdes dans des niveaux de **schistes noirs**, aux côtés d'autres métaux, présentent un caractère anecdotique. Il en est de même des latérites. Enfin, il ne faut pas oublier les **placers** dans lesquels on trouve les platinoïdes associés aux sulfures, dans le cortège des minéraux lourds.

### Aperçu génétique

La typologie présentée ci-dessus montre clairement que l'association **platinoïdes-sulfures** est le phénomène dominant. Lors de l'apparition dans le magma d'une phase sulfurée par immiscibilité (de composition fer-soufre), qui peut se produire soit après l'incorporation de soufre dans le magma, soit par modification de composition du magma en réponse à des phénomènes de mélange de magma, les éléments chalcophiles (Cu, Ni, platinoïdes...) vont pouvoir se concentrer. Pour expliquer

l'enrichissement parfois anormalement élevé en ces éléments, Antony Naldrett a proposé la notion de « *R Factor* », rapport de masse entre le magma silicaté et le liquide sulfuré en équilibre.

Selon cette hypothèse, pour qu'il y ait enrichissement en métaux chalcophiles autre que Fe, il faut que la phase sulfurée liquide ait été en équilibre avec la plus grande masse possible de magma, afin que l'enrichissement en Cu, Ni, platinoïdes provenant du magma soit le plus efficace possible. Pour le Bushveld, on peut imaginer une situation stable avec enrichissement en métaux chalcophiles, puis concentration de la phase sulfurée par gravité. Car pour former un gisement, encore faut-il que les sulfures se concentrent par tout type de processus possible. Sinon, on demeure en présence de fines disséminations de sulfures dans une roche, donc sans concentration économique de métaux. Dans le cas de Norilsk, la dynamique du phénomène aurait une importance majeure, avec un système alimenté en permanence par du nouveau magma qui pérennise l'équilibre, donc l'enrichissement en métaux précieux des sulfures.

La question du rôle d'une phase hydrothermale est également essentielle. Dans le magma, lors du refroidissement (cas du Bushveld par exemple), une phase hydrothermale aqueuse apparaît. Le rôle de cette phase hydrothermale est à la base du débat entre l'origine magmatique ou hydrothermale des minéralisations. Le rôle du fluide est-il simplement de modifier par une sorte d'auto-altération une minéralisation existante ou est-il plus majeur, avec participation dans le transport des métaux et précipitation des sulfures ? La question n'est pas tranchée et il est vraisemblable que les deux phénomènes interviennent, ce que le rapprochement des deux écoles de pensée tendrait à suggérer. Les fluides ont joué un rôle ; il reste à le préciser exactement.

Dans la matte sulfurée, la présence d'éléments



Photo 1. Affleurements du Bushveld (cliché Thierry Augé).



Photo 2. Empilement de coulées de basaltes à Norilsk (cliché Thierry Augé).

volatils est avérée. Cette matre sulfurée cristallise selon un processus de cristallisation fractionnée, ce qui conduit à un liquide résiduel enrichi en cuivre, platinoïdes et en éléments volatils tels que Te, Bi, Sb... qui formeront des niveaux riches dans la masse des sulfures (cas de Norilsk notamment).

En quoi la formation de concentrations de platinoïdes correspond-elle à des phénomènes exceptionnels ? Par la somme des paramètres qui convergent et surtout par la pérennité, la multiplicité et la répétitivité des phénomènes. Il faut d'abord souligner que l'on n'a jamais démontré la présence de magmas spécialisés, comme c'est le cas dans d'autres types de gisements, liés aux granites par exemple. Pour que les sulfures précipitent, il faut soit qu'il y ait une contamination par l'encaissant (à Norilsk, les sédiments encaissants sont riches en sulfures), soit qu'il y ait une variation de composition chimique du magma, ce qui serait le cas du Bushveld avec le mélange de magmas de composition chimique différente.

L'apparition d'une phase sulfurée ne résulte pas en premier lieu de la composition des magmas, mais des processus, complexes, impliqués. Et c'est une difficulté pour l'exploration de nouvelles cibles.

L'origine des platinoïdes dans les environnements sans sulfures (cas des complexes alaskéens ou des chromites ophiolitiques) est plus difficile à expliquer. Comme les minéraux de platine sont inclus dans les chromites, on a invoqué qu'ils pouvaient constituer un germe pour la cristallisation de la chromite. Ensuite, pour qu'il y ait concentration des platinoïdes, il faut concentrer la chromite et l'on peut proposer ici une concentration physique par gravité (Augé, 2005). Cette hypothèse se heurte aux tenants de l'origine sulfurée initiale, dont la déstabilisation aurait conduit aux platinoïdes et à la chromite.

## Exploration et recherche : méthodes et acteurs

L'avancée des connaissances en matière de typologie des gisements et de genèse a permis de confirmer les deux grandes étapes de l'exploration :

- la localisation et la délimitation des complexes mafiques-ultramafiques potentiellement porteurs : géologie générale, aéromagnétisme, prospection géochimique et alluvionnaire, etc. ;
- la recherche de guides à des échelles plus restreintes : discontinuités, brèches, présence de sulfures ou de chromites (notion de « pièges », etc.).

La minéralogie des platinoïdes progresse réguliè-

rement (les éléments du groupe du platine forment des minéraux du groupe du platine, on les trouve également en solution solide dans les sulfures de Fe, Ni, Cu) et de nouvelles espèces sont identifiées chaque année, conduisant au total actuel d'environ 150 minéraux, tandis que plusieurs centaines de « nouvelles » espèces minérales ont été suspectées ou décrites mais non validées. Les platinoïdes se retrouvent dans des familles de minéraux très variées (alliages, sulfures, antimoniures, oxydes...) et leur étude est susceptible de fournir des données quant à l'origine des minéralisations. Ainsi, en Inde par exemple, la remobilisation hydrothermale d'une minéralisation magmatique constituée de sulfure et d'alliage de platinoïdes se retrouve sous la forme de minéraux complexes à Sb-Bi-Te. Néanmoins, la contribution de la minéralogie à la connaissance des processus de genèse des minéralisations de platinoïdes reste limitée.

Les acteurs impliqués sont au premier chef les compagnies exploitantes puisque, comme nous l'avons vu, la production de platinoïdes est très largement dominée par deux gros gisements dont les réserves dépassent le siècle (au rythme actuel de la consommation). Les géologues sont ici impliqués dans l'évaluation des ressources et des réserves et dans la recherche d'extensions de gisements connus. Ainsi, dans le Bushveld, alors que la production provient essentiellement de niveaux métriques minéralisés – *Merensky Reef* à sulfures et platinoïdes et *UG2* à chromite et platinoïdes –, un 3<sup>ème</sup> niveau est reconnu (*Platreef*) dans l'extension nord du complexe, qui pourrait être l'équivalent de l'un des deux gisements précédents, mais issu de processus génétiques différents.

Au Canada, comme les platinoïdes sont des sous-produits d'une production installée, celle de nickel-cuivre, ce sont surtout des compagnies juniors qui essaient de se placer par la promotion de prospects potentiels.

La recherche est répartie entre un petit nombre de pays et d'organismes : Service géologique et départements de recherche des sociétés (Inco, Falconbridge) et universités (Chicoutimi) au Canada, *US Geological Survey* aux États-Unis, quelques universités européennes (Royaume-Uni, Espagne, Italie), Allemagne (BGR), France (BRGM). Plus que de véritables équipes de recherche, il s'agit de chercheurs individuels. Tous ces chercheurs se rencontrent en particulier lors du symposium international sur le platine qui rassemble environ 150 personnes à chaque session et qui a lieu tous les 3 ou 4 ans.

L'apport de la recherche à l'exploration dépend du stade d'avancement de celle-ci. À un stade relativement amont, elle peut aider à la définition des zones de meilleur potentiel.

## CONNAISSANCE DES GÎTES MINÉRAUX

---

### Pour en savoir plus

- Augé T., Genna A., Legendre O., Ivanov K.S., Volchenko Y. A., 2005: Primary platinum mineralization in the Nizhny Tagil and Kachkanar ultramafic complexes, Russia: a genetic model for PGE concentrates in chromitite-rich zones. *Econ. Geol.*, 100, 707-732.
- Cabri L. J. ed. (2002): The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum group elements. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), Vol. 54, 852 p. (26 articles).
- Coll. Symposiums sur le platine : le 9<sup>ème</sup> était à Stillwater (Montana) en 2002, et le 10<sup>ème</sup> en Finlande en 2005.