

Nouvelles approches analytiques, expérimentales et numériques appliquées à la compréhension de la genèse des concentrations métalliques

Michel Cathelineau¹.

Quels objectifs pour les métallogénistes français ?

Concernant les métaux et les géomatériaux, les questions relèvent de la métallogénèse et de l'environnement. Sur le thème de la métallogénèse, trois grands domaines de recherche :

- Processus de fractionnement à l'origine des hyper-accumulations métalliques ?
- Caractérisation des grands systèmes métallogéniques ?
- Où sont les métaux et les géo-matériaux pour l'avenir ?

Sur le plan environnemental :

- Comment exploiter « proprement » ?
- Comment réhabiliter les sites pollués en métaux toxiques, et utiliser des matériaux, autrefois considérés comme des « déchets », comme des ressources ?

Tous ces thèmes donnent lieu à de nombreuses recherches à l'échelle mondiale. Nous nous limitons à évoquer ici les résultats obtenus récemment dans le cas du GdR Transmet (BRGM-CNRS) et les perspectives qui ont résulté de cette activité.

1. Courriel : michel.cathelineau@g2r.uhp-nancy.fr

Avancées du groupe du GdR Transmet (2001-2006)

Ce GdR a été constitué par deux partenaires, le CNRS et le BRGM. Les travaux ont duré de 2001 à 2006 et ont permis des avancées significatives dans plusieurs domaines.

Premier domaine : l'analyse des **paléofluides**. Les études réalisées ont permis de progresser dans l'analyse *in situ* de ces fluides et donc dans les conclusions génétiques qui peuvent en être tirées (pression, température, donc éventuellement enfouissement). La détermination précise des trajets P-T et la mise en évidence de l'évolution brutale de pression ou température permet d'évaluer les causes des processus (rupture sismique des failles, réchauffement lié à des intrusions cachées, l'ensemble de ces processus pouvant avoir un rôle clé sur le dépôt). Toutefois, la mise au point des méthodes pour l'analyse détaillée des concentrations élémentaires (métaux, éléments en traces) reste difficile, et implique des intercomparaisons entre méthodes, *Laser Induced Breakdown Spectroscopy* (LIBS) et *Laser-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS) notamment. Il faut en général compléter les résultats obtenus par les méthodes non destructrices (Raman, Synchrotron) puis par méthodes destructrices sur les mêmes types d'inclusions (LIBS pour les majeurs, LA-ICP-MS pour les traces). C'est sur cette base intercomparative que l'on peut espérer reconstituer la paléochimie des fluides et donc évaluer la spéciation des métaux.

À ce jour, il n'existe que peu d'études intégrées et d'application à des fluides liés aux transferts des métaux, en dehors des fluides magmatiques plus faciles pour tester les méthodes car très salins. Parmi les questions qui pourraient être étudiées à l'avenir : le rôle des saumures dans la mobilité de l'uranium ou de l'argent ; l'impact des mélanges de fluides sur la spéciation et le dépôt des métaux.

Deuxième domaine de progrès, l'expérimentation sur la **spéciation des métaux**, leur solubilité dans les magmas, et le partage des métaux entre phase fluide et phase vapeur. Un des résultats majeurs obtenus dans le cadre du GdR concerne la complexation de l'or et la stabilité des minéraux qui lui sont le plus souvent associés (porteurs de Sb et As). Les travaux réalisés ont permis d'acquérir des données thermodynamiques et de développer des modèles thermodynamiques prédictifs du comportement de l'or en solution. De même, les études menées sur la spéciation des métaux dans les vapeurs et le partage des métaux entre phases vapeur et liquide apportent des contraintes fortes aux modèles de liaison porphyres-épithermaux.

L'étude enfin du lien entre adakites et gisements Cu-Au à caractère porphyrique ou épithermal, en s'appuyant sur les analyses sur inclusions fluides vitreuses, confirmées expérimentalement, a conduit à proposer que seules les adakites « vraies » puissent être préférentiellement enrichies en soufre, en éléments chalcophiles et en or. Des travaux très novateurs sur la solubilité de l'or dans ce type de magma montrent que le soufre augmente la solubilité de l'or par plus d'un ordre de grandeur.

Ces travaux expérimentaux et analytiques enrichissent considérablement la connaissance des processus de fractionnements des métaux dans la lithosphère. Ils sont cependant indissociables d'une connaissance géologique, structurale et géodynamique des cas étudiés. Ils donnent *in fine* des guides conceptuels sur les mécanismes à l'origine des préconcentrations magmatiques et donc leur localisation potentielle, ou sur les processus efficaces pour l'enrichissement des métaux dans la phase fluide. Les conditions de pression et température les plus propices à ces fractionnements et la nature des phases fluides ou magmatiques impliquées donnent également des pistes pour la localisation des conditions les plus favorables à la formation des gisements.

Perspectives

Pour l'avenir, l'amélioration des **modèles métallogéniques** passe par une réponse aux questions suivantes. Quels sont :

- les processus les plus significatifs à l'origine des concentrations en métaux : fonctionnement de la source, efficacité du fractionnement initial, conditions de stabilité des porteurs de métal ;
- les contrôles de l'efficacité du transport : rôle de la présence de ligands comme le soufre ou le chlore ;
- les facteurs contrôlant l'efficacité des processus de dépôt (mélange, dilution, redox) ?

Suite aux travaux réalisés par le GdR, notamment sur les **systèmes épithermaux et mésothermaux aurifères** associés à l'exhumation post-orogénique et aux plans de subduction, il apparaît que la concentration du soufre régule de manière critique la solubilité des porteurs de métaux, de la source jusqu'au gisement. Les études pourraient se poursuivre sur le rôle du soufre, par rapport à d'autres ligands comme le chlore, sur les fractionnements élémentaires dans la lithosphère, et cela au moyen d'expérimentations, de modélisations d'interactions eau-roche et d'analyses des paléofluides.

Dans le domaine de l'**uranium**, autre secteur de recherche important des équipes françaises, notamment

CONNAISSANCE DES GÎTES MINÉRAUX

du G2R-CREGU, il convient de poursuivre les travaux sur le fonctionnement des sources (stabilité des porteurs primaires), le rôle des saumures sur la solubilisation de ces porteurs et le transport de l'uranium. Dans les zones de dépôt, l'impact des mélanges de fluides et des processus de dilution sur le comportement des métaux (approche thermodynamique, détermination des sources et évolution des fluides), la relation entre migration de fluides et grands événements géodynamiques, la préservation

des concentrations primaires ou leur dispersion sont entre autres, des clés de la compréhension de la formation des concentrations économiques.

À l'échelle française, ces recherches se poursuivent sous l'impulsion des grands groupes d'exploration minière (AREVA NC, en particulier pour l'uranium), et du point de vue des programmes nationaux dans le cadre du programme du CNRS 3F (Failles, Fluides, Flux).