

NOUVELLES PERSPECTIVES HYDROGÉOCHIMIQUES POUR L'EXPLORATION – PHASE 2, LES EAUX SOUTERRAINES

Par Silvain Rafini

Dans l'environnement, les métaux se dispersent naturellement à partir des gisements métalliques. La détection de ces empreintes géochimiques, diluées, mais très étendues, constitue un vecteur de premier ordre pour l'exploration des corps métalliques qui en sont la source. De fait, depuis les années 1970, les analyses de concentrations métalliques dans les sols, les sédiments glaciaires, les sédiments de ruisseaux et de fond de lacs, ont constitué un outil d'exploration privilégié par les géologues du Québec, et ont largement contribué aux découvertes. La détection de telles empreintes dans les eaux souterraines a été envisagée dans les années 1970, mais son développement drastiquement retardée par les moyens analytiques limités de l'époque. Avec la généralisation des techniques ICP-MS et ICP-MS Haute-Résolution, cette méthode connaît un important essor dans plusieurs régions métallifères (Australie, Alaska, Espagne) où de telles empreintes ont été reconnues et analysées, confirmant ainsi l'utilité des levés hydrogéochimiques à des fins d'exploration.

Les dépôts affleurants ont été largement explorés, les efforts sont tournés vers le potentiel plus en profondeur, ce qui requiert le développement d'outils novateurs adaptés. Dans le contexte du Bouclier canadien, couvert en grande partie par les sédiments glaciaires, la méthode visée revêt un intérêt particulier : elle fournit un échantillonnage direct des niveaux inférieurs profonds, et la nature du couvert glaciaire ne restreint pas, *a priori*, son efficacité.

La revue littéraire révèle un certain nombre d'études expérimentales réalisées durant les deux dernières décennies dans le but d'évaluer la méthode dans une variété de contextes métallogénique, géologique, climatique et hydrogéologique. Dans la plupart des cas, l'hydrogéochimie détecte efficacement l'empreinte des corps minéralisés, confirmant le potentiel de la méthode pour l'exploration locale. Toutefois, la nature de cette empreinte, les différents contrôles qu'elle subit, ainsi que les performances globales de la méthode, varient fortement d'un contexte à l'autre. Il apparaît en particulier qu'une bonne connaissance des conditions hydrogéologiques du site est vitale pour une interprétation valable des résultats. Le contexte de couverture glaciaire n'étant pas documenté, le présent projet se fixait pour mandat de fournir une évaluation préliminaire de la méthode au Québec. Il s'agissait : 1) de vérifier l'existence d'une empreinte géochimique dans l'eau au contact d'un sulfure massif (SM); 2) à différentes profondeurs sous la couverture glaciaire; et 3) en s'éloignant du corps. À ces objectifs premiers s'ajoutent des tests de protocoles d'échantillonnage visant à établir la méthodologie optimale.

Un levé de 30 échantillons d'eau souterraine a donc été réalisé en août 2016 sur le gîte *Phelps Dodge 1* (camp de Matagami, Abitibi), grâce à une collaboration entre l'UQAC, le CONSOREM, et GLENORE. Ce levé a démontré qu'un SM zincifère enfouit à plus de 300 mètres de profondeur incluant une épaisse couverture glaciaire produit un halo métallique détectable dans l'aquifère de socle à des distances de plusieurs centaines de mètres du dépôt. Ce halo présente un enrichissement en Zn ainsi qu'en plusieurs éléments intermédiaires et traces mobiles dans le milieu aqueux. L'empreinte de subsurface est multi-élément : Zn, Fe, Sb, Sn, Se, Be, Ag, V, Cu, Pb, Ni, Co, SO_4^{2-} . Elle se fractionne en profondeur pour devenir Zn, Fe, (Sb). Le fractionnement latéral, c'est-à-dire sur le chemin de dispersion du halo, reflète la mobilité relative des traceurs et leur facteur d'enrichissement : l'empreinte proximale, à environ 100 m du SM, est Zn, Fe, Sb, Be, (Sn, SO_4^{2-}), l'empreinte distale, environ 500 m, est Zn, Fe, (Sn). Plusieurs forages réputés négatifs, car ayant raté le SM de quelques dizaines de mètres, et sans « senteur ou signal » à l'analyse de la carotte, contiennent une eau très nettement modifiée par le SM proximal : l'analyse de l'eau dans ces forages aurait donc permis aux géologues de suspecter la présence d'un corps métallique proximal et de vectoriser l'exploration dans la direction de l'amont hydraulique.

Par ailleurs, plusieurs éléments de cette empreinte sont corrélés avec le temps de résidence de l'eau dans le socle. Une correction est donc requise pour rehausser les anomalies profondes, par normalisation sur un élément conservateur (i.e., dont la mobilité est peu affectée par les conditions Eh-pH et les éléments majeurs) et non enrichi au contact du SM. Le Ti apparaît comme le meilleur candidat, toutefois ce ratio doit être confirmé sur un plus grand nombre d'échantillons; le ratio par Cl proposé dans la littérature s'avère inapproprié.

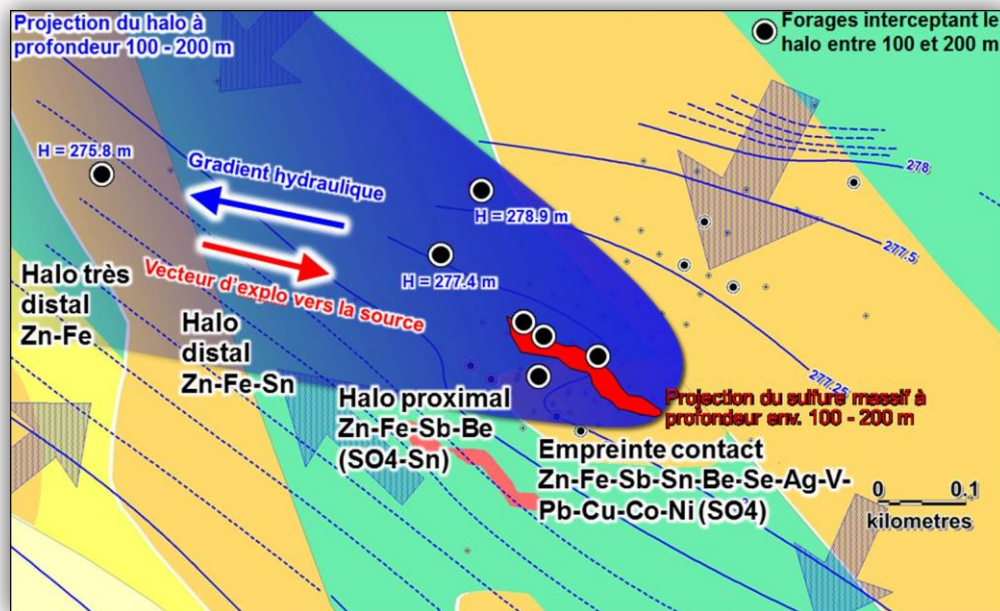
L'étude hydrogéologique permet ici de raffiner l'interprétation du levé. La mesure des niveaux statiques permet d'établir l'amont et l'aval hydraulique, et donc le chemin de dispersion. L'analyse des majeurs révèle une eau calcique très peu saline, impliquant une forte interconnexion avec l'eau contenue dans le till carbonaté sus-jacent, confirmée par le comportement physique de l'aquifère: répartition des charges hydrauliques, absence de rabattements au pompage. Par ailleurs, on observe une dilution par les eaux météoriques au moyen d'une rampe d'accès avortée dans les années 80'.

Les tests de protocoles d'échantillonnage indiquent que l'empreinte est suffisamment forte pour être détectée au protocole passif : *bailer*. Le protocole actif, avec purge et pompage à faible débit, plus élaboré, semble fournir une empreinte plus marquée, bien que les concentrations soient

très diminuées, dans le cas présent, par la dilution évoquée plus haut. Plusieurs points d'amélioration du protocole passif sont identifiés, notamment afin de diminuer le temps de rééquilibrage avec CO₂ atmosphérique lors de l'extraction. Les avantages et inconvénients respectifs des deux protocoles ont été reconnus, toutefois des investigations supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer le protocole le mieux adapté.

Plusieurs facteurs doivent être documentés dans l'optique d'une utilisation optimale de cette méthode en exploration : 1) le mécanisme de solubilisation métallique en contexte de faible oxygénation (gîtes profonds), et ses contrôles ; 2) les traceurs hydrogéologiques permettant de corriger le type d'eaux (recharge vs eau ancienne) et l'influence de la profondeur du forage et de l'échantillon ; 3) impact de la profondeur de l'échantillon lors d'un échantillonnage « aveugle » (c.a.d., sans connaître la profondeur du corps minéralisé) ; 4) temps de repos requis après arrêt du forage.

L'analyse des eaux souterraines à partir de forages pourrait devenir une systématique lors des campagnes d'exploration. Elle a le potentiel d'étendre la portée des informations accessibles par le forage, en complément des autres méthodes indirectes déjà utilisées en routine (géophysique : *Pulse EM*). Cette augmentation de la valeur ajoutée des forages pour un moindre coût améliorerait les performances de l'exploration, notamment profonde et en contexte de couverture transportée. Cette étude préliminaire conclue à un « go ». Il est recommandé de poursuivre les investigations expérimentales de cette méthode.



REPRÉSENTATION DU HALO DE DISPERSION MÉTALLIQUE ÉMANANT DU GÎTE PHELPS DODGE 1 ENTRE 100 ET 200 M DE PROFONDEUR, ET SON FRACTIONNEMENT HORIZONTAL.

FICHE SOMMAIRE

- Objectifs*
- Vérifier l'existence d'une empreinte métallique dans l'eau souterraine au contact d'un sulfure massif, dans l'environnement du Bouclier canadien au Québec, en subsurface et en profondeur.
 - Investiguer la nature géochimique de cette empreinte à différentes profondeurs et son fractionnement lors de sa dispersion depuis le corps métallique.
 - Comparer l'efficacité de la méthode vs les coûts pour différents protocoles d'échantillonnage.
 - Documenter les aspects tels que la dimension des empreintes et le rôle du contexte hydrogéologique, la spéciation métallique, le traçage par le fractionnement des terres rares, etc.
-

- Résultats*
- Revue littéraire démontrant le fort potentiel de la méthode autant que l'absence de test expérimental en contexte d'exploration dans le Bouclier canadien avec couverture transportée.
 - Réalisation d'un levé expérimental sur le Gîte zincifère de Phelps Dodge 1 (camp de Matagami, Abitibi) au mois d'août 2016 : 30 échantillons d'eau souterraine extraite de forages d'exploration anciens à différentes profondeurs et distances horizontales du sulfure massif ; analyse ICP-MS Haute Résolution.
 - Une empreinte proximale multi-éléments est très clairement identifiée, dans laquelle un panel d'éléments traces, pour la plupart chalcophiles, sont enrichis.
 - Un enrichissement est également mesuré dans l'eau au contact du sulfure massif à très forte profondeur (échantillons à 208, 350, 360 et 537 m).
-

- Innovations*
- La géochimie des eaux souterraines permet de délimiter un halo métallique émanant d'un corps minéralisé massif enfoui sous une épaisse couverture transportée.
 - Cette méthode est efficace pour l'exploration profonde.
 - Plusieurs aspects de la méthode doivent être renseignés pour un usage efficace : définition des niveaux de référence (seuils d'anomalies), optimisation des protocoles d'échantillonnage et d'analyse, contextes de campagne active, influence et correction de la profondeur de l'eau (temps de résidence), recherche des meilleurs vecteurs (ratios, assemblage, indices de saturation, etc.)
-