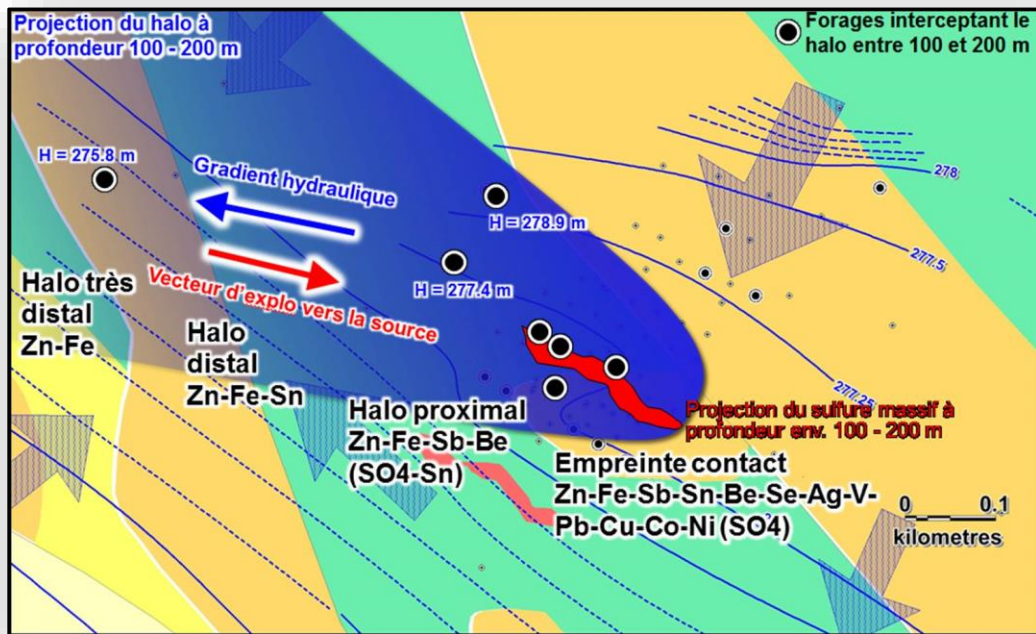


# HYDROGEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES APPLIQUEE A L'EXPLORATION MINERALE – PHASE 1

PROJET 2016-05



Par : Silvain Rafini  
Mai 2017

---

## AVERTISSEMENT

---

CE DOCUMENT PRESENTE CERTAINS RESULTATS DES TRAVAUX DE RECHERCHE DU CONSOREM (CONSORTIUM DE RECHERCHE EN EXPLORATION MINERALE) RENDUS PUBLICS POUR LE BENEFICE DE L'ENSEMBLE DE LA COMMUNAUTE GEOLOGIQUE, CECI APRES LA PERIODE DE CONFIDENTIALITE PREVUE AUX REGLEMENTS GENERAUX DU CONSOREM.

BIEN QUE CE DOCUMENT AIT SUBI UN PROCESSUS D'ÉVALUATION INTERNE, DES ERREURS OU OMISSIONS PEUVENT S'Y RETROUVER. LE CONSOREM NE PEUT ÊTRE TENU RESPONSABLE POUR DES DÉCISIONS PRISES SUR LA BASE DE CES RÉSULTATS.

LE CONTENU DU DOCUMENT DEMEURE LA PROPRIETE DE SON AUTEUR ET DU CONSOREM ET PEUT ETRE REPRODUIT EN TOTALITE OU EN PARTIE A DES FINS NON COMMERCIALES EN CITANT LA REFERENCE SUIVANTE :

RAFINI, S., 2016. HYDROGÉOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES APPLIQUÉE À L'EXPLORATION MINÉRALE. RAPPORT, PROJET CONSOREM 2016-05, 57 P.

TOUTEFOIS, LA REPRODUCTION MULTIPLE DE CE DOCUMENT, EN TOUT OU EN PARTIE, POUR DIFFUSION A DES FINS COMMERCIALES EST INTERDITE, SAUF AVEC LA PERMISSION ECRITE DE CONSOREM.

### CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi  
555, boulevard de l'Université  
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : [consorem@uqac.ca](mailto:consorem@uqac.ca)

Site Web : [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

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 fût drastiquement retardé par les moyens analytiques limités de l'époque. Avec la généralisation des techniques ICP-MS et ICP-MS à haute résolution, cette méthode connaît un important essor dans plusieurs régions métallifères (ex.: 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 profond, 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. En effet, 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 métallogéniques, géologiques, climatiques et hydrogéologiques. 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, un « *go / no-go* ». 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 Glencore. Ce levé a démontré qu'un SM zincifère enfoui 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<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Elle se fractionne en profondeur pour devenir Zn, Fe, (Sb).

Le fractionnement latéral, c.-à-d., 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,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), l'empreinte distale, environ à 500 m, est Zn, Fe, (Sn). Plusieurs forages réputés négatifs, car ayant raté le SM de quelques dizaines de mètres, et sans « senteur » 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 (c.-à-d., dont la mobilité est peu affectée par les conditions Eh-pH et les éléments majeurs) et non enrichi au contact du SM. 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, confirmé par le comportement physique de l'aquifère : répartition des charges hydrauliques, absence de rabattements au pompage. Par ailleurs, une dilution est observée 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 le  $\text{CO}_2$  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'eau (recharge versus une eau ancienne) et l'influence de la profondeur du forage et de l'échantillon ; 3) l'impact de la profondeur de l'échantillon lors d'un échantillonnage « aveugle » (c.-à-d., sans connaître la profondeur du corps minéralisé) et 4) le 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 conclut à un « go ». Il est ainsi recommandé de poursuivre les investigations expérimentales de cette méthode.

---

**TABLE DES MATIERES**

---

Avertissement .....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
Table des Matières .....	vi
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux.....	ix
1 Introduction.....	1
2 Contexte .....	5
3 Description du site.....	7
3.1 Cadre géologique .....	7
3.1.1 Géologie archéenne.....	7
3.2 Cadre hydrogéologique .....	12
3.2.1 Niveaux statiques.....	12
3.2.2 Analyse de la fracturation ouverte .....	13
3.2.3 Modèles conceptuels .....	15
4 Méthode .....	16
4.1 Mode d'échantillonnage.....	16
4.2 Profondeur des intervalles de prélèvement.....	17
4.3 Protocole analytique .....	17
4.4 QA-QC.....	18
4.5 Stratégie d'échantillonnage .....	18
5 Résultats .....	20
5.1 Éléments majeurs.....	21
5.2 Éléments mineurs, traces et ultratrace .....	22
5.2.1 Niveaux de référence.....	22
5.2.2 Cartes de valeurs brutes (Zn et Fe).....	24
6 Discussion .....	27
6.1 Profils de distance du sulfure massif (SM) .....	27
6.2 Empreinte hydrogéochimique du sulfure massif (SM).....	29
6.2.1 Corrélations brutes.....	29
6.2.2 <i>Diagrammes R-R distance au corps métallique</i> .....	30
6.3 Influence de la profondeur de l'eau .....	32
6.3.1 <i>Notion d'âge de l'eau</i> .....	32
6.3.2 Composition chimique et temps de résidence de l'eau.....	32
6.3.3 Diagramme R-R profondeur.....	33

6.3.4	Profondeur relative.....	36
6.4	Dispersion horizontale du halo .....	38
6.5	Empreinte profonde versus empreinte subsurface .....	40
6.6	Influence du mode d'échantillonnage .....	44
6.6.1	Influence du mode d'échantillonnage sur la géochimie de l'eau.....	44
6.6.2	Pompage et connexions artificielles.....	46
7	Conclusion.....	48
8	Références .....	50
9	Annexe 1 : planche photos .....	53
10	Annexe 2 : Diagraphie d'imagerie acoustique (televiewer) .....	54
11	ANNEXE 3 : QA-QC.....	55
12	ANNEXE 4 : MATÉRIEL NUMÉRIQUE .....	56
13	ANNEXE 5 : Tests de significativité des coefficients de corrélation pour populations restreintes .....	57

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1. Localisation du site d'étude.....	7
Figure 2. Camp de Matagami (Genna, 2015) .....	9
Figure 3. Localisation du gîte Phelps Dodge 1, camp Ouest, Matagami (modifié de SIGEOM 2015, comm. pers. écrite Boucher, 2016).....	10
Figure 4. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) et géologie quaternaire (Veillette et al., 2003). Les aires situées entre les chenaux sont occupées par le till de Cochrane et des dépôts organiques (marécages). Les failles du socle ont été reportées. ....	11
Figure 5. Colonne hydrostratigraphique quaternaire. Modifié de Parent et al., (2008). ....	12
Figure 6. Niveaux statiques mesurés en sondage, réseau de fractures ouvertes, et géométrie des écoulements interprétés. Fond topographie (DEM 50k NRCAN).....	14
Figure 7. Modèle conceptuel d'écoulement impliquant l'aquifère de socle et l'aquifère granulaire supérieur. ....	15
Figure 8. Disposition des échantillons par rapport à la lentille de sulfure massif de Phelps Dodge 1 (au centre des cercles concentriques). ....	19
Figure 9. Valeurs de salinité mesurées à la sonde HANNA ( <i>Total Dissolved Solids</i> ).....	21
Figure 10. Représentation des concentrations en éléments majeurs sur un diagramme de Piper. ....	22
Figure 11. Diagrammes <i>box plot</i> des concentrations en Zn, Cu, Ni, Pb, Fe et SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> dans les eaux souterraines pour l'ensemble de la base de données PACES-UQAT (580 échantillons)..	23
Figure 12. Carte des concentrations en Zn dans l'eau de l'aquifère de socle autour du gîte PD1. ....	25
Figure 13. Carte des concentrations en Fe dans l'eau de l'aquifère de socle autour du gîte PD1. ....	26
Figure 14. Profils concentration <i>versus</i> distance au SM pour une sélection d'éléments. ....	28
Figure 15. Corrélation entre les valeurs brutes de concentration et la distance au corps métallique.....	29
Figure 16. Diagramme de corrélation de type <i>R-R</i> , l'axe horizontal et l'axe vertical indiquent respectivement les valeurs de <i>R</i> entre la concentration et la distance au corps métallique (sulfure massif, SM) pour les groupes « Protocole <i>Bailer</i> » et « Protocole Pompage ». ....	31
Figure 17. Diagramme <i>R-R</i> , l'axe horizontal et l'axe vertical indiquent respectivement les valeurs de <i>R</i> entre la concentration et les profondeurs de l'échantillon et du forage. Seuls les échantillons du « protocole <i>Bailer</i> » sont considérés ( $n = 25$ ). ....	34
Figure 18. Diagramme <i>R-R</i> , l'axe horizontal et l'axe vertical indiquent respectivement les valeurs de <i>R</i> entre la concentration et la distance au SM, et entre la concentration et la maturité de l'eau. Seuls les échantillons du « protocole <i>Bailer</i> » sont considérés ( $n = 25$ ). ....	35
Figure 19. A) profil montrant les distributions des profondeurs par groupe d'échantillon, B) illustration du concept de profondeur relative. ....	36
Figure 20. Diagramme <i>R-R</i> .....	37
Figure 21. Fractionnement horizontal de l'empreinte hydrogéochimique du corps métallique. ...	39
Figure 22. Fractionnement vertical de l'empreinte hydrogéochimique du corps métallique. ....	40
Figure 23. Diagrammes multiéléments de la géochimie complète des échantillons pris en doublets pour comparaison de mode d'échantillonnage passif ( <i>bailer</i> ) vs actif ( <i>pompage</i> ).....	45
Figure 24. Disposition sur une image satellite des forages avec échantillonnage pompage, du lac de rampe directement connecté au socle, et de la fracture ouverte N.-N.-E.2. ....	46
Figure 25. Écarts normalisés entre les concentrations obtenues par les deux protocoles d'échantillonnage pour plusieurs éléments constituant l'empreinte du SM. ....	47



---

**LISTE DES TABLEAUX**

---

Tableau 1. Stratégie d'échantillonnage de l'eau autour de la lentille de sulfure massif.....	19
Tableau 2. Valeurs statistiques des concentrations mesurées.....	20
Tableau 3. Valeurs centiles Zn de la base régionale PACES-UQAT.....	24
Tableau 4. Matrice de corrélation de Spearman entre les différentes variables considérées dans le traitement des données.....	36
Tableau 5. Facteurs d'enrichissement de l'eau en contact avec le corps métallique pour plusieurs tranches de profondeur.....	43

---

## 1 INTRODUCTION

---

Les gîtes métallifères sont des corps géologiques de volume très restreint dans l'immensité de la croûte terrestre. Dans de nombreux cas, leur découverte est rendue possible par la détection de leur empreinte, primaire et/ou secondaire, de dimension typiquement plus large que le gîte lui-même. Cette méthode d'exploration « indirecte » est nécessaire en particulier pour la recherche des gîtes non affleurant.

L'empreinte « primaire » se distingue de l'empreinte « secondaire » en ce que les éléments qui la constituent n'ont pas été remaniés après la mise en place du dépôt. L'empreinte primaire géochimique est l'altération hydrothermale qui est syngénétique au gîte lui-même. Au contraire, l'empreinte secondaire résulte de la dispersion tardive dans l'environnement d'éléments géochimiques émanant du corps minéralisé. De par sa nature diffuse, le halo secondaire, typiquement étendu spatialement, suit un chemin de dilution depuis la source jusqu'à un niveau de base régional. Ce chemin implique un transport souvent complexe et polyphasé, faisant intervenir essentiellement des mécanismes glaciaires, hydrogéologiques, et/ou pédogénétiques (Rafini, 2012 et 2013). La recherche de ces empreintes géochimiques à des fins d'exploration minérale s'est considérablement développée dans les années 70 (*p. ex.*, Cameron, 1977), alors que les efforts d'exploration, historiquement focalisés sur les minéralisations affleurantes, se sont tournés vers le potentiel non visible de la croûte terrestre, c.-à-d. aux minéralisations enfouies dans le socle et aux régions avec couverture transportée. Ce changement de stratégie a été notamment occasionné par la maturation des régions métallifères et l'exploration de nouvelles provinces nordiques. Au Québec, la réalisation par le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) de vastes levés régionaux dans l'environnement secondaire sur les terrains archéens et protérozoïques ont contribué significativement à la mise en valeur de la ressource du sous-sol et à la découverte d'un grand nombre d'indices et de gîtes. Tandis que la stratégie du MERN était de se concentrer sur la géochimie des sédiments de fond de lacs, dans le but de se procurer une couverture homogène sur l'ensemble de la province, l'industrie de l'exploration a eu fréquemment recours à la recherche d'empreintes secondaires dans d'autres médias, tels que les sols, les tills, les sédiments de ruisseaux, les eaux souterraines et de surface.

L'analyse de la géochimie de l'eau souterraine à des fins d'exploration a suscité un intérêt pionnier en exploration d'uranium, dans les années 70 (Langmuir et Chatham, 1980). Son efficacité pour la recherche d'autres substances était restreinte par les limites analytiques de l'époque : les métaux constituent, dans le milieu aqueux, un soluté en très faible concentration qui était sensiblement non détectable en routine avant l'avènement de l'ICP-MS, dans les années 90. La généralisation de cette méthode analytique, puis de l'ICP-MS à haute résolution dans les années 2005-2010, ont provoqué un puissant regain d'intérêt pour l'hydrogéochimie appliquée à l'exploration des gîtes de métaux de base et précieux. En témoignent plusieurs projets gouvernementaux de grande ampleur, tels que les projets : United States Geological Survey (USGS) sur le porphyre géant de Pebble (Eppinger et al., 2012) ; des groupes de recherche australiens CRC LEME (Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration) sur le supergéant SEDEX de Broken Hill (De Caritat, 2005, Kirste et de

Caritat, 2003) ; et CSIRO sur le gîte aurifère Panglo (Gray, 1998), ainsi que de la Commission géologique du Canada sur le camp VMS de Bathurst (Leybourne et al., 2000, 2002 et 2006). Par ailleurs, un certain nombre d'études expérimentales ont évalué la méthode dans une variété de contextes métallogéniques, géologiques, climatiques et hydrogéologiques : les gîtes Spence et La Pampa au Chili (Leybourne et Cameron, 2006) ; le gîte Tillex au Canada (Gilliss et al., 2004) ; le gîte Tsumeb, en Namibie (Bowell, 2014) ; les gîtes Hinta et Kayar en Inde (De Caritat et al., 2009) ; les gîtes La Zanza et MasaValverde en Espagne (Pauwels et al., 2002) ; le gîte Wan'ershan en Chine (Quian et al., 2008) ; les gîtes St-Ives (Carey et al., 2003) et North Miitel (Noble et al., 2013), et le district minier Black Flag (Giblin et Mazzucchelli, 1997) en Australie.

S'appuyant sur un levé de 200 échantillons d'eau souterraine recueilli à moins de 10 km des trois gîtes de type SEDEX localisés en Inde, De Caritat et al. (2009) établissent que l'empreinte hydrogéochimique du gîte est rendue détectable par la normalisation sur l'élément conservateur Cl<sup>-</sup>, en particulier les ratios Zn/Cl et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup> et As/Cl<sup>-</sup>. Ces auteurs montrent de plus que l'indice de saturation par rapport à des minéraux primaires ou secondaires associés à la minéralisation (p. ex., le sulfate de fer jarosite) délinée fidèlement les halos hydrogéochimiques des gîtes. Eppinger et al. (2012) mettent en évidence, par l'analyse ICP-MS à haute résolution, 68 échantillons autour du gîte Pebble (Alaska), une empreinte hydrogéochimique proximale composite dont la plupart des constituants enrichis n'auraient pas été détectés par la méthode ICP-MS quadripôle standard. En contexte aurifère, l'analyse haute résolution de 78 échantillons d'eau prélevés en forages suivant une maille kilométrique autour du gîte subaffleurant de St-Ives (Australie), révèle un enrichissement en Au, monométallique, et somme toute très proximal et superficiel (Carey, 2003). L'absence de halo profond résulte, selon l'auteur, du contexte hydrogéologique particulièrement complexe dominé par un apport profond des eaux hypersalines depuis le lac Lefroy subissant une forte évaporation. La mesure de concentrations en Au, Pd, Pt aussi basses que 1 ppt est permise ici par une préconcentration au charbon actif (Gray, 2001) dans une aliquote de 1000 ml. Ce rôle critique des conditions hydrogéologiques et l'importance de bien les contraindre pour interpréter correctement les levés hydrogéochimiques a aussi été mis en avant par Leybourne et Cameron (2006) lors de l'étude du cas du porphyre de Spence dans le désert Atacama (Chili). Les auteurs démontrent que l'eau échantillonnée dans l'aquifère libre à l'aplomb et en aval du gîte est fortement modifiée par un apport profond d'eau saline très mature remontant à la faveur d'un réseau de fractures, lui-même associé à la mise en place du porphyre (eau riche en Cl<sup>-</sup>, I, Br, Li). Noble et al. (2013) montrent que le gîte nickélifère de North Miitel (Australie), subaffleurant sous une couverture transportée peu épaisse, produit un très net halo hydrogéochimique de dimension hectométrique dans l'aquifère sus-jacent (régolithe + sédiments transportés, profondeur < 50 m), marqué par un enrichissement en Ni, Pd, Pt, (Li).

La revue littéraire révèle que, 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. Enfin, il ressort de cette compilation que les contextes de couverture glaciaire du milieu climatique boréal ne sont pas documentés.

L'efficacité de cette méthode dans le contexte québécois présente donc une lacune de connaissance. De plus, ces études de cas visent des minéralisations peu profondes et échantillonnent l'aquifère superficiel et libre. Le potentiel de la méthode pour l'exploration profonde, en échantillonnant les eaux matures de l'aquifère de socle, demeure méconnu.

Ce projet se fixait donc pour mandat de fournir une évaluation préliminaire de la méthode au Québec, un « *go/no-go* ». L'objectif premier est de vérifier l'existence d'une empreinte géochimique dans l'eau au contact d'un sulfure massif (SM) enfoui sous une épaisse couverture glaciaire, à différentes profondeurs, et en s'éloignant du corps. À cela s'ajoute un test de protocole d'échantillonnage visant à documenter la méthodologie optimale. Les dépôts affleurants ont été largement explorés, les efforts sont actuellement tournés vers le potentiel profond, 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 puisqu'elle fournit un échantillonnage direct des niveaux inférieurs profonds et la nature du couvert glaciaire ne restreint pas, *a priori*, son efficacité. Lorsque les moyens d'une utilisation efficace de la méthode dans le contexte québécois seront établis, celle-ci pourrait devenir une systématique des campagnes de forages et augmenter ainsi l'efficacité de l'exploration sur le territoire.

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). Ce levé a bénéficié de la collaboration originale de la compagnie Glencore, mettant à disposition sa propriété et les infrastructures présentes, la base de données associée au gîte visé, assurant la vérification des accès, les levés de niveaux statiques préalables, l'arpentage des trous et enfin fournissant le moyen de transport et l'assistant technique de l'opérateur du levé.

---

## 2 CONTEXTE

---

Des échanges géochimiques se produisent au contact prolongé de l'eau souterraine avec un gisement métallique. En contexte relativement superficiel, autrement dit lorsque l'eau est encore relativement immature et oxydante, ces échanges impliquent une oxydation des sulfures, minéraux particulièrement labiles, qui a pour effet de détruire leur structure cristalline et de mettre en solution les éléments qu'ils contiennent, en concentration majeure ou trace. Les éléments peu solubles vont précipiter sur place sous forme de minéraux secondaires, tandis que les éléments mobiles vont être transportés dans le réseau d'écoulement souterrain pour produire un halo dispersé par advection, dirigé vers l'aval hydraulique, et par diffusion, dirigé de manière isotrope. En contexte d'exploration minérale, l'interception de telles empreintes peut permettre d'orienter l'explorateur vers la source métallique. Il s'agit pour cela d'établir les traceurs adéquats, les anomalies brutes, les ratios ou associations d'éléments et les indices géochimiques.

La morphologie de ces halos secondaires est régie par la mobilité des éléments les constituant. Cette dernière est conditionnée par leur spéciation, l'acidité, le potentiel redox (Eh) et la composition de l'eau en éléments majeurs. Les cations divalents Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Ni ont une très forte propension à se présenter sous forme libre, si bien que leur mobilité est augmentée par la diminution du pH. Ceci résulte d'une baisse d'adsorption causée par la compétition avec les ions  $H^+$ , de même signe, sur les sites non spécifiques. Ainsi, Dzombak et Morel (1990) avancent que l'adsorption des cations augmente drastiquement lorsque le pH augmente de 4 à 6, provoquant une baisse corollaire de leur mobilité. Inversement, plusieurs éléments traces essentiellement chalcophiles associés typiquement aux minéralisations hydrothermales ont tendance à se complexer sur des ligands hydroxydes pour former des oxyanions, complexes dont la charge négative engendre une sensibilité au pH opposée à celle des cations libres : leur mobilité augmente lorsque le pH augmente. Il s'agit entre autres des éléments As, Sb, Se, Mo et V, formant les complexes  $H_2AsO_4^-$  ou  $HAsO_4^{2-}$ ,  $SeO_4^{2-}$ ,  $Sb(OH)_6^-$  ou  $SbO_3^-$ ,  $HMoO_4^-$  ou  $MoO_4^{2-}$ ,  $HVO_4^{2-}$  ou  $H_2VO_4^-$ . Les ligands  $SO_4^{2-}$  et  $Cl^-$  ont aussi pour effet d'augmenter significativement la solubilité de la plupart des éléments. Ceci inclut Au, élément extrêmement immobile, qui forme toutefois les complexes  $AuCl_2^-$ ,  $AuCl_3^-$ ,  $AuCl_4^-$  en présence d'eau chlorurée (Carey, 2003, Pokrovski et al., 2016). Cet élément devient aussi soluble en présence d'iode (Gray, 1998) grâce au complexe  $AuI_2^-$ . Gray (1998) note que ces complexes (Au-Cl et Au-I) sont instables en conditions réductrices. La mobilité de Au dans l'eau souterraine est donc régie essentiellement par les conditions redox.

Le temps de résidence de l'eau dans un aquifère augmente très rapidement avec la profondeur. Gascoyne (2004) estime, par isotopie stable dans un aquifère de socle du Bouclier canadien (Manitoba), que l'eau échantillonnée à 200 m sous la surface est âgée de plusieurs siècles tandis que cet âge atteint  $10^5$  années et plus à partir de 400 m, approximativement. Si ces valeurs semblent révéler la lenteur de l'écoulement dans le roc, il faut ici mentionner l'extrême complexité de la quantification du temps de résidence de l'eau dans un système hydraulique aussi hétérogène que le socle, où interagissent un écoulement rapide ségrégué dans le réseau de fractures, et un écoulement extrêmement lent dans la perméabilité interstitielle.

Le temps prolongé de résidence de l'eau dans le socle implique des échanges eau-roche importants qui modifient progressivement la composition géochimique de l'eau. Cette maturation de l'eau reflète la géochimie des formations aquifères traversées ainsi que l'aptitude des minéraux à se météoriser.

Proche de la surface, le potentiel redox (Eh) est régi par l'oxydation de la matière organique et la respiration bactérienne. Plus en profondeur, lorsque toute la matière organique est désintégrée, la consommation de l'oxygène dissous, et la diminution inhérente de Eh, sont causés par l'oxydation du Fe (II) contenu dans les minéraux hôtes ferrifères, essentiellement la biotite, la pyrite, la magnétite. Le potentiel redox (Eh) devient donc régi par le tampon Fe (II) -Fe (III). Cette diminution du Eh avec la maturation de l'eau, pose la question de la capacité de l'eau à imprimer la signature hydrogéochimique d'un corps métallique en profondeur : les conditions réductrices permettent-elles qu'une telle signature soit observable ? Le cas échéant, quel est le mécanisme — autre que l'oxydation — par lequel l'eau acquiert le bagage métallique du corps ? Derrière cette question réside celle de l'intérêt de la méthode pour l'exploration profonde.

### 3 DESCRIPTION DU SITE

Le secteur du levé est le gîte Pelphs Dodge 1, un gîte de sulfure massif volcanogène (SMV) situé dans le camp minier de Matagami, au nord de la ceinture de roches vertes archéennes de l'Abitibi, Québec, Canada (Fig. 1). Le camp de Matagami est un district de SMV regroupant 20 dépôts dont la moitié est économique et caractérisé par des teneurs en Zn particulièrement élevées (9 % en moyenne, Genna, 2015), pour une production historique totale de 50 Mt de minerais depuis les années 60.

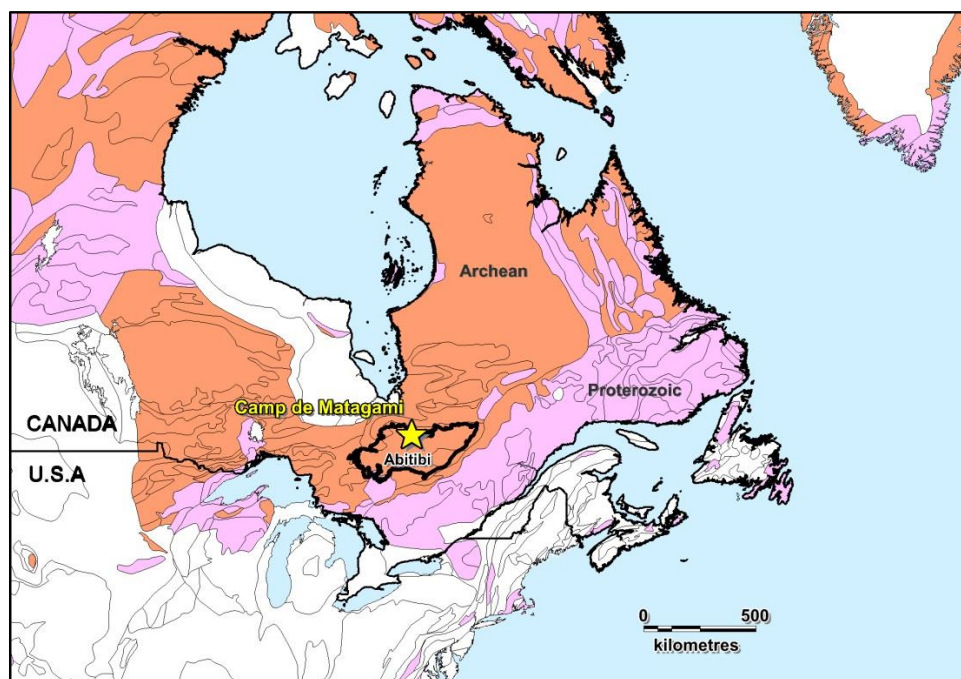


Figure 1. Localisation du site d'étude

#### 3.1 Cadre géologique

##### 3.1.1 Géologie archéenne

###### 3.1.1.1 Géologie régionale

La ceinture de roches vertes de la Sous-province de l'Abitibi résulte de l'accrétion diachrone du nord vers le sud de bassins volcano-sédimentaires formés entre 2735 et 2698 Ma, séparés par de larges ensembles plutoniques synvolcaniques à syntectoniques essentiellement de la série TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite), orientés globalement E-W, assimilables à des arcs (Daigneault et al., 2002). Certains ensembles plutoniques de la partie orientale de la sous-province sont interprétés comme des fenêtres de la semelle crustale profonde, métamorphisée à un plus haut grade.



La sous-province a subi une tectonique polyphasée entre 2695 et ca 2670 Ma (Daigneault et al., 2002), dominée par une verticalisation précoce des couches et un raccourcissement subséquent N-S marqué par la formation de larges plis E-W dont les cœurs synclinaux sont portés par les bassins volcano-sédimentaires et les cœurs anticlinaux par les arcs plutoniques, plus rigides et moins déformés. Les zones de transition entre ces deux types de domaines lithologiques sont donc localisées sur les flancs, où se produit une déformation plus intense exprimée par le plissement isoclinal serré des couches volcano-sédimentaires, une foliation de plan axial E-W très pénétrative, souvent confondue avec la stratification, et une concentration du cisaillement dans des couloirs de failles. Ces couloirs très en pentes, dans la plupart des cas, enregistrent un cisaillement ductile (mylonitisation) à ductile-cassant polyphasé, avec une linéation d'étirement d'aval-pendage (*down-dip*) généralisée, vraisemblablement associée à l'épisode principal de plissement (déformation de flancs), recoupée localement par une linéation à faible pendage indiquant un épisode de décrochement tardif. Les failles de l'Abitibi se distinguent des failles modernes par leur attitude subverticale : l'angle ainsi formé avec  $\theta_1$  est très fort ce qui impose : 1) sur le plan géomécanique, un « affaiblissement » des failles (*strength weakening*) possiblement dû aux pressions très élevées des fluides hydrothermaux (Sibson 1996) ou à la présence de formations « savon » (serpentinite, talc), et 2) probablement une composante précoce en déformation coaxiale, c.-à-d., « l'écrasement » ductile des couches. Les conditions cinématiques de la structuration régionale de l'Abitibi demeurent débattues, au moins pour les phases précoces, elles relèvent soit de mouvements essentiellement verticaux induits par des forces de volume (*gravity-driven*), ou de mouvement horizontaux induits par des forces de contact aux limites du système. Dans le second cas, les plis se forment à l'aplomb d'un décollement régional dans une croûte relativement mince (*buckling*) ou bien résultent du contraste rhéologique entre les bassins et les arcs plutoniques conduisant les premiers à basculer sur les seconds (*doming*). Derrière ces questions réside celle, plus géodynamique, de l'importance très controversée des forces horizontales à l'Archéen – à l'aube de la formation de la lithosphère continentale, et donc des conditions de l'initiation de la tectonique des plaques.

### 3.1.1.2 Géologie locale

Le camp de Matagami est localisé au nord de la Sous-province de l'Abitibi. Il est constitué (Fig. 2) : 1) des unités volcaniques des Groupes de Watson (2726,3 – 2722,4 Ma, Mortensen, 1993), essentiellement felsique, et de Wabassee, plus jeune, essentiellement mafique et 2) du complexe de la rivière Bell, une intrusion litée de gabbro-anorthosite datée à 2724,6 Ma (Mortensen, 1993). Ce complexe, formant le cœur d'un large anticlinal orienté N.-O.-S.-E, est interprété comme le moteur thermique des systèmes SMV mis en place sur son flanc sud et sur son flanc nord. Les minéralisations dans ces secteurs sont systématiquement associées à la « tuffite clé », un horizon exhalatif à composante tuffacée (Genna, 2015), démontre le rôle dominant de l'altération hydrothermale post-exhalaison dans la formation de cet horizon. En particulier, l'auteur avance que la minéralisation est synchrone de ces altérations, de sorte que les SMV seraient épigénétiques, formés par remplacement hydrothermal et non par précipitation sur le plancher océanique d'un panache métallifère émanant de fumerolles sous-marines. Le métamorphisme régional est de niveau schiste vert.

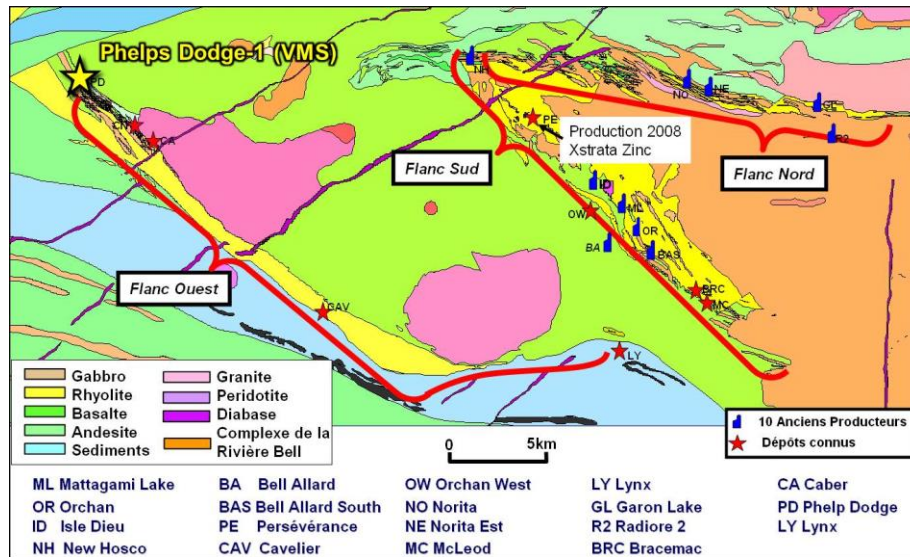


Figure 2. Camp de Matagami (Genna, 2015)

Le gîte Phelps Dodge 1 (PD1) est localisé à 15 km à l'ouest du complexe de la rivière Bell, dans le « camp Ouest », où ont été découverts trois autres gîtes zincifères volcanogènes : Caber Nord, Caber Sud, et Cavalier.

Le gîte PD1 est encaissé dans les volcanites felsiques du groupe de Watson intercalées avec les basaltes de la formation de rivière Allard appartenant au Groupe de Wabasse (Fig. 3). Une abondance d'intrusions gabbroïques, concordantes à sub-concordantes de puissance hectométrique, ainsi que plusieurs larges intrusions intermédiaires, tel que le pluton tonalitique de Mc Ivor y sont observés. Le gîte est situé dans la partie ouest du domaine structural au sud du camp de Matagami (Pilote et al., 2012 et 2013). Ce secteur est caractérisé par une stratigraphie approximativement 130° N./60° N.-E., à polarité N.-E., et une situation sur le flanc S.-O. d'un synclinal large et ouvert orienté 140° N., le synclinal de Mc Ivor. La limite avec le domaine structural Nord est localisée à trois kilomètres au N.-O du gîte, matérialisé par la zone de cisaillement de la rivière Allard. Au contraire du domaine Sud, le domaine Nord montre un degré de déformation intense, marqué par une schistosité pénétrative E.-O. et plusieurs couloirs de déformation à fort pendage vers le nord (Williamson et al., 2013).

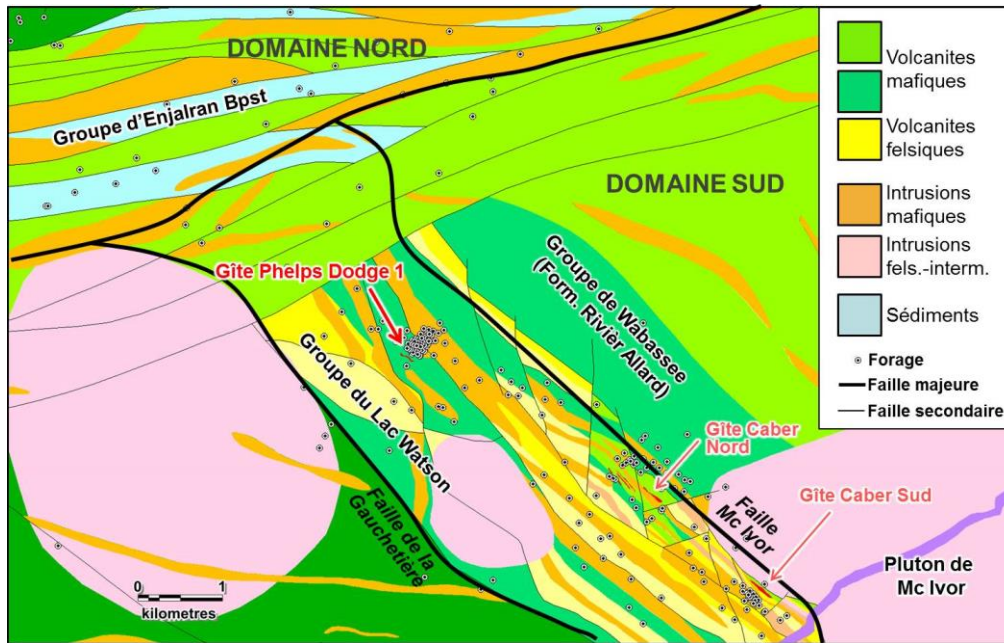


Figure 3. Localisation du gîte Phelps Dodge 1, camp Ouest, Matagami (modifié de SIGEOM 2015, comm. pers. écrite Boucher, 2016).

Les ressources du gîte PD1 sont estimées à 1,7 Mt @ 4,55 % Zn, 1,16 % Cu et 19,88 g/t Ag. Il s'agit essentiellement d'une lentille discontinue concordante de sulfures massifs à semi-massifs, inclinée à 60-70 degrés vers le N.-E. La lentille atteint une puissance maximale de 35 m, son extension d'aval-pendage (*down-dip*) est d'environ 500 m, pour une extension horizontale de 200 m.

### 3.1.1.3 Géologie quaternaire et topographie

Le secteur d'étude est couvert par une séquence de sédiments glaciaires d'épaisseur très variable. Les 42 forages situés à moins de 1 km du gîte montrent des variations entre 9,5 et 53,3 m, pour une épaisseur médiane de 21.2 m. Ceci est dû au relief très accidenté de la surface du roc, en fort contraste avec la surface topographique extrêmement plane (altitude entre 280 et 285 m à 1 km autour du gîte). La figure 4 présente la situation du gîte PD1, dans un goulet orienté N.-O.-S.-E., entre deux hauts topographiques armés par des affleurements de socle. Sur la figure 4, ont été reporté les failles archéennes afin de mettre en relief les relations entre les structures du socle et la topographie actuelle. En effet, les deux directions des failles dominantes, approximativement 70°N. dans le domaine structural Nord et 130°N. dans le domaine structural Sud, se reflètent dans les orientations de la topographie actuelle et des chenaux postglaciaires. Il est intéressant de constater que le couloir de faille 130° N. forme un haut topographique tandis que le couloir 70°N. semble davantage générer un bas topographique, notamment au N.-E. de la figure 4. Ces relations géomorphologiques dérivent des lithologies associées aux structures : le réseau 130°N. met en place un ensemble d'intrusions mafiques à felsiques, plus résistantes à l'érosion, tandis que le réseau 70°N. est associé essentiellement à des volcanites mafiques et à des sédiments.

Pour finir, le cadran S.-E. du secteur (Fig. 4) est marqué par des hauts reliefs reliés, entre autres, au pluton felsique de Mc Ivor.

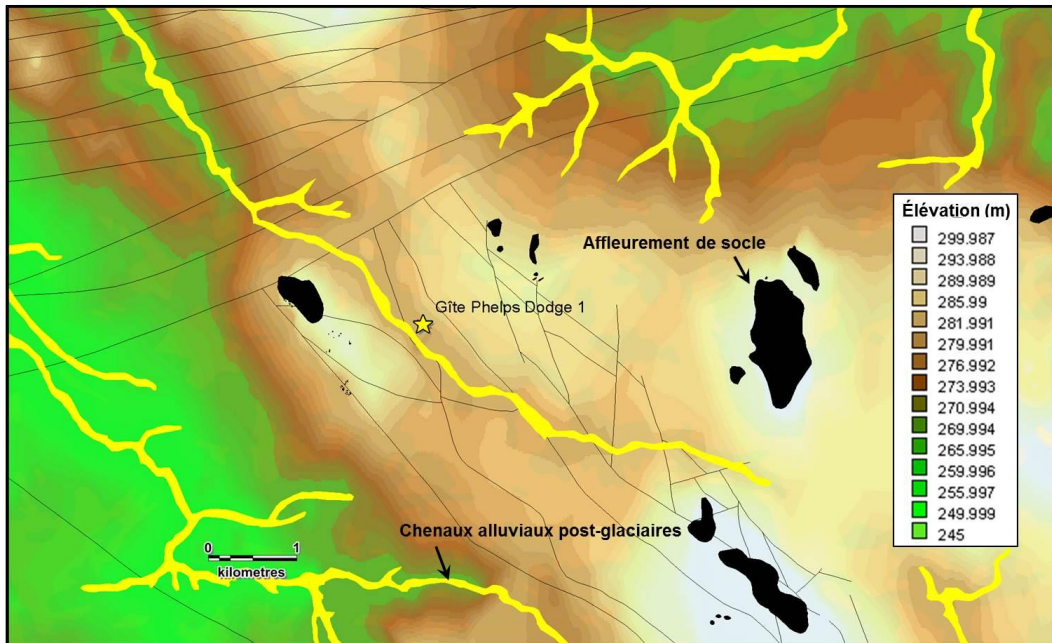


Figure 4. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) et géologie quaternaire (Veillette et al., 2003). Les aires situées entre les chenaux sont occupées par le till de Cochrane et des dépôts organiques (marécages). Les failles du socle ont été reportées.

L'analyse détaillée du levé de sondages de mort terrain de type SONIC, réalisé 5 km au nord du gîte PD1 (Villeneuve et Fournier, 2013), révèle plusieurs niveaux de tills successifs (Fig. 5) recouverts par les sables et les argiles du lac tardiglaciaire Ojibway (Veillette, 1994) puis, de façon discontinue, par les dépôts exotiques de crues glaciaires (till de Cochrane, Parent et al., 2008). Sous-jacent à ces dépôts se trouve localement un régolithe, marqué par une argilisation pédogénétique. Enfin, plusieurs chenaux fluvioglaciaires découpent ces formations. Sur le plan hydrostratigraphique, plusieurs niveaux de diamictons sableux non compactés ont le potentiel de constituer des aquifères épais et relativement continus : le till inférieur et certains niveaux du till de Matheson. L'aquifère de till inférieur serait en connexion hydraulique direct avec l'aquifère de socle.



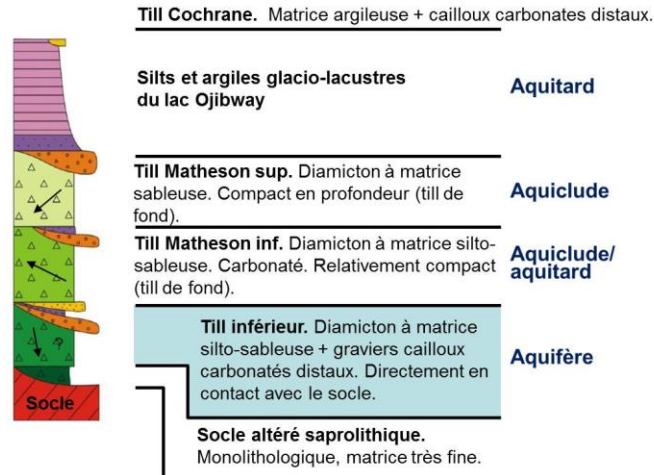


Figure 5. Colonne hydrostratigraphique quaternaire. Modifié de Parent et al., (2008).

## 3.2 Cadre hydrogéologique

### 3.2.1 Niveaux statiques

Les niveaux statiques ont été mesurés dans 40 forages localisés à moins de 2 km du gîte, entre le 25 et le 28 juillet 2016, puis dans les sondages échantillonnés entre le 9 et le 18 août 2016. Onze mesures ont ainsi pu être doublées, ce qui révèle la quasi-absence de variation significative du niveau statique entre les deux périodes : les écarts sont inférieurs à 6 cm à l'exception d'un cas à 33 cm. En revanche, les trois cas d'écarts aberrants traduisent très certainement des erreurs de prise de données (0,9, 2,3 et 9,1 m).

La piézométrie statique obtenue présente une très grande cohérence. Elle reflète une surface peu accidentée (Fig. 6), relativement lisse, ce qui est inattendu dans le contexte d'un aquifère de socle, où les structures hydrauliques sont *a priori* très hétérogènes. Cette absence de compartimentation hydraulique dans le socle pourrait être la conséquence d'une connexion hydraulique régulière avec l'aquifère de till sus-jacent.

L'écoulement souterrain au niveau de PD1 est dirigé du N.-O. vers le S.-E., soit vers l'intérieur du goulet depuis les deux hauts topographiques qui l'entourent au N.-O. et S.-E. Ces deux zones constituent des zones de recharge où le socle, et possiblement l'aquifère granulaire, affleurent. Au sein du goulet, l'écoulement suit le mouvement régional, soit depuis les hauts topographiques au S.-E., vers le N.-O.

### 3.2.2 Analyse de la fracturation ouverte

Les aquifères de socle sont caractérisés par une porosité primaire, matricielle, très faible (typiquement < 3 % pour les roches ignées) à laquelle se superpose une porosité secondaire, portée par la fracturation. Le milieu poreux matriciel est peu conducteur et très capacitif (c.-à-d. à fort emmagasinement) tandis que les fractures sont, inversement, très peu capacitives, mais très conductrices de sorte que les vitesses d'écoulement peuvent y atteindre plusieurs mètres par jour (Worthington et al., 2016).

Ces mêmes auteurs démontrent par des diagraphies de débitmètre qu'en moyenne 65 % (basalte) à 95 % (granites) de l'écoulement est portés par les quatre fractures les plus productives. Les interactions entre les deux systèmes d'écoulement aux propriétés opposées font des aquifères de socle des systèmes hydrauliques particulièrement complexes.

Dans le secteur d'étude, 19 sondages ont fait l'objet de diagraphies par imagerie acoustique (*televiwer*), procurant un levé des structures du socle en termes d'attitude et de nature : fractures ouvertes, fractures fermées, veines et foliations. L'imagerie acoustique permet ici d'apprécier la continuité des structures hydrauliques constituant l'aquifère et leur l'expression *in situ* (détail de l'analyse en annexe 2). L'analyse des corrélations entre les données de diagraphies dans les différents sondages révèle que l'attitude des fractures ouvertes est relativement constante, ce qui suggère un réseau hydraulique continu et constitué d'une ou deux familles. Les fractures ouvertes sont éparées, isolées ou bien incluses dans des intervalles métriques de fracturation fermée, eux-mêmes peu nombreux. Les corrélations indiquent une extension hectométrique de ces structures, qui sont vraisemblablement des failles cassantes bien qu'aucun rejet ne puisse être identifié faute de marqueurs. La densité de fracturation y atteint plusieurs dizaines par mètre linéaire, tandis que le niveau de base de fracturation, en dehors de ces zones, est sensiblement nul. Il est intéressant de noter qu'une même structure change d'expression d'un sondage à l'autre — fracture ouverte isolée discrète versus intervalle métrique de fracturation dense — tandis que son attitude globale demeure relativement constante. Tous les sondages analysés à l'imagerie acoustique interceptent au moins une de ces zones, ce qui indique une bonne connectivité du réseau. La partie sommitale du socle n'est pas marquée par une fracturation systématique, toutefois les failles cassantes, discrètes en profondeur, semblent s'y intensifier, acquérir une expression plus diffuse, jusqu'à constituer des intervalles fracturés décamétriques (p. ex., sondages PD1-10-18 et PD1-10-22). Ceci conduirait à la formation de « conduits » hydrauliques — structures unidimensionnelles à l'échelle hectométrique — le long de la ligne d'intersection entre la faille et le sommet du socle. Enfin, une fracturation plus intense dans les niveaux de rhyodacite ainsi que dans la pipe d'altération est observée.

Dans l'environnement immédiat du corps minéralisé, il a été possible d'identifier deux structures principales d'attitude globale N.05-20°/40-70°E. (voir figure 6), ainsi que deux structures secondaires. L'analyse structurale détaillée des diagraphies est fournie en annexe 2.

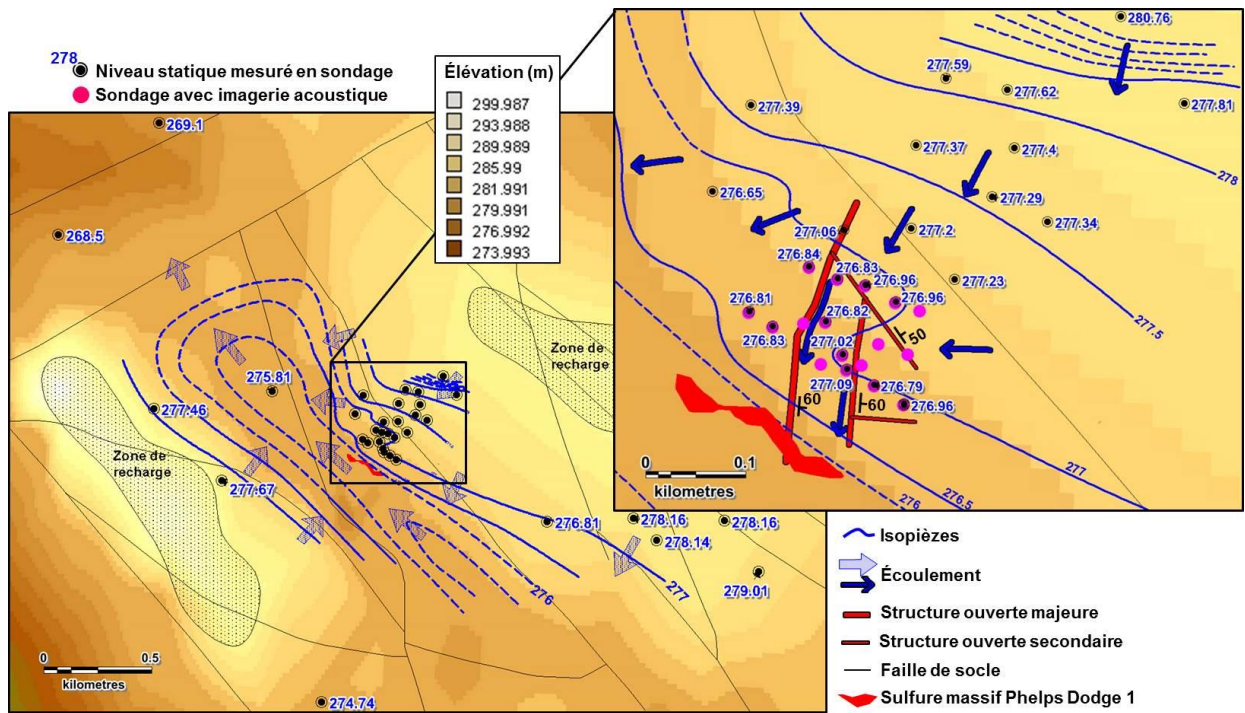


Figure 6. Niveaux statiques mesurés en sondage, réseau de fractures ouvertes, et géométrie des écoulements interprétés. Fond topographie (DEM 50k RNCAN).

### 3.2.3 Modèles conceptuels

Les données piézométriques, géologiques et l'interprétation structurale des diagraphies d'imagerie acoustique permettent de contraindre le modèle conceptuel d'écoulement (Fig. 7). Les écoulements dans le socle sont ségrégués dans un réseau de structures hydrauliques connectées, en nombre restreint, mais montrant une bonne continuité. Les décalages des isopièzes observés localement (voir figure 6, encart) corroborent cette interprétation. En revanche, l'absence de compartimentation hydraulique dans le socle, et la piézométrie régionale relativement lisse, suggèrent que ce réseau est lui-même en connexion hydraulique avec l'aquifère granulaire situé directement au-dessus, constitué d'un diamicton silto-sablonneux-graveleux carbonaté (till inférieur, voir figure 5). Ceci a été confirmé sur le terrain par les très faibles rabattements générés lors des pompages de l'aquifère de socle : les fractures interceptées doivent être connectées à une source abondante. Finalement, le système est en charge sous les niveaux de diamicton silto-sableux compactés (till de Matheson) ou les argiles lacustres sus-jacentes. Le sondage SCB-01-99, le plus à l'est du levé, autrement dit en amont hydraulique, est artésien.

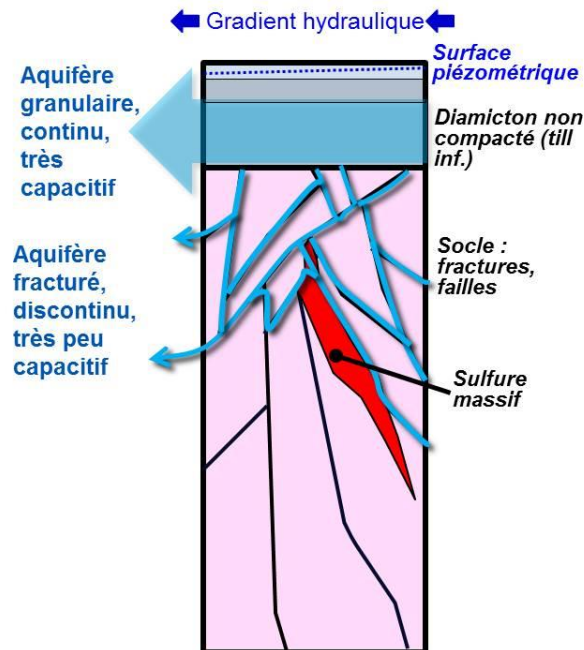


Figure 7. Modèle conceptuel d'écoulement impliquant l'aquifère de socle et l'aquifère granulaire supérieur.



### 4.1 Mode d'échantillonnage

L'eau souterraine a été prélevée dans le socle en 23 différents sondages. Au total 30 échantillons ont été recueillis, incluant 2 échantillons issus d'un même sondage à des profondeurs différentes et 6 doublets de protocoles. Ces derniers ont été établis dans le but d'investiguer l'influence du mode d'échantillonnage sur l'efficacité de la méthode en contexte d'exploration. Le mode d'échantillonnage passif est utilisé pour 24 prélèvements, doublé pour 6 sondages d'un échantillonnage actif, à la même profondeur. Pour une documentation exhaustive sur les différents modes d'échantillonnage des aquifères de socle, se référer au *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* produit par le MDDEP (2011).

**L'échantillonnage passif** consiste à descendre dans le puits un tube vide (*bailer*, photos 1 et 2, annexe 1) aux extrémités duquel sont disposées deux billes permettant l'ouverture du tube pendant la descente et sa fermeture lors du mouvement de remontée. Le système est arrimé sur un treuil de 1000 m qui est fixé au toit du véhicule tout-terrain (ARGO, photo 3, annexe 1), ce qui autorise des prélèvements très profonds, et une cadence moyenne de 3 par jour. Le volume du *bailer* est de 500 ml. L'extraction de l'eau du *bailer* s'effectue en plusieurs jets, qui seront réceptionnés dans différents récipients pour le suivi des paramètres physico-chimiques, la mesure de l'alcalinité, et le remplissage des flacons.

L'inclinaison des puits varie entre 45° et 85° pour une moyenne de 60°. Plusieurs des puits présentent de la limaille d'acier (alliage Fe-Cr-Ni-Mo-Mn) produite par le frottement du *bailer* sur le tubage lors de la remontée. Toutefois, ces éléments ne révèlent pas de concentrations en excès dans les sondages faiblement inclinés – générant *a priori* plus de frottement, de sorte qu'aucune contamination n'est à rapporter. Plusieurs tubages contenaient des hydrocarbures et/ou de la graisse de forage en abondance. De telles contaminations sont difficiles à détecter étant donné le large panel d'éléments que l'on retrouve dans la composition des graisses de forage (Dhiman et al., 2014). Cependant, les puits particulièrement graisseux ne présentent pas de bagage métallique anormal.

**L'échantillonnage actif** consiste à purger l'eau stagnante contenue dans le tubage, avant de prélever l'eau en pompant à la profondeur désirée. Le débit de pompage, tant à la purge qu'au prélèvement, est faible (idéalement < 0,5 ml/min) afin de limiter les perturbations au sein du puits relié aux transferts verticaux artificiels (Puls et Barcelona, 1995, Creasey et Flegal, 1999, MDDEP, 2011). La purge est suivie par une lecture en continu des paramètres physico-chimiques Eh, pH, température, conductivité et oxygène dissous de l'eau extraite. Après une période de variations drastiques, la stabilisation de ces paramètres est interprétée comme l'approvisionnement direct du pompage par l'eau de la nappe, de sorte que le prélèvement *sensu stricto* peut commencer. Une pompe de type Redi-Flo est utilisée, opérée depuis la surface *via* une tubulure (photo 4, annexe 1). La profondeur d'échantillonnage actif est donc limitée à la longueur de tubulure disponible, soit 65 mètres.

L'échantillonnage passif est communément utilisé par les études antérieures sur l'hydrogéochimie dans les contextes de minéralisation (*p.ex.*, Pauwels et al., 2002, De Caritat et al., 2009), tandis que l'échantillonnage actif est la méthode par défaut des travaux environnementaux (Puls et Barcelona, 1995). Les avantages et inconvénients de ces deux modes en contexte d'exploration seront discutés à la lumière des résultats des doublets d'échantillonnages, en section 6 : DISCUSSION.

#### 4.2 Profondeur des intervalles de prélèvement

Outre les aspects décrits plus haut concernant la stratification par densité dans le puits, le lien entre la profondeur d'échantillonnage et la profondeur de l'eau dans l'aquifère est incertain dans le contexte de socle. Ceci est dû au fait que l'apport d'eau dans le puits n'est pas continu et homogène sur toute la hauteur du puits, mais au contraire très discret, associé à quelques venues d'eau ponctuelles (fractures ouvertes). Ainsi, même en l'absence de stratification par densité, la profondeur d'échantillonnage ne correspond à la profondeur de l'entrée d'eau dans le puits que si l'intervalle est situé au regard d'une fracture ouverte.

Les intervalles d'échantillonnage ont donc été sélectionnés à la hauteur de zones de fracturation connues, soit par l'analyse des carottes de forage ou bien par l'imagerie acoustique, lorsque disponible. Ceci augmente les chances que l'eau soit représentative de l'aquifère à la profondeur désignée, aussi bien en mode d'échantillonnage passif qu'actif.

En mode d'échantillonnage actif, l'absence de fracture ouverte au regard de l'intervalle pompé provoquera, même à faible débit, des mouvements verticaux tels que l'eau ne sera potentiellement plus caractéristique de la profondeur de l'intervalle. Notons que ceci pourrait aussi constituer une stratégie d'échantillonnage visant à investiguer une plus large zone, en contexte d'exploration, puisque l'eau échantillonnée dans ce cas sera un mélange des plusieurs sources ponctuelles (fractures) alimentant le puits. Une telle stratégie n'a pas été retenue dans la présente étude, mais pourrait être testée ultérieurement.

#### 4.3 Protocole analytique

Le protocole d'échantillonnage utilisé est celui recommandé par le MDDELCC pour l'analyse des métaux ultratrace (MDDELCC, 2014), lui-même inspiré en grande partie du guide de l'Agence américaine pour la Protection de l'Environnement (AAPE, 1996). Ce protocole prévoit une décontamination à l'eau ultrapure du matériel utilisé ainsi que plusieurs autres précautions lors du traitement et du dosage des échantillons. Toutes les manipulations de transvasement sont effectuées avec des gants et à l'intérieur de sacs protecteurs. L'eau prélevée pour l'analyse des cations est tout d'abord placée dans une bouteille HDPE puis filtrée, transvasée dans un flacon décontaminé, et acidifiée. L'aliquote est ensuite placée dans une glacière jusqu'au campement où il sera conservé à 4° jusqu'à la fin du levé. Ces aliquotes ont été entreposées dans les locaux des laboratoires Maxxam pendant 22 jours puis leurs eaux analysées par ICP-QQQ à haute résolution (protocole standard MA. 203 – Mét.Tra. ext. 1.0) pour la gamme d'éléments Al, Sb, Ag, As, Ba, Be, B, Bi, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Sn, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, K, Se, Na, Si, Sr, Ti, V, Zn.

Les limites de détection obtenues sont de 0,002 à 0,5 ppb ( $\mu\text{g/l}$ ) selon les métaux. L'eau des aliquotes contenant les anions n'est ni filtrée ni acidifiée. Elle a été entreposée pendant 8 à 18 jours puis analysée par chromatographie ionique (Cl, Br,  $\text{SO}_4$ ) et par électrode combinée pour les fluorures.

#### 4.4 QA-QC

Deux blancs de terrain (eau ultrapure) ont été réalisés pendant le levé : au premier jour, et au 8<sup>e</sup> et dernier jour. De plus, le plan d'assurance qualité et de contrôles qualité (QA/QC), interne au laboratoire Maxxam, prévoit deux blancs de méthode, deux duplicatas de laboratoire ainsi que deux blancs fortifiés (ajout d'une quantité connue d'analyte) utilisés pour évaluer la précision de la méthode. Les résultats du QA/QC sont détaillés en annexe 3. Le blanc de terrain initial présente des contaminations mineures en B, Na, Ca, Zn, tandis que le blanc de terrain final montre des contaminations importantes en B, K, Na, Ba, Mg, Ca, Sr, Mn, Zn. Ceci est attribuable aux mauvaises conditions météorologiques du dernier jour du levé, avec averses torrentielles, conditions qui ne s'étaient pas produites auparavant. Les échantillons prélevés le dernier jour ont été interprétés en tenant compte de ces informations. Ce résultat pointe l'extrême sensibilité de l'échantillonnage « ultratrace » et la nécessité d'améliorer les conditions de manipulation sur le terrain. Les blancs de la méthode indiquent une absence de contamination au laboratoire. La récupération des deux blancs fortifiés montre une précision analytique globalement acceptable, toutefois notons que Bi présente un défaut de récupération pour les deux blancs fortifiés (81 % et 78 %), tandis que Co, Zr, Cu indiquent un excès de récupération sur un des deux blancs fortifiés (107 %, 110 %, 110 %, respectivement). L'analyse des duplicatas révèle un problème de précision très net sur 13 analytes, avec des erreurs relatives moyennes supérieures à 20 % et excédant 100 % pour Pb, W, Hg. Dans le cas des éléments Sn, Bi, Te, Ag, Hg, Cr, l'imprécision est imputable à la faible résolution reliée aux concentrations proches des limites de détection rapportées (LDR). Par contre, l'imprécision rapportée pour les éléments Mo, Sb, Zn, Pb, W, Co, Zr, Cu est vraisemblablement causé par une faible homogénéisation des échantillons avant séparation des duplicatas. Ceci pourrait être le fait du développement d'une phase particulaire ou adsorbée induite par une durée d'entreposage trop élevée et/ou un défaut d'acidification avant séparation.

#### 4.5 Stratégie d'échantillonnage

Les intervalles sélectionnés sont localisés à des distances du corps minéralisé variant entre 0 (contact) et 1,7 km, excluant les deux échantillons témoins (Fig. 8). Les profondeurs de prélèvement varient entre 23 m et 537 m. La stratégie d'échantillonnage est résumée au tableau 1. L'objectif premier du levé étant de vérifier l'existence d'une empreinte du sulfure massif (SM) sur l'eau à différentes profondeurs, 6 échantillons ont été prélevés au regard du SM dont 4 en subsurface (profondeur < 100 m) et 2 en profondeur (120 m et 348 m). De plus, 10 échantillons ont été prélevés à moins de 100 m du SM en distance horizontale, afin d'investiguer l'empreinte proximale : 5 échantillons de subsurface et 5 profonds. En particulier, ces échantillons proximaux visent à vérifier la présence d'anomalies hydrogéochimiques dans des forages ayant raté de peu le corps minéralisé et ne présentant aucune « senteur » à l'analyse de carotte.

Enfin, l’empreinte distale est investiguée par 6 échantillons, dont 1 en subsurface et 5 profonds. Ces échantillons ont été sélectionnés préférentiellement vers l’aval hydraulique. Pour finir, 2 témoins régionaux ont été prélevés à 2,8 et 7 km vers l’Est (amont hydraulique) en subsurface, et 6 prélèvements ont fait l’objet de doublets d’échantillonnage afin de documenter l’impact des modes passif et actif sur les performances de la méthode.

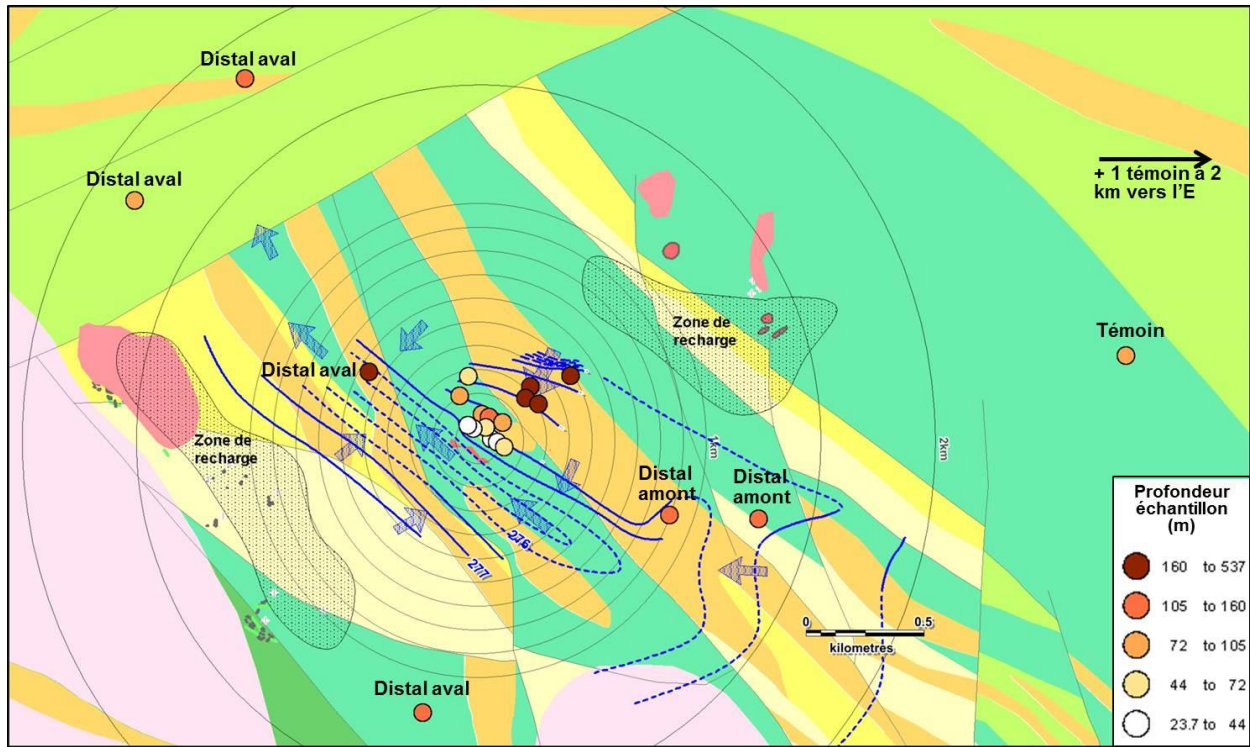


Figure 8. Disposition des échantillons par rapport à la lentille de sulfure massif de Phelps Dodge 1 (au centre des cercles concentriques).

Tableau 1. Stratégie d’échantillonnage de l’eau autour de la lentille de sulfure massif.

Groupe	Nombre d'échantillons	Objectif	Profondeur (m)
1a	4	Contact SM	< 100
1b	2	Contact SM	100 - 550
2a	5	Proximal	< 100
2b	5	Proximal	100 - 550
3a	1	Distal	< 100
3b	5	Distal	100 - 550
4	2	Témoins	< 100
5	6	Doublets pompage	< 100
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>		

## 5 RÉSULTATS

Les caractéristiques générales de concentrations obtenues pour l'ensemble des analytes sont reportées au tableau 2. À l'exception de Ti, les concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces présentent une très bonne résolution, avec des valeurs systématiquement supérieures à la LDR (limite de détection rapportée). Les LDR sont plus restrictives pour les éléments ultratracés : les concentrations en Se, Be, Tl, Bi, Cd, Te, Ag ne sont pas détectées dans la majorité des échantillons. Par ailleurs, les anions bromures, nitrates/nitrites ne sont pas détectés. Les sulfates sont détectés dans 7 échantillons sur 30 ce qui, en dépit d'une résolution très faible, demeure un résultat intéressant dans le contexte de l'étude, qui sera approfondi plus loin.

Tableau 2. Valeurs statistiques des concentrations mesurées.

	Médiane*	25ème centile*	75ème centile*	Écart-type relatif (%)*	LDR**	n sous LDR	
ProfREEL_vert	65.49	37.28	114.89	n/a	n/a	n/a	
pH	7.57	7.11	7.87	n/a	n/a	n/a	
Eh_mV	-130.00	-164.63	-90.08	n/a	n/a	n/a	
O2 (ppm)	0.19	0.00	0.46	n/a	n/a	n/a	
Cond. (microS/cm)	418.50	264.00	450.75	n/a	n/a	n/a	
Ca_ug/L	57000	49500	70250	36.26	5	0	MAJEURS
Na_ug/L	25000	18000	37000	52.69	5	0	
Mg_ug/L	13000	11000	16250	40.59	5	0	
Si_ug/L	7050	5200	9125	39.65	2	0	MINEURS
K_ug/L	3200	2175	4000	44.64	10	0	
Fe_ug/L	1650	600	3800	255.62	0.5	0	
Sr_ug/L	340	225	482.5	58.09	0.04	0	MINEURS
Mn_ug/L	245	190	337.5	97.85	0.03	0	
Ba_ug/L	89.5	45.75	380	155.76	0.03	0	
B_ug/L	51.5	35.75	63	372.28	0.2	0	MINEURS
Zn_ug/L	39.5	6.075	150	261.48	0.2	0	
Al_ug/L	6.45	3.7	15.25		0.2	0	
Mo_ug/L	4.55	2.85	6.025	53.34	0.01	0	TRACES
As_ug/L	3.55	1.1475	8.1	91.39	0.02	0	
Li_ug/L	3.2	2.6	3.7	463.94	0.1	0	
W_ug/L	1.8	0.9275	9.9	117.52	0.04	0	
Ni_ug/L	1.25	0.7125	1.7	64.77	0.03	0	
Ti_ug/L	0.5	0.2	1.125	163.52	0.4	14	
Co_ug/L	0.455	0.18	0.6925	86.26	0.008	0	
Cu_ug/L	0.295	0.1425	0.61	300.15	0.05	0	
Cr_ug/L	0.17	0.1	0.31	109.70	0.04	0	
U_ug/L	0.165	0.04475	0.31	241.73	0.001	0	
Zr_ug/L	0.125	0.0675	0.425	169.78	0.04	1	
V_ug/L	0.12	0.08	0.3875	148.88	0.02	0	
Sb_ug/L	0.084	0.043	0.15	493.15	0.005	0	ULTRATRACES
Pb_ug/L	0.0725	0.025	0.46	258.38	0.006	1	
Sn_ug/L	0.0425	0.025	0.09	190.84	0.05	15	
Se_ug/L	0.025	0.025	0.025	68.99	0.05	26	
Be_ug/L	0.005	0.005	0.0425	286.67	0.01	21	
Hg_ug/L	0.005	0.002	0.0285	121.99	0.002	5	
Tl_ug/L	0.005	0.005	0.005	0.00	0.01	30	
Bi_ug/L	0.0045	0.0045	0.0045	95.69	0.009	28	
Cd_ug/L	0.003	0.003	0.004	191.04	0.006	23	
Te_ug/L	0.0025	0.0025	0.01375	313.01	0.005	20	
Ag_ug/L	0.0015	0.0015	0.0055	271.13	0.003	18	
Th_ug/L	0.0015	0.0005	0.00575	194.85	0.001	10	
F_mg/L	0.125	0.095	0.17	40.9	0.01	1	ANIONS
Br_mg/L	0.25	0.25	0.25	n/a	0.5	30	
Cl_mg/L	1.1	0.475	1.825	150.1	0.3	4	
NO2_NO3_mg/L	0.05	0.05	0.05	n/a	0.1	30	
SO42_mg/L	1.5	1.5	2.125	125.6	3	23	

\* Valeurs < LDR ont été multipliées par -0.5

\*\*Limite de Détection Rapportée

## 5.1 Éléments majeurs

En l'absence de mesures directes  $[\text{HCO}_3^-]$  est déduit des concentrations en majeurs et du pH en postulant la balance ionique. L'analyse des éléments majeurs indique une eau très peu saline (Fig. 9), de type calcique carbonatée selon le diagramme de Piper (Fig. 10) communément utilisé en hydrogéologie pour la classification des grands types d'eau. Il s'agit davantage de la signature d'une eau de recharge que d'une eau d'aquifère de socle. Ce résultat peut sembler surprenant au premier abord, toutefois il fait écho avec le modèle conceptuel d'écoulement décrit au chapitre précédent : l'eau du socle est en connexion hydraulique avec l'aquifère de till carbonaté sus-jacent au moyen d'un réseau de fractures ouvertes.

Par ailleurs, le caractère anormalement dilué des eaux du socle peut être mis en parallèle avec la présence d'une rampe d'accès située à 150 m au SSW de la zone d'étude. Cette rampe, foncée dans les années 80 lors d'un projet avorté d'exploitation du gîte, constitue une connexion artificielle entre les eaux de pluie et l'aquifère de socle. Toutefois, elle est située en aval hydraulique des puits échantillonnés, de sorte que son influence devrait *a priori* affecter davantage les échantillons prélevés par pompage (voir chapitre DISCUSSION).

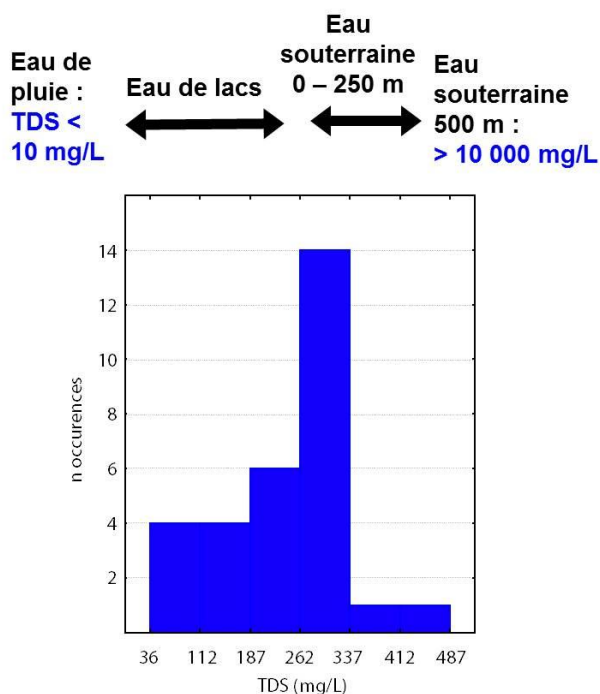


Figure 9. Valeurs de salinité mesurées à la sonde HANNA (*Total Dissolved Solids*).

Les repères indiquent les valeurs typiques pour différents types d'eau.

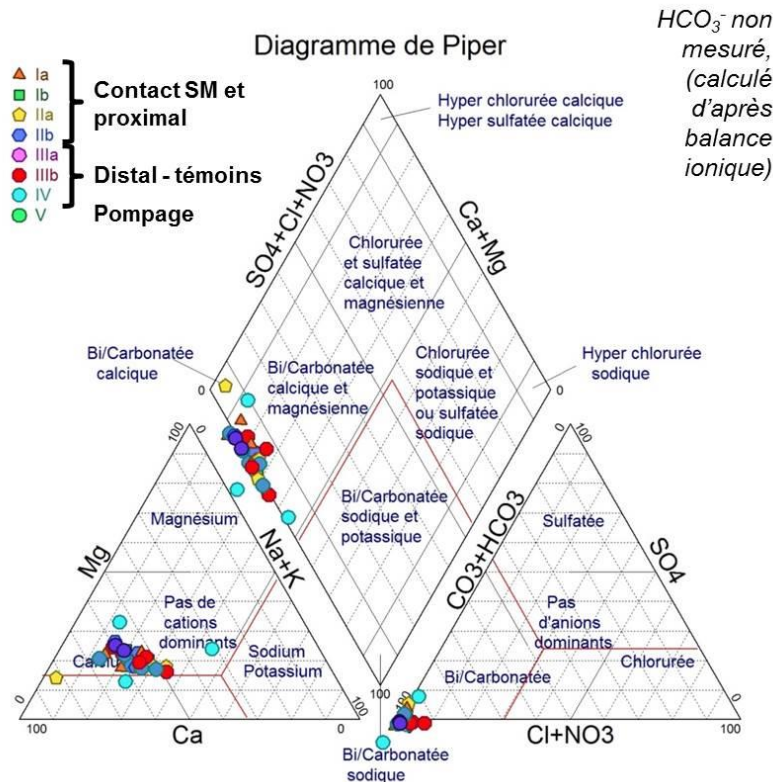


Figure 10. Représentation des concentrations en éléments majeurs sur un diagramme de Piper.

Les symboles se rapportent aux groupes décrits dans le tableau 1.

L'analyse de la composition en éléments majeurs ne fait pas apparaître de relation sensible avec la proximité du sulfure massif (SM). Les échantillons d'eau en contact direct avec le SM semblent concentrés sur le pôle carbonaté, indépendamment du protocole d'échantillonnage.

## 5.2 Éléments mineurs, traces et ultratrace

### 5.2.1 Niveaux de référence

L'étude de la composition en éléments traces et ultratrace des eaux souterraines en est à ses balbutiements, essentiellement du fait que l'ICP-MS à haute résolution soit encore une méthode relativement récente. Par conséquent, les niveaux de base sont encore mal connus pour la plupart des éléments, de même que les facteurs régissant les variations « normales » de ces niveaux de base. En l'absence d'un niveau de base bien caractérisé, l'identification de valeurs anormales est délicate. Deux jeux de références ont été utilisés pour le niveau de base :

- 1) Une base de données récente prélevée dans le sud de l'Abitibi par l'équipe de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue à l'occasion des Programmes d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDLECC) ;

- 2) Les échantillons distaux sans lien avec la lentille minéralisée (témoins), en faible nombre, mais présentant l'avantage d'être pris dans les formations encaissant le gîte.

### 5.2.1.1 Base de données Abitibi PACES-UQAT

La base de données PACES-UQAT contient 580 échantillons d'eau souterraine prélevés dans le sud de l'Abitibi entre 2003 et 2010. Les protocoles analytiques sont relativement homogènes, ICP-MS avec mesure systématique des paramètres physico-chimiques *in situ*. Toutefois, l'information concernant la nature de l'aquifère échantillonné (granulaire *versus* socle rocheux) n'est pas disponible, et les protocoles d'échantillonnage sont irréguliers (échantillonnage actif *versus* passif, volume de purge, etc.). Les valeurs sont donc à regarder comme de larges moyennes, tous contextes et tous protocoles confondus. En dépit de ces réserves, cette base de données fournit une vue générale de la composition des eaux souterraines dans des formations semblables à celles du secteur de Matagami, en âge et en lithologie. Le contexte quaternaire demeure très différent puisque la couverture de sédiments glaciaires dans le sud de l'Abitibi est nettement plus discontinue et moins épaisse.

La figure 11 illustre les valeurs statistiques de la base de données PACES-UQAT pour Zn, Cu, Ni, Pb, Fe et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

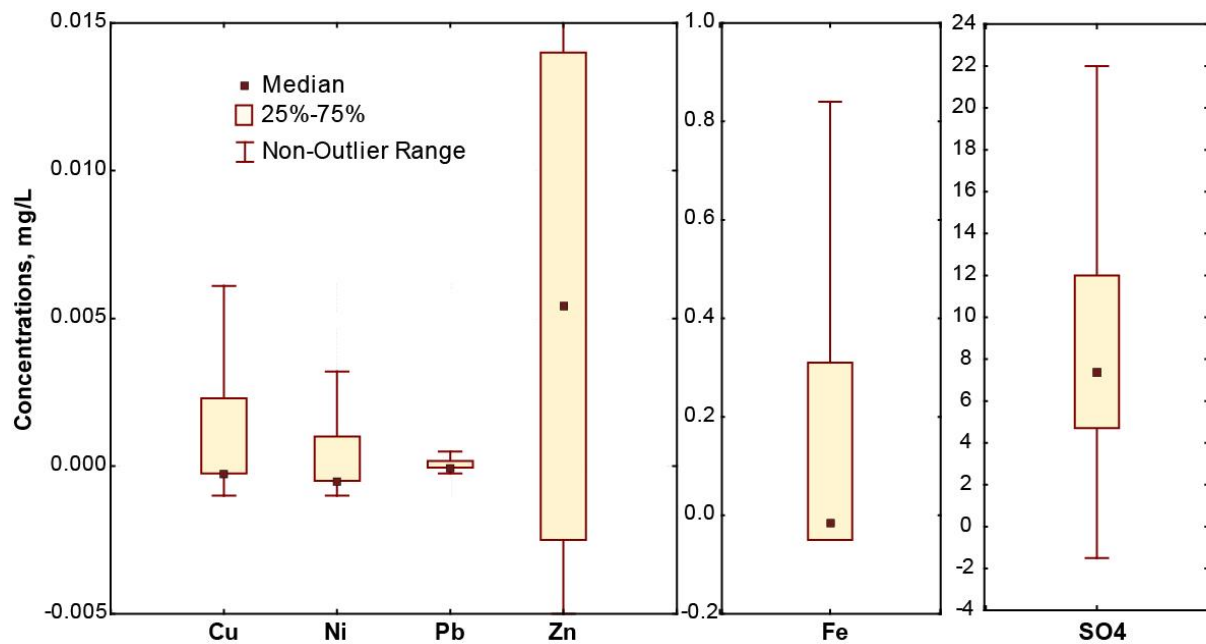


Figure 11. Diagrammes *box plot* des concentrations en Zn, Cu, Ni, Pb, Fe et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dans les eaux souterraines pour l'ensemble de la base de données PACES-UQAT (580 échantillons).



Les médianes de Cu, Ni et Fe sont sensiblement nulles, illustrant les problèmes relatifs aux limites de détection évoqués au début de cette section. Ces données fournissent en revanche une première estimation appréciable du niveau de base régional en Zn (repères indiqués dans le tableau 3).

Tableau 3. Valeurs centiles Zn de la base régionale PACES-UQAT.

Centile	Valeur mg/L
99	0.380
97	0.105
93	0.034
75	0.014
50	0.0055

### 5.2.1.2 Cette étude

Huit échantillons ont été prélevés très loin du gîte PD1 : deux du groupe « témoin » et six du groupe « distal ». Parmi ces échantillons, ceux présentant un niveau faible relativement homogène pourront plausiblement être considérés comme un niveau de base local valable.

### 5.2.2 Cartes de valeurs brutes (Zn et Fe)

La distribution spatiale des concentrations en Zn est présentée sur la figure 13. Tous les échantillons d'eau au contact avec le sulfure massif présentent des concentrations très élevées en Zn, à toutes les profondeurs. Sept (7) échantillons sur 8 ont des valeurs supérieures au 93<sup>e</sup> centile des données régionales (base PACES-UQAT), incluant 3 au-dessus du 99<sup>e</sup> centile. Ces échantillons décrivent l'**empreinte contact**, où l'eau est en contact direct avec le sulfure massif. Il est particulièrement intéressant de noter que cet enrichissement demeure extrêmement marqué en profondeur, puisque l'eau échantillonnée au regard des deux interceptions profondes du sulfure massif (360 m) est au-dessus du 99<sup>e</sup> centile.

Plusieurs forages ayant raté de peu le sulfure massif, offrent un contexte idéal pour investiguer le **halo proximal** ou l'eau localisée à quelques dizaines de mètres du sulfure massif demeure très enrichie en Zn. Les cinq échantillons de ce groupe visible, sur la figure 12, sont au-dessus du 95<sup>e</sup> centile, incluant deux au-dessus du 98<sup>e</sup> centile.

Enfin, le **halo distal** correspond aux trois échantillons localisés dans des forages passant à plus de 100 m du sulfure massif. Ces trois échantillons, situés à approximativement 100 m, 180 m et 400 m du sulfure massif, présentent des valeurs élevées en Zn : respectivement, 12 ppb (env. 65<sup>e</sup> centile), 50 ppb (94<sup>e</sup> centile) et 16 ppb (80<sup>e</sup> centile).

À noter que les forages dits « proximaux » et « distaux » n'interceptent aucun signal minéralisé à l'analyse de carotte. En revanche, ces résultats démontrent sans ambiguïté qu'ils interceptent le halo hydrogéochimique du sulfure massif. Le fait que ces forages soient positifs à l'analyse de l'eau tandis qu'ils étaient négatifs à l'analyse de la carotte met en exergue l'intérêt de la méthode hydrogéochimique pour l'exploration.

Cinq des sept échantillons distaux présentent une concentration en Zn semblable ou inférieure à la médiane des données régionales, indiquant un niveau de base conforme. Ces échantillons sont donc des témoins plausibles. Par contre, il est intéressant de mentionner que deux échantillons présentent des valeurs très élevées en Zn, aux 97<sup>e</sup> et 98<sup>e</sup> centiles, bien qu'ils soient situés à approximativement 1,2 et 1,5 km du gîte de Phelps Dodge 1. Il s'agit des échantillons PD1-91-07BA et PD1-09-17BA. Ces échantillons sont localisés dans l'axe stratigraphique, ou couloir structural, de l'horizon portant les gîtes Phelps Dodge 1, et, plus au sud, Caber Nord, et les empreintes hydrogéochimiques interceptées ne peuvent être produites par l'un de ces deux gîtes étant les distances trop importantes. Il s'agit donc potentiellement de corps non découverts. C'est ici un exemple percutant de cibles générées par l'analyse de l'eau souterraine.

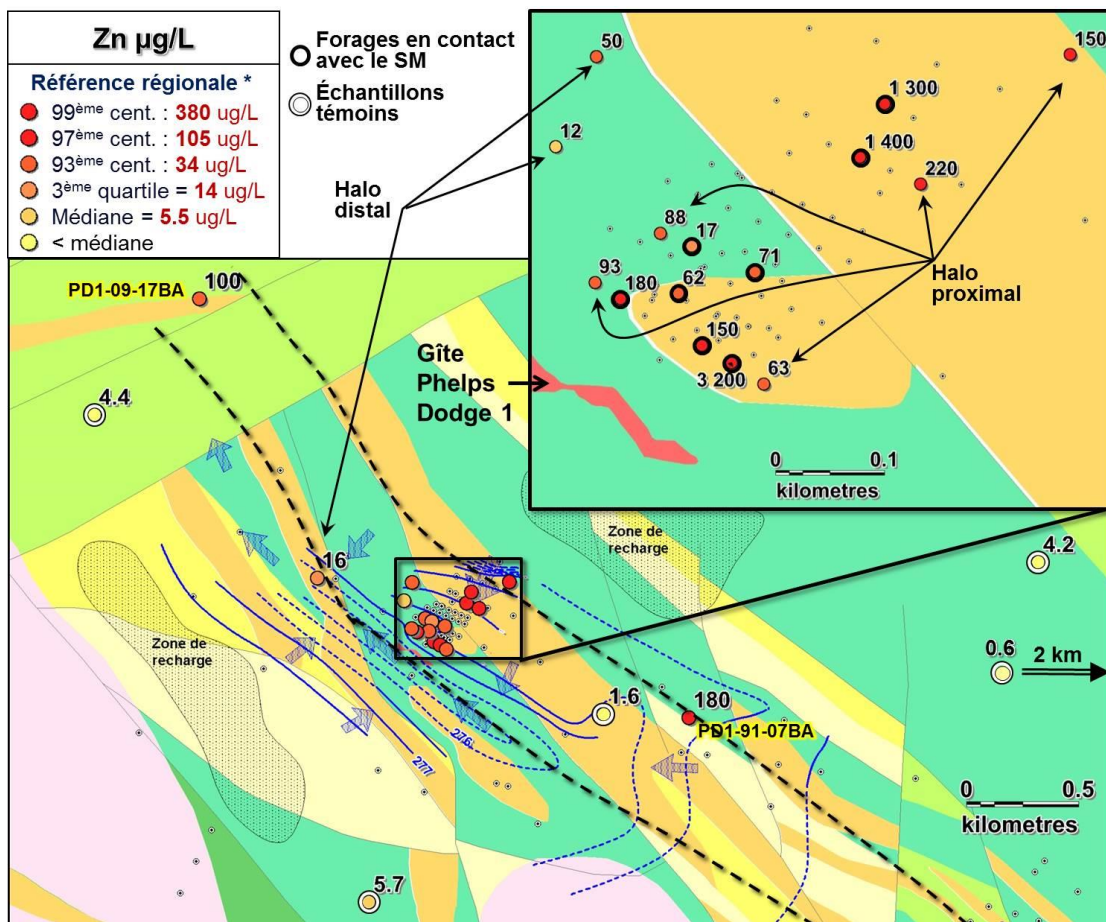


Figure 12. Carte des concentrations en Zn dans l'eau de l'aquifère de socle autour du gîte PD1.

La référence régionale indiquée dans l'encart correspond à la base PACES-UQAT.

La distribution des concentrations en Fe est présentée sur la figure 13. Dans ce cas, les données régionales PACES-UQAT ne peuvent être prises comme niveaux de base puisque l'ensemble des échantillons de Phelps Dodge 1 est significativement plus riche que la médiane de la base PACES-UQAT, incluant les échantillons distaux au sulfure massif.

Ces derniers présentent des valeurs de 50, 270, 270, 500, et 620 µg/L tandis que la médiane de la base PACES-UQAT est sous le seuil de détection de 15 µg/L et le troisième quartile est à environ 300 µg/L (Fig. 11). Les enrichissements liés aux sulfures massifs seront donc évalués par rapport aux échantillons distaux du levé, considérés comme le niveau de base local, avec une médiane égale à 270 µg/L.

Les échantillons d'eau prélevés au contact avec le sulfure massif présentent des concentrations extrêmement élevées en Fe, atteignant 70 000 µg/L, décrivant ainsi une très nette **empreinte contact**. À la différence du Zn, l'eau semble s'imprégner davantage du fer contenu dans le sulfure massif à faible profondeur. Les enrichissements en Fe semblent en effet moins importants sur les interceptions profondes du SM. Ceci traduit possiblement le potentiel redox plus élevé proche de la surface, où l'eau, plus oxygénée et plus oxydante, a un plus grand potentiel de dissolution de la pyrite et de la chalcopryrite.

Un **halo proximal** est aussi observé, avec des concentrations comprises entre 1 900 et 3 700 µg/L ce qui indique un enrichissement extrêmement fort : au minimum 7 fois la médiane locale, et 125 fois la médiane Sud-Abitibi (base PACES-UQAT). La présence d'un **halo distal** significativement enrichi : 600, 1 200, 1 500 µg/L, soit 2 fois, 4 fois et 5 fois la médiane locale, est également reconnaissable. Enfin, notons que les échantillons proximaux et distaux interceptant le halo sont les mêmes que pour le Zn.

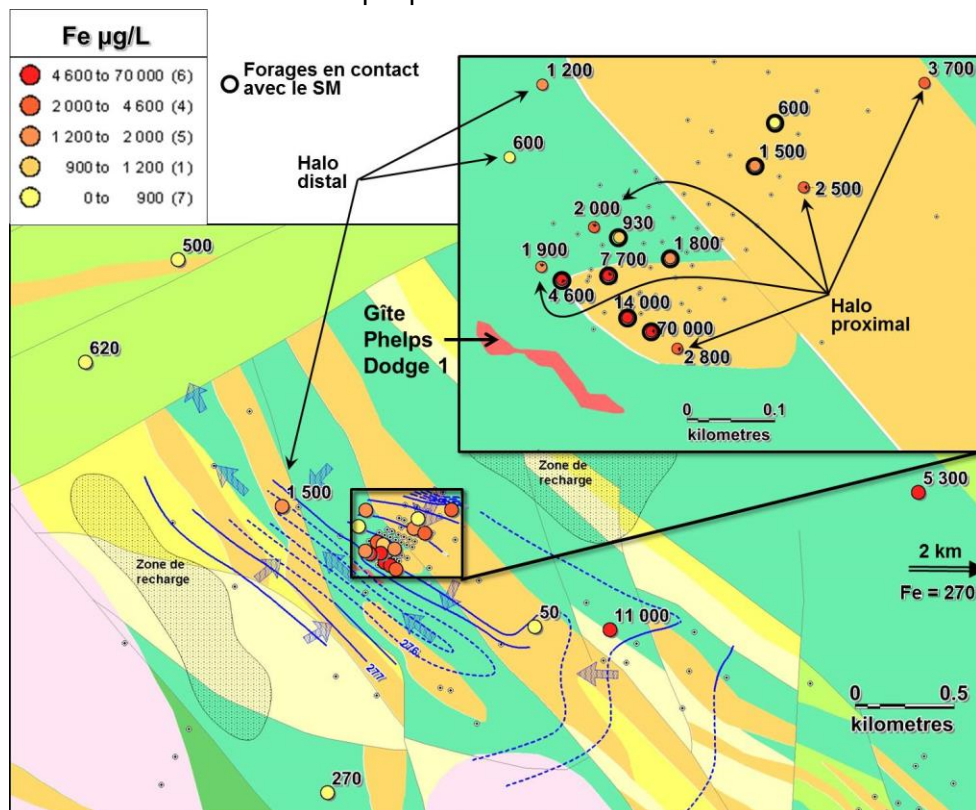


Figure 13. Carte des concentrations en Fe dans l'eau de l'aquifère de socle autour du gîte PD1.

L'**empreinte contacte** et le **halo de dispersion** ont été caractérisés dans la section précédente à travers l'observation des valeurs brutes en Zn et Fe. Ceci répond d'ores et déjà au premier objectif de cette étude qui était de vérifier l'existence d'une telle empreinte. La présente section se propose d'aller plus loin en analysant plus en profondeur la nature de cette empreinte, sa composition chimique, sa dispersion ainsi que les différents facteurs exerçant une influence.

### 6.1 Profils de distance du sulfure massif (SM)

En premier lieu, l'influence du corps métallique sur l'eau environnante est visualisée par les profils d'évolution des différentes composantes de l'eau en fonction de la distance au corps. À noter que les distances ne peuvent pas être déterminées de façon rigoureuse puisqu'elles sont projetées en profondeur, où le contrôle sur la géométrie du corps minéralisé et ses limites latérales est relativement faible. La figure 14 présente ces profils pour les concentrations en Zn, Fe, Sb, Sn, Se et Be. Ces profils permettent par ailleurs de visualiser et de comparer les résultats obtenus pour les protocoles d'échantillonnage actif et passif.

L'enrichissement en Zn et Fe apparaît très clairement avec les deux protocoles d'échantillonnage. Il est toutefois plus fort avec le protocole passif, en effet le Zn montre une amplification d'un facteur 40 (médianes), tandis que les échantillons actifs sont enrichis d'un facteur 3 à 10. Les échantillons prélevés dans l'eau située à proximité du corps métallique, mais non en contact direct avec celui-ci, présentent un enrichissement déjà très marqué, d'un facteur 20 approximativement (médianes). Ceci confirme l'existence d'un halo proximal, déjà visualisé en carte à la section précédente.

Un enrichissement en Sb et Sn en se rapprochant du corps métallique est observable avec les échantillons prélevés suivant le protocole passif. L'amplitude demeure toutefois inférieure à celle du Zn et du Fe (facteur 5). Enfin, les éléments Se et Be ont été représentés ici du fait que, dans les deux cas, la totalité des échantillons supérieurs à la LDR sont situés au contact ou à proximité du SM, ce qui permet de conclure à un enrichissement très clair en dépit de la très faible résolution des résultats.

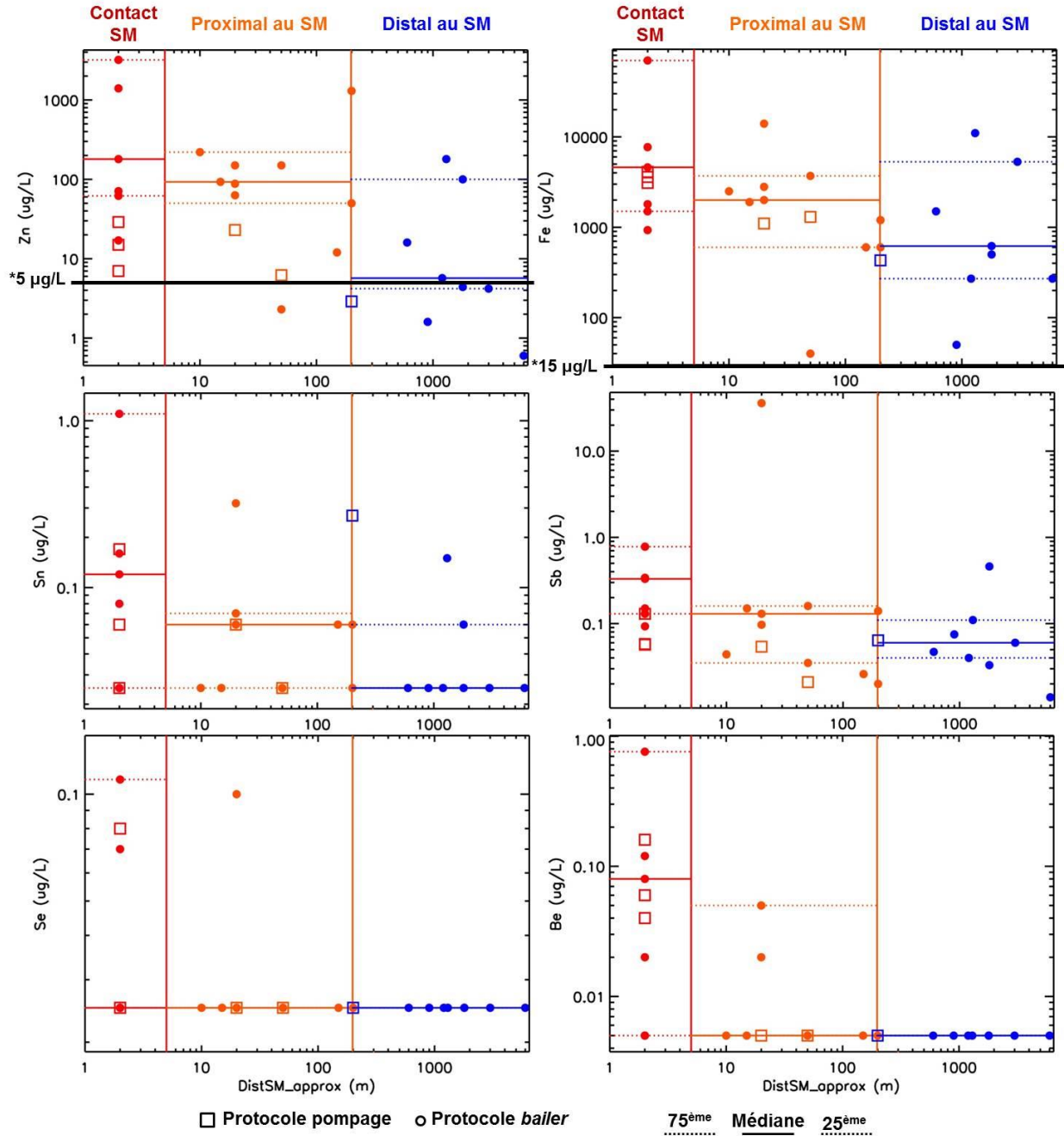


Figure 14. Profils concentration *versus* distance au SM pour une sélection d'éléments.  
 \* valeurs médianes Sud-Abitibi (base de données PACES-UQAT, 581 éch.)



## 6.2 Empreinte hydrogéochimique du sulfure massif (SM)

### 6.2.1 Corrélations brutes

La composition de l’empreinte hydrogéochimique du SM ainsi que son fractionnement par dispersion peuvent être appréhendés en investiguant, pour chaque élément, les relations quantitatives entre la concentration et la distance du SM.

En dépit des limitations mentionnées précédemment sur l’estimation rigoureuse des distances du SM, il est possible de calculer, pour chaque élément, le coefficient de corrélation  $R$  entre la concentration et la distance au SM. Ce coefficient est calculé ici suivant la méthode de Spearman, autrement dit, il exprime la corrélation entre les deux variables passées en rangs centiles ce qui fournit des résultats beaucoup plus robustes que la méthode classique de Pearson. Ces résultats sont présentés sur la figure 15. Les éléments Zn, Sb, Fe, Sn ont la plus forte relation avec la proximité du SM. Toutefois, le fait qu’il s’agisse ici des valeurs brutes implique qu’une partie non déterminée des corrélations peut être causée par des corrélations partielles, c.-à-d. que les deux variables — concentration et distance — peuvent ne pas avoir de corrélation directe, mais être corrélées par l’entremise d’une tierce variable. C’est la raison pour laquelle les *pathfinders* dits « vrais » ne peuvent être identifiés qu’après investigation de l’impact des facteurs collatéraux tel que, la profondeur de l’eau (voir plus bas). En particulier, les corrélations entre la distance au SM et certains éléments lithophiles tels que Th, Zr, ainsi que les corrélations négatives pour les majeurs Cl, Ca, Mg, sont le reflet de cette corrélation partielle, tel que démontré plus bas.

	R_spearman		R_spearman	
Zn	-0.53	Corrélation négative significative	Li	-0.14
Cu+Zn+Ni	-0.53		Ti	-0.09
Sb	-0.51		F-	-0.09
Fe	-0.43		Mo	-0.05
Th	-0.41		U	-0.03
Sn	-0.37		W	0.00
Zr	-0.34		Hg	0.04
Fe+Mn	-0.32		Ag	0.05
SO42-	-0.31		Na	0.08
Ni	-0.29		K	0.08
V	-0.27		K+Na	0.08
Co	-0.26	Ba	0.09	Corrélation positive significative
NaSURCl	-0.25	Mn	0.12	
As	-0.24	Sr	0.14	
Cu	-0.18	Cl	0.23	
Cr	-0.16	Ca	0.24	
Pb	-0.16	Ca+Mg	0.25	
B	-0.16	Mg	0.28	

Figure 15. Corrélation entre les valeurs brutes de concentration et la distance au corps métallique.

Les éléments montrant une corrélation positive significative avec la proximité du SM apparaissent sur fond orange tandis que ceux ayant une corrélation négative significative apparaissent sur fond violet.

### 6.2.2 Diagrammes R-R distance au corps métallique

Une représentation particulièrement intéressante de ces corrélations consiste en un diagramme binaire de type R-R, représentant les valeurs de  $R$  pour l'ensemble de variables, pour les deux protocoles d'échantillonnage (Fig.16). Les valeurs de  $R$  considérées comme non significatives sont indiquées par des bandes grises :  $R < 0,2$  pour le groupe « protocole *bailer* » et  $R < 0,5$  pour le groupe « protocole pompage ». Ces valeurs critiques ont été établies au moyen de tests de représentativité sur des variables aléatoires décrites par des populations restreintes (annexe 5 pour plus de détails).

En premier lieu, la figure 16 permet d'apprécier la cohérence entre les résultats obtenus avec les deux différents protocoles d'échantillonnage. Cette cohérence est incarnée par le fait que les points s'organisent le long d'un axe traversant le diagramme du quartier S.-O. au quartier N.-E. Une cohérence parfaite et linéaire aurait été indiquée par un alignement des points sur une droite de pente unitaire. Au contraire, les points semblent s'aligner ici sur une droite de pente plus forte, ce qui indique que les valeurs de  $R$  sont globalement plus élevées avec le « protocole pompage ». **Les éléments enrichis à proximité du SM suivant les deux protocoles sont Zn, Be, Fe, Th, Zr et, de façon moins marquée, Sb, Se, V.** Les éléments  $\text{SO}_4^{2-}$ , Sn, As et Ni présentent un enrichissement uniquement avec le « protocole *bailer* ». Il est important de rappeler ici que les deux groupes de données (« protocole *bailer* » et « protocole pompage ») sont absolument indépendants ; les résultats montrant une bonne cohérence sur ce diagramme sont donc très robustes.

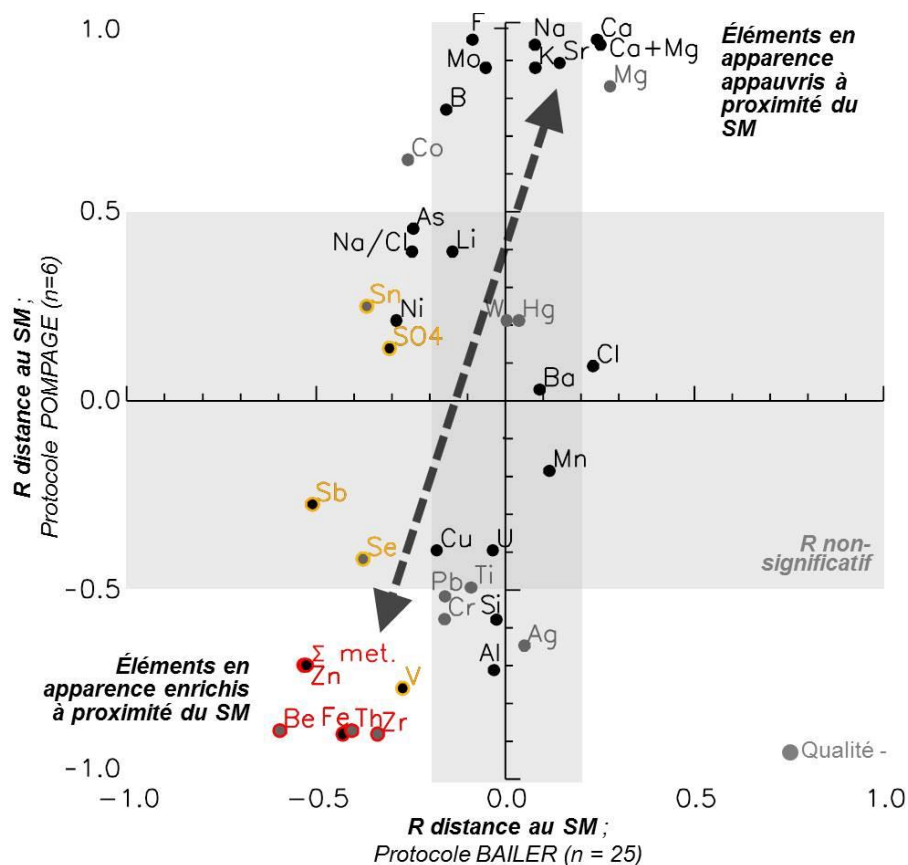


Figure 16. Diagramme de corrélation de type R-R, l'axe horizontal et l'axe vertical indiquent respectivement les valeurs de R entre la concentration et la distance au corps métallique (sulfure massif, SM) pour les groupes « Protocole Bailer » et « Protocole Pompage ».

La double flèche en tirets noirs souligne la cohérence entre les résultats obtenus par les deux protocoles. Les éléments surlignés en rouge constituent *a priori* des bons candidats pour le marquage du corps métallique, en orange des candidats potentiels. Les éléments marqués par « Qualité » correspondent aux éléments dont la résolution et/ou le nombre de valeurs supérieures à la LDR sont faibles (voir tableau 2).

Pour finir, rappelons qu'il s'agit là de résultats bruts, c.-à-d. non traités, de sorte qu'une portion inconnue des corrélations visualisées peut être le fait de corrélations partielles, tel qu'expliqué plus haut. Ainsi, l'appauvrissement apparent en éléments majeurs Ca, Mg et possiblement Na, K, est en partie au moins, l'expression de facteurs collatéraux reliés essentiellement à la profondeur de l'eau et à une dilution par des eaux de surface des échantillons pompés au contact du SM. Ces aspects sont approfondis dans la section suivante.



## 6.3 Influence de la profondeur de l'eau

### 6.3.1 Notion d'âge de l'eau

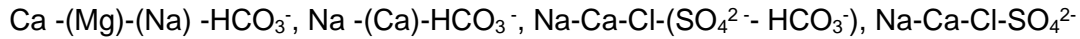
Dans un milieu aquifère idéalisé continu et homogène, la profondeur et le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère montreraient une relation linéaire : plus profonde est l'eau, plus grand est le temps écoulé depuis son infiltration à partir de la surface. Dans les aquifères de socle, discontinus et hétérogènes, cette relation est nettement moins bien contrainte, mais demeure *a priori* globalement valable (ex. Gascoyne, 2004). Les aquifères de socle sont marqués par la coexistence de deux types de porosité : la porosité primaire, interstitielle, très peu conductrice, mais très capacitive, c.-à-d. que les transferts d'eau (pression et soluté) s'y produisent très lentement, mais en gros volume et à l'inverse, la porosité secondaire qui correspond aux fractures, et qui est très conductrice, mais peu capacitive. La réponse immédiate de l'aquifère à toute perturbation hydraulique est gouvernée par la porosité secondaire tandis que la réponse à long terme reflète la porosité primaire, suivant le modèle classique du milieu à double porosité (*dual continuum*) (Warren et Root, 1963).

Étant donnée la forte conductivité des fractures, l'eau y circule extrêmement plus rapidement que dans la porosité primaire. Lorsque la porosité primaire est sensiblement non-nulle, il y a mélange d'eaux circulant dans les deux types de porosité en tout point de l'aquifère. Par conséquent, le temps de résidence de l'eau, à une profondeur donnée, est une variable complexe résultant de la contribution relative d'eaux ayant suivi des chemins d'écoulement très disparates à des vitesses très inégales. Il est évident que l'âge résultant du mélange de ces « différentes eaux » n'est pas une moyenne de leurs âges respectifs. Au contraire, le recours à une approche statistique est requis. Le caractère non trivial de la notion d'âge de l'eau, ou de temps de résidence de l'eau, dans les aquifères de socle, est ici pressenti.

### 6.3.2 Composition chimique et temps de résidence de l'eau

Les échanges ioniques entre l'eau et la roche environnante suivent une certaine évolution depuis l'infiltration (âge zéro) jusqu'aux temps prolongés, laquelle reflète essentiellement la nature des minéraux météorisés, et les variations de solubilité des différentes espèces induites par les changements de conditions pH, Eh. Cette évolution est encore relativement mal contrainte. La forte solubilité des carbonates provoque, lorsque ces minéraux sont présents, un enrichissement rapide de l'eau en ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et carbonates.

La séquence de dissolution suivante est rapportée par Worthington et al. (2016) : les roches carbonatées sont plus rapidement météorisables que les roches ignées mafiques, elles-mêmes plus facilement météorisables que les roches ignées felsiques et que les roches sédimentaires détritiques (grès, argiles). Gascoyne (2004) démontre la séquence de maturation de l'eau suivante dans un environnement igné mafique archéen couvert de sédiments carbonatés holocènes :



Seul l'enrichissement en anions  $\text{Cl}^-$  au détriment des carbonates  $\text{HCO}_3^-$  aurait un caractère généralisable, de sorte que ces deux éléments sont les meilleurs marqueurs « potentiellement universels » de la maturation de l'eau. Ceci est confirmé par les données de Frapé et al., (1984) dans les roches cristallines du secteur de Sudbury, de Nordstrom et al. (1989) dans la mine Stripa (Suède), et de Bottomley et al., (1994) dans une compilation de plusieurs sites du Bouclier canadien (Mazor, 2004). Quel que soit l'assemblage géochimique, les paramètres Eh et la salinité montrent systématiquement une très nette corrélation avec la maturation de l'eau : la salinité augmente, essentiellement par un enrichissement en Ca, Na, Cl, tandis que Eh diminue.

### 6.3.3 Diagramme R-R profondeur

On retrouve sur le site de Phelps Dodge 1 sensiblement la même séquence d'évolution de la composition chimique de l'eau avec la maturité, autrement dit l'âge de l'eau. Ceci est illustré sur le diagramme *R-R* de la figure 17. La très bonne cohérence entre les fractionnements observés, la longueur du forage et la profondeur de l'échantillon, *sensu stricto*, reflète possiblement en partie la corrélation artefact entre les deux variables ( $R = 0.59$ , voir Tableau 4), ainsi que, partiellement encore, des mélanges verticaux au sein du puits d'eaux entrées à différentes profondeurs. Quoi qu'il en soit, cette figure visualise clairement **le fractionnement relié à la maturation de l'eau : enrichissement en Mg, Ba, Ca, Sr, Cl, F** et conductivité, appauvrissement en métaux traces et ultratrace. Plusieurs des éléments de la séquence décrite par Gascoyne, (2004) dans des intrusions mafiques du Bouclier canadien sont identifiables. Toutefois, l'enrichissement attendu en Na et  $\text{SO}_4^{2-}$  ; en profondeur, n'est pas observé, ce qui reflète certainement le fait que les eaux échantillonnées demeurent davantage marquées par la géochimie de la couverture sédimentaire que du socle.

Ces résultats indiquent un appauvrissement en Ni, Cu, Sb,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe avec la profondeur, ce qui est pour le moins surprenant. En effet, c'est probablement l'effet de la corrélation artefact qui est encore présent entre la proximité du SM et la profondeur. En effet, les échantillons prélevés proche ou au contact du SM sont statistiquement plus superficiels que les échantillons distaux ( $R = 0,58$  ; voir Tableau 4 et figure 19A). Ceci résulte de la disposition du levé et du faible nombre d'échantillons disponibles : les échantillons distaux témoins ne sont pas assez nombreux pour qu'une sélection des plus superficielles ne soit statistiquement représentative.

Par ailleurs, plusieurs autres éléments constituant l’empreinte brute du corps métallique apparaissent appauvris en profondeur sur la figure 17 : Be, Th, Se, Sn.

Les données disponibles de ce levé sont aux limites des possibilités statistiques offertes par des populations restreintes : les variables collatérales ne sont pas assez bien décrites (c.-à-d. que la représentativité des populations est globalement faible), si bien qu’il n’est pas possible de discriminer de façon robuste les différents facteurs affectant la géochimie de l’eau. Par conséquent, il est impossible à ce stade de déterminer les ratios d’éléments susceptibles de corriger les facteurs collatéraux – c.-à-d. sans lien avec la minéralisation afin de rehausser les anomalies. Les différentes analyses décrites ci-dessous utiliseront donc les valeurs brutes.

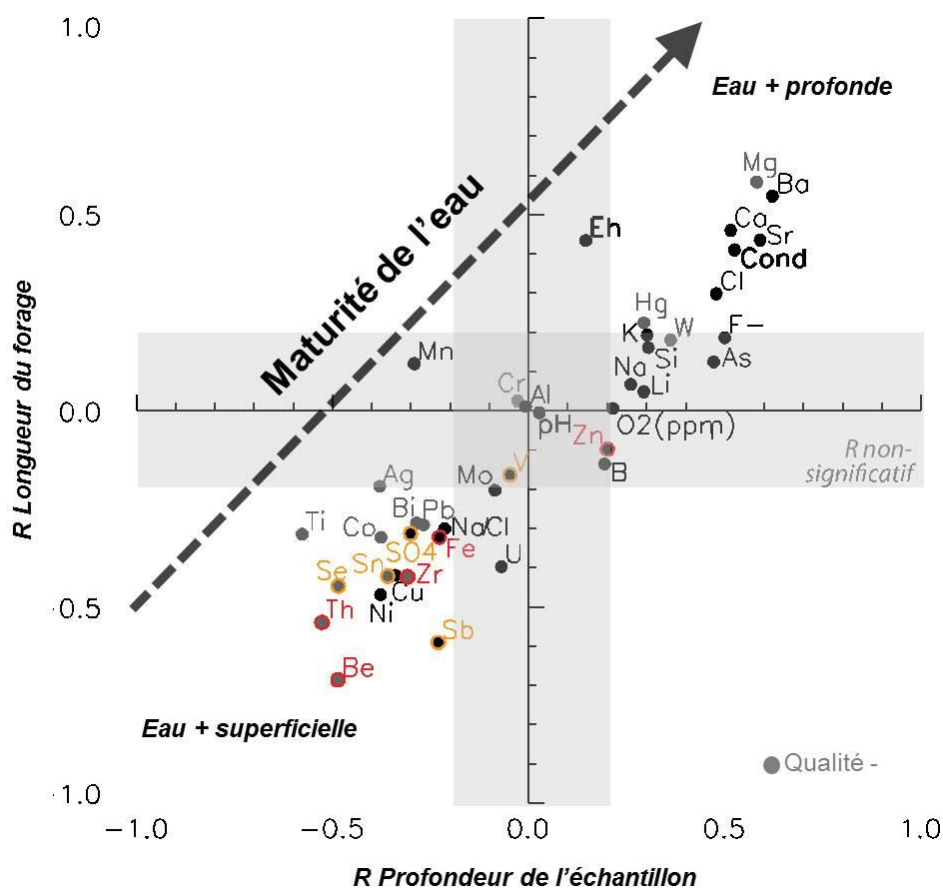


Figure 17. Diagramme R-R, l’axe horizontal et l’axe vertical indiquent respectivement les valeurs de R entre la concentration et les profondeurs de l’échantillon et du forage. Seuls les échantillons du « protocole Bailer » sont considérés ( $n = 25$ ).

Les éléments surlignés en rouge constituent *a priori* des bons candidats pour le marquage du corps métallique (empreinte brute du SM), en orange des candidats potentiels. Les éléments marqués par « Qualité - » correspondent aux éléments dont la résolution et/ou le nombre de valeurs supérieures à la LDR sont faibles (voir tableau 2).



Tableau 4. Matrice de corrélation de Spearman entre les différentes variables considérées dans le traitement des données.

	Distance SM	Prof. verticale ech.	Prof. verticale forage	Prof. relative
Distance SM	1	<b>0.58</b>	0.024	<b>-0.65</b>
Prof. verticale ech.		1	0.59	<b>0.52</b>
Prof. verticale forage			1	-0.25
Prof. relative				1

### 6.3.4 Profondeur relative

La profondeur relative de l'échantillon correspond à son positionnement vertical dans le forage : il s'agit du rapport entre la profondeur de l'échantillon et la longueur totale du forage (Fig. 19).

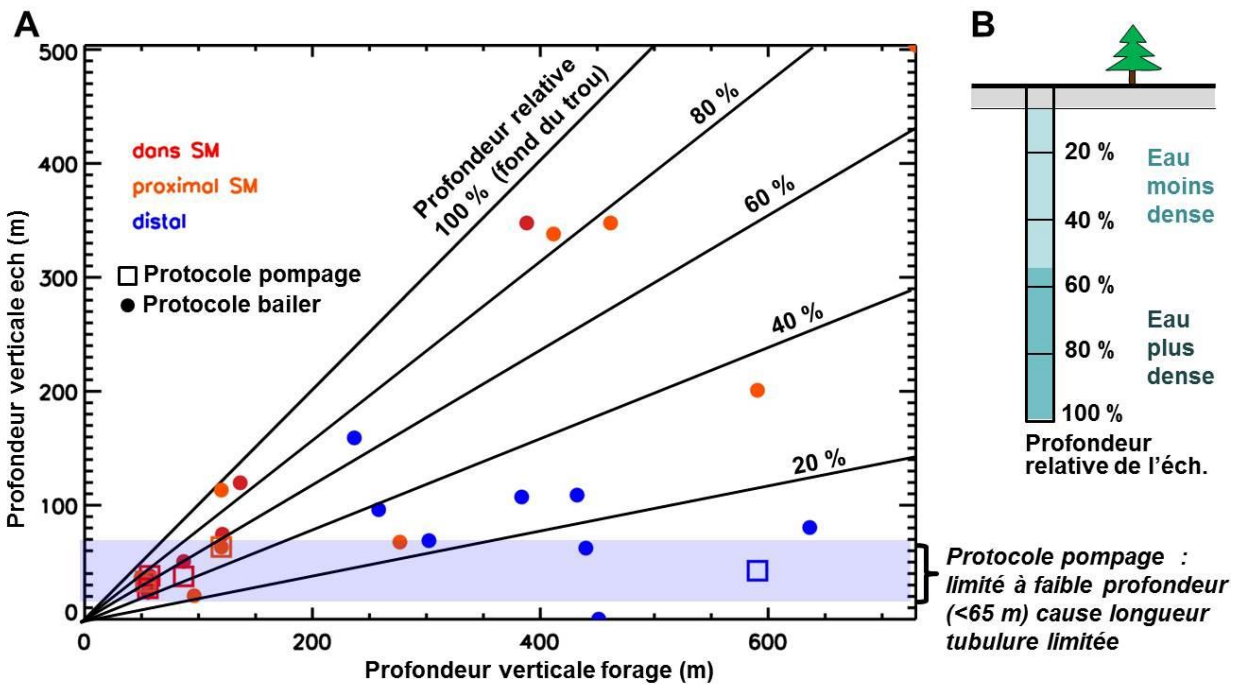


Figure 19. A) profil montrant les distributions des profondeurs par groupe d'échantillon, B) illustration du concept de profondeur relative.

La figure 19 fait apparaître un biais dans les distributions de profondeurs relatives : les échantillons localisés à proximité ou au contact du SM sont globalement dans la moitié inférieure du forage (40 – 100 %) tandis que les échantillons distaux sont davantage dans la moitié supérieure (< 40 %). Ceci résulte du fait que les forages sont systématiquement arrêtés après avoir traversé le SM.



## 6.4 Dispersion horizontale du halo

La figure 21 montre le fractionnement horizontal de l’empreinte hydrogéochemique du corps métallique. Les échantillons sélectionnés interceptent l’empreinte et son halo à des profondeurs comprises entre 100 et 200 m, à différentes distances du corps métallique. La composition chimique de l’empreinte est présentée dans un diagramme multiéléments normalisé sur la valeur du bruit de fond (Fig. 21B). Les éléments marqueurs de la maturité de l’eau sont également présentés.

Suivant le postulat très commun en hydrogéologie quantitative selon lequel l’écoulement est à très forte dominante horizontale — postulat généralement valide à distance des zones de recharge et de décharge de l’aquifère ce qui est le cas ici — le fractionnement observé dans le plan horizontal devrait traduire la dispersion du panache géochimique depuis la source. Cette dispersion suit le chemin d’écoulement, globalement gouvernée par le gradient de charge hydraulique, bien que de façon non linéaire dans le contexte de socle étant donné la forte hétérogénéité et discontinuité de la conductivité hydraulique. Le fractionnement hydrogéochemique est investigué, ici, dans cinq forages localisés approximativement en aval hydraulique du corps métallique (Fig.21A), à des distances croissantes du corps soit, au contact, à moins de 100 m, à environ 100 à 150 m, et enfin à environ 500 m du corps métallique.

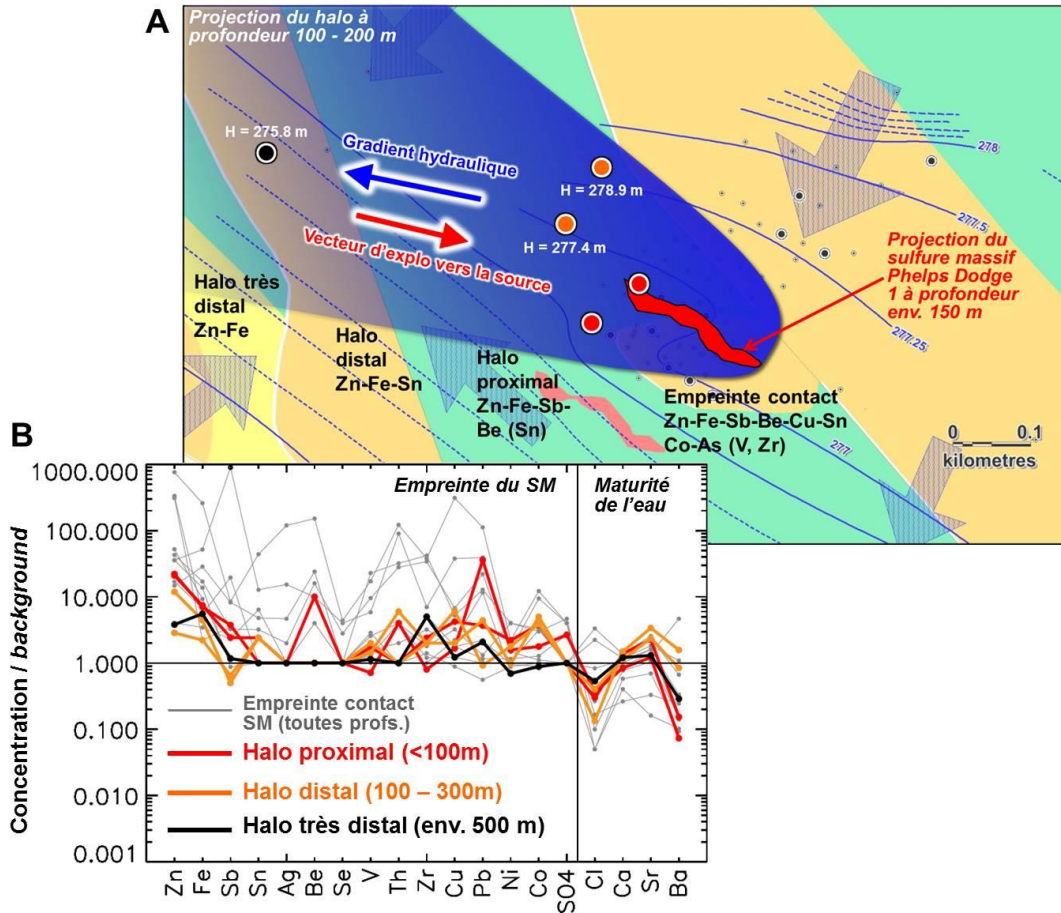
**L’empreinte contact**, illustrée en arrière-plan (trait gris) sur la figure 21B, est multiéléments. Elle se traduit par un enrichissement très net en Zn, Fe, Sb, V, puis par un enrichissement très marqué, mais moins bien contraint pour des raisons de qualité des analyses (faible résolution), en Sn, Be, Se, Ag, et enfin, un enrichissement moins important en Pb, Cu, Co, Ni,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

**L’empreinte proximale** est marquée par un enrichissement en Zn, Fe, Sb, Be, et moindrement en  $\text{SO}_4^{2-}$  et Sn.

**L’empreinte distale et très distale** ne contient plus que Zn et Fe, éléments dont l’amplitude de l’enrichissement au contact est aussi la plus forte.

Le panache évolue donc sur quelques centaines de mètres depuis une signature multiélément, au contact du corps métallique, à forte dominante d’éléments chalcophiles (Sb, Ag, Se, Cu, Zn, Sn, Pb,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) plus Fe, vers une empreinte Zn, Fe, Sb, Sn,  $\text{SO}_4^{2-}$ , puis Zn, Fe, Sn, puis Zn, Fe. Ce fractionnement est le reflet de deux facteurs (1) l’amplitude de l’enrichissement au contact, et (2) la mobilité de l’espèce. Plusieurs éléments demeurent anomaux dans le halo distal, bien que de façon moins constante et moins marquée que Zn et Fe : il s’agit essentiellement de Pb, Cu, Co, Sb.





On note ici la dimension nettement plus large du halo de dispersion en comparaison avec le corps métallique lui-même. Ceci offre un potentiel intéressant pour l'exploration, puisque la détection du halo, beaucoup plus facile que la découverte de la lentille elle-même, permettrait, en contexte d'exploration, de vectoriser les travaux vers la source en remontant le gradient hydraulique, tel qu'illustré sur la figure 21.



## 6.5 Empreinte profonde versus empreinte subsurface

La figure 22 montre les différentes expressions de l'empreinte hydrogéochimique du SM en fonction de la profondeur. Les résultats sont présentés le long de deux sections traversant le SM depuis la subsurface jusqu'à 537 m. Tous les échantillons inclus dans cette figure sont de l'eau en contact direct ou très proximal avec le corps métallique. Les concentrations rapportées au niveau de base local sont représentées sur le diagramme multiéléments (Fig. 22B). Les éléments indiqués constituent l'empreinte du corps métallique ainsi que les marqueurs de la maturité de l'eau déterminés par l'analyse des corrélations décrite précédemment (diagrammes R-R, voir f 16 et 17). Quatre éléments majeurs ont été retenus comme marqueurs de la maturité de l'eau : Cl, Ca, Sr, Ba.

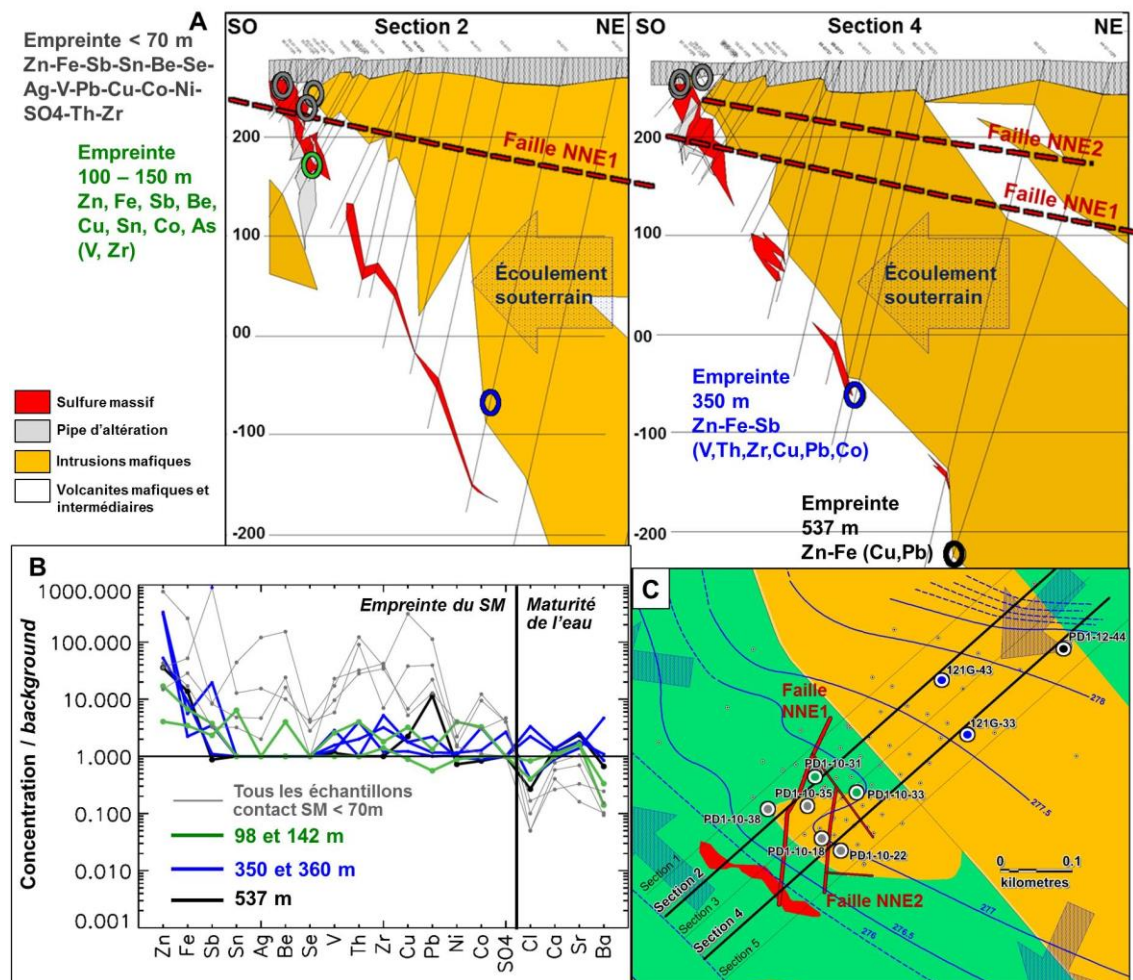


Figure 22. Fractionnement vertical de l'empreinte hydrogéochimique du corps métallique.

A) Position des échantillons sur les coupes 2 et 4. L'arrière-plan présente les failles ouvertes interprétées par imagerie acoustique (annexe 2), la géologie interprétée ainsi que la direction globale d'écoulement. B) Diagramme multiéléments montrant l'empreinte et son fractionnement vertical. C) Vision en plan de la position des échantillons, des coupes et des fractures ouvertes.

Le caractère plus mature des eaux profondes est visible sur la figure 22B par des concentrations plus élevées en Cl, Ca, Sr et Ba. Les échantillons les plus superficiels (groupe < 70 m) apparaissent appauvris en ces éléments du fait qu'ils sont statistiquement moins profonds que les échantillons témoins utilisés comme niveau de base.

**L'empreinte hydrogéochimique la plus superficielle** du SM (< 70 m) est aussi la plus amplifiée et la plus diversifiée. Cette empreinte est représentée par sept échantillons, et est donc relativement robuste. Des enrichissements en **Th, Zn, Pb, Zr, Fe, Be** supérieurs à un facteur 10 (rapports de médianes, Tableau 5) sont observables. Les éléments **Cu, V, Sb, Te, Ti, Sn, Co, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cr, Ag et Ni** sont également enrichis, avec des facteurs compris entre 2 et 10. L'enrichissement culmine à un facteur d'environ 1000 pour Zn et Sb, un facteur de 300 pour Fe et Cu, un facteur de 100 pour Ag, Be Th, Ni (voir figure 22B).

L'empreinte du SM dans la tranche de profondeur 100 à 150 m est constituée de **Zn, Fe, Sb, Be, Cu, Sn, Co, As (V, Zr)**. Les facteurs d'enrichissement sont globalement plus faibles, inférieurs à 10 à l'exception de Zn (16,5). Plus en profondeur (350 m), l'empreinte établie d'après les rapports de médianes est enrichie en **Zn, Fe, Sb**, et, moindrement, en **Co, As, Th, Zr, Cu, V**. Ce groupe ne contient que deux échantillons, tous les deux montrant des valeurs extrêmement élevées en Zn (220 et 1400 µg/L, pour un niveau de base médian à 5,5 µg/L). Le facteur d'enrichissement est donc de 188,37 (Tableau 5), ce qui en fait la tranche de profondeur exhibant l'anomalie la plus forte en Zn. C'est aussi le cas de Sb, avec un facteur d'enrichissement de 9,47. Pour finir, l'échantillon prélevé à 537 m de profondeur est très fortement anomal en **Zn et Fe** essentiellement, et, moindrement, en **Pb et Cu**.

Il est particulièrement intéressant de noter que deux échantillons profonds (121G-33\_BA, à 360 m et PD112-44\_BA à 537 m) sont pris dans des forages dits « *off hole* », autrement dit des forages n'interceptant pas le corps métallique, mais passant à une dizaine de mètres (voir figure 22B, section 4). L'analyse de carotte ne révèle dans ces forages aucune trace de minéralisation, ni à l'observation directe ni en géochimie (*assays*). En contrepartie, l'analyse de l'eau fait ressortir très clairement des teneurs extrêmement élevées en Zn, Fe et en Sb pour l'un des échantillons, **indiquant la proximité du SM**. Ces deux cas fournissent des exemples percutants de l'intérêt de la méthode hydrogéochimique en exploration : **l'empreinte hydrogéochimique du SM est interceptée tandis que le SM lui-même ne l'est pas**.

Le fait que les facteurs d'enrichissement en Zn en profondeur soient aussi élevés (plus élevés qu'en subsurface) est particulièrement saisissant. Cette amplification de l'empreinte du corps métallique sur l'eau en profondeur peut être reliée au temps de contact prolongé avec le SM.

C'est un résultat majeur dans la perspective d'une application en exploration profonde. Par ailleurs, l'enrichissement en sulfates au contact du SM ne se produit que dans les échantillons superficiels (groupe < 70 m). Ceci indique des conditions plus oxydantes en subsurface qu'en profondeur, un résultat attendu puisque l'eau y est globalement plus « jeune » et donc plus oxygénée. Dans ce contexte superficiel, la solubilisation de Zn, S et Fe est reliée à l'oxydation des sulfures.

**Le fait qu'un enrichissement très fort, sinon plus fort, en Zn et Fe soit visible en profondeur, sans production de sulfates, indique que leur solubilisation demeure efficace dans des conditions peu oxydantes.** Ceci peut révéler l'existence d'un mécanisme de destruction des sulfures actif en profondeur n'impliquant pas d'oxydation. Pour finir, un fort enrichissement en As, particulièrement marqué en profondeur, n'est pas identifié à l'empreinte, car son association avec le SM ne se confirme pas avec le « protocole pompage » (voir figure 16). L'enrichissement observé ici en profondeur (voir tableau 5) peut être simplement la conséquence du fait que les échantillons témoins sont statistiquement dans les deux tranches les moins profondes (profondeur médiane du groupe témoins = 88 m).

Par ailleurs, Th et Zr sont très enrichis en subsurface, ainsi que plusieurs autres éléments associés à l'empreinte du SM. Ces observations corroborent l'analyse de corrélation illustrée par le diagramme *R-R* de la figure 18 : plusieurs éléments de l'empreinte montrent aussi une corrélation négative avec la profondeur, tels que Be, Sr, Sn, Ni, Sb. Les enrichissements en ces éléments au contact du SM dans les tranches profondes seront donc **inévitavelmente sous-évalués**, puisque les valeurs mesurées sont rapportées à une eau plus superficielle (où le niveau de base est plus élevé). Encore une fois, la quantité d'échantillons disponibles dans ce levé ne permet de rapporter l'empreinte profonde à un niveau de base de même profondeur.

Tableau 5. Facteurs d'enrichissement de l'eau en contact avec le corps métallique pour plusieurs tranches de profondeur.

	Médiane / médiane témoins locaux (n = 6)			
	<70 m (n = 7)	100 - 150 m (n = 3)	350 m (n = 2)	537 m (n = 1)
Th_ug/L	28.00	1.00	3.00	1.00
Zn_ug/L	<b>21.63</b>	<b>16.51</b>	<b>188.37</b>	<b>34.88</b>
Pb_ug/L	17.19	1.03	0.84	9.06
Zr_ug/L	11.82	1.64	2.00	0.91
Fe_ug/L	<b>10.34</b>	<b>4.04</b>	<b>4.49</b>	<b>8.31</b>
Be_ug/L	10.00	4.00	1.00	1.00
Cu_ug/L	<b>6.50</b>	<b>2.90</b>	1.35	2.00
V_ug/L	5.47	1.60	1.33	1.07
Sb_ug/L	<b>3.68</b>	<b>2.23</b>	<b>9.47</b>	0.80
Te_ug/L	3.60	1.00	1.00	1.00
Ti_ug/L	3.43	0.57	0.57	0.57
Sn_ug/L	<b>3.20</b>	<b>2.40</b>	1.00	1.00
Co_ug/L	3.18	3.47	2.35	0.88
As_ug/L	3.08	7.24	<b>11.81</b>	6.06
SO42-_mg/L	2.67	1.00	1.83	1.00
Cr_ug/L	2.09	0.87	1.13	1.48
Ag_ug/L	2.00	1.00	1.00	1.00
Ni_ug/L	1.86	2.61	1.29	0.86
Mo_ug/L	1.21	1.16	0.65	1.58
Li_ug/L	1.21	1.09	1.25	1.51
B_ug/L	1.15	1.15	1.53	0.76
Cd_ug/L	1.00	1.00	1.00	1.00
Se_ug/L	1.00	1.00	1.00	1.00
Si_ug/L	0.87	1.53	1.12	1.32
K_ug/L	0.79	1.31	0.87	1.28
Ca_ug/L	0.77	1.11	1.04	1.35
F-_mg/L	0.76	1.52	1.19	1.71
Sr_ug/L	0.68	1.40	1.40	2.08
Mn_ug/L	0.64	0.52	0.83	0.96
Mg_ug/L	0.60	0.97	0.97	1.35
Na_ug/L	0.45	1.68	1.11	0.91
U_ug/L	0.38	0.60	0.44	0.10
Cl-_mg/L	0.22	0.52	1.72	0.35
Hg_ug/L	0.18	0.41	1.09	1.18
W_ug/L	0.16	0.40	1.04	1.13
Ba_ug/L	0.16	0.24	4.47	1.03
	> 2	> 10	> 100	

\*Les éléments affichés en rouge constituent l'empreinte déterminée d'après l'analyse des corrélations (voir figure 16), en bleu les éléments enrichis en profondeur (voir figure 17).

## 6.6 Influence du mode d'échantillonnage

Le mode d'échantillonnage passif est simple d'utilisation (voir détails dans la section 4.1) et globalement satisfaisant, c'est le mode par défaut utilisé dans cette étude. Toutefois, il demeure une incertitude quant au fait que l'eau échantillonnée soit bien représentative de l'aquifère à la profondeur désignée. En effet, une stratification chimique s'opère avec le temps au sein du puits (voir section 6.3.4), du fait d'un rééquilibrage par densité des eaux de différentes salinités suintant ponctuellement par les fractures (p. ex., Mazor, 2004). L'importance de cet artifice dépend de la dynamique des transferts verticaux *versus* le renouvellement de l'eau du puits à travers les venues ponctuelles (fractures), aspects non quantifiés à ce jour.

En contrepartie, le mode d'échantillonnage actif génère des écoulements artificiels, dirigés vers le puits, induits par la dépressurisation du puits. Étant donné le caractère très hétérogène de la conductivité hydraulique dans le milieu du socle, ces écoulements artificiels ne provoquent pas un drainage distribué dans l'environnement immédiat du puits, augmentant ainsi le volume d'aquifère échantillonné. Cela a pour effet de stimuler des connexions discrètes et artificielles avec des réservoirs distaux, dont il est totalement impossible de connaître la nature et la disposition. Le pompage ne stimule donc pas le système naturel, mais le modifie, puisque le gradient généré est très différent du gradient naturel. Par conséquent, il constitue une source d'incertitude supplémentaire, complexifiant potentiellement l'interprétation des analyses géochimiques en particulier si la géométrie du réseau de fractures ouvertes n'est pas connue.

### 6.6.1 Influence du mode d'échantillonnage sur la géochimie de l'eau

Les résultats présentés sur la figure 23 démontrent que **le mode d'échantillonnage n'a pas d'impact majeur sur la géochimie de l'eau**, dans la plupart des cas. En effet, les signaux se superposent remarquablement bien dans 5 doublets sur 6, avec des coefficients de corrélation proches de 1. C'est donc bien la même eau qui est échantillonnée. Par ailleurs, les deux échantillons prélevés au *bailer* dans le puits PD1-10-30 à deux profondeurs différentes (76 et 136 m) montrent deux eaux aux géochimies différentes en particulier en ce qui concerne les éléments traces et ultratrace, tandis que le doublet prélevé en mode actif à 76 m fournit une signature fidèle à l'échantillon pris au *bailer* à la même profondeur. Ces résultats confortent sur la robustesse de l'échantillonnage puisque les échantillons sont bien représentatifs de l'eau environnante, quel que soit le mode opératoire.

Notons que tous les doublets sont dans la tranche superficielle étant donné les limites techniques du mode opératoire actif (longueur de la tubulure).

En revanche, les éléments critiques associés à l'empreinte, en particulier **Zn, Sb et Fe**, **apparaissent quasi systématiquement sous-évalués avec le « protocole pompage »** dans les doublets en contact direct avec le SM. Ceci pourrait être interprété comme une simple **dilution de l'empreinte lors du pompage**, par une eau ayant globalement la même composition que l'eau initialement présente, prélevée au *bailer*. Dans ce cas, cela suggérerait la mise à contribution du réservoir supérieur (till de fond en contact direct avec le socle) au moyen de connexions activées par le pompage.

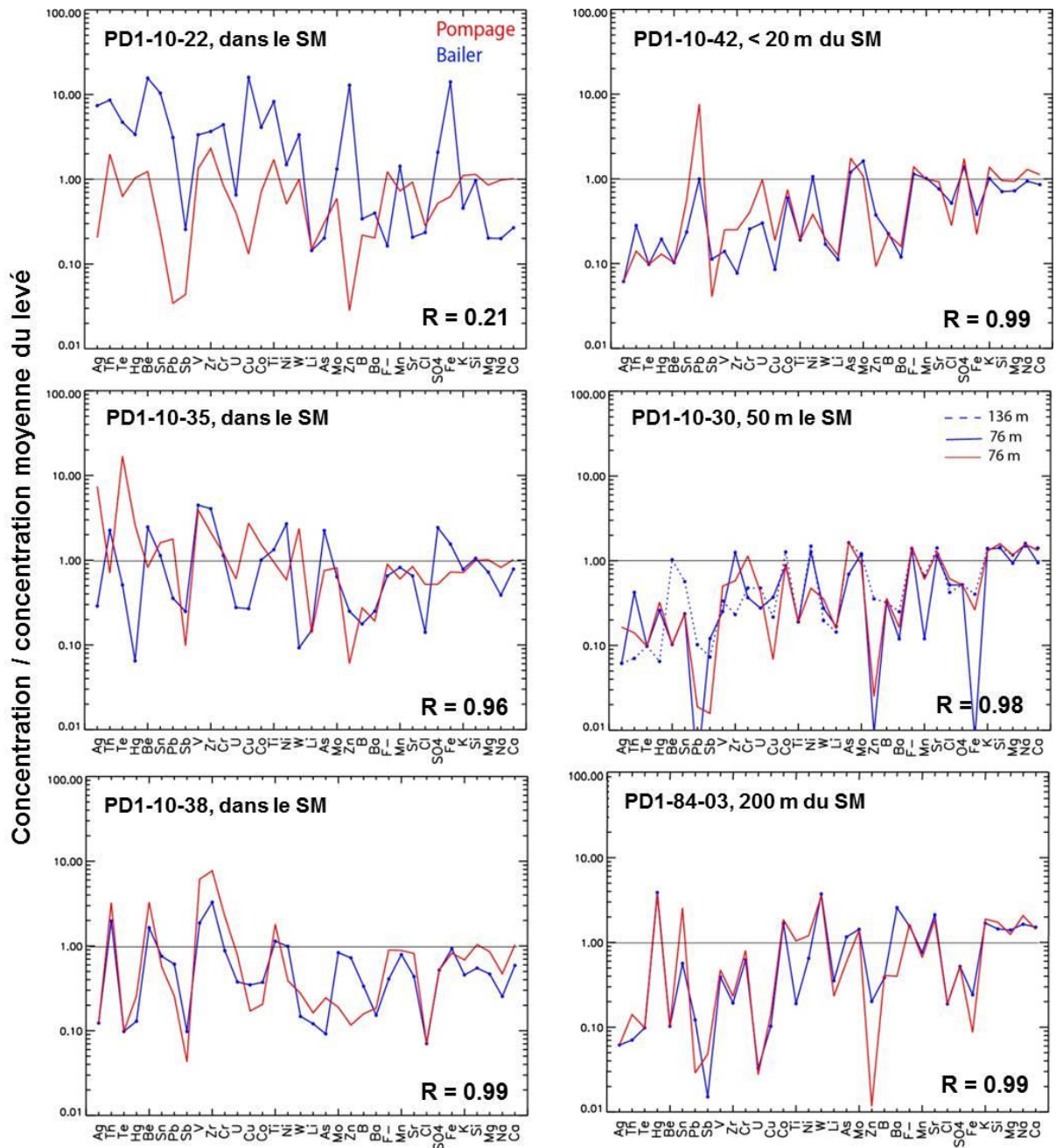


Figure 23. Diagrammes multiéléments de la géochimie complète des échantillons pris en doublets pour comparaison de mode d'échantillonnage passif (*bailer*) vs actif (*pompage*).



## 6.6.2 Pompage et connexions artificielles

Le doublet du forage PD1-10-22 montre une dilution généralisée considérable affectant la plupart des éléments à l'exception des majeurs Sr, F, Cl, K, Mg, Na, Ca. Dans ce cas, le coefficient de corrélation est faible ( $R = 0,21$ ). Ceci est interprété comme une dilution par des eaux météoriques circulant depuis le lac de la rampe artificielle (section 5.1) localisée à 200 m au sud. En effet, une des fractures identifiées par imagerie acoustique (fracture N.-N.-E.2) relie directement ce lac au forage PD1-10-22 (Fig. 24).

La figure 24 illustre les écoulements générés par la connexion artificielle entre le lac de rampe et le forage PD1-10-22, lors du pompage. Le lac de rampe met en connexion directe l'eau de surface avec le socle. Dans ce cas, le transfert se produit très rapidement en raison de la présence d'une fracture ouverte (fracture N.-N.-E.), reconnue et corrélée dans plusieurs diagraphies (Annexe 2). Cette fracture est relativement discrète en profondeur, mais son expression s'élargit substantiellement proche de l'interface avec la couverture sédimentaire, où elle devient un réseau de fracture dense atteignant plusieurs dizaines de mètres de largeur. Il s'agit donc d'un conduit très perméable et continu sous le toit du roc.

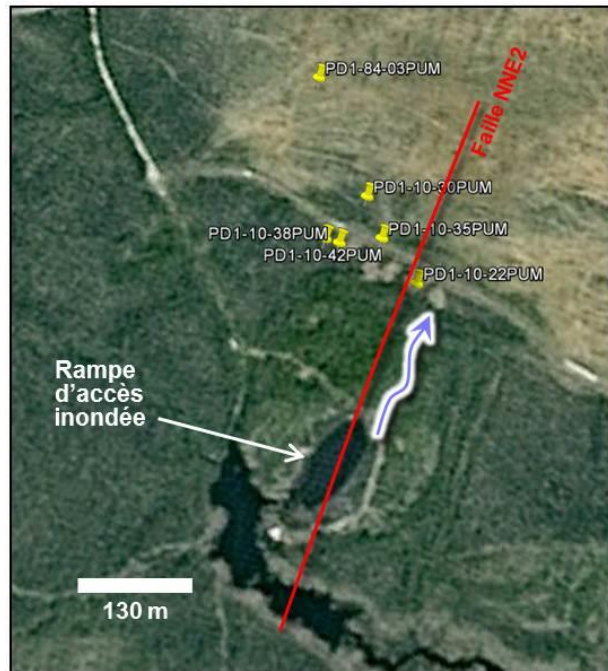


Figure 24. Disposition sur une image satellite des forages avec échantillonnage pompage, du lac de rampe directement connecté au socle, et de la fracture ouverte N.-N.-E.2.

Données SPOT (GoogleEarth). La flèche indique les écoulements artificiels induits par le pompage dans le forage PD1-10-22.

Cette dilution est très visible sur la figure 25 puisque tous les éléments présentés apparaissent dilués à l'exception de As. Plus spécifiquement, cette figure permet de visualiser la dilution de l'empreinte du SM par le mode opératoire actif (pompage). La dilution de Zn, Fe et Sb, telle que mentionnée plus haut, est à nouveau présente.

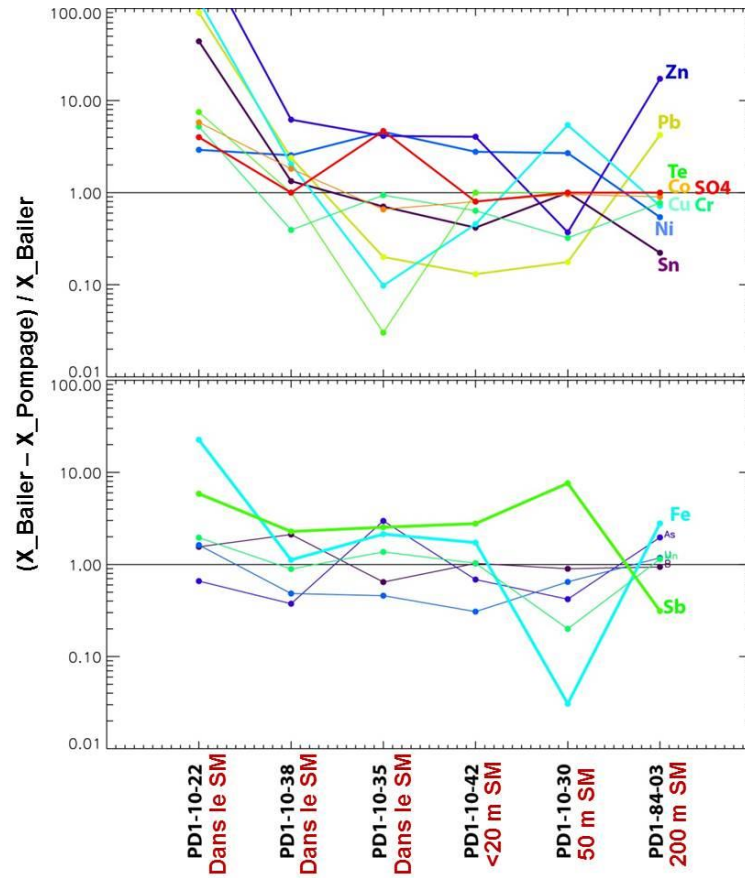


Figure 25. Écarts normalisés entre les concentrations obtenues par les deux protocoles d'échantillonnage pour plusieurs éléments constituant l'empreinte du SM.



---

## 7 CONCLUSION

---

L'objectif principal de ce projet de recherche était de fournir une évaluation préliminaire de l'usage de l'hydrogéochimie souterraine en exploration minérale, au moyen d'une étude de cas sur un corps métallique découvert, mais non exploité, en Abitibi. En premier lieu, il s'agissait de documenter l'existence d'une empreinte du corps sur l'eau en contact direct avec celui-ci, à différentes profondeurs ; ensuite, vérifier la dimension du halo et renseigner les fractionnements associés à la dispersion de ce halo ; enfin, évaluer les facteurs permettant une utilisation optimale de cette méthode en exploration : rehaussement d'anomalies, protocoles.

Le site étudié est le gisement de Phelps Dodge 1, un sulfure massif zincifère localisé dans le camp de Matagami, à des profondeurs évoluant entre 30 et 600 m. Un levé de 30 échantillons d'eau souterraine a été réalisé en août 2016, puis analysé par ICP-MS à haute résolution.

L'étude conclue à l'existence d'une empreinte très nette mesurable dans l'eau, émanant du corps métallique, jusqu'à au moins 500 m de profondeur, et sur au moins 500 m de distance horizontale. Un fractionnement géochimique est observé associé à la dispersion du panache. L'empreinte au contact du sulfure massif est multiélément et très fortement enrichie en Th, Zn, Pb, Zr, Fe, Be, ainsi que, moindrement, en Cu, V, Sb, Te, Ti, Sn, Co,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Cr, Ag et Ni. La dispersion montre le fractionnement suivant : Zn, Fe, Sb, Be, Sn, puis Zn, Fe, Sn, puis Zn, Fe.

L'étude conclue à la nécessité, pour un usage optimal, de contrôler certains paramètres hydrogéologiques incluant en premier lieu le degré de maturité de l'eau, exprimant la durée des échanges eau-roche, autrement dit le temps de résidence de l'eau dans le milieu rocheux depuis son infiltration. En effet, l'évolution naturelle de la composition de l'eau avec la profondeur — corrélée, en première approximation, à la maturité de l'eau — présente plusieurs similitudes avec l'empreinte du corps métallique. Il est par conséquent nécessaire d'appliquer des corrections afin de déterminer des vraies anomalies, c.-à-d., des valeurs en excès par rapport à un niveau de base approprié au contexte (profondeur, lithologie). Ces aspects devront être précisés par un levé plus substantiel.

De façon générale, les niveaux de base en éléments traces et ultratrace de l'eau souterraine sont encore mal contraints. Une meilleure connaissance de ces aspects serait requise pour détecter des anomalies de façon robuste, en contexte d'exploration.

L'un des enjeux importants du projet était d'étudier le potentiel de cette méthode pour l'exploration profonde, autrement dit de vérifier si le corps métallique produisait une empreinte à forte profondeur. Les échantillons prélevés entre 350 et 540 m au contact ou à proximité du corps métallique montrent un enrichissement extrêmement fort en Zn, Fe, (Sb, Pb). Pour Zn, cet enrichissement est même plus fort qu'en surface, où les conditions oxydantes donnaient un *a priori* plus positif. Ainsi, en dépit des conditions non oxydantes en profondeur, confirmées par l'absence de sulfates dans l'empreinte profonde, les échanges ioniques avec les sulfures demeurent très actifs ce qui induit un enrichissement très marqué de l'eau.

Il est probable qu'après corrections sur la maturité de l'eau, cette empreinte profonde soit nettement rehaussée et constituée d'une plus large gamme d'éléments. Ces résultats suggèrent un fort potentiel de la méthode pour l'exploration profonde.

Cette étude démontre que plusieurs forages révélés négatifs à l'analyse de carotte apparaissent positifs à l'analyse de l'eau : le halo hydrogéochimique a été intercepté tandis que le sulfure massif lui-même, de dimension nettement plus restreinte, avait été manqué. Dans de telles situations, la méthode permettrait de vectoriser l'exploration vers la source du panache hydrogéochimique en remontant le gradient hydraulique. La méthode revêt donc un très fort potentiel pour l'exploration, et pourrait contribuer à accroître le succès des campagnes de forages en implémentant un nouveau type de donnée recueillie sur une base systématique.

---

## 8 REFERENCES

---

- De Caritat, P. et Kirste, D. 2005. Hydrogeochemistry - clues to hidden mineralisation, *AUSGEO News*, 77
- De Caritat, P., McPhail, D.C., Kyser, K. et Oates, C.J. 2009. Using groundwater chemical and isotopic composition in the search for base metal deposits: hydrogeochemical investigations in the Hinta and Kayar Pb–Zn districts, India. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 9(3): 215-226.
- Gray, D.J. 1998. Characteristics of gold distribution and hydrogeochemistry at the Carosue Dam Prospect, Western Australia: Preliminary Report.
- Leybourne, M. I., Goodfellow, W. D., Boyle, D. R., et Hall, G. E. M. 2000. Form and distribution of gold mobilized into surface waters and sediments from a gossan tailings pile, Murray Brook massive sulphide deposit, New Brunswick, Canada. *Applied Geochemistry*, 15(5), 629-646.
- Leybourne, M. I. 2001. Mineralogy and geochemistry of suspended sediments from groundwaters associated with undisturbed Zn–Pb massive sulfide deposits, Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 39(6), 1597-1616.
- Leybourne M.I., et Cameron E.M. (2006) Composition of soils and groundwaters at the Pampa del Tamarugal: anatomy of a fossil geochemical anomaly derived from a distant porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 101:1569-1581.
- Gilliss, M.L., Al T.A., Blowes, D.W., Hall, G.E.M. et MacLean, B. 2004. Geochemical dispersion in groundwater from a weathered Cu-Zn deposit in glaciated terrain. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4 : 291-305.
- Bowell, R.J. 2014. Hydrogeochemistry of the Tsumeb Deposit: Implications for Arsenate Mineral Stability. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 79:589-627
- Pauwels, H., Tercier-Waeber, M.-L., Arenas, M., Castroviejo, R., Deschamps, Y., Lassin, A., Graziottin, F., et Elorza, F.-J. 2002. Chemical characteristics of groundwater around two massive sulphide deposits in an area of previous mining contamination, Iberian Pyrite Belt, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 75:17-41.
- Quian, J., Li, S. et Cao, C. 2008. Geochemical characteristics and source analysis of inflow of mine water in Wang'ershan Gold Mine, Shandong. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27(1), 82
- Carey M.L., McPhail, D.C. et Taufen, P.M. 2003. Groundwater flow in playa lake environments: impact on gold and pathfinder element distributions in groundwaters surrounding mesothermal gold deposits, St.Ives area, Eastern Goldfields, Western Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3:57-71
- Noble, R.R.P., Lintern, M.J., Gray, D.G., Reid, N. et Anand, R.R. 2013. Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: Part 1, regolith and groundwater. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13(2):67-85.
- Giblin, A. et Mazzucchelli, R. 1997. Groundwater geochemistry in exploration: an investigation in the Black Flag district, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(4):433-443.
- Genna, D. 2015. Traceurs géochimiques pour guider l'exploration des SMV le long des tuffites de Matagami (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).

Williamson, K., Pilote, P. et Rabeau, O. 2013. Modélisation Régionale Du Camp Minier De Matagami, Publication du MRNF, MB 2013-05

Pilote, P. 2012. Géologie - Lac Matagami, Publication Du MRNF CG-32FL3B-2012-01

Parent, M., Boisvert, E. et Hardy, F. 2008. *Prospection Glacio-Sédimentaire Dans Les Régions À Épaisse Couverture Argileuse D'abitiibi – Stratigraphie, Minéralogie Et Géochimie Des Tills En Sous-Surface de la région de la rivière Octave*, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Ressources naturelles Canada, 30 p.

Eppinger, R.G., Fey, D.L., Giles, S.A., Kelley, K.D. et Smith, S.M. 2012. An exploration hydrogeochemical study at the giant Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska, USA, using high resolution ICP-MS, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12:211–226. DOI: 10.1144/1467-7873/11-RA-070

Cameron, E. M. 1977. Geochemical dispersion in lake waters and sediments from massive sulphide mineralization, Agricola Lake area, Northwest Territories. *Journal of Geochemical Exploration*, 7, 327-348. Creasey C.L. et Flegal A.R. 1999 Elemental analyses of groundwater: demonstrated advantage of low-flow sampling and trace-metal clean techniques over standard techniques, *Hydrogeology Journal*. 7:161–167

Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown, E.H. 2004. Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous history of arc development, accretion and collision, *in* Eriksson, P. G., Altermann, W., Nelson, D. R., Mueller, W. U., Catuneau, O., and Strand, K., eds., *Developments in Precambrian Geology/Tempos of events in Precambrian time*, 12: Amsterdam, Elsevier, p. 88-103.

Dhiman C., Reddy, M.N., Gulati, K. et Khan, M.S., 2014. Detection of Elemental Composition of Lubricating Grease Using Laser Induced Breakdown, *Spectroscopy Lubricants* (2):223-236. DOI:10.3390/lubricants2040223

Holzbecher, E. 2000. Modeling Density-Driven Groundwater Flow in Vertical Cross-Sections. In: Sato K., Iwasa Y. (eds) *Groundwater Updates*. Springer, Tokyo

Kirste, D et De Caritat, 2003. Groundwater studies as an aid to mineral exploration in areas of sedimentary cover, broken hill region. *In* : Peljo M., comp., 2003. Broken Hill Exploration Initiative: Abstracts from the July 2003 conference. *Geoscience Australia Record* 2003/13.

Langmuir, D. & Chatham, J.R. 1980. Groundwater prospecting for sandstone-type uranium deposits: a preliminary comparison of the merits of mineral-solution equilibria, and single-element tracer methods, *Jour. of Geoch. Expl.*, 13 (2-3): 201-219. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(80\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(80)90007-2)

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec (MDDEP), 2011. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines*, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 60 p., 1 annexe. [Http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage.htm](http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage.htm)

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2014. *Protocole d'échantillonnage de l'eau de surface pour l'analyse des métaux en traces*, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-69205-8 (PDF), 19 p.

- U.S. Environmental Protection Agency, (U.S. EPA), 1996. *Method 1669: Sampling Ambient Water for Trace Metals at EPA Water Quality Criteria Levels*, U.S. EPA, Office of Water, Engineering and Analysis, Division (4303), Washington.
- Mazor, E. 2004. *Global Water Dynamics*; Ed.; Marcel Dekker: New York, 404 p.
- Pokrovski, G.S., Akinfiev, N.N. et Borisova, N.Y. 2016. Gold speciation and transport in geological fluids: insights from Experiments and physical-chemical modelling *in* Garofalo, P. S. & Ridley, J. R. (eds) 2014. *Gold-Transporting Hydrothermal Fluids in the Earth's Crust*. Geological Society, London, Special Publications, 402:9–70.
- Puls, R.W. et Barcelona, M.J. 1995. Low-flow (minimal drawdown) ground-water sampling procedures, *United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development EPA/540/S-95/504*, EPA Ground Water Issue
- Rafini, S. 2012. Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts, Rapport, Projet CONSOREM 2011-06, 45p.
- Rafini, S. 2013. Évaluation de l'efficacité des différentes techniques de géochimie de l'environnement secondaire, Projet CONSOREM 2012-04, 36p.
- Veillette, J.J. 1994. Evolution and paleohydrology of glacial lakes Barlow and Ojibway, *Quaternary Science Reviews*, 13:945-971
- Veillette, J.J., Paradis S.J. et Thibaudeau P. 2003. Les cartes de formations en surface de l'Abitibi, Québec ; Commission géologique du Canada, Dossier public 1523
- Warren J.E. et Root P.J. 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs, *SPE, Trans. AIME*, 228 : 245-255.
- Williamson, K., Pilote, P. et Rabeau, O., 2013. Modélisation régional du camp minier de Matagami, Ministère, Énergie et Ressources naturelles (MERN), GM67022, 13 p.
- Worthington, S.R.H., Davies G.J. et Alexander E.C. 2016. Enhancement of bedrock permeability by weathering *Earth-Science Reviews* 160:188–202



Photo 1. Dispositif du *bailer*. Photo Solinst®, modèle 429



Photo 2. Bille située en tête du *bailer*.



Photo 3. Montage du *bailer* sur l'ARGO. Le treuil (500 m) est fixé sur le toit de l'ARGO, puis le câble glisse sur une poulie fixée sur le sommet du tubage, ce qui permet la descente du *bailer* dans le puits.



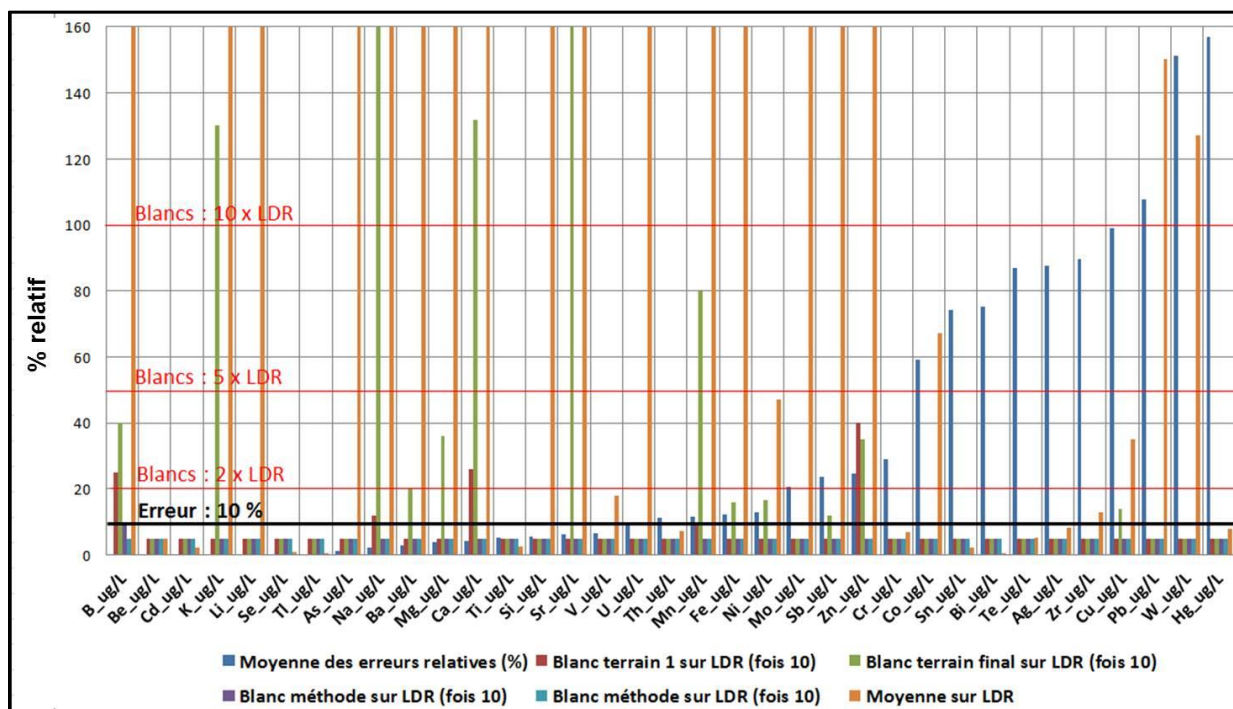
Photo 4. Échantillonnage actif, avec tubulure reliée à une pompe Redi-Flo en surface. Au premier plan, le bas de réception de l'eau dédié à la mesure en continu des paramètres in situ (pH, Eh, Cond, OD). La sonde de mesure apparaît à gauche de l'image.





## 11 ANNEXE 3 : QA-QC

Le tableau ci-dessous résume les résultats des échantillons de contrôle (terrain et laboratoire). Les moyennes des erreurs relatives correspondent à la moyenne, sur les deux duplicatas, des écarts relatifs  $100 \text{ ABS} (\text{dup} - \text{parent}) / [0,5 (\text{dup} + \text{parent})]$ . Les résultats des échantillons blancs sont indiqués en valeurs relatives  $10 (\text{valeur}/\text{LDR})$ , où LDR signifie Limite de Détection Rapportée. Les valeurs ont été multipliées par 10 à des fins de représentation. Enfin, la variable « moyenne sur LDR » correspond simplement à la valeur moyenne obtenue pour les 30 échantillons divisés par la LDR. Ceci permet de déterminer si des problèmes de précision peuvent être causés par des valeurs proches de la limite de détection, où la résolution est normalement plus faible, plutôt que par des problèmes de manipulation.





**2016-05\_Echantillons\_ANNEXE.pdf : ensemble des données relatives aux échantillons**

- Caractéristiques des forages (coordonnées, inclinaison, azimut, etc.)
- Caractéristiques des échantillons (groupe, distance au SM, profondeur, etc.)
- Résultats des analyses
- Commentaires de terrain
- Divers commentaires

E_UTM83z18	N_UTM83z18	Elevation_c ollet	Azimuth	Inclinai on	Prof_trou	Prof_tubage	Long_ Casing	Charge_hydraul ique	Prof_mesure_t	Prof_ech_ DEMAND	Prof_ech _REEL
273753.523	5516735.684	279.209	200.84	-45.33	78	31.3	0.5	276.7914888	3.4	33	33
273651.750	5516794.281	279.385	195.541	-64.89	63	24.6	0.4	276.8321923	2.82	42	42
273704.657	5516799.352	279.148	196.823	-58.43	102	33.7	0.25	277.2954864	2.175	59.4	59.4
273774.922	5516819.089	279.349	197.675	-49.51	159	35.5	0.35	276.9653306	3.135	98	98
273716.915	5516842.527	279.272	197.21	-57.43	162	18.7	0.15	276.8288639	2.9	142	142
273871.413	5516923.919	280.110	200	-75	401.73	28.65	0.4	277.2899987	2.92	360	360
273726.284	5516751.794	278.950	30	-60	111	19	0.4	277.0886163	2.15	23.7	23.7
273628.194	5516809.338	279.113	202.086	-54.41	66	18	0.25	276.8127639	2.83	40.5	40.5
273782.998	5516716.445	278.937	191.362	-55.49	60	33.8	0.35	276.8359399	2.55	44.5	44.5
273688.149	5516854.388	279.507	194.546	-56.42	144	17.5	0.175	276.8419179	3.2	76	76
273592.29	5516933.47	281.503	202	-70	294.44	32.31	NC	278.961705	2.705	72	72
273688.149	5516854.388	279.507	194.546	-56.42	144	17.5	0.175	276.8294254	3.215	136	136
273629.678	5517015.820	279.309	202	-75	611.43	20.42	0.3	277.3867498	1.99	208	208
273927.057	5516899.209	279.490	200	-75	426.11	43.28	0.65	276.4092452	3.19	350	350
273893.905	5516972.974	280.568	200	-75	477.93	29.25	0.4	277.4003273	3.28	451	360
274064.148	5517017.747	280.813	199.9	-69.7	778	34.5	0.35	277.8124406	3.2	537	537
272213	5517762	271.253	210	-60	508	30	0.5	268.4998837	3.18	72	72
274863.43	5516412.02	271.253	180	-50	830.9	22.1	0.05	269.0476112	2.88	105	105
272680	5518280	271.253	230	-52	327.5	45	0.4	269.0946269	2.74	122	122
274485.024	5516427.932	279.604	210	-50	500.75	61.75	0.45	277.1459104	3.21	140	140
273436.235	5515589.899	278.112	257.4	-56.9	516	30.75	0.3	274.7454764	4.02	130	130
273206.793	5517034.423	276.939	202	-84	238	20.5	0.4	275.8127922	1.1325	160	160
279550.17	5517944.63		25	-64	502		0.1		-0.2		0
276422.931	5517104.562	277.866	228.5	-50	394.5	78	0.1	277.5826688	0.37	90	90
273753.523	5516735.684	279.209	200.84	-45.33	78	31.3	0.5	276.8199242	3.36	33	38
273628.194	5516809.338	279.113	202.086	-54.41	66	18	0.25	276.9062499	2.715	40.5	40.5
273704.657	5516799.352	279.148	196.823	-58.43	102	33.7	0.25	276.8185174	2.735	59.4	44
273651.750	5516794.281	279.385	195.541	-64.89	63	24.6	0.4	276.8050348	2.85	42	42
273629.678	5517015.820	279.309	202	-75	611.43	20.42	0.3	277.381921	1.995	208	44
273688.149	5516854.388	279.507	194.546	-56.42	144	17.5	0.175	276.6545294	3.425	76	76

<b>ProfREEL_vert</b>	<b>pH</b>	<b>Eh_mV</b>	<b>O2 (ppm)</b>	<b>Cond. (microS/cm)</b>	<b>Anthropique</b>	<b>Commentaires terrain 1</b>
<b>23.46853321</b>	7.22	-171	0	117	Graisse ++	Eau bleutée
<b>38.03077944</b>	7.28	-302	0.17	192	Hydrocarbures	NO
<b>50.60886984</b>	6.12	-95.5	0.52	279	Hydrocarbures	NO
<b>74.5308918</b>	8.01	-172	0.3	436	Hydrocarbures	Eau bleutée
<b>119.6682821</b>	7.06	-73.8	0.35	414	NO	Eau jaunâtre
<b>347.7332975</b>	7.61	-127.4	0.36	449	Graisse +++	Eau claire
<b>20.52480207</b>	5.92	-44.2	0.24	163	Graisse +++	Eau jaunâtre
<b>32.93469511</b>	8.55	-232.5	NC	219	NO	Eau bleutée
<b>36.66921572</b>	6.8	-110	0.19	363	NO	Eau jaunâtre
<b>63.31669136</b>	7.69	-137.4	0.75	448	NO	NO
<b>67.6578687</b>	8.03	-113	1.16	453	NO	Eau claire
<b>113.303553</b>	7.88	-158.8	0.39	473	NO	Eau claire
<b>200.9125719</b>	7.12	-4.7	0	762	Graisse + / Hydrocarbures	Eau claire
<b>338.0740392</b>	7.55	-155.9	0.11	444	Graisse +	Eau brune
<b>347.7332975</b>	7.57	-130	0.28	450	Graisse++	Eau claire
<b>503.6463579</b>	7.04	-98.4	0.59	558	NO	Eau claire
<b>62.35382907</b>	7.57	-130	0.81	423	Graisse +	Eau bleutée
<b>80.43466653</b>	6.23	-35.1	0	57	NO	NO
<b>96.13731194</b>	7.79	-56	0.6	453	NO	NO
<b>107.246222</b>	8.53	13.8	2.01	88	Graisse ++	NO
<b>108.9034332</b>	7.42	-101	0.17	374	Graisse +	Eau jaunâtre
<b>159.1235033</b>	7.49	-116	0.2	449	NO	NO
<b>0</b>	7.98	-67.9	0	450	Graisse ++	Eau claire
<b>68.94399988</b>	6.54	-162.5	0	353	Graisse ++	Eau noire
<b>27.02437158</b>	7.87	-182.6	0	319	Graisse ++ / Hydrocarbures	Eau noire
<b>32.93469511</b>	7.78	-158.8	0	408	NO	Eau claire
<b>37.48805173</b>	7.57	-171.7	0	318	Hydrocarbures	Eau jaunâtre
<b>38.03077944</b>	7.44	-159.7	0	194	Hydrocarbures	Eau claire
<b>42.50073636</b>	7.65	-143.9	0	469	Graisse + / Hydrocarbures	Eau blanchâtre
<b>63.31669136</b>	7.87	-176.2	0	470	NO	Eau claire

Commentaires terrain 2		Sb_ug/L	Ag_ug/L	As_ug/L	Ba_ug/L	Be_ug/L	Bi_ug/L	B_ug/L	Cd_ug/L	Ca_ug/L
Très chargé en particules > 45 microns		0.34	0.18	0.99	110	0.76	0.02	56	0.092	15000
		0.13	0.003	0.45	42	0.08	-0.0090	55	-0.0060	33000
		0.33	0.007	11	69	0.12	-0.0090	29	-0.0060	44000
		0.15	-0.0030	0.61	150	0.02	-0.0090	53	-0.0060	57000
		0.093	-0.0030	11	63	-0.0100	-0.0090	53	-0.0060	63000
		0.78	-0.0030	18	490	-0.0100	-0.0090	110	-0.0060	67000
Odeur de soufre		36	0.023	0.72	46	-0.1000	-0.0090	3400	0.06	23000
		0.15	-0.0030	5.9	33	-0.0100	-0.0090	37	0.008	48000
		0.13	-0.0030	3.7	67	0.02	-0.0090	50	-0.0060	50000
		0.16	-0.0030	3.4	33	-0.0100	-0.0090	53	-0.0060	53000
		0.026	-0.0030	4.6	380	-0.0100	-0.0090	44	-0.0060	65000
		0.097	-0.0030	8	69	0.05	-0.0090	53	0.011	79000
Forte variabilité des paramètres in situ		0.02	-0.0030	5.7	710	-0.0100	-0.0090	63	0.007	85000
		0.044	-0.0030	8.1	2100	-0.0100	-0.0090	31	-0.0060	51000
		0.14	-0.0030	14	380	-0.0100	-0.0090	120	-0.0060	78000
		0.035	-0.0030	6.7	300	-0.0100	-0.0090	35	-0.0060	77000
		0.033	-0.0030	0.81	830	-0.0100	-0.0090	35	-0.0060	53000
		0.11	0.28	2.9	140	-0.0100	-0.0090	6	0.05	3200
		0.46	0.007	8.2	290	-0.0100	-0.0090	96	-0.0060	55000
		0.075	0.004	1.5	1000	-0.0100	-0.0090	100	-0.0060	24000
Odeur de soufre		0.04	-0.0030	0.44	450	-0.0100	-0.0090	63	-0.0060	57000
		0.047	-0.0030	1.4	130	-0.0100	-0.0090	49	-0.0060	69000
Forage résurgent		0.014	-0.0030	2.3	6.4	-0.0100	-0.0090	26	-0.0060	86000
Très chargé en particules > 45 microns		0.06	0.007	0.71	24	-0.0100	-0.0090	43	-0.0060	57000
		0.058	0.005	1.5	56	0.06	-0.0090	36	-0.0060	57000
		0.054	-0.0030	8.6	44	-0.0100	-0.0090	36	0.081	63000
Odeur faible de soufre		0.13	0.18	3.7	53	0.04	0.032	45	-0.0060	57000
		0.057	0.003	1.2	51	0.16	-0.0090	26	-0.0060	58000
Odeur de soufre		0.064	-0.0030	2.9	110	-0.0100	-0.0090	67	-0.0060	80000
		0.021	0.004	8.1	45	-0.0100	-0.0090	59	-0.0060	74000

Cr_ug/L	Co_ug/L	Cu_ug/L	Sn_ug/L	Fe_ug/L	Li_ug/L	Mg_ug/L	Mn_ug/L	Hg_ug/L	Mo_ug/L	Ni_ug/L	Pb_ug/L	K_ug/L	Se_ug/L
1.2	2.2	28	1.1	70000	3.1	2600	450	0.052	6	2.1	2.8	1400	0.11
0.24	0.2	0.61	0.08	4600	2.6	6000	250	0.002	3.8	1.4	0.55	1400	0.07
0.31	0.54	0.47	0.12	7700	3.2	9300	260	-0.0020	2.9	3.8	0.32	2400	-0.0500
0.1	0.18	0.08	-0.0500	1800	2.9	15000	220	0.011	5.5	0.84	0.014	2400	-0.0500
0.1	0.59	0.29	0.16	930	2.4	15000	170	0.007	4.7	3.8	0.033	4000	-0.0500
0.11	0.57	0.11	-0.0500	1500	3	17000	230	-0.0020	1.8	0.98	0.025	2700	-0.0500
1.1	1.7	3.4	0.32	14000	550	2400	300	0.003	1.3	1.5	0.98	630	0.1
0.07	0.32	0.15	-0.0500	1900	2.4	9300	320	0.003	7.4	1.5	0.9	3100	-0.0500
0.09	0.71	0.87	0.07	2800	3.2	11000	250	0.005	8.3	1.5	0.43	3500	-0.0500
0.1	0.47	0.65	-0.0500	40	3.6	12000	38	0.004	5.5	1.8	-0.0060	4200	-0.0500
0.15	0.7	0.55	0.06	600	5.9	13000	150	0.005	4.8	1.7	0.023	6100	-0.0500
0.13	0.68	0.38	0.06	2000	3.1	15000	210	-0.0020	5.3	2.1	0.092	4300	-0.0500
0.17	0.9	0.18	0.06	1200	7.6	18000	240	0.06	6.5	0.92	0.11	5200	-0.0500
0.15	0.23	0.16	-0.0500	2500	3.6	13000	440	0.036	4.1	1.1	0.029	2600	-0.0500
0.17	0.16	0.16	-0.0500	600	4.7	18000	210	0.005	2.3	0.91	0.055	3700	-0.0500
0.17	0.15	0.2	-0.0500	3700	4	21000	390	0.02	7.2	0.69	0.29	3900	-0.0500
0.05	0.18	0.05	-0.0500	620	2.1	13000	490	0.008	12	0.55	0.039	3400	-0.0500
0.9	0.69	8.7	0.15	11000	0.4	400	390	0.002	0.68	3.6	11	780	-0.0500
0.09	0.39	0.37	0.06	500	2.6	12000	120	-0.0020	4.4	1.5	0.09	2200	-0.0500
0.18	0.1	0.38	-0.0500	50	4.6	11000	85	0.043	6.1	0.95	0.019	3600	-0.0500
0.22	0.14	0.09	-0.0500	270	3.2	21000	83	0.037	1.4	0.52	0.025	1400	-0.0500
0.05	0.16	0.11	-0.0500	1500	3.5	17000	320	0.026	4.5	0.66	0.052	1500	-0.0500
0.05	0.49	0.07	-0.0500	270	1.5	22000	1800	-0.0020	2.9	1.4	0.008	3300	-0.0500
0.47	0.44	0.61	-0.0500	5300	1.5	14000	660	0.005	4.6	1.6	0.35	2800	-0.0500
0.23	0.38	0.23	-0.0500	3100	3.2	11000	230	0.016	2.7	0.72	0.031	3400	-0.0500
0.11	0.4	0.33	0.06	1100	2.7	12000	310	0.002	4.9	0.54	6.9	4200	-0.0500
0.33	0.82	4.8	0.17	3600	3	13000	190	0.04	3.7	0.83	1.6	2200	-0.0500
0.61	0.11	0.3	0.06	4100	3.5	11000	280	0.004	0.86	0.55	0.23	2100	0.08
0.22	1	0.25	0.27	430	5	16000	210	0.057	6.3	1.7	0.026	5800	-0.0500
0.31	0.49	0.12	-0.0500	1300	3.4	15000	190	0.005	4.1	0.67	0.017	4000	-0.0500

Na_ug/L	Sr_ug/L	Te_ug/L	Tl_ug/L	Th_ug/L	Ti_ug/L	W_ug/L	U_ug/L	V_ug/L	Zn_ug/L	Zr_ug/L	Si_ug/L	F-_mg/L	Br-_mg/L
5100	76	0.12	-0.0100	0.061	8.7	17	0.26	1.2	3200	1.9	6700	0.02	-0.5
6500	160	-0.0050	-0.0100	0.014	1.2	0.75	0.15	0.67	180	1.7	3800	0.05	-0.5
9900	240	0.013	-0.0100	0.016	1.4	0.47	0.11	1.6	62	2.1	7300	0.08	-0.5
29000	370	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	3.7	0.19	0.07	71	0.07	6700	0.16	-0.5
37000	370	0.021	-0.0100	0.002	0.7	2.4	0.31	0.18	17	0.09	9200	0.15	-0.5
25000	420	-0.0050	-0.0100	0.002	-0.4000	0.4	0.18	0.09	1400	0.06	8200	0.14	-0.5
850	37	0.038	-0.0100	0.045	4.4	0.95	0.046	0.41	150	0.35	1200	0.05	-0.5
24000	280	-0.0050	-0.0100	0.002	-0.4000	0.86	0.12	0.05	93	0.04	4900.0000	0.14	-0.5
30000	180	0.009	-0.0100	0.002	0.6	1.8	0.64	0.08	63	0.17	5200	0.1	-0.5
41000	420	-0.0050	-0.0100	0.003	-0.4000	1.4	0.11	0.09	2.3	0.65	9800	0.17	-0.5
50000	540	0.037	-0.0100	0.003	0.7	1.7	0.02	0.1	12	0.1	9000	0.18	-0.5
38000	520	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	1	0.19	0.12	88	0.12	10000	0.17	-0.5
42000	780	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	19	0.013	0.14	50	0.1	10000	0.19	-0.5
24000	320	-0.0050	-0.0100	0.001	-0.4000	12	0.096	0.11	220	0.16	5200	0.11	-0.5
27000	590	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	1.9	0.14	0.2	1300	0.26	9100	0.13	-0.5
20000	550	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	6.7	0.031	0.08	150	0.05	7900	0.18	-0.5
29000	210	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	2.7	5.3	0.04	4.4	0.05	4400	0.08	-0.5
1000	19	-0.0050	-0.0100	0.008	2.9	0.59	0.003	0.38	180	0.09	910.0000	-0.01	-0.5
29000	420	-0.0050	-0.0100	0.001	0.5	0.68	1.2	0.19	100	0.1	5300	0.11	-0.5
37000	180	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	14	0.21	0.04	1.6	-0.0400	2000	0.13	-0.5
15000	990	0.008	-0.0100	-0.0010	0.5	12	0.011	0.12	5.7	0.06	5600	0.08	-0.5
19000	300	-0.0050	-0.0100	-0.0010	-0.4000	9.2	0.88	0.08	16	0.25	6400	0.12	-0.5
24000	390	-0.0050	-0.0100	-0.0010	0.6	0.36	0.041	0.07	0.6	0.16	9300	0.11	-0.5
20000	230	0.022	-0.0100	0.003	0.8	1.6	0.42	0.12	4.2	0.05	8000	0.1	-0.5
25000	340	0.016	-0.0100	0.014	1.8	5.1	0.16	0.48	7	1.2	7900	0.15	-0.5
33000	340	-0.0050	-0.0100	0.001	-0.4000	1	0.39	0.09	23	0.13	6600	0.17	-0.5
21000	310	0.43	-0.0100	0.005	1	12	0.24	1.4	15	1.1	6900	0.11	-0.5
12000	300	-0.0050	-0.0100	0.023	1.9	1.4	0.31	2.2	29	4	7200	0.11	-0.5
53000	680	-0.0050	-0.0100	0.001	1.1	18	0.011	0.17	2.9	0.12	12000	0.2	-0.5
40000	470	-0.0050	-0.0100	0.001	-0.4000	1.8	0.17	0.18	6.2	0.3	11000	0.18	-0.5

Cl-_mg/L	NO2-_NO3-_mg/L	SO42-_mg/L		Commentaire_arpen- tage	Validation GM Casing
0.5	-0.1	6		Arpenté - OK	
-0.3	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.3	-0.1	7		Pas recherché	Casing en place
1.2	-0.1	-3		Arpenté - OK	
2.5	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
6.7	-0.1	-3		Arpenté - OK	
-0.3	-0.1	6		Pas recherché	Casing en place
1.1	-0.1	4		Arpenté - OK	
0.5	-0.1	-3		Arpenté - OK	
1.1	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
1.2	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.9	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
0.4	-0.1	-3		Arpenté - OK	
1.2	-0.1	4		Arpenté - OK	
10	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.8	-0.1	-3		Arpenté - OK	
14	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
-0.3	-0.1	-3		Arpenté - OK	
6.5	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
4	-0.1	-3		Arpenté - OK	
3	-0.1	20		Pas recherché	Casing en place
1.6	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.6	-0.1	-3			
1.1	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
0.6	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.6	-0.1	5		Arpenté - OK	
1.1	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place
-0.3	-0.1	-3		Arpenté - OK	
0.4	-0.1	-3		Arpenté - OK	
1.3	-0.1	-3		Pas recherché	Casing en place

Roche
SM
SM
SM; Pipe alteration
SM; andésite
SM; SSM
SM
Dacite
Andésite
Basalte; pipe
Pipe altération (pics de Zn-Cu-Pb); andésite
Dacite ; tuff intermediaire à lapillis
Pipe altération (pics de Zn-Cu-Pb) ; basalte
Tuffite
Tuffite
SM; rhyolite
Gabbro; andésite
Rhyolite ; altérations ; pas la même formation que encaissante gîte
Tuffite ; tuffite clé 70 m en dessous
Andésite
Gabbro
Rhyolite
Rhyolite ; altération siliceuse et chloriteuse relevée en carotte
Andésite (meme litho et même formation que hôte gîte)
SM
Andésite
SM; pipe alteration
SM
Tuffite
Pipe altération (pics de Zn-Cu-Pb) ; andésite



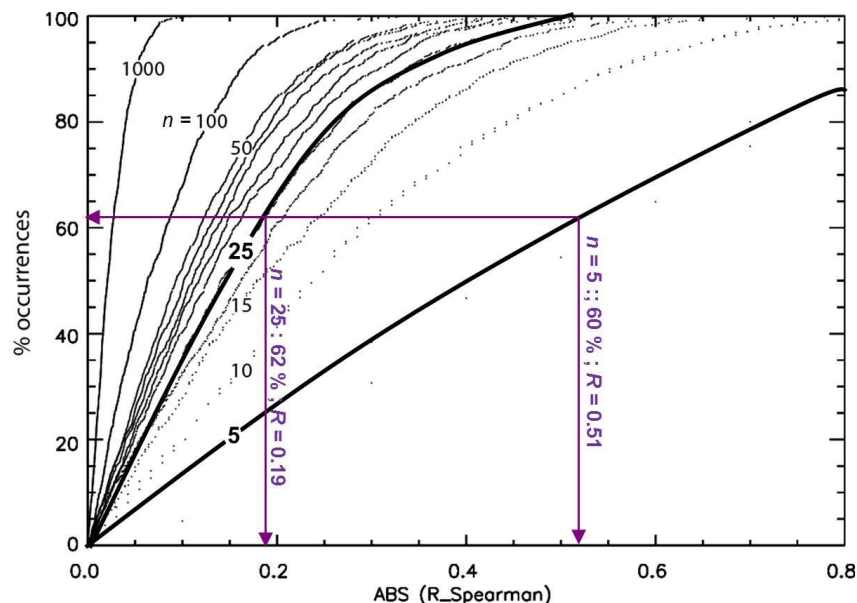


Televiewer	Commentaire2
Oui	
Oui	
Oui	
Oui	
Oui	
Non	
Oui	
Oui	
Oui	
Oui	
Oui	Meme trou que #11
Non	
Oui	Meme trou que #21
Non	
Non	
Non	
Non	
Non	
Non	
Non	
Non	
Non	Profondeur modifiable (plus profond est mieux, mais besoin pH etc... donc voir avec technique)
Non	Profondeur modifiable (plus profond est mieux, mais besoin pH etc... donc voir avec technique)
Non	
Non	
Non	
Oui	
Oui	
Oui	
Oui	
Non	
Oui	

### 13 ANNEXE 5 : TESTS DE SIGNIFICATIVITE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION POUR POPULATIONS RESTREINTES

La valeur d'un coefficient de corrélation  $R$  entre deux variables dépend de deux paramètres : 1) la « force » de la corrélation réelle entre les deux variables, et 2) la représentativité des deux populations de données. Un nombre restreint de données est évidemment moins représentatif du comportement réel de la variable, ce qui devrait avoir pour effet de diminuer le coefficient de corrélation entre deux variables corrélées. La significativité d'un coefficient de corrélation est donc fonction de la représentativité des deux jeux de données. Afin d'investiguer cette significativité en fonction du nombre de données décrivant les variables, les valeurs de  $R$  ont été calculées (méthode Spearman) entre deux variables aléatoires uniformes représentées par  $n$  données. Pour chaque valeur de  $n$ , l'opération est répétée 1000 fois, autrement dit 1000 couples de variables contenant  $n$  valeurs sont générés, de sorte que l'on a un ensemble de 1000 valeurs de  $R$  pour chaque valeur de  $n$ . Ces résultats sont projetés sur le diagramme binaire ci-dessous avec, en abscisse les valeurs de  $R$ , en ordonnée la proportion, dans la population de 1000 valeurs générées, de valeurs inférieures à  $R$ .

De façon assez attendue, plus le nombre d'échantillons  $n$  est grand, plus les valeurs de  $R$  obtenues sont faibles puisqu'il s'agit de deux variables aléatoires et qu'elles ont par conséquent rigoureusement une corrélation nulle. Ce diagramme montre que, lorsque les variables sont représentées par 5 et par 25 échantillons, ce qui est le cas des groupes de données « protocole pompage » et « protocole *bailer* », les valeurs de  $R$  calculées entre des variables aléatoires sont inférieures à 0,51 et 0,19, respectivement, dans approximativement 60 % des cas (environ 620 occurrences). Ces valeurs ont été retenues dans cette étude, à titre indicatif, comme seuils de significativité de  $R$  pour les variables traitées. Il s'agit toutefois d'une approche informelle et « de première approximation » puisque de tels seuils devraient diminuer avec la « force » de la corrélation réelle entre les deux variables, paramètre qui n'est pas pris en considération dans le présent calcul.



ID_ech_terrain	ID Maxxam	Groupe	Protocole_ech	Disposition/SM
PD1-10-22BA	CV3959	1a	passif_bailer	Dans le SM
PD1-10-38BA	CV3942	1a	passif_bailer	Dans le SM
PD1-10-35BA	CV3957	1a	passif_bailer	Dans le SM
PD1-10-33BA	CV3939	1a	passif_bailer	Dans le SM
PD1-10-31BA	CV3956	1b	passif_bailer	Dans le SM
121G-25BA	CV3951	1b	passif_bailer	Dans le SM
PD1-10-18BA	CV3958	2a	passif_bailer	20 m en amont vers NE; toit du SM
PD1-10-42BA	CV3937	2a	passif_bailer	moins de 20 m au NW (aval ?)
PD1-10-41BA	CV3960	2a	passif_bailer	20 m S (amont?)
PD1-10-30BA_76	CV3940	2a	passif_bailer	env. 50 m au toit du SM vers N
PD1-84-02BA	CV3955	2a	passif_bailer	150 NW (aval?)
PD1-10-30BA_136	CV3953	2b	passif_bailer	20 m NW (aval ?)
PD1-84-03BA	CV3954	2b	passif_bailer	200 m NNW (aval ?)
121G-33BA	CV3952	2b	passif_bailer	Tres proximal (10 m)
121G-43BA	CV3950	2b	passif_bailer	200 m de lentille principale au SE (amont?) ; SM sur 3m à 447m
PD1-12-44BA	CV3949	2b	passif_bailer	Tres proximal (50 m sous le SM)
PD1-12-45BA	CV3948	3a	passif_bailer	1.8 km NW
PD1-91-07BA	CV3941	3b	passif_bailer	1.3 km SE (amont hydraulique ?)
PD1-09-17BA	CV3946	3b	passif_bailer	1.8 km NW
PD1-07-14BA	CV3962	3b	passif_bailer	900 m SE (amont hydraulique ?)
PD1-11-43BA	CV3961	3b	passif_bailer	1.2 km SSW (amont hydraulique ?)
PD1-07-13BA	CV3947	3b	passif_bailer	600 m NW (aval ?)
RA-07-04BA	CV3967	4	passif_bailer	6km ENE
SCB-01-99BA	CV3966	4	passif_bailer	3 km E
PD1-10-22PUM	CV3965	5	purge_pomp	Dans le SM
PD1-10-42PUM	CV3943	5	purge_pomp	moins de 20 au NW du SM (aval ?)
PD1-10-35PUM	CV3964	5	purge_pomp	Dans le SM
PD1-10-38PUM	CV3944	5	purge_pomp	Dans le SM
PD1-84-03PUM	CV3963	5	purge_pomp	200 m NNW (aval ?)
PD1-10-30PUM	CV3945	5	purge_pomp	env. 50 m au toit du SM vers N