



Silvain Rafini
Chercheur, CONSOREM

Notre mission: contribuer au succès de l'exploration minière

Silvain Rafini PhD, Géo, Prof. associé UQAC

RÉSUMÉ

Ce projet visait à évaluer la méthode MMIMC pour l'exploration minière au Québec. En particulier, il est question 1) de renseigner la validité au Québec des postulats fondamentaux relatifs à cette méthode ; 2) de vérifier quantitativement la nature réellement exogène, théoriquement annoncée, du signal MMIMC. L'analyse de données du domaine public fait apparaître un fort contrôle des teneurs MMIMC par les métaux primaires contenus dans le sol (background métallique associé à la fraction phyllosilicatée, exprimé par le signal aqua-regia). Par ailleurs, les changements locaux de conditions physico-chimiques du sol produisent d'importantes remobilisations métalliques in-situ, conduisant à la formation d'anomalies dites indirectes qui pourraient être interprétées à tort comme des anomalies directes (c.a.d., émanations ioniques diffusées directement depuis une minéralisation enfouie). Ces résultats remettent en question la nature directe des anomalies MMIMC, ainsi que leur caractère exogène. Ils démontrent la nécessité d'effectuer plusieurs corrections sur les valeurs brutes afin d'écartier les fausses anomalies produites par des facteurs externes : sols riches en phyllosilicates, présence de carbonates, changements de pH.

Présentation de la méthode MMI

La MMI est une méthode géochimique propriétaire initialement introduite en Australie par le géochimiste A. W. Mann (Mann et al., 1995). Elle diffère de la plupart des SWE en ce qu'elle cible exclusivement les ions métalliques de la phase fluide faiblement fixés - adsorbés - sur les grains du sol (fig. 1), localement sans que ces derniers ne soient dissous. Il s'agit d'un procédé extractif et non digestif, au cours duquel les ions métalliques en adsorption sont captés par des ligands introduits en solution, avec lesquels ils créent des liaisons suffisamment fortes pour ne pas être re-fixés et pour rester dans la solution. La nature chimique des ligands n'est pas divulguée, elle demeure la propriété des laboratoires.

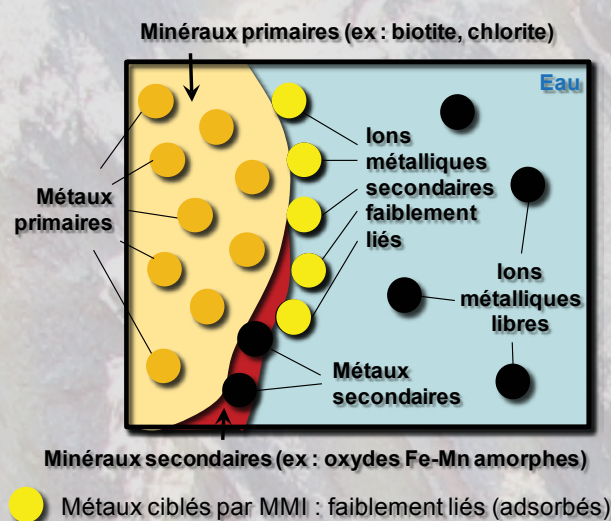


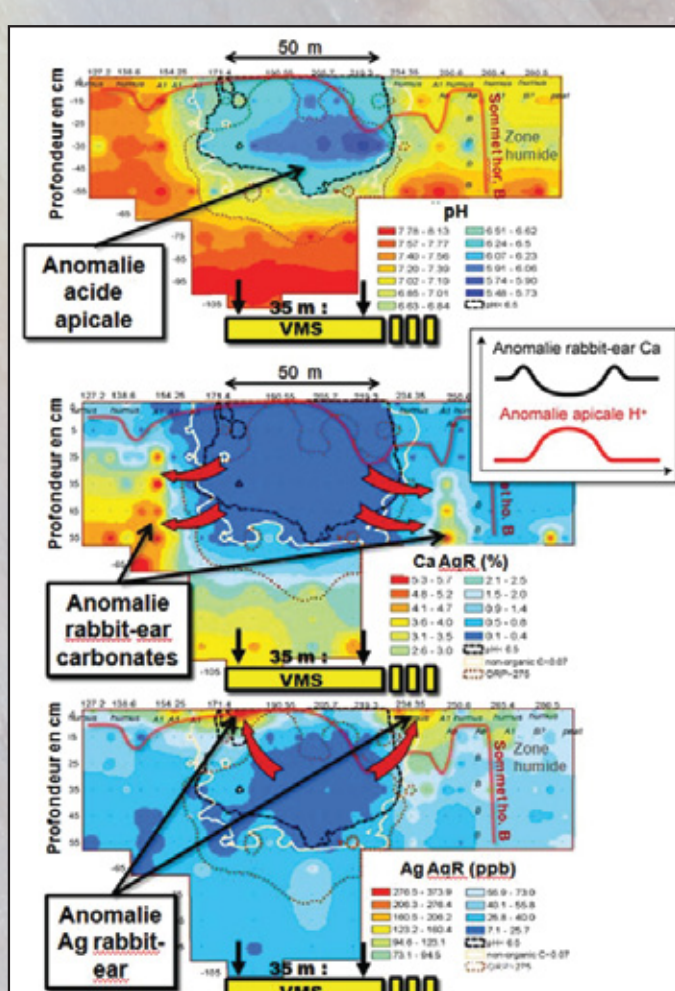
Figure 1 : distribution des métaux primaires (i.e., endogènes) et secondaires dans le sol.

Anomalies pH et anomalies indirectes

Les anomalies pH se forment à l'aplomb des gisements sulfurés suite à la diffusion sub-verticale des ions H⁺ générés en excès par l'oxydation de gisements ou contact des écoulements souterrains. Un exemple frappant d'anomalie pH-Eh-résistivité est offert par le VMS Zn-Pb de Cross Lake (fig. 4). Les résultats interpolés de relevés verticaux effectués dans le sol (projet CAMIRO 99E01) montrent en effet une spectaculaire anomalie acide oxydante directement à l'aplomb du gisement.

La mobilité des éléments étant conditionnée par le couple pH-Eh, ces anomalies ont des répercussions considérables sur la répartition in-situ des éléments chimiques du sol. La figure 4 montre deux exemples, pour Ca et Ag, de redistributions locales causées par les changements pH-Eh. L'appauvrissement (dissolution) dans la zone acide oxydante s'accompagne d'anomalies positives (précipitation) à la périphérie de celle-ci, à géométrie Rabbit-Ear. L'anomalie en Ag obtenue ici est donc de nature indirecte (remobilisation in-situ) et ne devrait pas être interprétée comme l'expression d'une minéralisation sous-jacente en Ag. Ce cas illustre la nécessité de déterminer la nature directe (émanation de minéralisation enfouie) ou indirecte des anomalies métalliques mesurées dans les sols.

Figure 4 : profil de pH, Ca et Ag (aqua regia) dans le sol à l'aplomb du VMS de Cross Lake (Ont.). Exagération verticale de l'ordre de x100. La bande jaune indique l'emplacement du VMS sous 35 m de sédiments glacio-lacustres. Le trait rouge montre le sommet de l'horizon B. Modifié de CAMIRO 99E01.



Théorie associée à la méthode : le transport par migration ionique

Les anomalies détectées par MMI se forment théoriquement directement à l'aplomb des gisements enfouis. Elles sont marquées par une géométrie abrupte, à fort contraste avec le bruit de fond, et ne montent pas d'étalement ni de dispersion latérale à la différence des anomalies classiques (fig. 2). Ce type d'anomalies résultent d'une migration sub-verticale des ions métalliques depuis la source enfouie (gisement) jusqu'aux sols (fig. 2). Les mécanismes potentiellement impliqués dans cette migration ionique, synthétisés par Aspodiar et al (2008), demeurent mal connus. Le plus communément retenue est la diffusion électrochimique, qui implique le mouvement de particules chargées au sein d'un champ électrique induit par l'oxydation d'un gisement sulfuré au contact des écoulements.

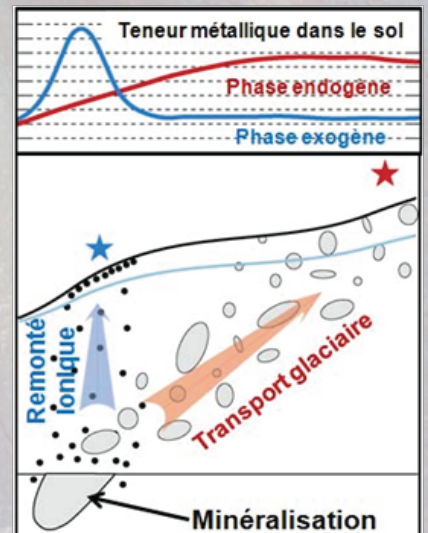


Figure 2 : géométrie des anomalies retrouvées en surface (sol et till) en fonction des mécanismes de transport glaciaire (clastique signal endogène) ou par remontée ionique (hydromorphisme signal exogène)

Données utilisées

La base de données utilisée a été réalisée par Fedikow (2006). Elle consiste en 814 échantillons (8 traverses : fig. 5) pris dans l'intervalle 10-25cm sous le sommet du niveau A, c.a.d. sous le niveau organique humus. Les échantillons sont analysés par aqua regia (AqR) et par MMI, ce qui permet une analyse rigoureuse des corrélations entre les valeurs métalliques MMI et les métaux primaires du sol (AqR). La nature primaire du signal métallique AqR est confirmée ici par l'excellente corrélation obtenue entre les premiers AqR (Zn, Cu, Ni, Pb, Co) et la composante phyllosilicatée du sol : les métaux contenus dans la biotite et la chlorite constituent l'essentiel du signal AqR. Il s'agit donc d'un signal à large dominance de métaux primaires.

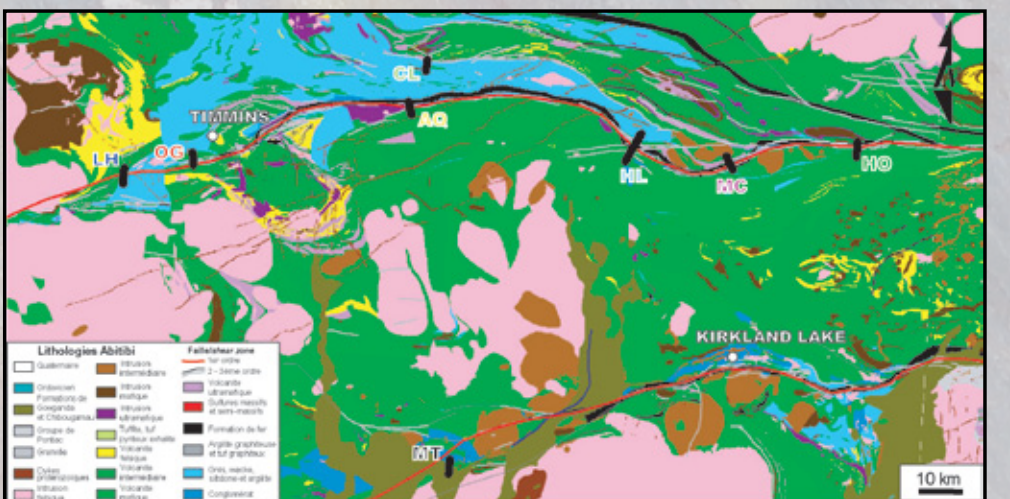


Figure 5 : carte de localisation des traverses (trait épais noir), labélisées par deux lettres.

Application de la méthode au Québec

Au Québec, la jeune couverture de sédiments glaciaires impose une diffusion ionique à deux vitesses (fig. 3) : 1) à travers le socle sur une très longue période de temps ; 2) à travers la couverture sur une période de temps comparativement extrêmement courte (de l'ordre de 8000 ans). Étant donnée la nature caractéristique de la diffusion ionique, il est nécessaire de se poser des questions sur la possibilité d'accumuler dans le sol de concentrations métalliques détectables depuis la dernière déglaciation. Le cas échéant, quelles sont les épaisseurs critiques de couverture glaciaire ? Le problème a été à plusieurs reprises mentionné dans la littérature d'un point de vue conceptuel (Cameron et al. 2004 ; Salicrú et Cohen, 2004 ; Mann et al. 2005), plus sporadiquement sur le plan quantitatif (Smees, 2003 ; Hamilton, 2004). Une controverse active est en cours sur ce sujet : les épaisseurs critiques proposées pour les métaux de base sont généralement inférieures à 5 mètres. Aucune donnée n'existe pour Au, Ag, toutefois il est vraisemblable que ces éléments soient encore moins rapides que les métaux de base. La formation par diffusion ionique d'anomalies métalliques directes depuis un gisement situé sous plus de 5 mètres de sédiments glacio-lacustres est donc théoriquement peu probable. Le seul consensus existant porte sur H⁺ (coefficient de diffusion 30x supérieur aux métaux de base) formant des anomalies de pH dans les sols à l'aplomb des gisements.

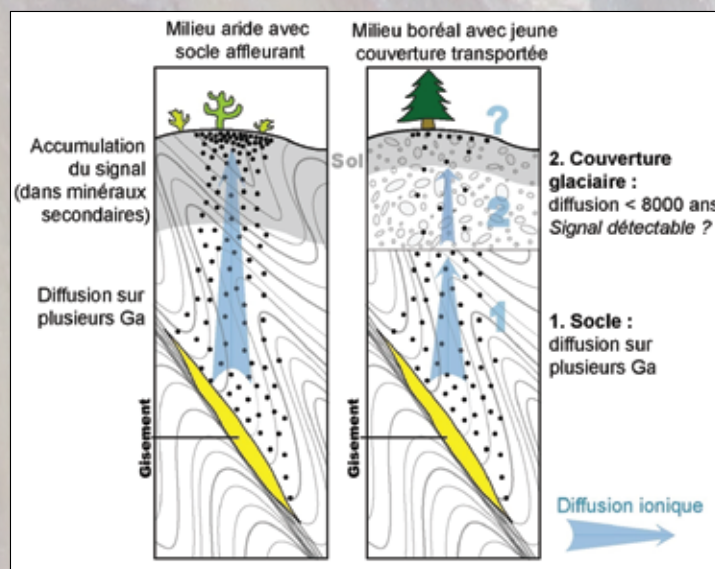


Figure 3 : illustration du problème de la diffusion ionique à travers une couverture transportée. Les conditions schématisées à gauche correspondent au contexte australien, à droite le contexte canadien.

Comparaison entre les profils de teneurs Aqua Regia et MMI : profils

Puisque l'origine endogène des métaux de base AqR est démontrée, il convient d'investiguer l'impact de ce signal endogène sur les teneurs MMI et donc de confirmer ou infirmer la nature purement exogène de ce signal. Les profils sont comparés à des concentrations très claires et bien marquées, particulièrement évidentes pour Cu et Ni (Figure 6). La corrélation AqR-MMI ressort d'une manière moins systématique pour Zn, qui semble être contrôlé par un tiers facteur indépendant de la composition métallique endogène du sol. Ces observations indiquent que les métaux primaires exercent un contrôle très significatif sur les valeurs mesurées par MMI, ou moins pour Cu et Ni. Ce contrôle peut s'exercer soit par une mise en solution in-situ des métaux endogènes dans la phase aqueuse du sol, autrement dit un équilibre métallique entre les phases liquide et solide du sol (échanges eau-roche), soit par la digestion partielle de certains minéraux lors de l'extraction et la libération consécutive de métaux non-exogènes. Rappelons que ce dernier aspect demeure très peu

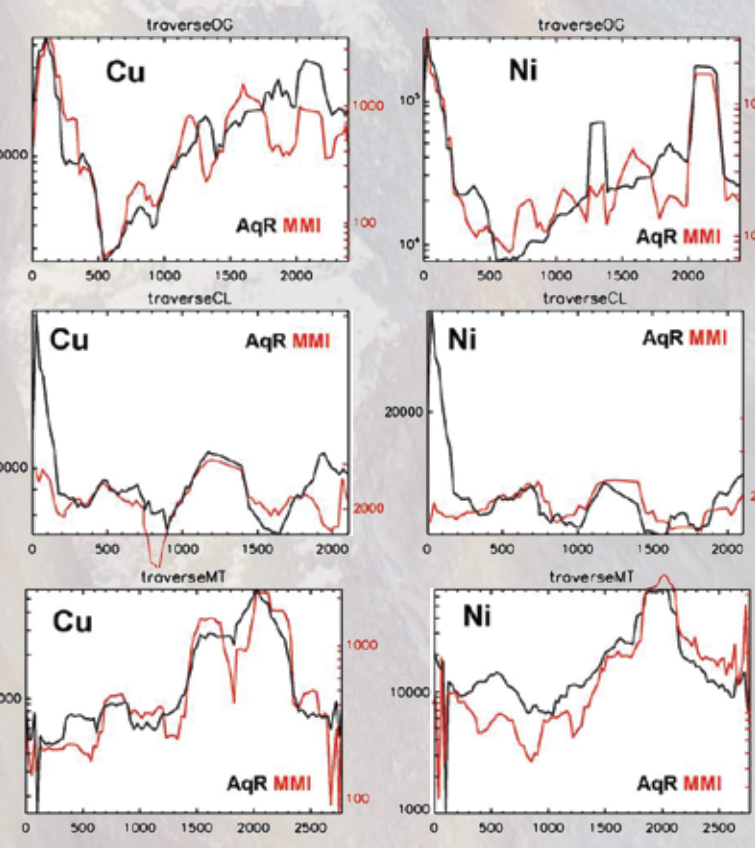


Fig. 6 : superposition des profils aqua-regia et MMIMC le long de trois traverses situées dans la région de Timmins (données OGS).

Comparaison entre les profils de teneurs Aqua Regia et MMI : Analyse en composantes principales

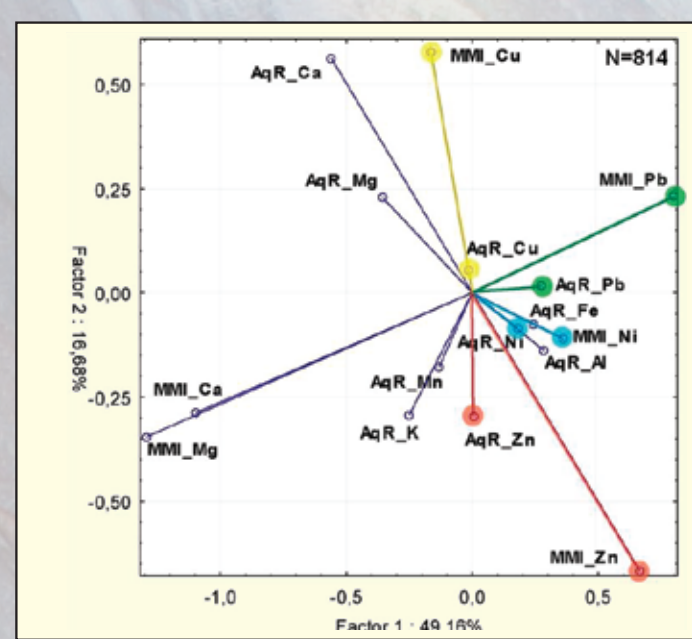


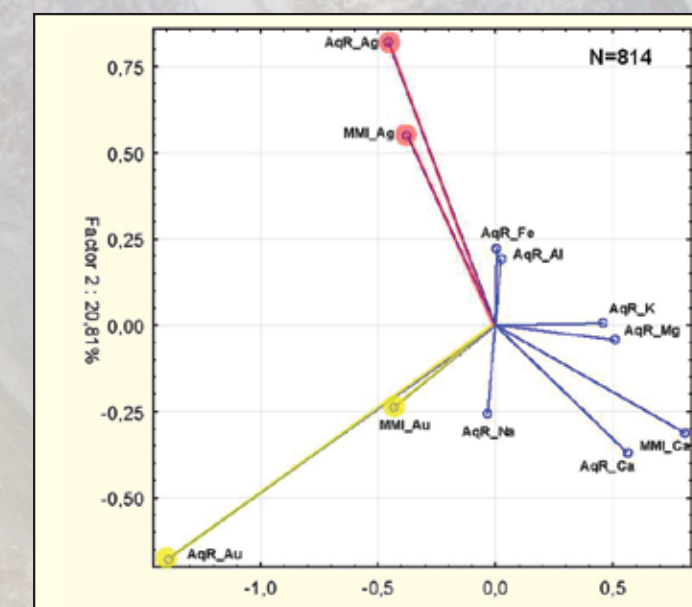
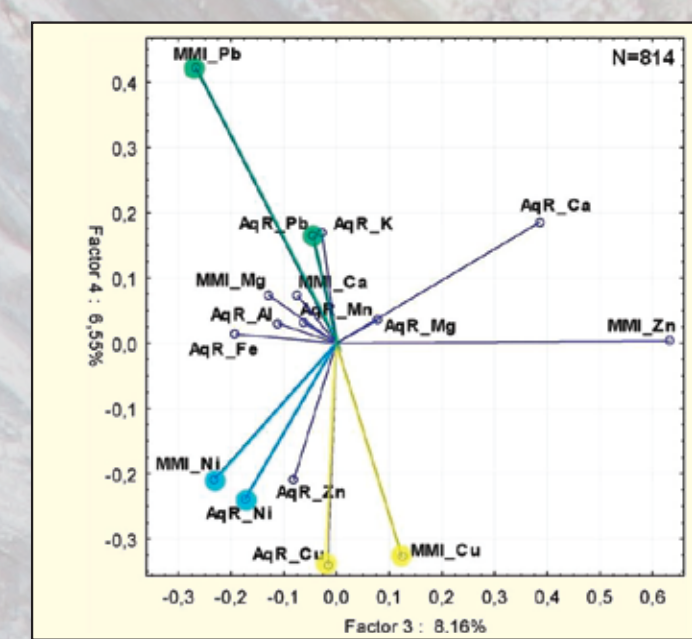
Figure 7 : analyse en composantes principales des teneurs MMI vs AqR (métaux de base + majeurs). Toutes les valeurs sont log-centrées.

L'analyse en composantes principales (ACP) vise ici à évaluer quantitativement l'impact de la composition du sol sur les teneurs en métaux de base mesurés par MMI.

Pour les métaux de base, l'ACP amène aux conclusions suivantes (fig. 7) :

1. Les 4 premiers facteurs (80% de la variabilité) sont des processus affectant dans le même sens les métaux de base endogènes (AqR) et les mesurés par MMI. Il s'agit donc principalement intrinsèques au sol (composition primaire, degrés de pédogenèse...), ce qui confirme l'importance de la composante endogène des métaux mesurés par MMI.
2. La nature du premier facteur semble être liée au degré de pédogenèse (gain en Fe, Al, perte en Ca, K). On retrouve ici un lien entre le MMI lié au protocole d'échantillonnage : l'absence de contrôle sur la nature du niveau pédologique échantillonné constitue une source d'incertitude majeure, exerçant un contrôle dominant sur la variabilité des résultats MMI.
3. MMI_Zn montre une anticorrélation partielle avec la présence de carbonates dans le sol. Il s'agit ici d'un artefact lié au processus extractif MMI-A (capacité d'extraction de la solution fortement affectée par la neutralisation de la solution causée par la présence carbonatée).

Pour Au et Ag, les corrélations très nettes entre les signaux Au et Ag obtenus par MMI et AqR (fig. 7) indiquent très clairement que ces deux méthodes mesurent, en première approximation, le même signal.

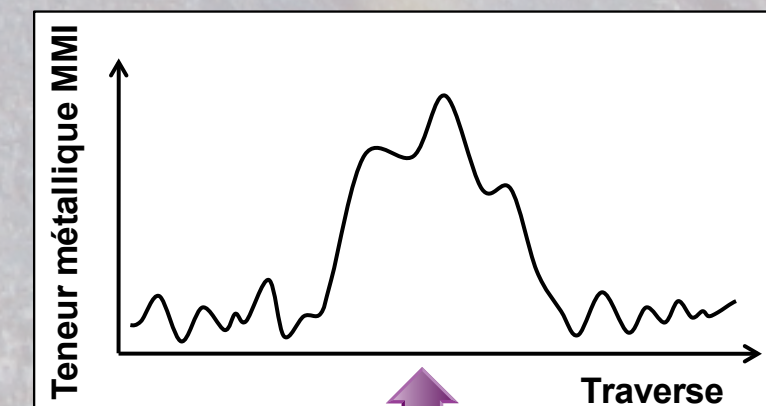


Conclusions - recommandations

- Le signal métallique MMI brut est corrélié de façon dominante au signal métallique mesuré par les méthodes conventionnelles (aqua regia).
- De part les faibles teneurs typiquement mesurées en MMI, il y a un risque élevé de fausses anomalies produites par des sols riches en phyllosilicates.
- Le signal métallique MMI est très sensible au pH du sol à anomalies indirectes dans les sols très acides qui se développent à l'aplomb des gisements sulfurés.
- Proche des minéralisations (peu de données), les levés MMI traités dans cette étude ne font pas ressortir le signal exogène théoriquement attendu traversant la couverture glaciaire par migration ionique verticale.
- En milieu à couverture transportée, les relevés MMI ne sont pas interprétables comme tel (signaux bruts) à un traitement est requis afin de démontrer la nature réellement exogène d'une anomalie mesurée (fig. 8). Ce traitement requiert :
 1. d'effectuer des analyses par des méthodes conventionnelles de type aqua regia parallèlement aux levés MMI (dans le même intervalle de sol) ;
 2. de mesurer en routine le pH, (Eh, perte au feu, conductivité) du sol ;
 3. de hausser le signal exogène par une régression multivariée utilisant comme variables explicatives les teneurs aqua regia pour le métal considéré, plus des indicateurs de la composition chimique du sol (teneurs en phyllosilicates (indiquées par Al, K, Mg), en carbonates) et le pH.

Références:

Aspodiar M.F., R.R. Anand and D.J. Gray (2008) Geochemical dispersion mechanisms through transported cover: implications for mineral exploration in Australia, CRC LEME open file report 246
Cameron EM, Stewart Hamilton, M. Beth McClenaghan, 2004 : Cross Lake: geochemical data and interpretations on soil samples, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
Fedikow, M.A. 2006. Aqua regia, Mobile Metal Ions and Enzyme Leach Soil geochemical survey results from the Timmins area: Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey, Open File Report 6179, 22p.
Hamilton S., Eon Cameron, Beth McClenaghan, Gwendy Hall, 2004 Deep penetrating geochemistry - Cross Lake final report, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
Mann A.W., R.D. Birrell, M.A.F. Fedikow & H.A.F. de Souza Vertical Ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration, Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, Vol. 5 2005, pp. 201-210
Skillcorn DB et Cohen DR 2004 Detecting Mineralization Using Partial Element Extractions: A Case study Workshop on Scientific and Engineering Datasets, SIAM International Conference on Data Mining 2004, 1-9, April 2004.
Smees, BW 2003, Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples, Explore, 118 p, 1-19.



- Signal MMI anomal :**
- ✓ Anomalie clastique (sulfures...)?
 - ✓ Sol à forte teneur en phyllosilicates (indice argile)?
 - ✓ Anomalie indirecte (pH-Eh, carbonates)?
 - ✓ Changement de milieu superficiel (conditions de drainage, MO)?
 - ✓ Anomalie exogène (migration ionique verticale)?

Figure 8 : schémas illustrant les différentes natures possibles d'une anomalie du signal MMI brut, et la nécessité de traiter le signal sur ces différents aspects afin de hausser un éventuel signal réellement exogène.

PARTENAIRES