



Introduction

L'exploration de gîtes métallifères non-affleurants consiste à détecter leur expression géochimique et/ou géophysique superficielle, permettant la définition de cibles sur lesquelles seront implantés des forages. Les gîtes produisent dans l'environnement secondaire des anomalies métalliques transportées depuis la source par des processus superficiels de natures glaciaire, hydrologique, érosive, pédologique, etc. Ces anomalies se retrouvent dans différents sites de réception, qui ont chacun fait l'objet de plusieurs projets de recherches du CONSOREM :

- Les sédiments de fond de lacs : projets 2004-09 et 2005-03
- Les sédiments de fond de ruisseaux : projets 2008-09 et 2009-02
- Les tills : projets 2001-04, 2010-05 et 2011-05
- Les sols : projet 2010-07, ce projet

La présente étude se fixe pour mandat d'optimiser l'exploration minière par la géochimie des sols conventionnellement analysés par des procédures d'acides forts qui sont l'aqua-regia et l'acide nitrique. L'étude est organisée en deux volets : 1) synthèse bibliographique visant à acquérir un important bagage fondamental, saisir l'état des connaissances, et identifier les aspects critiques de la méthode sur lesquels sera concentré le deuxième volet ; 2) recherche et compilation de données existantes pertinentes et analyse quantitative (traitement statistique).

Définition d'un sol, podzolisation, contexte québécois

Définition d'un sol : pellicule décimétrique à métrique formée à l'interface entre les milieux terrestre et atmosphérique, lieu d'interactions actives entre ces deux milieux telles que la désintégration par les eaux atmosphériques des minéraux primaires (hydrolyse), permettant l'approvisionnement minéral des plantes dont la décomposition – humification – produira en retour les acides humiques et fulviques qui contribueront à la destruction des réseaux cristallins, l'argilisation (e.g., illite, kaolinite au détriment des minéraux ferromagnésiens et des feldspaths alcalins) etc.

Podzolisation (figure 1) : lessivage des horizons supérieurs (horizon Ae) par les acides organiques entraînant un enrichissement relatif en minéraux inertes (quartz) tandis que les horizons inférieurs (horizons Bf et C) seront enrichis en minéraux secondaires (argiles, oxydes, ± carbonates dans certaines conditions) et en éléments plus mobiles notamment en Fe, Mn.

On trouve au Québec trois grandes familles de sols : les gleyols, les luvisols, et les podzols qui sont largement dominants. Leur répartition géographique est très fortement corrélée à la nature des sédiments glaciaires, qui déterminent les conditions de drainage. Ainsi, les podzols (séquence Ae/Bf) sont spatialement très dominants puisqu'ils se développent sur les tills. Les luvisols (séquence Ae/Bt) se forment typiquement dans de bonnes conditions de drainage sur des sédiments alluvionnaires. Les gleyols (séquence Bg/Cg) se forment dans des conditions de mauvais drainage, sur des sédiments argileux et/ou dans des cuvettes de pied-de-versant (pentes faibles), et sont typiquement associés à des milieux réducteurs avec accumulation de matière organique (marécages, tourbières). Ces derniers sont très fréquents en Abitibi, où ils occupent la vaste plaine argileuse du lac tardi-glaciaire Ojibway.



Figure 1. Caractéristiques générales des différents horizons des sols. Les caractéristiques chimiques indiquées sont tirées de la classification des sols conventionnelle produite par le ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire Canada. "Extractible au pyrophosphate de sodium. Les équivalences en perte au feu (PAF) sont tirées de la présente étude et de Perie et Ouimet, 2008. CO : carbone organique.

Comportement des métaux pendant la pédogenèse

Les profils de concentration résultants des transferts d'éléments dans le sol sont extrêmement spécifiques à chaque métal, conditionnés par la stabilité des phases minérales primaires comprenant le métal, par sa mobilité une fois libéré et par ses aptitudes à la fixation secondaire sur les phases minérales présentes (figure 2). Il existe plusieurs profils-typiques déterminés par la nature du mécanisme dominant affectant le métal considéré lors de la pédogenèse (figure 3) : 1) lessivage minéral, 2) accumulation organique, 3) accumulation inorganique, 4) accumulation anthropique (surface) et 5) contrôle géogène (variations chimiques liées à des faciès stratigraphiques glaciaires rémanents à travers la pédogenèse). Les profils de Cu et Ni sont principalement affectés par le lessivage minéral des horizons supérieurs, tandis que Pb, Cr, Zn, Cd et Au sont davantage contrôlés par de fortes accumulations dans les horizons organiques (humus – Ah), suggérant de fortes affinités avec la matière organique ou une mobilité atténuée en milieu acide. Finalement, les éléments montrant une accumulation inorganique significative dans les horizons de réception Bf et C sont le fer, le manganèse et l'aluminium. Ces derniers sont lessivés dans l'horizon éluvivé Ae.

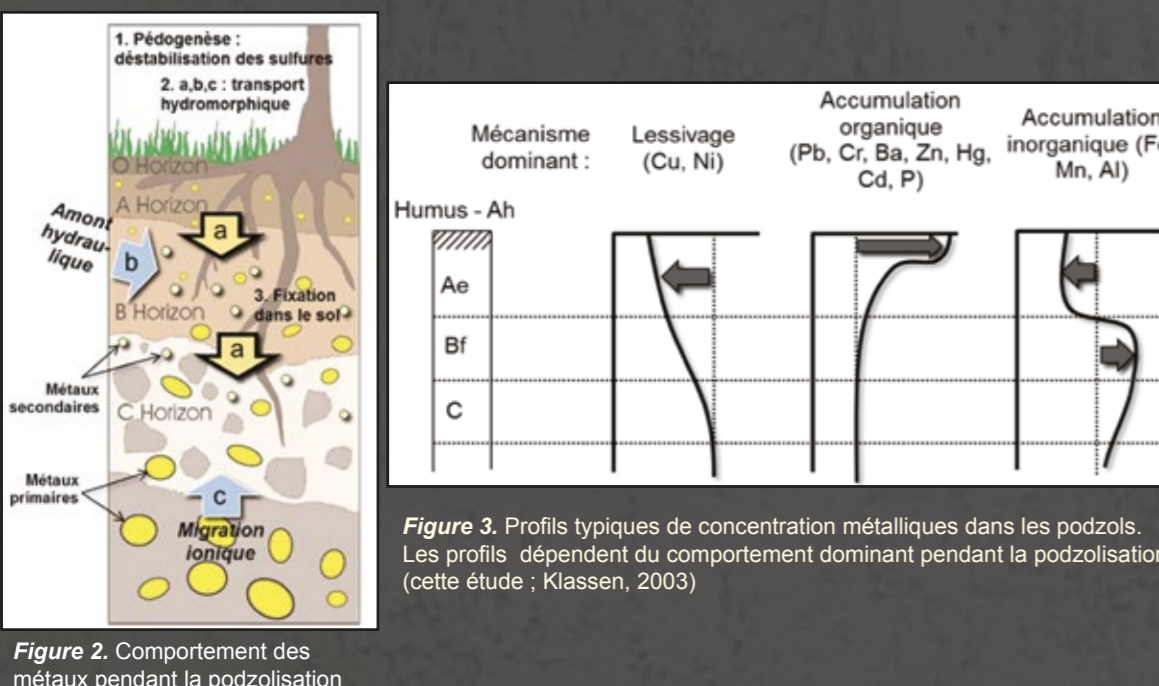


Figure 2. Comportement des métaux pendant la podzolisation

Données utilisées

La recherche de données existantes a permis de compiler plusieurs levés très pertinents pour le sujet, caractérisés par 1. l'échantillonnage de plusieurs horizons sur chaque station et 2. leur analyse par acide fort et l'homogénéité des méthodes de mesure (ICP). Les analyses multi-horizons effectuées sur 2 909 stations ont été compilées. Il s'agit exclusivement de travaux de l'OGS issus de 8 levés répartis sur le territoire ontarien (table 1). Deux de ces levés ont été particulièrement exploités dans le cadre de ce projet :

- le MRD 015 (Bernier et Kaszycki, 1995), dans le secteur de Timmins : 805 stations ont été échantillonnées dans les trois horizons. Analyses par aqua-regia – ICP, échantillons tamisés à 63 microns dans les horizons B et C et à 177 microns dans l'humus. Les sédiments sont des tills de source locale. Le domaine investigé couvre approximativement 10 000 km² et comprend plus de 70 gîtes et indices en métaux de base. Il est composé de terrains archéens de la ceinture de roches vertes Suvaize, couramment interprétée comme l'extension SO de l'Abitibi.
- le MRD 061 (Bajc et Hall, 2000) couvre une superficie de 2 000 km² sur le flanc nord du bassin de Sudbury. Il totalise 373 stations d'échantillonnage dans les trois horizons (tamis identiques au MRD 015). Les sédiments sont des tills locaux. L'or est analysé par aqua regia – ICP avec préconcentration par Fire Assay.

Nom projet, référence	Humus (Ah) – horizon B	Humus (Ah) – horizon C	Horizons B – C	Secteur géographique
MRD015 ; Bernier et Kaszycki, 1995	824	837	869	District de Timmins, Ontario
MD061 ; Bajc et Hall, 2000	420	388	396	Bassin de Sudbury, Ontario
MRD071 ; Stacey et al, 2001	128	87	149	NO Ontario
MRD021 ; Morris, 1996			22	Separation Lake Area, NE Ontario
MRD040 ; Morris, 1999	17	17	55	Wawa Region, NE Ontario
MRD044 ; Bajc, 1999			218	Shebandowan Greenstone Belt, NO Ontario
MRD053 ; Tardiff, 2000			165	Bassin de Sudbury, SE Ontario
MRD074 ; Morris, 2001			137	Schreiber-Killala Lake, NO Ontario

Table 1. Sources des données utilisées dans cette étude.

Résultats

Une étude approfondie des concentrations en métaux de base et en or dans les trois horizons du sol a été réalisée, essentiellement avec les données des MRD 015 (métaux de bases) et 061 (or). Les médianes des teneurs métalliques dans les stations distantes (> 1km) et proches (< 1km) des gîtes et indices pour les substances concernées sont analysées (figures 5 et 7). Les profils de niveaux de base obtenus corroborant très bien les résultats de Klassen (2003) établis sur une plus grande variété de contextes géographiques à partir d'un nombre de stations en revanche nettement inférieur. Ainsi, les profils de concentrations du cuivre et du nickel dans le sol sont avant tout influencés par le lessivage minéral (baisse drastique des teneurs dans l'horizon B), sans accumulation organique, tandis que ceux du zinc, du plomb et de l'or sont au contraire marqués par l'accumulation organique (très forte augmentation des teneurs dans l'humus). En dépit de ces différences de profils des niveaux de base, il apparaît très clairement que l'amplification des signaux à proximité des minéralisations caractérisées est systématiquement optimale dans l'horizon C, tandis que le signal mesuré dans l'humus apparaît, au contraire, peu corrélé à la présence de minéralisations à l'exception de Zn. Cet élément montre en effet une amplification intéressante dans les trois horizons, bien que ce soit encore dans l'horizon C que celle-ci est la plus élevée. La figure 4 montre toutefois que, si une station est anormale dans l'humus mais pas dans l'horizon C, cette anomalie est vraisemblablement une fausse anomalie. Au contraire, les échantillons anormaux dans l'horizon C sont des vraies anomalies et révèlent efficacement la présence de minéralisations, que cette anomalie soit, ou ne soit pas, visible aussi dans l'humus. Les résultats sur Ni sont, d'une manière générale, moins convaincants. Ceci possiblement en raison du faible nombre de stations disponibles à proximité des gîtes/indices. La figure 8 montre que les teneurs aurifères dans l'humus sont élevées tant en niveau de base (groupe > 2km) que proche des minéralisations connues (autres groupes), et qu'il n'y a pas d'amplification notable indiquant la présence de ces dernières. Par conséquent, les hautes valeurs aurifères dans l'humus ne sont pas révélatrices de la présence de minéralisation. Dans les horizons inférieurs, en revanche, les valeurs normalisées (diagramme de droite) montrent une certaine amplification du signal pour les stations situées à moins de 200m des gîtes/indices, comparativement au niveau de base. L'amplification du signal indiquant la proximité de minéralisations semble être optimale dans l'horizon

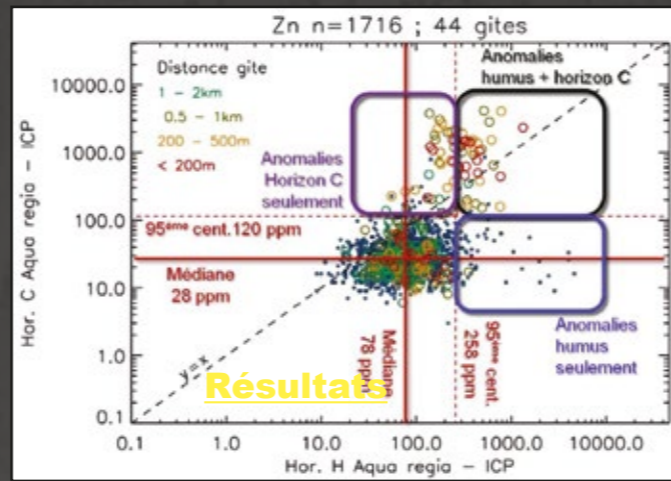


Figure 4. Comparaison des concentrations en Zn sur 1 716 stations d'échantillonnage multi-horizon humus – horizon C (MRD 015, 091, 071, 021, 040). La couleur des cercles indique la distance au gîte le plus proche (petits cercles bleus > 2km). Le cadre noir indique les stations anormales dans l'humus et dans l'horizon C. Le cadre bleu indique le champ des stations normales seulement dans l'humus. Le cadre violet indique les stations anormales seulement dans l'horizon C. Ce qui montre cette figure

- 1. Les concentrations (médiane et 95ème centile) dans l'humus sont supérieures à celles de l'horizon C.
- 2. Les anomalies (95ème centile) dans l'humus uniquement ne sont pas corrélées à la présence de gîtes → Mauvais candidat pour l'exploration
- 3. Les anomalies (95ème centile) dans l'horizon C sont corrélées à la présence de gîtes → Bon candidat pour l'exploration

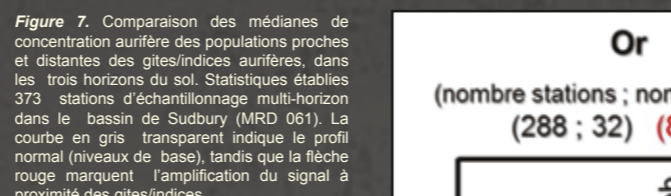


Figure 5. Comparaison des médianes de concentration en Cu, Ni, Zn et Pb des populations proches et distantes des gîtes/indices aurifères, dans les trois horizons du sol. Statistiques établies 373 stations d'échantillonnage multi-horizon dans le bassin de Sudbury (MRD 061). La courbe en gris transparent indique le profil normal (niveaux de base), tandis que la flèche rouge marque l'amplification du signal à proximité des gîtes/indices.

- 1. En dépit d'un haut niveau de base, la concentration aurifère de l'humus ne montre pas d'augmentation significative à proximité des gîtes/indices.
- 2. Cette augmentation est en revanche > 2.5 (rapport des médianes) dans l'horizon C, à moins de 200 m des gîtes/indices.
- 3. L'horizon à privilégier pour l'exploration aurifère est donc l'horizon C.
- 4. L'humus constitue un site d'accumulation aurifère naturelle (traduisant probablement les affinités de Au avec la MO), générant un haut niveau de base peu propice au développement d'anomalies liées à la présence d'un gîte à proximité. Les hautes valeurs dans l'humus ne sont pas révélatrices de la présence de

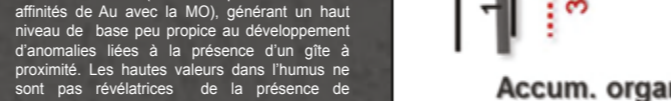


Figure 6. Comparaison de l'augmentation des teneurs aurifères à différentes distances des gîtes/indices aurifères, dans les trois horizons. Statistiques établies sur 373 stations d'échantillonnage multi-horizon réparties sur 51 gîtes et indices, dans le bassin de Sudbury (MRD061).

Conclusions, recommandations

Le facteur d'amplification du signal à proximité des minéralisations, exprimé par le rapport entre les médianes des populations proches et loin des gîtes/indices (figures 5 et 7), permet de dresser un portrait de l'efficacité des différents horizons pour les différentes substances :

- Humus : Zn (2.73) > Cu (1.25) > Pb (1.11) > Au (1.08)
- Horizon B : Zn (4.2) > Pb (3) > Cu (2) > Au (1.6)
- Horizon C : Pb (67.3) > Zn (10.32) > Cu (3.27) > Au (1.85)

Il en ressort que les substances pour lesquelles la géochimie des sols est le plus efficace sont Zn et Pb suivis, par efficacité décroissante, de Cu puis Au. Dans tous les cas, cette efficacité est optimale dans l'horizon C et très faible dans l'humus. Le calcul des contrastes, présenté figure 6, conduit aux mêmes conclusions quant aux performances des différents horizons du sol pour l'exploration. Bien que le niveau de base y soit plus élevé pour certains métaux (incluant Pb, Zn, Au), le signal métallique de l'horizon humus-Ah est faiblement corrélé à la minéralisation et présente dans la plupart des cas de faibles performances pour la détection de gîtes/indices. Ces résultats démontrent que l'horizon C est l'horizon à privilégier pour l'exploration minière en Pb, Zn, Cu et Au. L'horizon B est aussi un bon candidat, mais de moindre performance. L'humus est à éviter en toutes circonstances. Pour l'argent, les trois horizons présentent des performances comparables, au demeurant relativement faibles comparativement aux performances obtenues pour les métaux de base. Efficacité des levés de sol est globalement peu probante pour l'exploration aurifère, possiblement en raison de l'effet pépite, dont le seul moyen de s'affranchir est de procéder au décompte de grains d'or. Dans l'horizon C, le signal en arsenic démontre une performance bien meilleure que l'or lui-même. Celle des autres traceurs classiques (Sb, W) est très faible. Pour un compte-rendu complet sur le projet, voir le rapport (Rafini, 2012) disponible en ligne (consorem.uqac.ca).

Références

Bajc, A.F. et Hall, G.E.M. 2000. Geochemical response of surficial media, north and east ranges, Sudbury basin; Ontario Geological Survey, Open File Report 6033, MRD061.
Bernier, M.A. et Kaszycki, C.A., 1995. Till, humus and B-horizon soil geochemical database. Surficial Sediment Sampling Program, Swayze Greenstone Belt, Northern Ontario, 1992-94; Ontario Geological Survey, MRD015.
Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic information systems for geoscientists. 1ère édition. Pergamon Press.
Klassen, R.A., 2003. Soil profiles in naturally metal-rich terrains of eastern Canada: physical properties and geochemical data. Open File 1745, 1CDROM.
Perie C. et Ouimet R., 2008. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils, Canadian Journal of Soil Science, 88 : 315-325.
Rafini, S., 2010. Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI: Synthèse, études de cas, perspectives. Projet Consorem 2010-07, 42p.
Trépanier, S., 2005. Identification de domaines géochimiques et méthodologie de génération de cibles d'exploration (IOCG, Ni, VMS, Au) à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac. Projet Consorem 2004-09.
Trépanier, S., 2006. Identification de domaines géochimiques et génération de cibles d'exploration – Phase 2. Projet Consorem 2005-03.
Trépanier, S., 2009. Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration, Projet Consorem 2008-09.
Trépanier, S., 2010. Rehaussement et interprétation des levés de sédiments de ruisseaux pour la Gaspésie (Partie A) et pour la Baie James (Partie B), projet Consorem 2009-02.
Trépanier, S., 2011. Optimisation des données de Till – phase 1. Projet Consorem 2010-05.
Trépanier, S., 2012. (en édition). Optimisation des données de Till – phase 2. Projet Consorem 2011-05.