
OPTIMISATION DES DONNÉES DE GÉOCHIMIE DES SOLS PAR ACIDES FORTS

PROJET 2011-06

Par : Silvain Rafini
Juin 2012



AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minière) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

Rafini, S., 2012. Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts. Rapport, Projet CONSOREM 2011-06, 45 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite 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@ugac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce projet avait pour objectif de vérifier l'efficacité de la géochimie des sols pour l'exploration minière, ainsi que de proposer des éléments qualitatifs et quantitatifs d'optimisation. Cette optimisation se décline en trois niveaux correspondants aux trois étapes d'une campagne de géochimie des sols : 1. Échantillonnage (choix de l'horizon pédologique adéquat selon le signal ciblé, contexte environnemental, géologique, pédologique), 2. Laboratoire (choix de la méthode d'extraction et de mesure selon l'horizon échantillonné et le signal ciblé), 3. Traitement (rehaussement d'anomalies, normalisation du bruit de fond). Cette division a donné la trame de fond du projet de recherche, et les différents points notés aux trois étapes ont été abordés individuellement et/ou collectivement.

Les sols constituent un environnement extrêmement complexe, sensible et réactif. Leur usage efficace en exploration nécessite une certaine connaissance fondamentale des processus physico-chimiques en action. Un effort particulier a donc été porté dans ce travail sur l'acquisition et le transfert de connaissances, notamment sur les points suivants : comportement des métaux durant la pédogénèse (ségrégation métallique), profils de concentration spécifiques pour Ni, Cu, Pb, Zn, Au, distinction des métaux primaires et secondaires (c.-à-d. libérés lors de la destruction des sulfures labiles, transportés par hydromorphisme puis fixés dans les horizons de réception du sol) et des méthodes permettant de les extraire dans les différents horizons du sol : humus-Ah, B, C.

Cette étape de documentation approfondie a permis d'identifier les points sensibles et les sources d'incertitude lors des relevés d'exploration. Une deuxième étape, plus quantitative, s'est donc attardée à répondre aux questions suivantes : pour chaque substance, quelle est la nature du signal métallique contenu dans chaque horizon différencié (enrichissement pédogénétique du signal dépendant ou indépendant de la présence de minéralisation, hauteur du niveau de base et des anomalies) et, quel horizon possède le meilleur potentiel de restitution d'anomalie émanant d'un gîte proximal ? Des réponses claires sont apportées à ces questions par une analyse statistique de plusieurs levés régionaux existants (source OGS), contenant des stations à échantillonnage multi-horizons (humus, B, C). Au total, 2 900 stations ont été compilées, réparties sur 8 levés.

On y montre que les éléments Pb, Zn, Au ont un niveau de base systématiquement élevé dans l'horizon organique (humus-Ah), suggérant que ceux-ci ont des affinités marquées avec la matière organique, tandis que Cu et Ni sont plus concentrés dans l'horizon C (profil dominé par le lessivage). En revanche, le haut signal de Pb, Zn et Au dans l'humus est très faiblement corrélé aux minéralisations : il s'agit d'un signal versatile, extrêmement sensible à la pollution aérienne (fonderies, routes...) et aux conditions météorologiques. L'usage de cet horizon est déconseillé pour l'exploration. L'horizon C montre systématiquement, et pour tous les éléments considérés, le meilleur enrichissement associé aux minéralisations.

La performance des trois horizons est statistiquement quantifiée par le paramètre « côte », rapport de probabilités d'anomalies entre une population X (p.ex. < 1km des gîtes) et la population totale. Ce paramètre constitue un indicateur de performance standard, objectif et fiable. La comparaison des côtes des horizons humus, B et C à différentes distances des gîtes démontre très clairement que :

1. L'horizon C possède le meilleur potentiel pour la détection des gîtes, suivi de l'horizon B, tandis que l'humus est très peu performant;

2. Les anomalies associées aux gîtes sont détectables dans cet horizon à des distances < 1km;
3. Les analyses d'or dans les trois horizons montrent une très faible performance pour la détection des gîtes aurifères, performance qui est en revanche relativement bonne pour l'arsenic dans l'horizon C à partir de 1 km des gîtes.

Une méthode de rehaussement est proposée pour les métaux de base, basée sur le traitement du bruit de fond métallique associé à la présence de phyllosilicates. L'efficacité de cette méthode est démontrée par une augmentation quasi-systématique des côtes dans les horizons B et C.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----|
| Avertissement | i |
| RÉSUMÉ | ii |
| Table des Matières | iv |
| Liste des Figures | v |
| Liste des Tableaux | vii |
| 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Introduction du projet | 1 |
| 1.2 Mécanismes de transport dans l'environnement secondaire | 2 |
| 2 « Optimisation » | 3 |
| 3 Description du milieu de réception, différenciation des horizons pédologiques | 4 |
| 4 Comportement des métaux pendant la différenciation des sols | 7 |
| 4.1 Métaux primaires vs métaux secondaires | 7 |
| 4.2 Sources des anomalies | 10 |
| 4.3 Profils de concentration et ségrégation des métaux dans les horizons différenciés | 10 |
| 5 Les acides forts | 11 |
| 5.1 Caractéristiques | 11 |
| 5.2 Nature des signaux mesurés par acides forts vs par extractions sélectives dans les sols | 12 |
| 6 Analyse statistique des teneurs métalliques dans les horizons de sols différenciés : concentrations moyennes et anomalies | 14 |
| 6.1 Description des données utilisées | 14 |
| 6.2 Métaux de base | 16 |
| 6.2.1 Instabilité du signal métallique dans l'humus | 19 |
| 6.3 Analyse en or | 23 |
| 7 Quantification de la performance des horizons humus, B et C pour l'exploration minière | 26 |
| 7.1 Approche statistique | 26 |
| 7.2 Côtes des horizons humus-Ah, B et C | 27 |
| 8 Rehaussement d'anomalies en métaux de base par traitement du <i>background</i> minière | 30 |
| 8.1 Principe | 30 |
| 8.2 Vérification statistique de l'efficacité du rehaussement et application | 33 |
| 9 Conclusion, Discussion, recommandations | 35 |
| Remerciements | 37 |
| 10 Références | 38 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figure 1. | Synthèse schématique des processus intervenant dans le transport métallique, depuis un dépôt-source enfoui ou subaffleurant vers les différents sites de réception de l'environnement secondaire..... | 1 |
| Figure 2. | Identification des facteurs influents sur l'efficacité des campagnes de géochimie des sols, abordés dans ce projet..... | 4 |
| Figure 3. | Carte des sols du sud Québécois, opposée à la carte des sédiments glaciaires produite par Veillette et al., (2003). Légendes des sols : bleu = ordre des gleysols; jaune pâle : ordre des podzols; vert : ordre des luvisols; brun : ordre des brunisols. | 6 |
| Figure 4. | Photos de podzols (gauche et centre : crédits Camiro – Cross Lake), gleysol et luvisol (site web OGS)..... | 6 |
| Figure 5. | Illustration schématique des proportions minérales des horizons différenciés dans un sol développé sur des sédiments glaciaires (till) et identification des phases comprenant les métaux primaires et secondaires..... | 7 |
| Figure 6. | Illustration schématique du comportement des sulfures pendant la pédogénèse. | 8 |
| Figure 7. | Diagramme Eh-pH de Cu et Au (champs modélisés par Takeno, 2005). Le carré rose indique les conditions courantes des eaux souterraines et des sols. La flèche rouge indique l'augmentation de la mobilité du cuivre (diminution de sa fixabilité). | 9 |
| Figure 8. | Profils de concentration obtenus par Klassen (2003) à partir de relevés verticaux aux 5 cm effectués sur plus de 30 stations réparties dans l'Est canadien..... | 11 |
| Figure 9. | Répartition schématique des métaux primaires et secondaires dans les phases du sol; caractérisation des phases théoriquement attaquées par différents procédés d'extraction sélective et par acides forts (aqua regia, HNO ₃ , HF...). Modifié de Cameron et al., 2004. | 13 |
| Figure 10. | Charte d'utilisation des méthodes courantes d'extraction-digestion dans les sols, nature du signal métallique ciblé. | 13 |
| Figure 11. | Répartition géographique des levés utilisés dans cette étude (carte géologique et localisation des points : OGS). Les deux levés encadrés sont ceux exploités plus en détail (voir texte). | 15 |
| Figure 12. | Localisation des 805 stations du levé de Bernier et Kaszycki (1995), et des gîtes (tous métaux de base confondus). Les gîtes sont localisés au centre des cercles (zones tampons)..... | 16 |
| Figure 13. | Valeurs statistiques des concentrations en Cu à différentes distances des gîtes et indices cuprifères, établies sur une population totale comprenant plus de 800 stations (90 gîtes et indices)..... | 17 |
| Figure 14. | Comparaison des médianes des populations proches et distantes des gîtes, dans les trois horizons du sol. Les courbes en trait gras épais transparent de couleur grise montrent les profils normaux (niveaux de base), tandis que les flèches rouges marquent l'amplification des signaux à proximité des gîtes et indices. *gîtes – et indices – sélectionnés par substance analysée dans le sol. Le nombre de stations est indiqué au-dessus de chaque profil, ainsi que le nombre de gîtes échantillonnés à moins de 1 km. | 18 |
| Figure 15. | Profils de concentrations métalliques obtenus sur trois levés effectués dans des secteurs différents (MRD015 : district de Timmins; MRD061 : bassin de Sudbury; MRD071 : NO de l'Ontario). | 18 |
| Figure 16. | Contamination cuprifère visible de l'humus dans le bassin de Sudbury, reliée à la proximité des fonderies de Falconbridge, Coniston et Copper Cliff. | 19 |
| Figure 17. | Test de reproductibilité des analyses aurifères sur un tronçon de traverse, et sur une anomalie ponctuelle (données Ress. d'Arianne)..... | 20 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figure 18. | Test de reproductibilité des analyses en métaux de base et Ag sur le même tronçon de traverse que précédemment (données Ress. d'Arianne)..... | 21 |
| Figure 19. | Teneurs en Zn dans l'humus vs. Horizon C, montrant une compilation des analyses de tous les levés introduits en début de chapitre. La couleur et la taille des symboles indiquent la distance aux gîtes zincifères les plus proximaux : les ronds bleus de petite taille correspondent aux points situés à plus de 2 km d'un gîte zincifère. Les lignes rouges indiquent différents seuils, dans l'humus et dans l'horizon C : la médiane (trait gras plein) et le 95ème centile (trait fin pointillé) assimilé ici au seuil d'anomalie. Tous les points situés au-delà (à droite pour l'humus; en haut pour l'horizon C) des lignes pointillées sont donc des valeurs anormales, tel qu'illustré par les cadres bleu, noir et violet. | 23 |
| Figure 20. | Valeurs statistiques des concentrations en Au à différentes distances des gîtes et indices aurifères, établies sur une population totale comprenant 373 stations (51 gîtes et indices). | 25 |
| Figure 21. | Comparaison des médianes des populations proches et distantes des gîtes/indices aurifères, dans les trois horizons du sol. La courbe en trait gras épais transparent de couleur grise montre les profils normaux (niveaux de base), tandis que les flèches rouges marquent l'amplification du signal à proximité des gîtes/indices. Le nombre de stations est indiqué au-dessus de chaque profil, ainsi que le nombre de gîtes/indice échantillonnés à moins de 1 km..... | 25 |
| Figure 22. | Illustration de la notion de côte c, qui est égale au rapport entre les probabilités d'anomalies des deux populations. | 27 |
| Figure 23. | Variation des côtes avec la distance au gîte-indice le plus proximal, classé par substance, dans les trois horizons du sol (données MRD015). Métaux de base et argent..... | 28 |
| Figure 24. | Variation des côtes avec la distance au gîte-indice le plus proximal (toutes substances confondues excepté As : or) dans les trois horizons du sol (données MRD015). Métaux de base et traceurs communs..... | 29 |
| Figure 25. | Variation des côtes des teneurs en or en fonction de la distance au gîte-indice aurifère le plus proximal, dans les trois horizons du sol (données MRD015). | 30 |
| Figure 26. | Zn, Cu et Ni (aqua regia) vs indice phyllosilicates. Les couleurs des symboles correspondent à différentes traverses (8 traverses, pour un total de 814 stations). Mesures par ICP. Horizons d'échantillonnage : B et C confondus. Le cercle rouge marque les points contenant une forte fraction métallique non-incluse dans les phyllosilicates (voir texte), appartenant à une traverse dont le tracé est projeté sur la carte géologique. Levé MRD200 (Fedikow, 2006). | 32 |
| Figure 27. | Teneurs zincifères (horizon C) vs indice phyllosilicate pour l'ensemble des échantillons d'horizon C des différents levés compilés dans cette étude. La corrélation obtenue est très bonne en dépit de la grande variété géographique, géologique, métallogénique couverte par ces différents levés, ce qui démontre le caractère universel du background métallique compris dans les phyllosilicates du sol. | 33 |
| Figure 28. | Comparaison des côtes obtenues pour les valeurs avant (traits pointillés) et après (traits continus) rehaussement. Les lignes pointillées sont identiques à celles présentées en Figure 23. Levé MRD015. | 34 |
| Figure 29. | Carte de centiles sur une partie du levé MRD015, dans le district de Timmins, pour le signal zincifère avant et après rehaussement. | 35 |
| Figure 30. | Caractéristiques chimiques moyennes des trois horizons d'échantillonnage du sol (compilation de toutes les stations multi-horizons des levés introduits dans ce projet). CIA : chemical index of alteration (Nesbitt et Young, 1982), ratio immobiles / mobiles utilisé en géologie environnementale, paléoclimatologie, etc. | 36 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Caractéristiques générales des différents horizons des sols. Les caractéristiques chimiques indiquées sont tirées de la classification conventionnelle des sols 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 Perié et Ouimet, 2008. CO : carbone organique..... | 4 |
| Tableau 2. Données utilisées dans cette étude (MRD : Miscellaneous Data Release). Ces données proviennent de l'OGS. | 15 |
| Tableau 3. Valeurs des coefficients de corrélation R ² entre les signaux obtenus en juin et en juillet sur le même tronçon de traverse, pour différents métaux mobiles et peu mobiles. | 22 |

1 INTRODUCTION

1.1 Introduction du projet

L'exploration de gîtes métallifères subaffleurants, sous la couverture sédimentaires ou enfouis dans le socle rocheux consiste à détecter leur expression géochimique et géophysique superficielle ceci avant de procéder aux forages plus systématiques. Si les signatures géophysiques des gîtes métallifères peuvent être considérées comme directes en ce qu'elles sont le plus souvent générées directement par l'objet convoité, leurs signatures géochimiques superficielles sont dans la plupart des cas indirectes, et forment des anomalies métalliques transportées depuis la source vers l'environnement secondaire par des processus superficiels de natures glaciaire, hydrogéologique, hydrologique, érosive, pédologique, etc. Ces processus sont synthétisés sur la **Figure 1**.

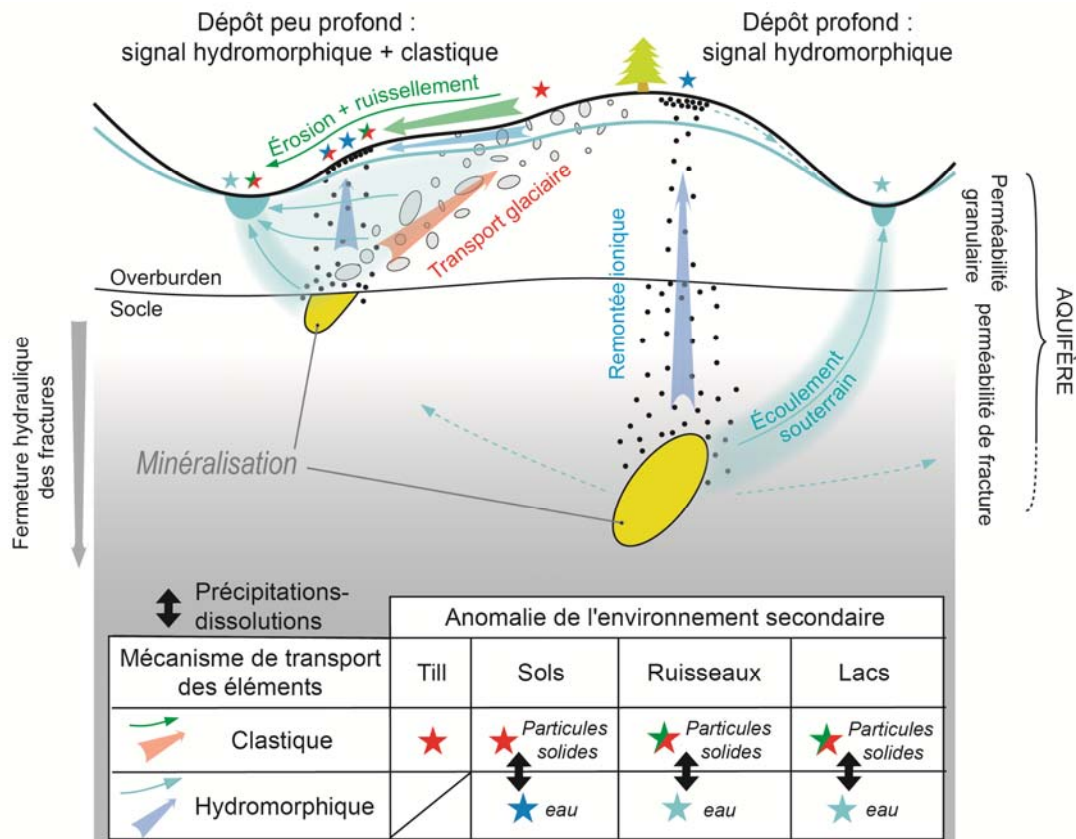


Figure 1. Synthèse schématique des processus intervenant dans le transport métallique, depuis un dépôt-source enfoui ou subaffleurant vers les différents sites de réception de l'environnement secondaire.

La composante latérale de ce transport est variable et conditionnée par la nature même du processus impliqué. Son amplitude évolue de quelques centimètres (processus pédologiques) et plusieurs dizaines de kilomètres (processus hydrologique et hydrogéologique : dimension des bassins versants et aquifères). Elle détermine donc l'échelle d'efficacité intrinsèque à la méthode. C'est un facteur compliquant qui devra être pris en compte lors de l'interprétation des levés afin de remonter à la source de l'anomalie. La composante verticale, aussi extrêmement variable, renferme en revanche tout l'intérêt de ces méthodes puisque c'est elle qui permet l'observation en surface d'une concentration métallique anormale aveugle située en profondeur.

La **Figure 1** illustre les différents sites de réception du signal métallique dans l'environnement secondaire. On y retrouve :

- Les sédiments de fond de lacs, qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2004-09 et 2005-03;
- Les sédiments de fond de ruisseaux, qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2008-09 et 2009-02;
- Les sédiments glaciaires (till), qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2001-04, 2010-05 et 2011-05;
- Les sols, qui ont fait l'objet du projet CONSOREM 2010-07.

La présente étude s'inscrit donc dans une série de projets, étalée sur une décennie, s'étant donnée pour mission de produire une vaste documentation sur le thème de la géochimie de l'environnement secondaire appliquée à l'exploration, tant d'un point de vue théorique et conceptuel que quantitatif, analytique et statistique. La plupart de ces projets utilisent des levés du domaine public émanant de multiples sources (gouvernements provinciaux et fédéral, compagnies) augmentés des banques de données privées, internes aux compagnies membres, générées par les campagnes d'exploration accumulées dans certains cas depuis plusieurs décennies. Il s'agit donc de méta-études, compilant les nombreux travaux expérimentaux conduits par les équipes gouvernementales (CGC, OGS, Géologie-Québec) tant que les rapports internes non-publics des compagnies.

Le projet 2010-07 s'est tout particulièrement attaché à évaluer l'efficacité d'une méthode spécifique, le MMI, à la détection des anomalies métalliques dans les sols. La portée du projet présenté ici est plus vaste puisqu'il se fixe pour mandat de fournir les moyens d'une optimisation des relevés de sols conventionnels, autrement dit analysés par les procédés classiques d'acides forts notamment l'aqua-regia et l'acide nitrique. À l'instar du projet 2010-07, cette étude s'est organisée en deux volets : 1) recherche bibliographique scientifique, industrielle, gouvernementale, universitaire, visant à acquérir un bagage plus fondamental, saisir l'état des connaissances, et identifier les aspects critiques de la méthode sur lesquels sera concentrée le deuxième volet; 2) recherche de données existantes pertinentes pour investiguer les problèmes identifiés au premier volet et compilation des différentes bases sélectionnées, analyse quantitative, statistique, traitement. Ce rapport suivra donc une organisation semblable, avec des sections théoriques portant sur la formation des sols, leurs structure et propriétés, ainsi que sur les méthodes d'extraction ciblées et leurs spécificités au sein de la gamme de méthodes existantes proposées par les laboratoires. Par la suite, l'aspect analytique et quantitatif est développé, amenant à plusieurs conclusions majeures sur les conditions d'usage de la géochimie des sols à des fins d'exploration minière.

1.2 Mécanismes de transport dans l'environnement secondaire

Les mécanismes de transport métallique en environnement secondaire se déclinent en deux grandes familles, caractérisées par la forme – solide ou dissoute – prise par les métaux durant leur transport : les mécanismes clastiques transportent les métaux sous forme solide, intégrés dans les structures cristallographiques des minéraux primaires et secondaires. Il s'agit essentiellement des processus glaciaires et, dans une moindre mesure, érosifs et hydrologiques (ruissellement, transport solide dans les rivières). Les mécanismes hydromorphiques stipulent la mise en solution des métaux, libérés lors de la destruction des réseaux cristallins associée à l'altération du minéral (oxydation, hydrolyse). Les métaux – libres ou complexés – sont transportés dans la phase aqueuse par advection (écoulement souterrain : gradient hydraulique) et diffusion (gradient chimique, électrochimique). Le transport hydromorphique intervient dans divers processus hydrogéologiques, hydrologiques et pédologiques.

Il est important de noter que ces deux mécanismes de transport interviennent dans de nombreux cas naturels en combinaison (**Figure 1**), avec plusieurs séquences possibles incluant : anomalie de sédiments glaciaires transportée par ruissellement vers l'aval topographique jusqu'aux ruisseaux, possiblement par la suite fixée lors de la précipitation de minéraux secondaires (oxydes, argiles,

carbonates), lesquels pourront être encore affectés par le transport clastique de fond de rivières lors d'épisodes de crue, etc. Cet exemple illustre les multiples possibilités d'interactions intervenant dans le transport métallique en environnement secondaire, à l'origine des difficultés bien connues d'identification des dépôt-sources.

Les différents mécanismes de transport évoqués ici s'accompagnent de modifications du signal primaire, en nature et intensité, qui leurs sont très spécifiques. Typiquement, le transport clastique induit une ségrégation mécanique, contrôlée par la dureté relative des minéraux, qui va significativement modifier la composition minérale des sédiments. Le broyage des minéraux de faible dureté renfermant les métaux (minéraux ferromagnésiens, sulfures...) engendre une redistribution du signal métallique vers la fraction fine telle que le niveau métallique de base sera partiellement conditionné par la distance de transport – la fraction fine étant dans la plupart des cas la fraction analysée. Ce phénomène a été documenté dans le till à l'occasion du projet 2011-05 (Trépanier, 2011). À l'inverse, le transport hydromorphique s'accompagne d'une ségrégation chimique du signal métallique dans laquelle les facteurs contrôlant sont la stabilité des minéraux métallifères et la mobilité des formes ioniques prises par les métaux lors de l'altération de ces derniers, dans les conditions Eh-pH des différents environnements traversés jusqu'au milieu de réception. Typiquement, le caractère labile de la plupart des sulfures font que ceux-ci sont facilement déstabilisés, et le signal métallique libéré, transporté, puis fixé par adsorption ou précipitation secondaire. Ceci peut se produire soit à l'échelle locale, entre les horizons d'un sol par exemple, soit à une échelle plus régionale comme celle d'un aquifère. Ce phénomène vaut pour les métaux de base, il est par contre inopérant sur le signal aurifère puisque ce métal se trouve exclusivement sous forme native, stable, très peu affectée par les réactions de lessivage. Ainsi le signal aurifère est généralement de nature primaire tandis que les métaux de base ont une nette propension à se retrouver dans le signal secondaire, fixés sur le réseau cristallin des minéraux secondaires.

2 « OPTIMISATION »

Ce projet a pour mandat de fournir les moyens d'une optimisation des relevés de géochimie des sols pour l'exploration minière. Une telle optimisation peut *a priori* se concentrer sur plusieurs aspects, aussi diverses que nombreux, intervenant aux différentes étapes d'une campagne : échantillonnage, analyse, interprétation. Ce sont là autant d'avenues possibles pour ce projet de remplir son vaste mandat. La sélection s'opèrera toutefois naturellement en fonction des données disponibles et des observations recueillies dans la littérature quant à la pertinence des problèmes posés.

La **Figure 2** présente une vision d'ensemble des différents aspects ayant une influence significative sur l'efficacité des campagnes de géochimie des sols. Ces aspects ont été investigués dans le cadre de ce projet, de manière conceptuelle ou quantitative, à l'exception du problème de la détermination des sources des anomalies et implicitement de leur nature clastique et/ou hydromorphique. Cette question, critique et particulièrement complexe, est évoquée de façon conceptuelle mais requiert davantage de travaux et doit être résolue, cas-par-cas, pour chaque anomalie détectée, à travers des mesures subsidiaires.

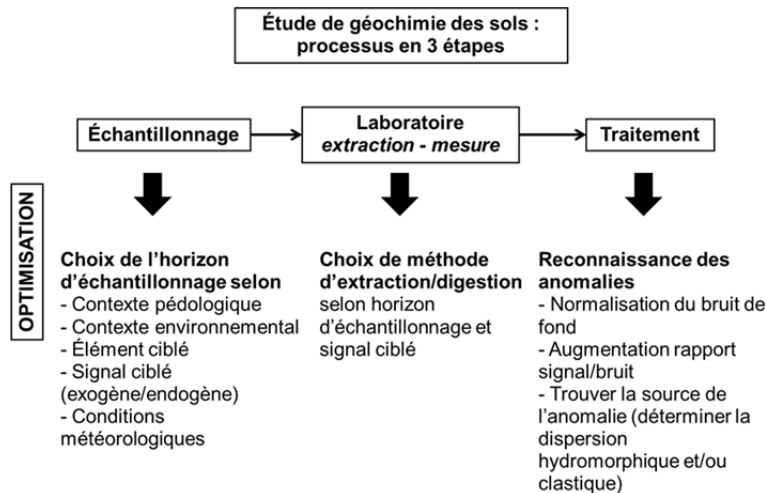


Figure 2. Identification des facteurs influents sur l'efficacité des campagnes de géochimie des sols, abordés dans ce projet.

3 DESCRIPTION DU MILIEU DE RECEPTION, DIFFERENCIATION DES HORIZONS PEDOLOGIQUES

Est appelé sol la pellicule décimétrique à métrique de terre formée à l'interface entre les milieux terrestre et atmosphérique. Cette zone de contact, ou de transition, est le lieu d'interactions actives entre les deux milieux telles que la désintégration par les eaux atmosphériques des minéraux primaires (oxydation, 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 (p.ex. illite, kaolinite au détriment des minéraux ferromagnésiens et des feldspaths alcalins), etc. Le lessivage des horizons supérieurs (**Tableau 1**, horizons A) entraîne un enrichissement relatif en minéraux inertes (quartz) tandis que les horizons inférieurs (**Tableau 1**, horizons B et C) seront enrichis en minéraux secondaires (argiles, oxydes, ± carbonates dans certaines conditions) et en éléments plus mobiles notamment en Fe, Mn.

Tableau 1. Caractéristiques générales des différents horizons des sols. Les caractéristiques chimiques indiquées sont tirées de la classification conventionnelle des sols 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 Perié et Ouimet, 2008. CO : carbone organique.

| | | |
|--|---|---|
| HORIZON O | | |
| <i>Horizon organique (mousses, brindilles, terre végétale...). Bien développé en milieu mal drainé. LFH : Litière, Fibres, Humus</i> | | |
| <p>Horizon fibrique Of <i>Peu décomposé, riche en fibres</i></p> | <p>Horizon mésique Om <i>Intermédiaire</i></p> | <p>Horizon humique Oh <i>Très décomposé, peu de fibres CO* > 15 % (approx. PAF > 30 %)</i></p> |
| HORIZON A | | |
| <i>Horizon minéral ± enrichi en MO</i> | | |
| <p>Ah <i>Fort enrichissement MO, couleur sombre 5 < CO* < 17 % (approx. 2,5 < PAF < 8,3 %)</i></p> | <p>Ae <i>Forte éluviation (c.à.d., lessivage), perte d'argiles (texture grossière), perte de fer (couleur pale, cendrée)</i></p> | |

| | | | | |
|---|--|--|--|---|
| HORIZON B | | | | |
| <i>Horizon minéral enrichi en oxydes Fe, Mn, argiles, ± enrichi en MO</i> | | | | |
| Bh | Bt | Bf-Bm | Bca | Bg |
| <i>Fort enrich. MO, couleur sombre vis-à-vis horizon C</i> | <i>Fort enrich. argile (textures fines, cutanes d'argiles)</i> | <i>Fort enrich. oxydes ; brunification : oxyde Fe CO* < 5 % (approx. PAF < 2,5 %); Al* > 0,1 % (argiles); Al* > 0,3 % (sables); Fe* > 0,3 %</i> | <i>Fort enrichissement en carbonates secondaires</i> | <i>Textures marmorisées, gleyifiées (milieu réducteur mal drainé)</i> |
| HORIZON C | | | | |
| <i>Horizon minéral moins affecté par la pédogénèse</i> | | | | |
| Cg | | Cca | | |
| <i>Gleyfication</i> | | <i>Enrichis en carbonates secondaires</i> | | |

Plusieurs ouvrages de référence sont disponibles décrivant les caractéristiques conventionnelles permettant la classification des sols d'après une terminologie finement codifiée (Lamontagne et Nolin, 1997; Système canadien de classification des sols : ARC, 1998), émanant notamment de recherches en agriculture (cartographie de la favorabilité des sols) et en environnement (contaminations industrielles). La classification en vigueur déterminée par le ministère fédéral *Agriculture et Agroalimentaire Canada* s'accompagne, outre leurs caractéristiques discriminantes, de nombreuses photos standards des différents types de sols utiles à leur reconnaissance sur le terrain. Ces informations sont disponibles en ligne (<http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/intro.html>). Pour finir, notons que la littérature produite en environnement est – paradoxalement – particulièrement pertinente en exploration puisqu'elle aborde les problèmes de la mobilité des métaux dissous, exerçant une influence considérable sur leur transport hydromorphique et leur aptitude à la fixation.

On trouve au Québec essentiellement trois grandes familles de sols (**Figure 3**) : les gleysols, les luvisols, et les podzols qui sont largement dominants. Cette dernière famille est caractérisée par une très forte différenciation des horizons, conséquence d'une acidification intense due au lent développement des acides organiques dans des conditions de très basse température (podzolisation). Un podzol (étym. : du russe, *sous les cendres*) est constitué de la séquence suivante : humus/Ah – Ae – Bf/Bm. Autrement dit, d'un horizon A très éluvié, de couleur blanchâtre et d'aspect cendré, superposé à un horizon B fortement enrichi en (oxy-(hydr-)) oxydes de Fe, Mn ainsi qu'en argile dans certains cas. Ces sols extrêmement différenciés sont facilement reconnaissables (**Figure 4**) par la présence de l'horizon blanchâtre cendré peu épais.

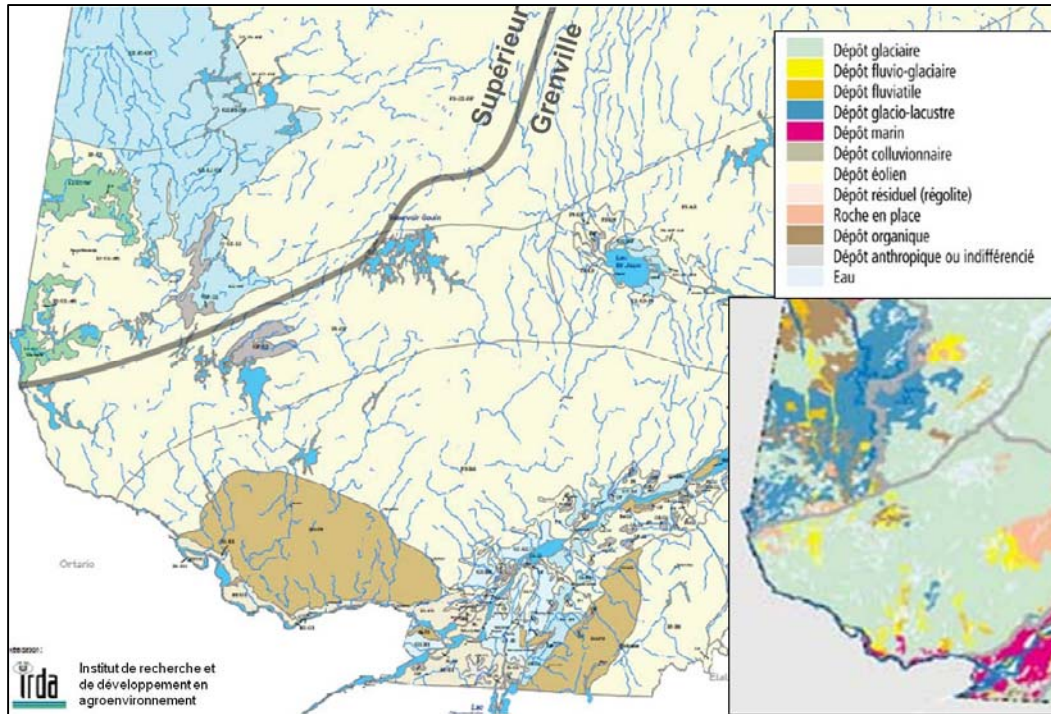


Figure 3. Carte des sols du sud Québécois, opposée à la carte des sédiments glaciaires produite par Veillette et al., (2003). Légendes des sols : bleu = ordre des gleysols; jaune pâle : ordre des podzols; vert : ordre des luvisols; brun : ordre des brunisols.

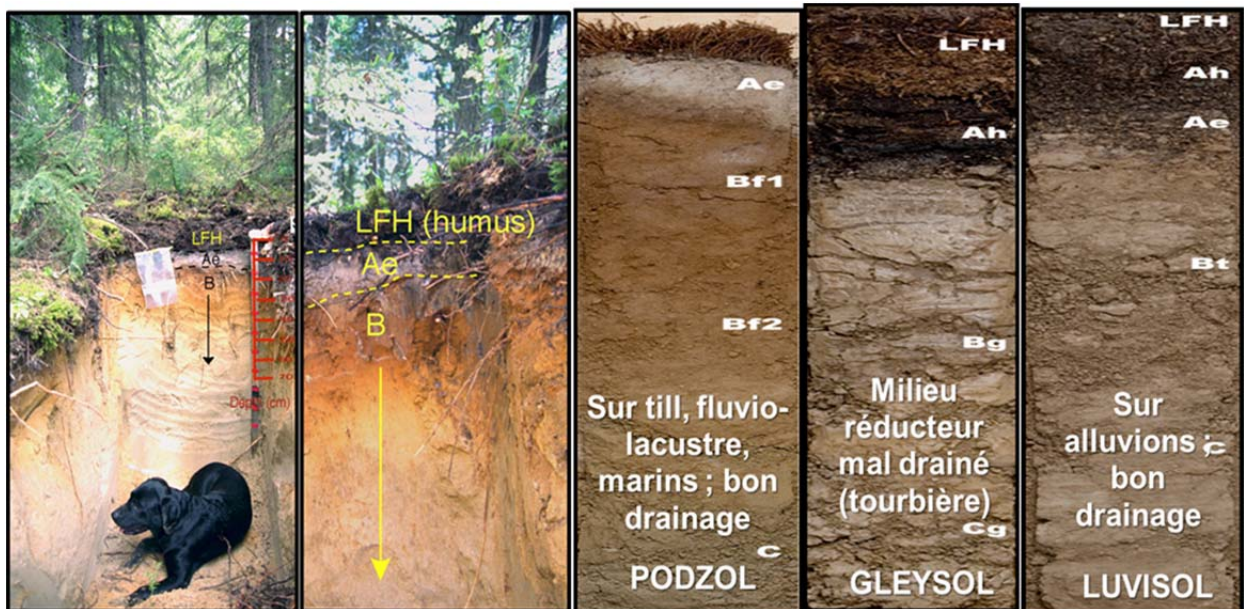


Figure 4. Photos de podzols (gauche et centre : crédits Camiro – Cross Lake), gleysol et luvisol (site web OGS).

Les luvisols et gleysols sont respectivement constitués des séquences suivantes : humus/Ah – Ae – Bt; humus/Ah – Bg – Cg. Les luvisols se forment typiquement dans de bonnes conditions de drainage sur des sédiments alluvionnaires, ils sont représentés essentiellement au SE de la Province du Supérieur

(Figure 3). Les gleysols 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). La différenciation y est très peu prononcée, et l'horizon B au sens classique – enrichi en fer – absent. Ils sont très fréquents en Abitibi, où ils occupent la vaste plaine argilo-glaciaire du lac tardi-glaciaire Ojibway (Figure 3).

On note un très net contrôle des conditions pédogénétiques par la nature glaciaire des sédiments de surface, illustré par la corrélation évidente entre les deux cartes présentées sur la Figure 3. Les podzols occupent ainsi une très grande superficie, dominée par la présence de till.

4 COMPORTEMENT DES METAUX PENDANT LA DIFFERENCIATION DES SOLS

4.1 Métaux primaires vs métaux secondaires

La Figure 5 est une tentative très schématique de représentation des modifications minérales induites par la pédogénèse d'un sédiment glaciaire de type till. La composition de départ (barre inférieure : till) correspond à un till moyen développé à partir de roches ignées intermédiaires, constitué essentiellement de phyllosilicates, quartz, feldspath et, en plus faible proportion, de minéraux ferromagnésiens (amphiboles, pyroxènes). On observe surtout dans les horizons B et C la formation de minéraux secondaires (argiles, oxydes) au détriment des minéraux ferromagnésiens et des feldspaths, ainsi que la déstabilisation des sulfures, principalement par oxydation, tandis que l'or, natif, est peu affecté. On voit que les minéraux de fixation préférentielle des métaux de base libérés dans la phase aqueuse par la déstabilisation des sulfures sont les phyllosilicates (primaires et secondaires), les oxydes (essentiellement secondaires) et dans une moindre mesure les minéraux ferromagnésiens primaires. Dans l'horizon humus-Ah, à forte proportion organique (> 15 % de carbone organique extractible au pyrophosphate de Na), les acides organiques humiques et fulviques forment des complexes très stables avec les métaux secondaires, incluant l'or. La matière organique humifiée est donc un milieu de fixation privilégié de certains métaux en solution.

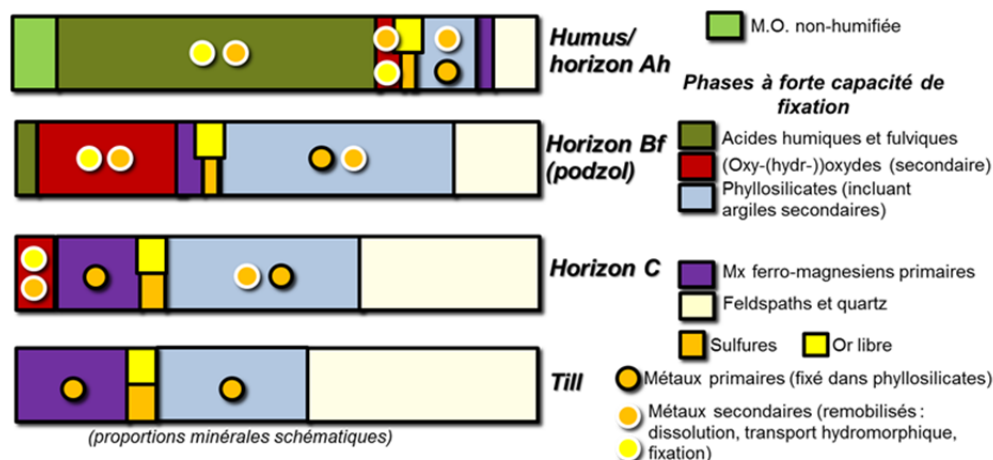


Figure 5. Illustration schématique des proportions minérales des horizons différenciés dans un sol développé sur des sédiments glaciaires (till) et identification des phases comprenant les métaux primaires et secondaires.

Les sols sont donc le lieu d'importantes remobilisations des éléments, opérant une ségrégation chimique entre les horizons différenciés. On distingue globalement des horizons dominés par le lessivage, des horizons dominés par l'accumulation organique, des horizons dominés par l'accumulation inorganique. Le

transfert hydromorphique des métaux de base induit par la déstabilisation des sulfures est illustré par la **Figure 6**. Les horizons de réception métallique, horizons d'accumulation inorganique, sont théoriquement les horizons B et C, principalement du fait de la présence de minéraux secondaires à forte capacité de fixation tels que les argiles (très forte CEC, capacité d'échange cationique, reliée à leur très grande surface spécifique) et les (oxy-(hydr-))oxydes amorphes de fer et manganèse qui contiennent une grande quantité de sites d'adsorption spécifique et non-spécifique.

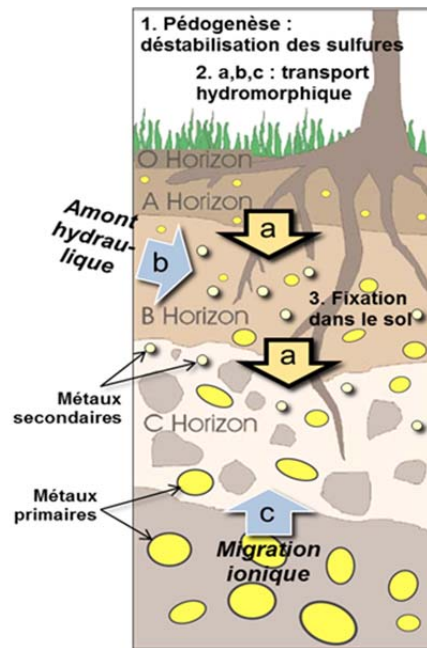


Figure 6. Illustration schématique du comportement des sulfures pendant la pédogenèse.

Par ailleurs, les acides organiques y étant représentés en plus faible proportion (< 5 % de carbone organique extractible au pyrophosphate de Na), l'acidité de l'horizon B est moins forte ce qui diminue la mobilité des métaux dissous et favorise par conséquent leur fixation, par adsorption ou précipitation. Ce comportement est très visible sur les diagrammes Eh-pH, dont l'exemple du cuivre est présenté sur la **Figure 7** : les phases solides (cuprite, cuivre natif, ténorite) sont stables dans des conditions alcalines, et peu oxydantes ou réductrices. L'augmentation du potentiel redox (Eh), ou bien la diminution du pH induit la déstabilisation des phases solides et l'augmentation de la mobilité du cuivre ionique, qu'il soit libre (Cu^+ , Cu^{2+}) ou complexé avec un ligand hydroxyle. Ce comportement est similaire à celui de tous les métaux usuels, à l'exception de quelques uns, rares, dont l'uranium (uraninite instable en conditions alcalines) et le molybdène (mobilité diminue en milieu acide). Le lecteur est référé à Takeno (2005) pour un inventaire des diagrammes Eh-pH.

Rappelons toutefois que l'influence du pH sur la mobilité des métaux dissous s'inverse lorsque ces derniers sont présents sous forme anionique : du fait de leur charge négative, les anions ne sont pas en compétition avec H^+ (l'acidité est une mesure de la concentration de H^+ : $\text{pH} = -\log([\text{H}^+])$). Ceci n'est pas le cas des métaux usuels, qui prennent des formes cationiques excepté le chrome dans certaines conditions. En revanche, c'est le cas de certains traceurs couramment utilisés en exploration, tels que As, W, Sb, Se. L'effet inversé du pH sur ces éléments par rapport aux métaux usuels recherchés est un facteur peu considéré en exploration, pourtant d'importance critique. Cet aspect doit être gardé en mémoire à l'étape de l'interprétation des levés, notamment pour les normalisations par le pH.

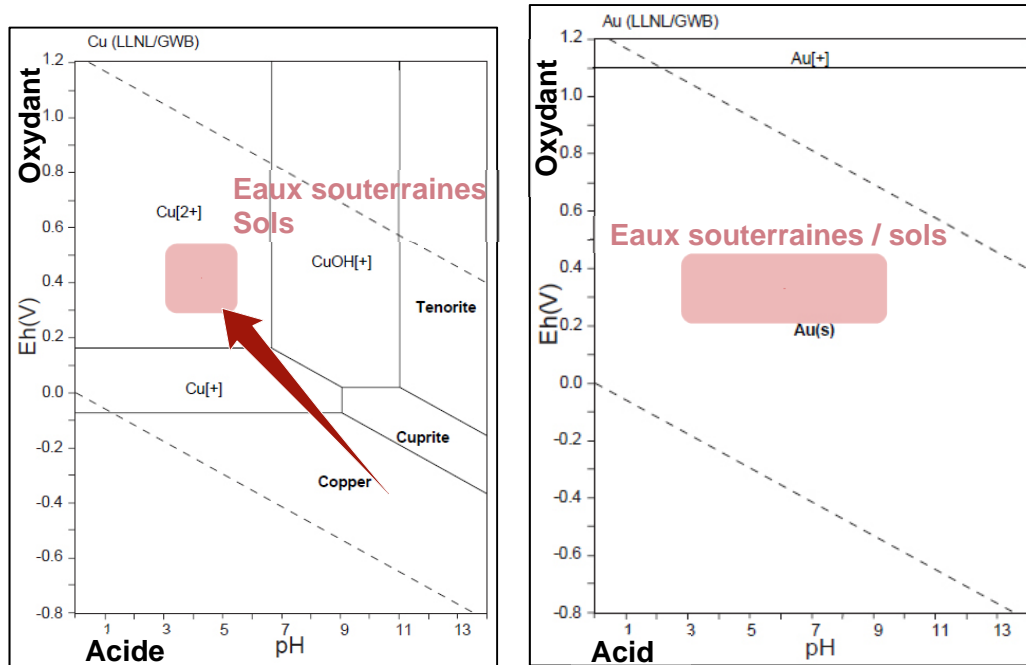


Figure 7. Diagramme Eh-pH de Cu et Au (champs modélisés par Takeno, 2005). Le carré rose indique les conditions courantes des eaux souterraines et des sols. La flèche rouge indique l'augmentation de la mobilité du cuivre (diminution de sa fixabilité).

Il est généralement admis que l'existence d'or ionique est très peu vraisemblable dans les conditions Eh-pH-température standards des eaux souterraines, pour des compositions chimiques standards. Le diagramme établi par Takeno (2005) à partir de réactions modélisées, présenté sur la **Figure 7**, illustre ce fait : l'or natif est extrêmement stable dans les conditions superficielles standards. Certains ligands pourraient toutefois complexer l'or dans des milieux marginaux tels que les milieux sulfatés (oxydation d'un dépôt sulfuré, ligand thiosulfate $S_2O_3^-$) et les milieux hypersalins (ligands Cl_2^- et I_2^-). Pour finir, la présence d'or ionique dans les sols a été détectée par certains travaux récents (Lintern et al., 2009). Bien que la nature du complexe demeure inconnue, elle serait anionique et pourrait impliquer le brome. Ceci expliquerait les très hauts niveaux de base aurifères systématiquement mesurés dans l'humus (voir sections suivantes) : les conditions acides de cet horizon favoriseraient la fixation de l'or anionique.

4.2 Sources des anomalies

La provenance des métaux transportés par hydromorphisme et fixés dans les horizons de réception du sol n'est pas systématiquement locale, *in situ*. Il est possible en effet que les métaux soient transportés sur des distances supérieures (**Figure 6** : flèches bleues), soit par écoulement souterrain ou ruissellement de surface, soit par migration verticale depuis une source enfouie. Ce dernier point demeure toutefois énigmatique et mal contraint d'un point de vue fondamental (cf. projet 2010-07 : Rafini, 2010).

Il est donc possible, et probablement courant, que des anomalies métalliques soient transportées depuis des anomalies préexistantes dans l'environnement secondaire, situées en amont hydraulique ou topographique. D'une manière générale, la localisation du dépôt-source d'où émane une anomalie détectée dans le sol n'est pas triviale, le transport métallique pouvant se produire en plusieurs étapes, successivement clastique et hydromorphique. Un exemple bien documenté d'une anomalie mesurée dans les sédiments glaciaires, située en amont glaciaire mais en aval topographique et hydraulique de la source nous est donné par le gîte de Nama Creek, Ontario (Kettles et al., 1998). Dans ce cas, la localisation du gîte vis-à-vis de l'anomalie démontre que celle-ci a été transportée par hydromorphisme, et non par écoulement glaciaire.

La détermination de la nature primaire ou secondaire des métaux constituant l'anomalie est d'une certaine aide pour l'identification des dépôts-source. En effet, une anomalie formée par des métaux primaires dans les sédiments glaciaires est inévitablement issue du transport clastique relié aux phénomènes glaciaires. On cherchera dans ce cas à remonter cette (ou ces) dispersion(s) glaciaire(s) afin de découvrir la source. Cette évidence n'est plus valable pour un signal métallique secondaire. Le ratio de métaux primaires/secondaires peut procurer certains indices puisque la coexistence d'anomalies primaire et secondaire stipule des remobilisations *in-situ*, impliquant donc la préexistence d'une anomalie primaire, dont la source sera alors située en amont glaciaire. La provenance d'une anomalie uniquement secondaire est plus difficile à identifier, et impose de déterminer si celle-ci découle d'une anomalie primaire préexistante ou émane directement du dépôt-source.

Le caractère primaire ou secondaire d'un signal métallique est assez efficacement établi par l'approche des extractions faibles et sélectives (SWE : *selective and weak extraction*) versus acides forts. Les premières ciblent typiquement le signal secondaire, tandis que les deuxièmes extraient sensiblement tous les métaux présents dans le sol (métaux de base et précieux). Le rapport entre les deux (typiquement : Σ extractions sélectives/aqua regia) donne la proportion de métaux primaires, aussi appelés métaux résiduels. Ces aspects sont approfondis plus loin dans ce texte, dans la section consacrée aux méthodes d'extraction. Pour un inventaire avancé des répartitions métalliques primaires/secondaires dans le sol, voir Deschênes et al., (2006).

4.3 Profils de concentration et ségrégation des métaux dans les horizons différenciés

Les profils de concentration résultants de ces transferts d'éléments dans le sol sont extrêmement spécifiques à chaque métal, conditionnés par la stabilité des phases primaires comprenant le métal, par sa mobilité une fois libéré et ses affinités avec les phases minérales présentes.

Les travaux s'intéressant à ces profils verticaux de concentrations métalliques dans les sols sont extrêmement rares, la recherche environnementale et agricole étant davantage ciblée sur les horizons organiques supérieurs – Ah et humus – où se produit l'activité biologique. Klassen (2003) a entrepris un vaste programme de reconnaissance des comportements-types des métaux courants, parallèlement à une description très détaillée des faciès glaciaires successifs sur les profils verticaux, aux différentes stations échantillonnées. Les échantillons sont pris sur des intervalles de 5 cm, jusqu'à des profondeurs métriques à pluri-métriques, puis analysés par ICP-ES. Les sédiments sont des tills et des sédiments glaciolacustres, et les sols essentiellement des podzols. L'auteur établit en conclusion plusieurs profils-

types déterminés par la nature du mécanisme dominant affectant le métal considéré, lors de la pédogénèse, dont il définit cinq familles : 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 pédogénèse). La **Figure 8** présente les principaux résultats de cette étude. On voit que les profils de Cu et Ni sont principalement affectés par le lessivage minéral des horizons supérieurs, tandis que Pb, Cr, Zn, Cd 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 effectivement 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 éluvié Ae.

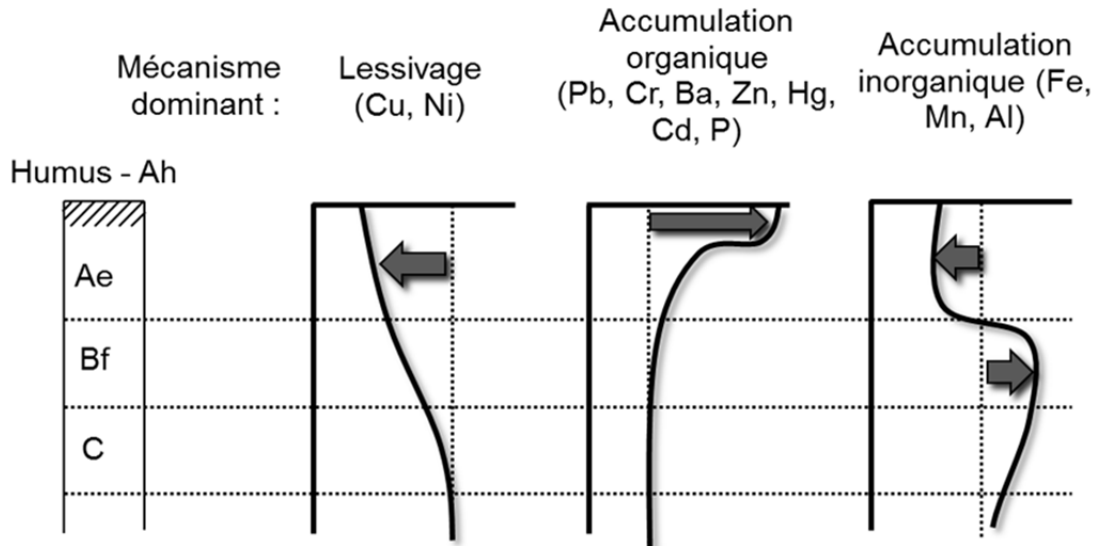


Figure 8. Profils de concentration obtenus par Klassen (2003) à partir de relevés verticaux aux 5 cm effectués sur plus de 30 stations réparties dans l'Est canadien.

5 LES ACIDES FORTS

5.1 Caractéristiques

Les méthodes de digestion communément réunies dans la catégorie des acides forts sont des mélanges de HCl, HNO₃, HFB₄ et HF bien que ce dernier ne soit pas *sensu stricto* un acide fort. Un acide fort est un acide qui se dissout intégralement, autrement dit dont tous les ions H⁺ vont être libérés, et ainsi diminuer d'autant le pH de la solution.

On distingue les mélanges d'acides produisant des extractions non-totales, dont les concentrations sont reconnues sous la dénomination « *acid extractables* », des mélanges dits de concentration totale (Yafa et Farmer, 2006). La première catégorie consiste en un mélange de HCl et HNO₃ en proportions variables. L'aqua regia correspond à la proportion 3:1 tandis que l'HNO₃ classique est 0:1. L'aqua regia est une digestion à chaud (2 heures à 90°-100°C), standardisée par la norme ISO11466. À noter que les proportions du mélange affectent peu les pourcentages de récupération pour la plupart des métaux incluant Co, Cu, Mn, Zn, Pb, mais ont un effet marqué sur Fe (Snäll et Liljefors, 2000). En revanche, pour l'acide nitrique (HNO₃), la concentration de l'acide a un très fort impact sur les taux de récupération qui varient pour certains éléments d'un facteur 3 (Snäll et Liljefors, 2000). Les digestions *multi-acides* proposées par les laboratoires entrent dans la catégorie des extractions dites de concentration totale, et sont produites par l'ajout de HF, et éventuellement HBF₄ ou HClO₄.

Les écarts entre les taux de récupération par aqua regia vs multi-acides sont négligeables pour la plupart des métaux, notamment pour les métaux de base et précieux, ceux-ci étant principalement compris dans des minéraux dissous par les mélanges de la première catégorie, et font donc partie des éléments « *acid extractable* ». Les sulfures et l'or sont sensiblement totalement dissous par l'aqua regia (trad. française : *eau régale*, royale). La différence se fait surtout sentir pour les éléments compris en grande proportion dans les phases très inertes, tels que certains aluminosilicates, les chromites, spinelles chromifères, autrement dit pour certains majeurs (K, Al, Ti), le chrome et le barium. Il peut donc y avoir un biais analytique pour certaines méthodes de rehaussement impliquant les majeurs K ou Al (voir sections suivantes).

La note 8 de la norme ISO11466 décrivant la méthode aqua regia stipule que sa capacité de digestion est significativement atténuée par la présence de matière organique en forte proportion (carbone organique extractible au pyrophosphate > 16 %), la capacité oxydante de la solution étant alors saturée. Les taux de récupération seront significativement diminués dans les échantillons dépassant ce seuil. Ces conditions sont presque systématiques dans l'humus-Ah. Il est donc important de vérifier, si le laboratoire a procédé à une extraction par aqua regia dans cet horizon – ce qui est pratique courante, la façon dont ce problème a été traité. En effet, une façon commune est de procéder au préalable à une calcination à 500 °C (c.-à-d., matière organique désintégrée). Il y a alors risque de volatilisation de certains éléments incluant Au, As, Br, Hg, Cd... Cet aspect doit être discuté avec le laboratoire.

La présence de carbonates en forte concentration a aussi pour effet de diminuer la capacité d'extraction des solutions acides, par neutralisation. Il est donc important de vérifier la présence de biais analytique dans les échantillons fortement carbonatés et, le cas échéant, corriger ce biais.

Les tamis couramment proposés par les laboratoires pour les horizons humus, B et C sont de 2 mm, 177 ou 63 microns. Des écarts significatifs entre les taux de récupération par aqua regia pour ces différentes granulométries d'échantillons sont rapportés dans la littérature (Snäll et Liljefors, 2000), principalement liés au fait que l'efficacité de la digestion est proportionnelle à la surface de contact des grains. Par ailleurs, les proportions minérales sont variables d'une fraction granulométrique à l'autre : la fraction argileuse est plus riche en phyllosilicates, par conséquent plus concentrée en métaux (niveau de base plus élevé). Il en résulte un biais analytique évident entre les échantillons tamisés à différentes mailles, c'est là un paramètre à surveiller.

Ces observations imposent une certaine prudence lors des interprétations combinant plusieurs campagnes de levés de sols. Les protocoles utilisés par les différentes campagnes doivent être comparés, et au besoin les résultats corrigés en fonction des fractions granulométriques analysées, et des procédés analytiques utilisés.

5.2 Nature des signaux mesurés par acides forts vs par extractions sélectives dans les sols

La **Figure 9** présente une synthèse schématique des phases minérales dissoutes par différentes méthodes d'extraction sélective et par acides forts, ainsi que la proportion de métaux primaires et secondaires dans ces phases.

Ces informations permettent, en combinaison avec celles présentées sur la **Figure 5**, d'établir une charte des méthodes analytiques utilisables dans les différents horizons du sol, et de la nature primaire et/ou secondaire du signal métallique obtenu (**Figure 10**). Notons qu'une telle charte n'a jamais été produite, et demeure relativement théorique à ce stade.

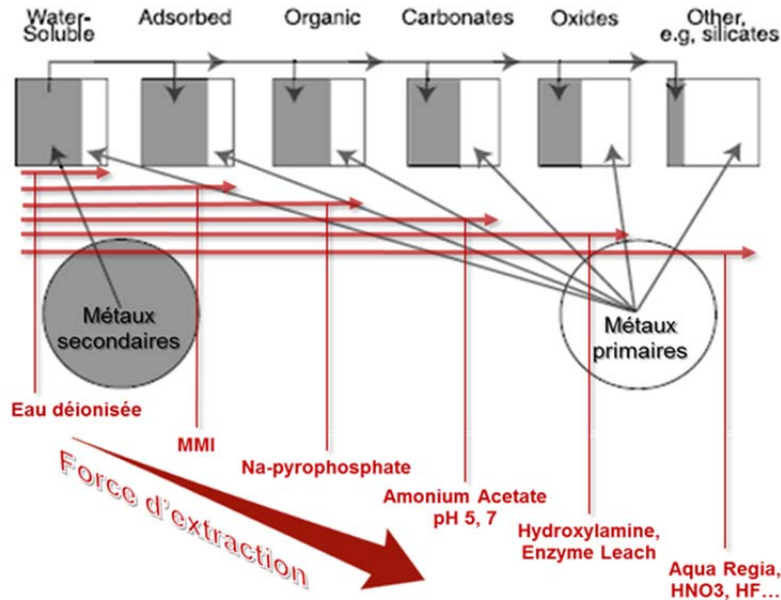


Figure 9. Répartition schématique des métaux primaires et secondaires dans les phases du sol; caractérisation des phases théoriquement attaquées par différents procédés d'extraction sélective et par acides forts (aqua regia, HNO₃, HF...). Modifié de Cameron et al., 2004.

| | Métaux secondaires | Métaux primaires et secondaires |
|------------------|---|---|
| Ae Humus | Pyrophosphate Na Métaux fixés sur humus | Aqua regia, HNO₃ Métaux fixés sur humus et phyllosilicates +/- oxydes Fe-Mn |
| Horizon B | Hydroxylamine hydrochloride Enzyme Leach Métaux fixées sur oxydes Mn-Fe MMI Ions métalliques mobiles | Aqua regia, HNO₃ Métaux fixés sur oxydes Fe-Mn et phyllosilicates +/- carbonates |
| Horizon C | Hydroxylamine hydrochloride Enzyme Leach Métaux fixées sur oxydes Mn-Fe MMI Ions métalliques mobiles | Aqua regia, HNO₃ Métaux fixés sur oxydes Fe-Mn et phyllosilicates |

Figure 10. Charte d'utilisation des méthodes courantes d'extraction-digestion dans les sols, nature du signal métallique ciblé.

6 ANALYSE STATISTIQUE DES TENEURS METALLIQUES DANS LES HORIZONS DE SOLS

DIFFERENCIÉS : CONCENTRATIONS MOYENNES ET ANOMALES

Au terme de la première phase de ce projet, axée sur l'acquisition du bagage fondamental et de l'état des connaissances actuelles, ce projet de recherche s'est orienté sur une investigation des teneurs obtenues sur le terrain en conditions normales *versus* anormales, dans les trois horizons fréquemment échantillonnés que sont l'humus-Ah, et les horizons B et C. Ceci d'un point de vue statistique, c'est-à-dire sur un grand nombre d'observations. Ce travail vise un double objectif :

- 1) Comparer, à partir d'une compilation de plusieurs levés, les niveaux de bases en métaux de base et or entre ces trois horizons, autrement dit définir les profils de distribution normaux, et vérifier leur constance sur plusieurs levés;
- 2) Procéder au même exercice en conditions *a priori* anormales, c'est-à-dire à proximité des gîtes, afin de déterminer le ou les horizons produisant la plus forte restitution d'une anomalie sous-jacente compte-tenu des différences de niveaux de base, autrement dit le plus fort facteur d'amplification.

Il sera alors possible de déterminer le(s) horizon(s) à échantillonner pour un levé optimisé, et ce pour différentes substances.

6.1 Description des données utilisées

Les données requises pour ce travail doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- échantillonnage de plusieurs horizons sur une même station;
- données détaillées sur les procédés de préparation (tamisage), d'extraction (digestion) et de mesure des éléments;
- données détaillées sur la nature sédimentaire des échantillons;
- données localisées à proximité et à distance de minéralisations caractérisées.

La recherche de données a été axée sur les études expérimentales produites par les organismes géologiques gouvernementaux (OGS, CGC, MRNF), relevant du domaine public, puisque les compagnies d'exploration ne pratiquent pas d'échantillonnage multi-horizons à station fixe, sauf exception.

Les analyses multi-horizons effectuées sur 2 909 stations ont été compilées. Il s'agit exclusivement des travaux de l'OGS (**Tableau 2**) issus de 8 levés répartis sur le territoire ontarien (**Figure 11**). Deux de ces levés ont été particulièrement exploités dans le cadre de ce projet :

- Le MRD015 (Bernier et Kaszycki, 1995), dans le secteur de Timmins, à l'occasion duquel 805 stations ont été analysées dans les trois horizons. Les analyses sont faites par aqua-regia – ICP, les échantillons sont 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. L'or n'est pas analysé. Le domaine investigué couvre approximativement 10^4 km² et comprend plus de 70 gîtes ou indices en métaux de base. Il est composé des terrains archéens de la ceinture de roches vertes Swaize, couramment interprétée comme l'extension SO de l'Abitibi.
- Le MRD061 (Bajc et Hall, 2000) couvre une superficie de 2 000 km² sur le flanc nord du bassin de Sudbury. Il totalise 373 stations avec un échantillonnage sur les trois horizons (tamis identiques au MRD015). Les sédiments sont des tills locaux. L'or est analysé par aqua regia – ICP avec préconcentration par Fire Assay.

Tableau 2. Données utilisées dans cette étude (MRD : *Miscellaneous Data Release*). Ces données proviennent de l'OGS.

| 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 |

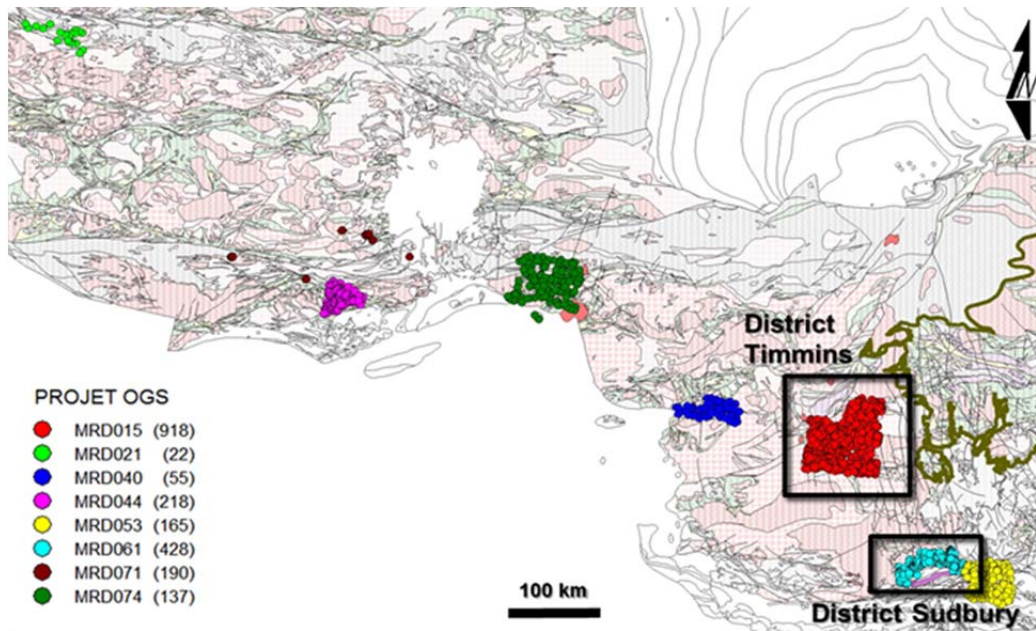


Figure 11. Répartition géographique des levés utilisés dans cette étude (carte géologique et localisation des points : OGS). Les deux levés encadrés sont ceux exploités plus en détail (voir texte).

6.2 Métaux de base

Une étude approfondie des concentrations de sols en métaux de base a été réalisée avec les données de la MRD015. Les stations ont été séparées en groupes dépendamment de leur proximité avec un gîte ou indice connu, au moyen de 4 zones tampons tels que présentées à la **Figure 12**.

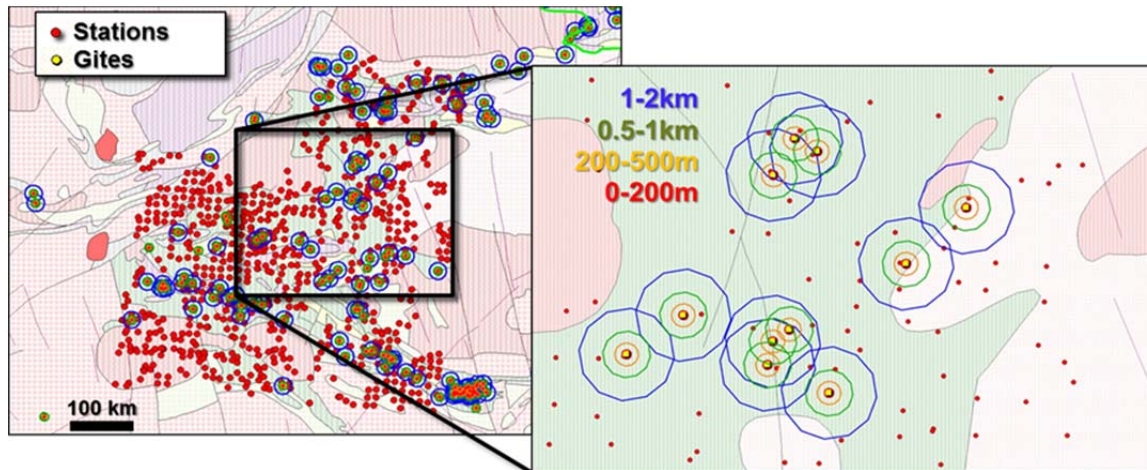


Figure 12. Localisation des 805 stations du levé de Bernier et Kaszycki (1995), et des gîtes (tous métaux de base confondus). Les gîtes sont localisés au centre des cercles (*zones tampons*).

Cette approche permet une comparaison statistique des teneurs métalliques à plusieurs distances des gîtes, par conséquent en contexte normal (niveaux de base) et anomal, dans les horizons humus-Ah, horizon B et horizon C.

Les résultats sont illustrés, pour le cuivre, sur la **Figure 13**, sous la forme de *boxplots* montrant les données statistiques (25^{ème}, 50^{ème} et 75^{ème} centile) des différents groupes : l'intervalle 0-200 m qui compte 30 stations (9 gîtes), l'intervalle 200-500 m qui compte 39 stations (16 gîtes), l'intervalle 0,5-1 km qui compte 51 stations (23 gîtes), l'intervalle 1-2 km qui compte 96 stations (42 gîtes), tandis que 608 stations sont situées à plus de 2 km d'un gîte et permettent ainsi de déterminer des teneurs métalliques *normales* dans les différents horizons. **Il apparaît clairement sur ce diagramme que l'horizon C est celui présentant la plus forte amplification des teneurs en Cu à proximité des minéralisations cuprifères**, laquelle est statistiquement optimale à moins de 1 000 m des gîtes. Ceci est visible tant sur les valeurs brutes (diagramme de gauche) que normalisées par la médiane (diagramme de droite) qui est établie, pour chaque horizon, par le signal *normal*, autrement dit le niveau de base donné par les 608 stations situées à plus de 2 km des minéralisations. On voit sur le diagramme normalisé que la médiane proche des minéralisations connues (< 200 m) est augmentée approximativement d'un facteur 6 par rapport au niveau de base. **L'humus présente de très faibles valeurs tant à distance qu'à proximité des minéralisations. Les fortes teneurs relatives en Cu dans cet horizon ne montrent aucune corrélation significative avec les gîtes et indices cuprifères caractérisés, aucune amplification du signal n'est observée.** La légère amplification du signal observé au sein de l'horizon B, particulièrement dans les tranches 200 – 500 m dénote un certain potentiel, toutefois nettement moins prononcé que pour l'horizon C.

Cette manipulation a été reproduite, à partir du même levé, pour le zinc, le plomb et le nickel, en plus du cuivre. Les médianes des teneurs métalliques des stations *distantes* et *proches* des gîtes et indices pour les substances concernées sont présentées et comparées sur la **Figure 14**. Les profils de niveaux de base obtenus pour ces quatre métaux de base corroborent très bien les résultats de Klassen (2003) établis sur une plus grande variété de secteurs géographiques (voir section 4, **Figure 8**), 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 et du plomb sont au contraire marqués par l'accumulation organique (très forte augmentation des teneurs dans l'humus). Ceci pourrait dénoter une grande affinité de ces deux éléments avec la matière organique humifiée, ou encore une meilleure fixation en milieu acide et relativement réducteur... ce qui peut paraître paradoxal étant donné que leur mobilité, déjà très grande en comparaison à Cu et Ni, en sera accrue.

Ce résultat trouve une excellente généralisation sur les autres levés contenant des analyses multi-horizons, comme l'indique la **Figure 15**. On voit en effet que les données mesurées tant dans le NO de l'Ontario (MRD071) que dans le bassin de Sudbury (MRD061) présentent les mêmes types de profils que ceux obtenus dans le district de Timmins (MRD015) et dans les données de Klassen (2003) présentées sur la **Figure 8**. Il s'agit donc de comportements relativement universels, à tout le moins dans les sols différenciés (podzols), autrement dit dans les tills glaciaires de manière quasi-systématique.

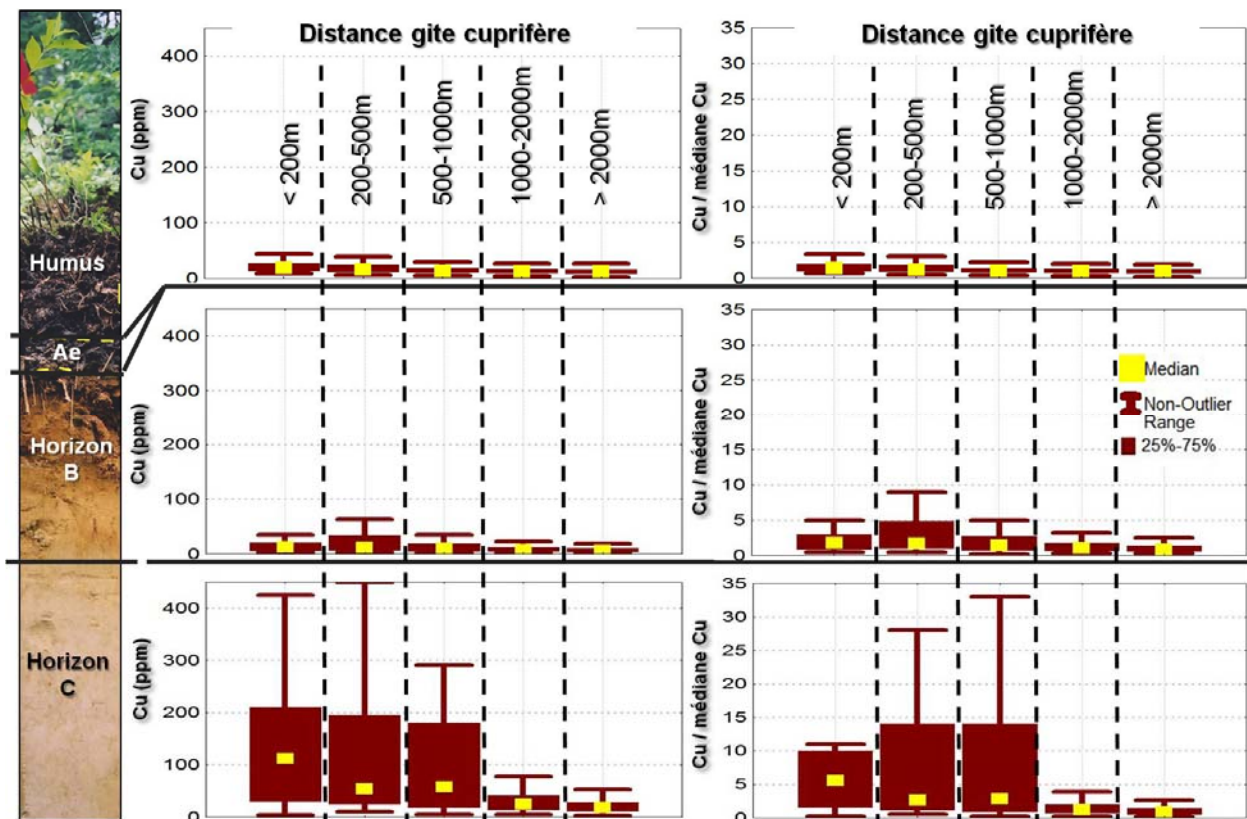


Figure 13. Valeurs statistiques des concentrations en Cu à différentes distances des gîtes et indices cuprifères, établies sur une population totale comprenant plus de 800 stations (90 gîtes et indices).

En dépit de ces différences de profils des niveaux de base, il apparaît très clairement sur la **Figure 14** 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. 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.

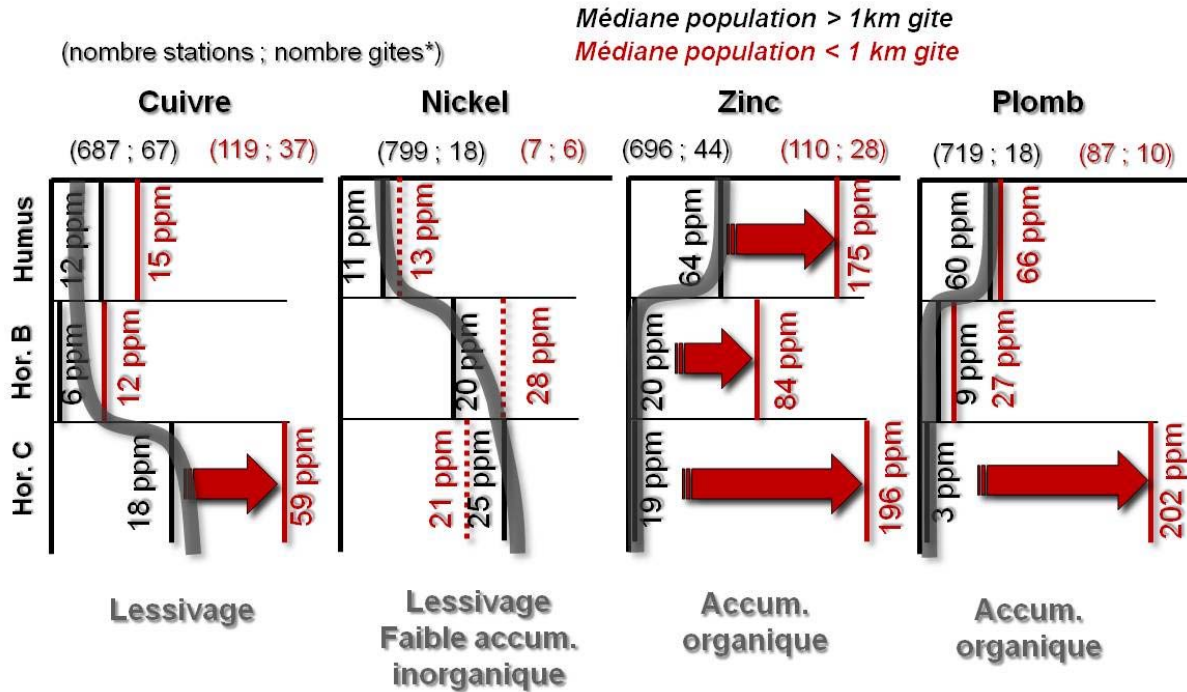


Figure 14. Comparaison des médianes des populations *proches* et *distantes* des gîtes, dans les trois horizons du sol. Les courbes en trait gras épais transparent de couleur grise montrent les profils *normaux* (niveaux de base), tandis que les flèches rouges marquent l'amplification des signaux à proximité des gîtes et indices. *gîtes – et indices – sélectionnés par substance analysée dans le sol. Le nombre de stations est indiqué au-dessus de chaque profil, ainsi que le nombre de gîtes échantillonnés à moins de 1 km.

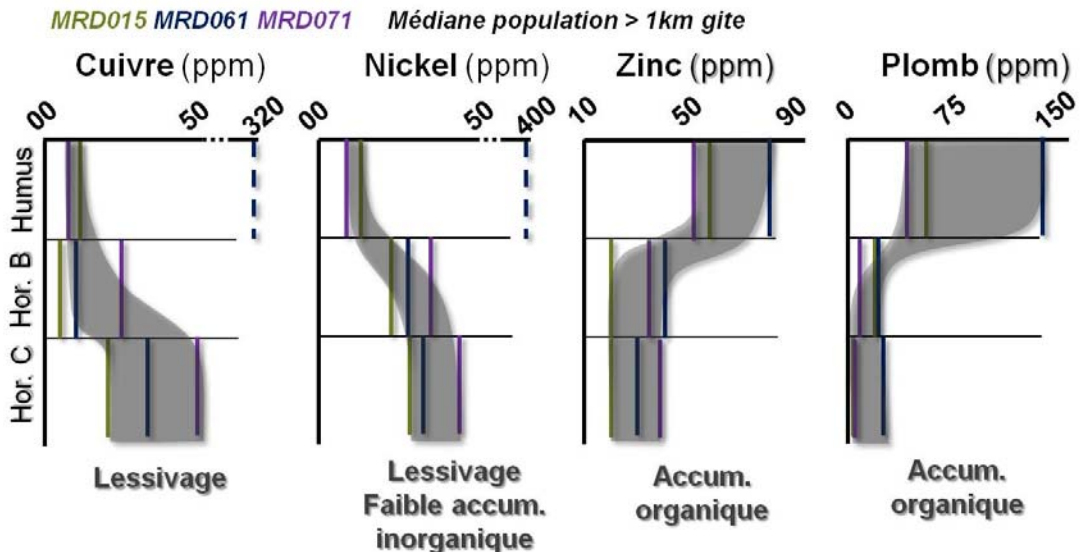


Figure 15. Profils de concentrations métalliques obtenus sur trois levés effectués dans des secteurs différents (MRD015 : district de Timmins; MRD061 : bassin de Sudbury; MRD071 : NO de l'Ontario).

6.2.1 Instabilité du signal métallique dans l'humus

6.2.1.1 Contamination aérienne

Des cas de contamination aérienne de l'humus dans les régions industrialisées ainsi qu'à proximité des axes routiers et ferroviaires sont communément rapportés dans la littérature (p.ex., Delmas-Gardas, 2000). Dans les régions minières où sont implantées des fonderies, ces contaminations sont mesurées sur de très grandes distances. Les travaux de McMartin et al. (2000) dans la région de Flin-Flon rapportent en effet des teneurs anormales en Cu et Zn dans l'humus jusqu'à une centaine de kilomètres de la fonderie, dans la direction des vents dominants.

Ce type de contamination est visible sur les données de la MRD061 et de la MRD053, investiguant toutes deux le bassin de Sudbury (**Figure 16**). En effet, les stations d'échantillonnage de ces levés sont toutes situées à moins de 60 km de l'une des trois fonderies de la région, dont les activités combinées se sont étendues sur presque un siècle (Bajc et Hall, 2000). Le diagramme binaire bilogarithmique (**Figure 16**, gauche) opposant les teneurs en Cu dans l'humus et dans l'horizon C indique clairement une augmentation anormale de toutes les teneurs obtenues dans ces deux levés par rapport aux quatre autres considérés. Il est intéressant de noter que l'horizon C n'est pas sensiblement contaminé, avec une médiane à 30 ppm contre 33 ppm pour l'ensemble des levés. Autrement dit, la pénétration des contaminants aériens par hydromorphisme vertical demeure faible et n'atteint pas l'horizon inférieur du sol.

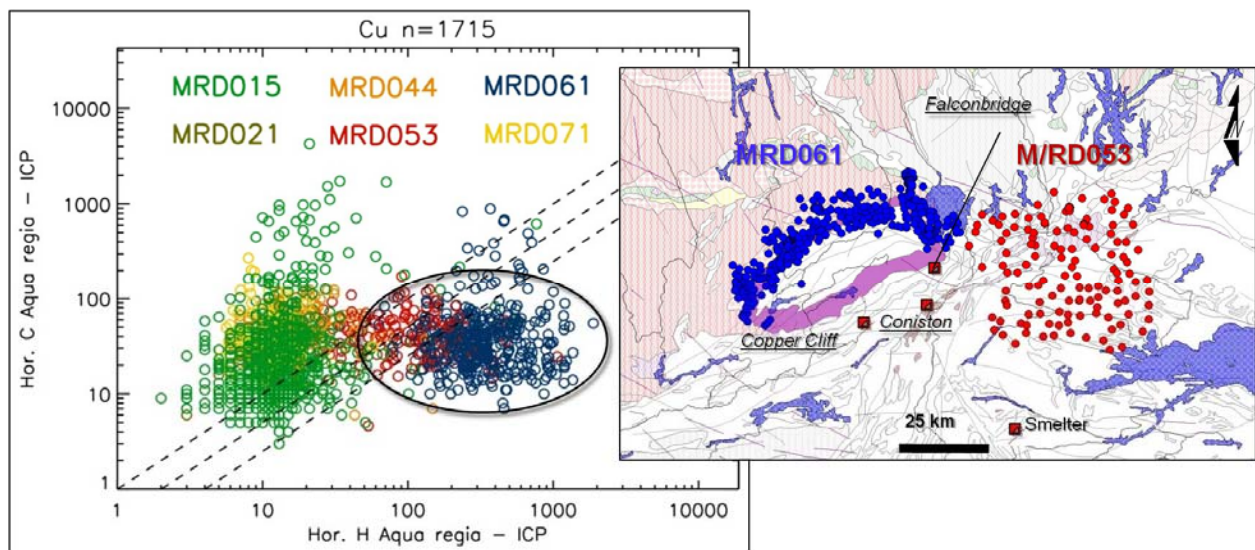


Figure 16. Contamination cuprifère visible de l'humus dans le bassin de Sudbury, reliée à la proximité des fonderies de Falconbridge, Coniston et Copper Cliff.

6.2.1.2 Reproductibilité et influence des conditions météorologiques

Les données permettant d'apprécier la stabilité temporelle des signaux métalliques dans l'environnement secondaire sont, d'une manière générale, très rares. Cet aspect mérite pourtant d'être mieux contraint, en particulier dans les sols puisque de fortes variations du taux d'humidité y ont lieu, associées à l'infiltration des eaux météoriques et aux battements de la nappe phréatique. D'autre part les cycles saisonniers devraient s'accompagner de variations des conditions physico-chimiques des sols (redox, pH, température). L'influence des conditions météorologiques et saisonnières sur les concentrations métalliques dans le sol demeure très peu analysée, et méconnue.

La compagnie d'exploration *Ressources d'Arianne* a réalisé en 2007 des tests de reproductibilité des analyses métalliques dans l'humus, où les variations, le cas échéant, devraient être les plus fortes étant donné la position superficielle de cet horizon. Le levé s'est déroulé à deux différentes périodes : l'une marquée par une pluviométrie nulle, des conditions chaudes et sèches (7-25 juin) tandis que l'autre correspond à un temps très pluvieux continu (après le 14 juillet).

Une portion de 400 m de la traverse effectuée en juin a été ré-échantillonnée pour l'or en juillet (**Figure 17**). La reproductibilité des analyses est sensiblement nulle. Par ailleurs, la reproductibilité a été testée sur une anomalie ponctuelle (cercle rouge sur la **Figure 17**). Celle-ci n'est pas extrêmement haute (36 ppb) mais elle est formée par deux échantillons juxtaposés à 25 m l'un de l'autre. Ici encore, la reproductibilité de l'anomalie est nulle : 19 échantillons ont été pris après le 14 juillet dans un rayon de 10 m centré sur l'anomalie, tous sont en dessous du seuil de détection (5 ppb). Notons que cette absence de reproductibilité est causée par les conditions météorologiques et/ou par l'effet pépîte.

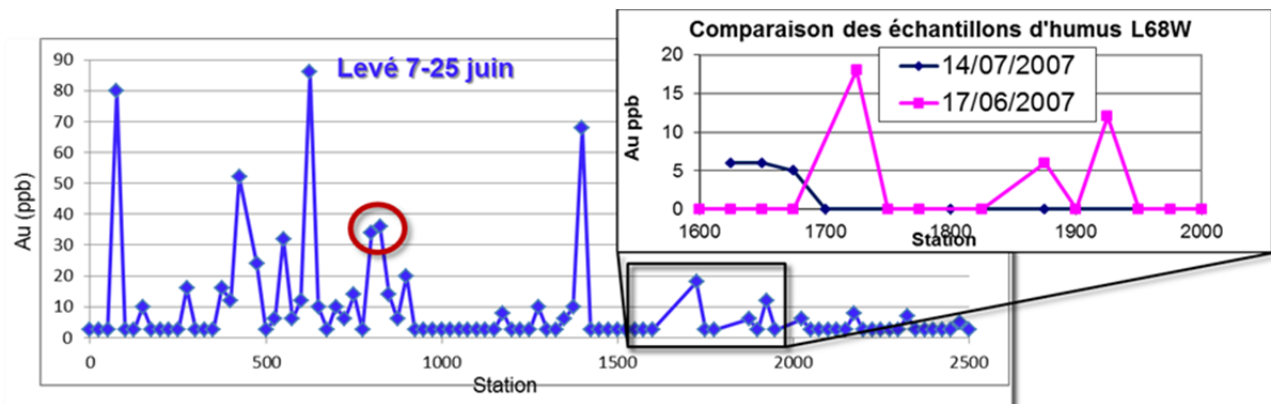


Figure 17. Test de reproductibilité des analyses aurifères sur un tronçon de traverse, et sur une anomalie ponctuelle (données *Ress. d'Arianne*).

Pour les autres éléments, le test de reproductibilité, effectué sur le même tronçon de traverse que précédemment, est aussi très peu concluant. Les corrélations sont extrêmement faibles pour tous les métaux de base (**Figure 18**), avec des valeurs de R^2 respectivement à 0,04, 0,09 et 0,11 pour Zn, Cu et Ni.

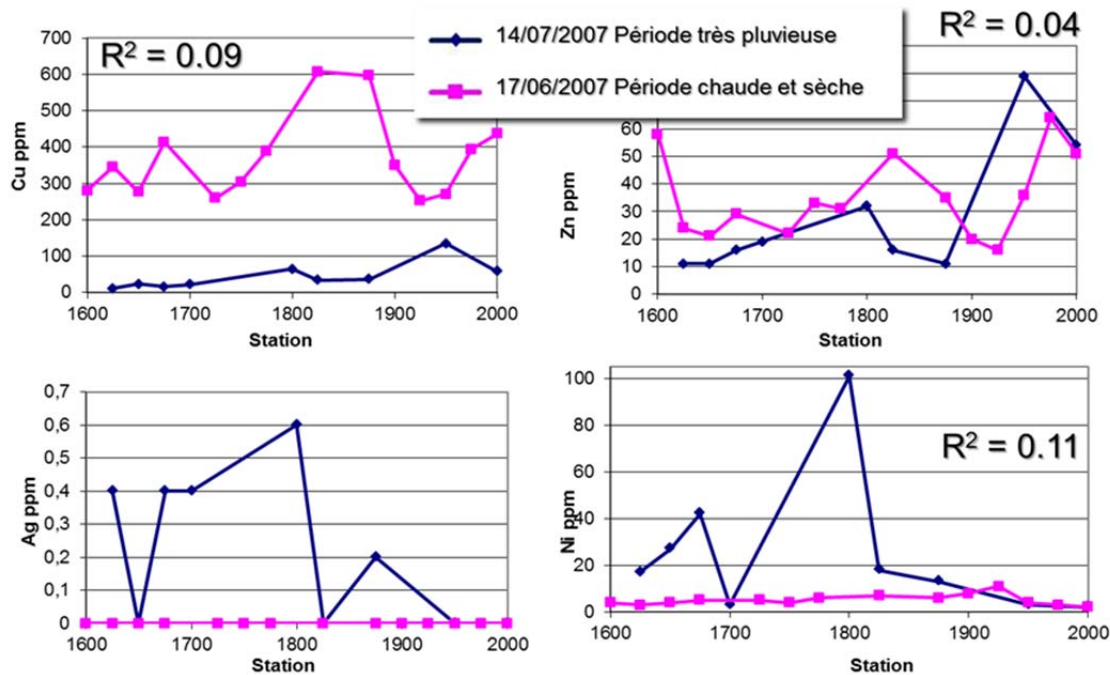


Figure 18. Test de reproductibilité des analyses en métaux de base et Ag sur le même tronçon de traverse que précédemment (données *Ress. d'Arianne*).

À première vue, une telle instabilité du signal métallique peut sembler surprenante pour des échantillons digérés par aqua-regia. En effet, comme nous l'avons évoqué plus haut, l'aqua-regia procure des concentrations sub-totales, constituées *a priori* des signaux primaires **et** secondaires puisque sensiblement tous les métaux de transition compris dans l'échantillon seront digérés et mesurés. Par définition, le signal primaire est plus stable que le signal secondaire (voir plus haut) : le signal primaire, encore appelé signal résiduel, est composé des métaux les moins mobiles situés dans les phases minérales les plus inertes, résistantes à l'altération, tandis que les métaux secondaires ont été libérés puis refixés par des liaisons relativement labiles, plus sensibles aux conditions pH, Eh, température, taux d'humidité, etc. L'instabilité du signal métallique dans l'humus, possiblement relié à des conditions météorologiques contrastées, peut donc être interprétée comme l'expression d'une forte dominance des métaux secondaires dans cet horizon. Le signal primaire devrait en effet être très faible étant donné la très faible composante minérale de l'humus, largement dominé par les acides humiques et fulviques, connus pour être d'excellents fixateurs métalliques.

On remarque sur le **Tableau 3** que les coefficients de corrélation R^2 sont globalement légèrement moins faibles pour les éléments les plus immobiles, tels Ti, Al, Fe, que pour les éléments mobiles. Cette observation suggère que l'instabilité du signal métallique dans l'humus relève bel et bien de perturbations reliées à du lessivage consécutif aux fortes pluviométries, affectant davantage les éléments mobiles.

Tableau 3. Valeurs des coefficients de corrélation R^2 entre les signaux obtenus en juin et en juillet sur le même tronçon de traverse, pour différents métaux mobiles et peu mobiles.

| Éléments peu mobiles | | Éléments mobiles | |
|----------------------|-------|------------------|------|
| Fe | 0,37 | Na | 0,09 |
| Ti | 0,25 | Ba | 0,02 |
| Mn | 0,015 | Mg | 0,09 |
| Al | 0,17 | Ca | 0,33 |
| Ni | 0,11 | Zn | 0,04 |

Une telle expérimentation n'a jamais été conduite dans les horizons B et C du sol. Toutefois, ceux-ci étant *a priori* composés d'une portion considérable de métaux primaires, plus stables, on peut y pronostiquer une plus grande stabilité du signal métallique.

Pour conclure, ces résultats démontrent que le signal métallique de l'humus est très instable, fortement affecté par les contaminations aériennes tant que par les changements de propriétés physico-chimiques du sol inhérentes aux variations des conditions météorologiques.

6.2.1.3 Corrélations avec les minéralisations

La **Figure 19** présente une compilation des analyses en Zn par aqua-regia + ICP pour tous les levés introduits au début de ce chapitre. Au total 1 716 stations ont été échantillonnées dans l'humus **et** dans l'horizon C. On retrouve ici le niveau de base nettement plus haut dans l'humus, tel qu'évoqué précédemment (**Figures 14 et 15**). La médiane est en effet deux fois plus haute dans l'humus. Ce décalage est aussi visible pour le seuil d'anomalie. Le cadre noir indique les stations anormales dans l'humus **et** dans l'horizon C. Le cadre bleu indique le champ des stations anormales seulement dans l'humus, tandis que le violet celui des stations anormales seulement dans l'horizon C. Il est très intéressant ici de constater que les stations anormales seulement dans l'humus (cadre bleu) ne présentent aucune corrélation spatiale avec les gîtes ou indices zincifères connus, toutes étant localisées à plus de 2 km d'un gîte ou indice. La quasi-totalité des stations anormales dans l'humus ayant une corrélation avec un gîte ou indice zincifère sont aussi anormales dans l'horizon C (cadre noir).

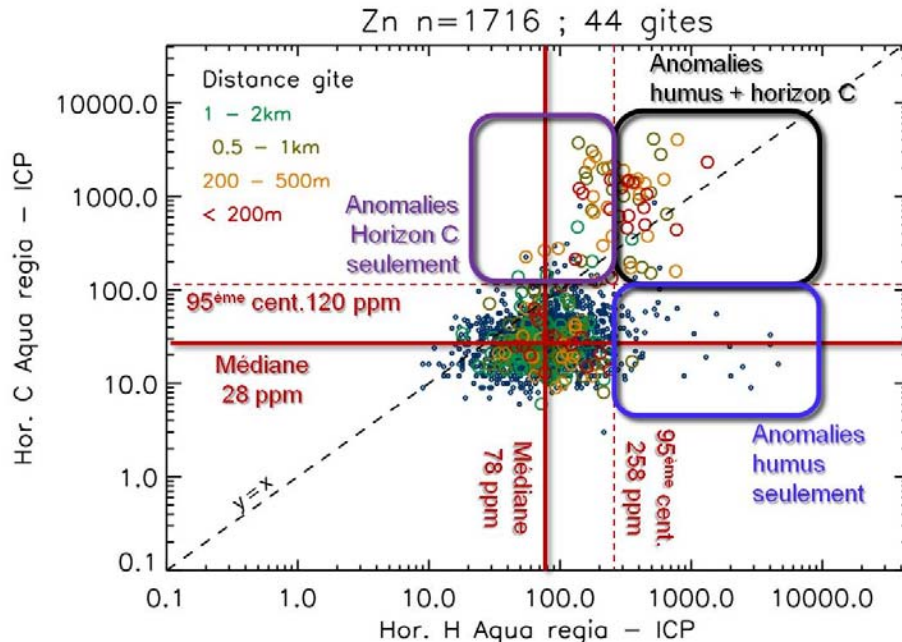


Figure 19. Teneurs en Zn dans l’humus vs. Horizon C, montrant une compilation des analyses de tous les levés introduits en début de chapitre. La couleur et la taille des symboles indiquent la distance aux gîtes zincifères les plus proximaux : les ronds bleus de petite taille correspondent aux points situés à plus de 2 km d’un gîte zincifère. Les lignes rouges indiquent différents seuils, dans l’humus et dans l’horizon C : la médiane (trait gras plein) et le 95^{ème} centile (trait fin pointillé) assimilé ici au seuil d’anomalie. Tous les points situés au-delà (à droite pour l’humus; en haut pour l’horizon C) des lignes pointillées sont donc des valeurs anormales, tel qu’illustré par les cadres bleu, noir et violet.

En d’autres termes, 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.

Pour finir, il est intéressant de noter ici la distribution bimodale des concentrations en Zn dans l’horizon C pour les stations spatialement corrélées aux minéralisations connues. On voit en effet sur la **Figure 19** que les grands cercles colorés se répartissent en deux groupes sur l’axe vertical. Le groupe inférieur est parfaitement superposé à la population totale, il n’est donc pas anomal, tandis que le groupe supérieur est anomal et s’étend largement au dessus du 95^{ème} centile. Une telle distribution implique non seulement qu’une partie significative des gîtes et indices zincifères ne produisent pas d’anomalie dans l’horizon C, mais que ceux-ci appartiennent à une catégorie clairement distincte, possiblement d’un point de vue géologique ou métallogénique... Cet aspect nécessiterait d’être approfondi, il ne le sera pas toutefois dans le cadre de ce projet mais pourra entrer dans des travaux ultérieurs.

En conclusion, le signal métallique dans l’humus est très instable, sujet à contaminations aériennes, et statistiquement non-corrélé avec la présence de minéralisation si les anomalies ne se retrouvent pas aussi dans l’horizon C.

6.3 Analyse en or

Les analyses en or ont été traitées suivant une approche similaire à celle décrite au chapitre précédent, mais sur le levé MRD061 puisque le levé MRD015 ne comprend pas d’analyses aurifères. Les analyses sont de très bonne qualité, effectuées par ICP avec préconcentration au *Fire Assay*, après digestion par

aqua regia. Les stations ont été séparées en 5 groupes en fonction de leur distance avec un gîte aurifère (< 200 m, 200 – 500 m, 500 – 1000 m, 1 000 – 2 000 m, > 2 000 m), tel qu'illustré sur la **Figure 12**. Les valeurs statistiques des analyses – brutes et normalisées – de ces différents groupes sont ensuite comparées dans les horizons humus-Ah, B et C. Les nombres de stations incluses dans chaque groupe sont : > 2 km, 231 stations; 1 – 2 km, 57 stations (18 gîtes/indices); 0,5 – 1 km, 59 stations (16 gîtes/indices); 0,2 – 0,5 km, 18 stations (11 gîtes/indices); < 0,2 km, 8 stations (6 gîtes/indices).

Les résultats sont présentés sur la **Figure 20**. Ceux-ci ne permettent pas une interprétation aussi évidente que dans le cas des métaux de base (**Figure 13**). On voit en premier lieu des teneurs systématiquement plus hautes dans l'humus comparativement aux horizons inférieurs. Par contre, les teneurs dans l'humus sont élevées tant en niveau de base (groupe > 2 km) que proche des minéralisations connues (autres groupes), et il n'y a pas d'amplification notable du signal à proximité de ces dernières (diagramme de droite). Par conséquent, **les hautes valeurs 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 2 km des gîtes/indices, comparativement au niveau de base. **Cette amplification semble être optimale dans l'horizon C, qui serait alors à privilégier pour l'exploration. Elle demeure relativement faible, les médianes étant presque toujours inférieures à un facteur 2 (à l'exception du groupe < 200 m dans l'horizon C)**. Les mêmes données sont présentées sur la **Figure 21** sous la forme d'un profil de concentration, afin d'illustrer pour l'or un comportement de type « accumulation organique », semblable à celui de Zn et Pb, caractérisé par un niveau de base nettement supérieur dans l'humus comparativement aux horizons inférieurs du sol. On retrouve sur ce diagramme l'amplification des concentrations dans l'horizon C pour les stations situées à moins de 1 km des gîtes/indices aurifères, avec une augmentation de la médiane égale à un facteur 1,85 ce qui est nettement supérieur à celle de l'humus (1,08).

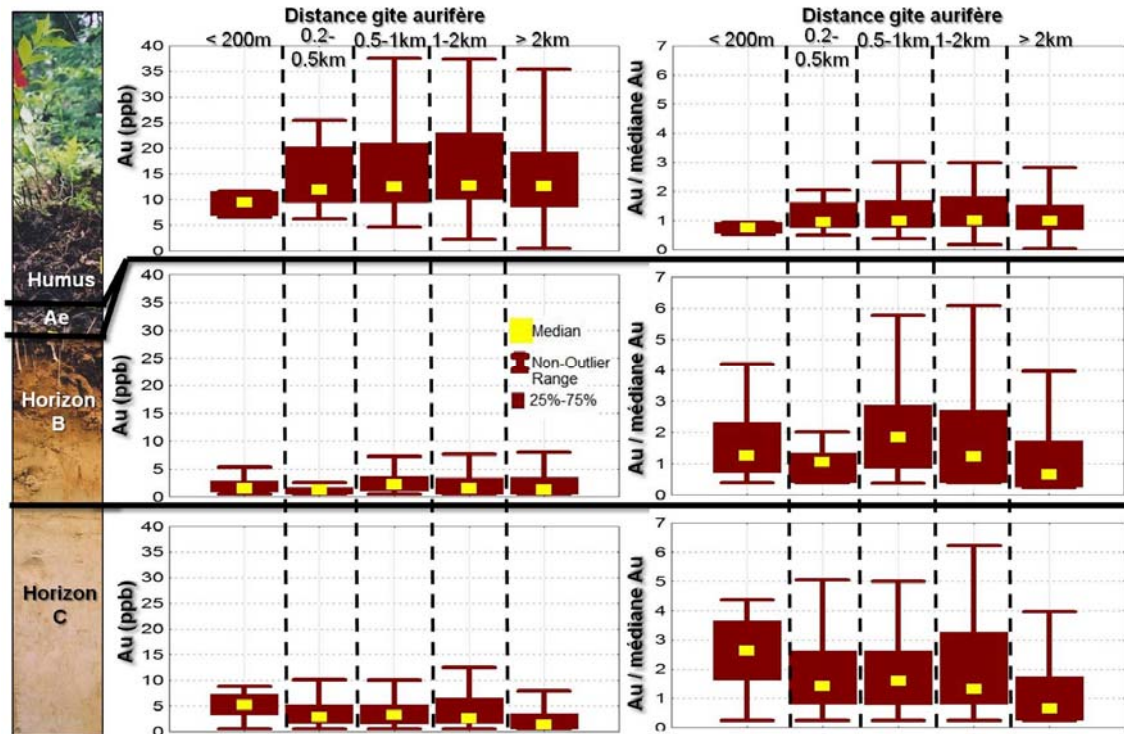


Figure 20. Valeurs statistiques des concentrations en Au à différentes distances des gîtes et indices aurifères, établies sur une population totale comprenant 373 stations (51 gîtes et indices).

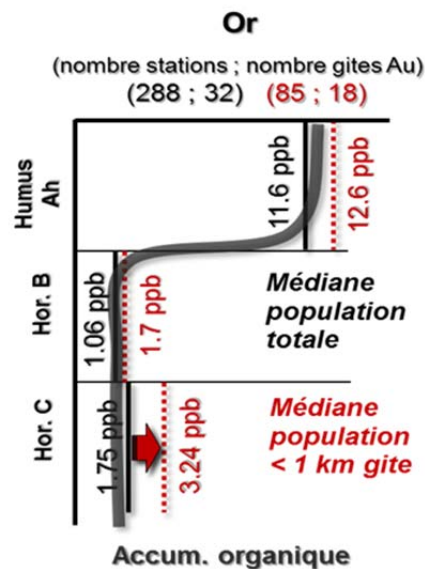


Figure 21. Comparaison des médianes des populations *proches* et *distantes* des gîtes/indices aurifères, dans les trois horizons du sol. La courbe en trait gras épais transparent de couleur grise montre les profils *normaux* (niveaux de base), tandis que les flèches rouges marquent l'amplification du signal à proximité des gîtes/indices. Le nombre de stations est indiqué au-dessus de chaque profil, ainsi que le nombre de gîtes/indice échantillonnés à moins de 1 km.

Ce profil de concentrations suggère certaines affinités de l'or avec la matière organique humifiée. Une compilation de plusieurs levés aurifères dans l'humus accompagnés d'analyses du carbone organique montre une corrélation significative entre ces deux signaux, avec un coefficient Pearson égal à 0,33 ($n = 411$). Cette corrélation peut être causée par une forte aptitude de l'or à se fixer sur les acides fulviques/humiques, laquelle n'a pas, à notre connaissance, été documentée à ce jour. Il peut aussi s'agir d'une corrélation *indirecte*, traduisant les corrélations des deux signaux à un même tiers paramètre, qui pourrait en l'occurrence être le pH-Eh. En effet, l'humus-Ah est typiquement l'horizon le plus acide du sol du fait du développement des acides organiques. Dans certains contextes, il en devient aussi facilement réducteur, avec la saturation de la capacité oxydante des eaux météoriques par un excès de matière organique. Les phases de stabilité de l'or dans les conditions physico-chimiques des eaux souterraines et superficielles ne sont pas encore parfaitement contraintes à ce jour, à l'insu de la plupart des métaux lourds (voir plus haut la discussion sur ce sujet). Certains travaux récents suggèrent la présence d'or dissous dans la phase aqueuse, complexé sous forme anionique (Lintern et al., 2009), ce qui serait compatible avec le profil de concentration observé ici puisque la stabilité des formes anioniques augmente en milieu acide : l'or aqueux serait donc plus stable dans l'humus.

7 QUANTIFICATION DE LA PERFORMANCE DES HORIZONS HUMUS, B ET C POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

Le chapitre s'est attaché à déterminer les profils de concentrations normales et anormales dans les horizons successifs d'un sol différencié, pour les métaux de base et l'or. Les comportements-types ont ainsi pu être mis en évidence, spécifiques à chaque métal. Les horizons montrant la plus forte amplification proche des minéralisations ont été identifiés sur une base qualitative. Le présent chapitre se fixe pour objectif de quantifier la performance pour l'exploration des différents horizons du sol par une approche statistique conventionnelle.

7.1 Approche statistique

L'approche adoptée ici consiste à mesurer la cote de chacun des trois horizons échantillonnés dans le sol, pour la population totale ainsi que pour les populations de stations situées à différentes distances des gîtes/indices classés par substances.

La cote est un calcul trivial de probabilité d'anomalie comparative entre deux populations. Prenons l'exemple fictif illustré sur la **Figure 22**. Si l'on considère un seuil d'anomalie fixé au 95^{ème} centile d'une population aléatoire de points (population totale), la probabilité qu'un point pris au hasard dans cette population soit anomal est, par définition, de 5 %, donc $P_{total} = 0,05$. Dans une deuxième population, regroupant les points situés à moins d'un kilomètre des gîtes connus, cette probabilité, normalement plus élevée, sera dans notre exemple de 28 %, donc $P_{inf1km} = 0,28$.

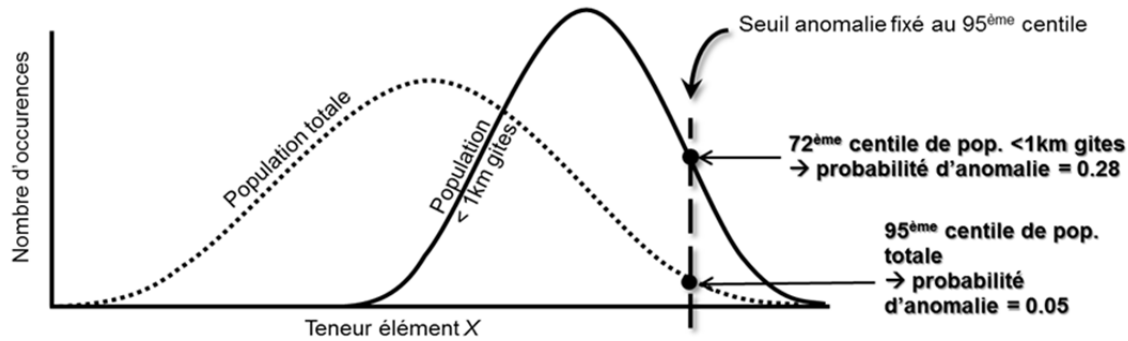


Figure 22. Illustration de la notion de côte c , qui est égale au rapport entre les probabilités d'anomalies des deux populations.

La côte c est égale au rapport entre ces deux probabilités : $c = P_{inf1km} / P_{total} = 5,6$, ce qui signifie qu'il y a 5,6 fois plus de chances de trouver un point anomal à moins d'un kilomètre d'un gîte qu'ailleurs.

Dans le cas présent, les côtes procurent des mesures de la performance des différents horizons du sol à révéler les anomalies proche des gîtes/indices.

7.2 Côtes des horizons humus-Ah, B et C

La **Figure 23** présente les côtes obtenues pour les métaux de base et l'argent, avec les données du levé MRD015 introduit plus haut. Les valeurs indiquées en ordonnée sont le logarithme népérien des côtes, encore appelé le contraste. **Ce diagramme démontre sans équivoque la faible performance globale de l'humus, et la forte performance globale de l'horizon C.** Ceci pour tous les métaux considérés, à l'exception du nickel qui, comme nous l'avons vu précédemment ne fournit pas de résultats cohérents possiblement en raison d'un trop faible échantillonnage, et de l'argent. Pour Cu, Zn, et Pb, il y a dans l'horizon C respectivement 33, 48 et 95 fois plus de chance de trouver un échantillon anomal à moins de 200 m d'un gîte/indice qu'ailleurs, ce qui constitue une très bonne performance pour l'exploration. Cette côte s'élève à 400 pour Pb, dans la tranche 200 – 500 m, puisque $e^{\hat{c}} \approx 400$. L'horizon B montre aussi de bonnes performances, toutefois moindres que celles de l'horizon C, pour Pb et Zn.

Il est intéressant de noter qu'à la différence de Pb, Zn et Cu, les côtes d'Ag n'augmentent pas de l'humus vers les horizons inférieurs, mais restent sensiblement constantes voire légèrement plus hautes dans l'horizon B. Cet horizon serait pour ce métal l'horizon à privilégier lors des levés de sols à des fins d'exploration, bien que l'écart avec les côtes des autres horizons ne soit pas très marqué.

Les côtes des éléments Cd, Co, As, Mo, Sb et Ba sont calculées pour la détection de tous gîtes confondus, excepté As (gîtes aurifères). Les résultats sont présentés **Figure 24**. Ces côtes demeurent toutes très basses dans l'humus, ainsi que dans l'horizon B à l'exception de Cd qui montre, au contraire, de relativement bonnes performances dans cet horizon (côte ≈ 15). **Dans l'horizon C, As et Cd montrent de relativement bonne côte, et dans une moindre mesure Co. Les autres éléments, à savoir Mo, Sb et Ba, s'avèrent inefficaces à révéler la présence de minéralisation puisque leurs hautes valeurs ne démontrent aucune corrélation avec les gîtes/indices connus, quelque horizon que ce soit.**

Ce même exercice conduit sur l'or indique, de la même manière, une inefficacité totale des trois horizons du sol à révéler la présence de minéralisation aurifère (Figure 25). Les données utilisées ici sont celles du levé MRD061, introduit plus haut. **On voit ici que As (horizon C) présente une bien meilleure aptitude à révéler la présence de gîtes-indices aurifères que l'or lui-même.** Ceci est

vraisemblablement dû à l'effet pépite qui biaise systématiquement les analyses géochimiques de l'or. À ce sujet, les travaux récents de Trépanier (2012) concluent que le seul moyen de s'affranchir de cet effet pépite dans les environnements secondaires, et donc de faire de l'exploration efficace, est de préférer le compte de grains d'or à l'analyse géochimique.

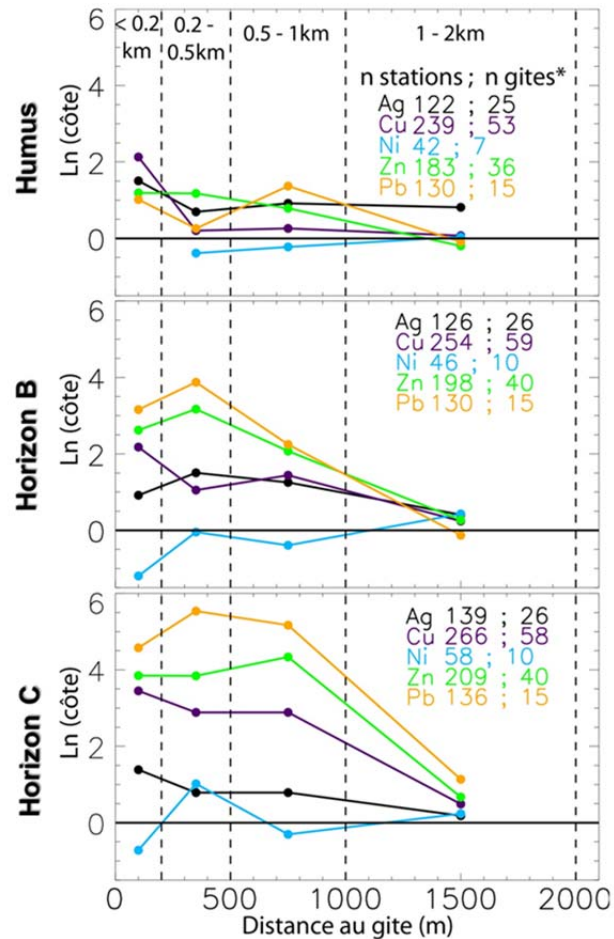


Figure 23. Variation des côtes avec la distance au gîte-indice le plus proximal, classé par substance, dans les trois horizons du sol (données MRD015). Métaux de base et argent.

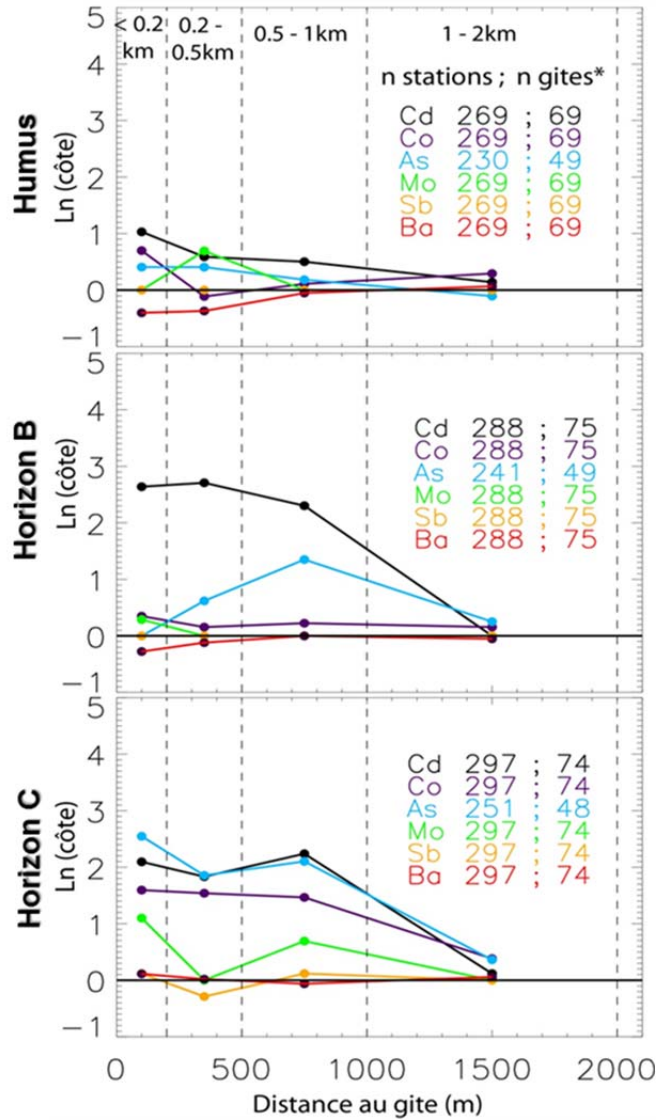


Figure 24. Variation des côtes avec la distance au gîte-indice le plus proximal (toutes substances confondues excepté As : or) dans les trois horizons du sol (données MRD015). Métaux de base et traceurs communs.

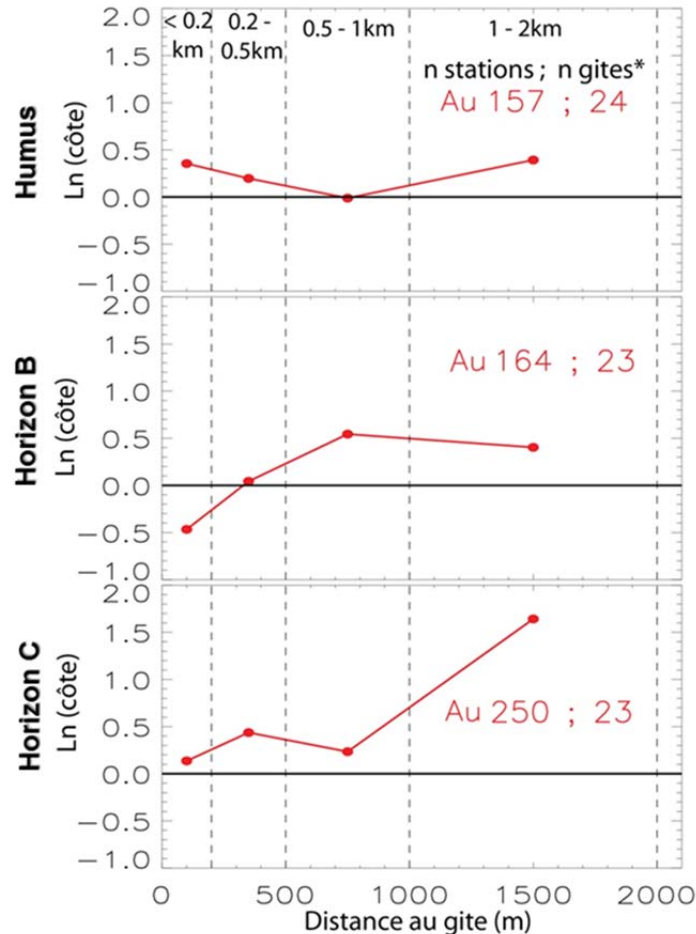


Figure 25. Variation des côtes des teneurs en or en fonction de la distance au gîte-indice aurifère le plus proximal, dans les trois horizons du sol (données MRD015).

8 REHAUSSEMENT D'ANOMALIES EN METAUX DE BASE PAR TRAITEMENT DU *BACKGROUND* MINERALE

8.1 Principe

Le principe général du rehaussement consiste à discriminer le signal métallique relié à la présence de sulfures du signal métallique relié à des *facteurs externes* (c.-à-d., indépendants de la minéralisation). Ceci par des approches exclusivement quantitatives (statistiques), semi-quantitatives, ou davantage qualitatives. Nous proposons dans ce projet une méthode originale de rehaussement d'anomalie adaptée aux levés de sol, basée sur le traitement du *background* minéral. Le principe de ce traitement, illustré sur les **Figures 26** et **27**, consiste simplement à extraire du signal métallique la fraction non-associée aux sulfures, contenue essentiellement dans les phyllosilicates primaires et secondaires (chlorite, biotite...) pour la plupart des métaux de base. Une simple projection binaire des teneurs en métaux de base vs fraction phyllosilicatée fait apparaître, pour tous les métaux de base, d'excellentes corrélations qui attestent de l'importance de la composante métallique fixée sur ces phases minérales (**Figures 26** et **27**), autrement dit, du très net contrôle des teneurs métalliques par la fraction phyllosilicatée du sol. Un indice efficace de la teneur en phyllosilicates nous est donné par la somme moyennée des majeurs K, Al, et Mg,

tel que présentée sur la **Figure 26** (en abscisse), qui présente les résultats d'un levé effectué en 2006 dans le secteur de Timmins - Kirkland Lake. Les traits noirs marquent, pour chaque diagramme, la corrélation entre les deux variables, qui procure une estimation du *background* métallique prédit en fonction de la teneur en phyllosilicates fournie par l'indice placé en abscisse. Les échantillons situés au dessus de cette ligne de corrélation possèdent donc un signal métallique supplémentaire, traduisant possiblement la présence de sulfures. La traverse de couleur jaune fait apparaître, pour Ni, des teneurs plus hautes que le *background* associé aux phyllosilicates. La carte géologique présentée dans l'encadré montre que la traverse chevauche sur une grande distance des formations ultramafiques, typiquement très riches en nickel associé à l'olivine et, en excès, aux sulfures (pentlandite, millérite), ce qui correspond à la fraction superposée au *background* visible sur le diagramme.

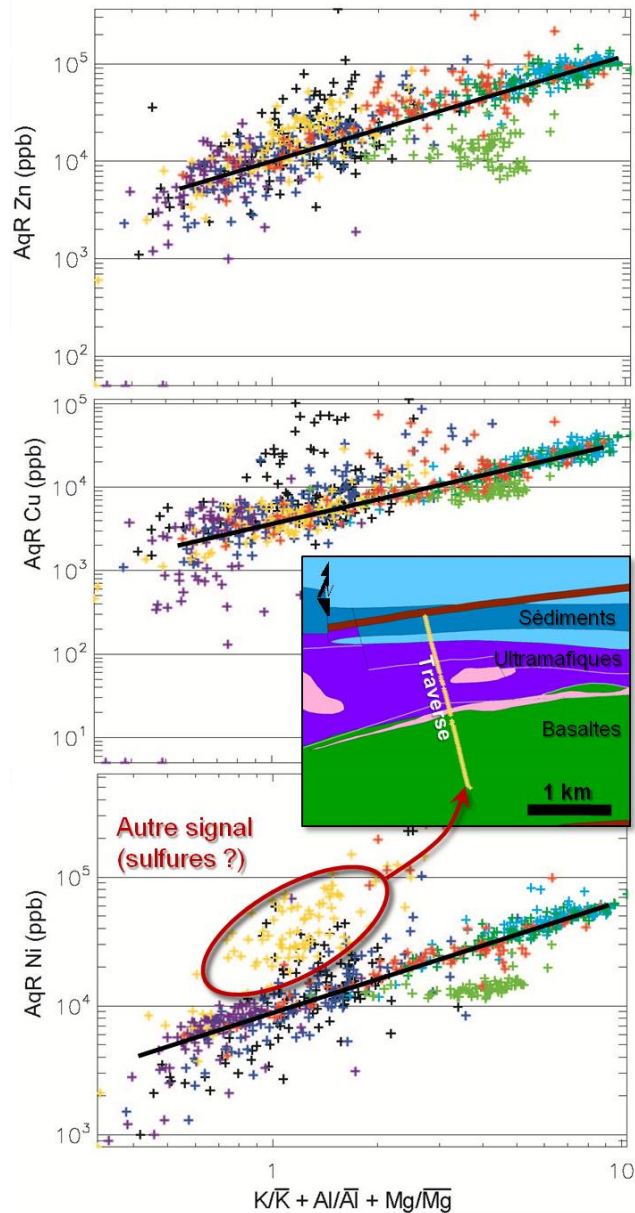


Figure 26. Zn, Cu et Ni (aqua regia) vs indice phyllosilicates. Les couleurs des symboles correspondent à différentes traverses (8 traverses, pour un total de 814 stations). Mesures par ICP. Horizons d'échantillonnage : B et C confondus. Le cercle rouge marque les points contenant une forte fraction métallique non-incluse dans les phyllosilicates (voir texte), appartenant à une traverse dont le tracé est projeté sur la carte géologique. Levé MRD200 (Fedikow, 2006).

La **Figure 27** présente le diagramme de corrélation entre Zn (horizon C) et l'indice phyllosilicates pour une compilation de plusieurs levés de l'OGS sélectionnés selon des critères de qualité de la base de données (informations détaillées sur la nature glaciaire du substratum, la nature pédologique de l'horizon échantillonné, les procédés analytiques, etc.). Ici encore, le contrôle du *background* métallique par la fraction en phyllosilicates primaires et secondaires du sol ne montre aucune ambiguïté ($R_{\text{Pearson}} = 0,58$). Notons que les autres métaux de bases ne sont pas illustrés ici, toutefois ils présentent des corrélations semblables à celle de Zn.

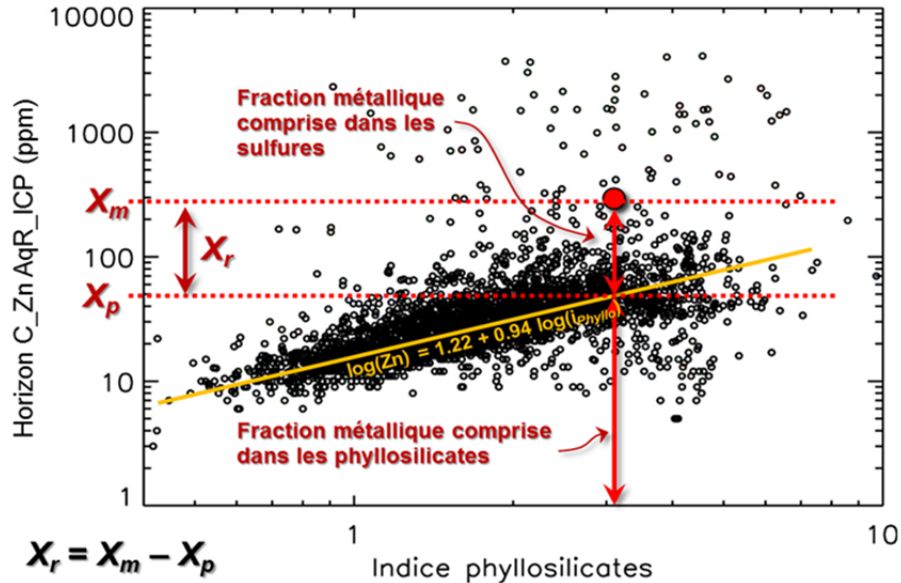


Figure 27. Teneurs zincifères (horizon C) vs indice phyllosilicate pour l'ensemble des échantillons d'horizon C des différents levés compilés dans cette étude. La corrélation obtenue est très bonne en dépit de la grande variété géographique, géologique, métallogénique couverte par ces différents levés, ce qui démontre le caractère universel du *background* métallique compris dans les phyllosilicates du sol.

Le rehaussement du signal consiste donc à calculer la valeur métallique résiduelle après suppression du *background* associé aux phyllosilicates à partir de la valeur brute : $X_r = X_m - X_p$.

8.2 Vérification statistique de l'efficacité du rehaussement et application

L'efficacité de cette méthode de rehaussement peut être vérifiée par l'approche des côtes, introduite dans la section précédente. Il suffit de comparer les côtes des valeurs avant et après rehaussement, et de vérifier ainsi leur augmentation avec le rehaussement. Cette comparaison est illustrée sur la **Figure 28**. **Il apparaît clairement que le rehaussement permet une augmentation très significative des côtes pour Cu, Pb et Zn, en particulier dans les tranches 200 – 1000 m, ce qui valide l'efficacité du traitement proposé.** Par exemple, la côte de l'horizon C pour la détection des gîtes zincifères (tranche 0,5 – 1 km) est, avant rehaussement de 65, ce qui signifie qu'il y a 65 fois plus de chances de trouver une anomalie à moins d'un kilomètre (et plus de 0,5 km) d'un gîte zincifère qu'ailleurs. Cette côte monte à 145 après rehaussement, avec donc une amélioration d'un facteur 2.3 de la performance de l'horizon C pour Zn.

Enfin, une approche comparable pourrait être envisagée pour l'or, partant de la corrélation observée de ce signal avec la matière organique (perte au feu ou carbone organique) dans l'humus-Ah et éventuellement dans l'horizon B qui peut contenir jusqu'à 5 % de carbone organique (valeur extractible au pyrophosphate). En effet, postulant que la corrélation entre l'or et la matière organique est assez bonne pour prédire un *background* aurifère à partir de la fraction organique de l'échantillon, le nivellement – par normalisation ou par soustraction – de ce *background* devrait produire un certain rehaussement des échantillons anomaux. Cette méthode est évoquée ici mais n'a pas été approfondie.

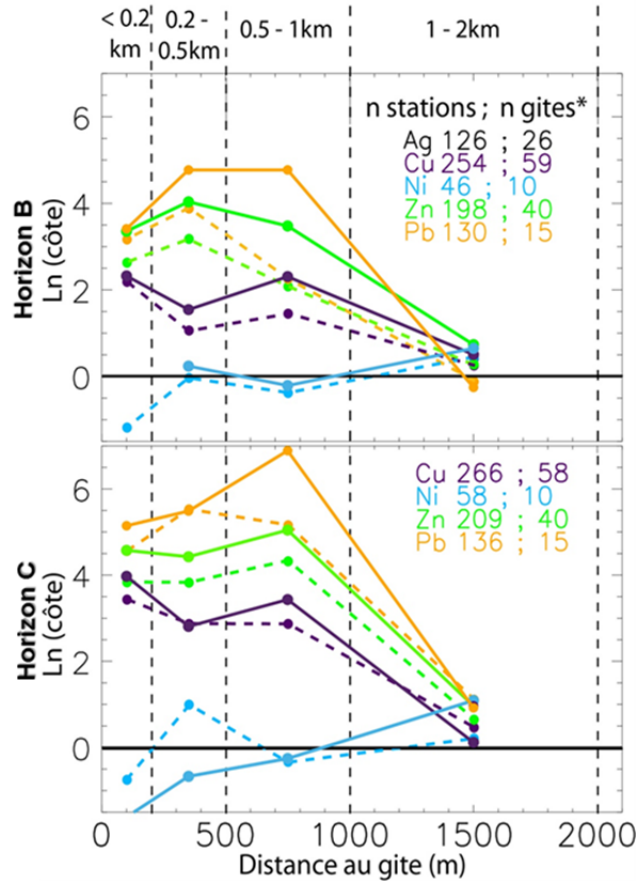


Figure 28. Comparaison des côtes obtenues pour les valeurs *avant* (traits pointillés) et *après* (traits continus) rehaussement. Les lignes pointillées sont identiques à celles présentées en **Figure 23**. Levé MRD015.

Un exemple d'application du traitement proposé pour les métaux de base est illustré ici sur une portion du levé MRD015, contenant deux gîtes/indices proximaux (**Figure 29**).

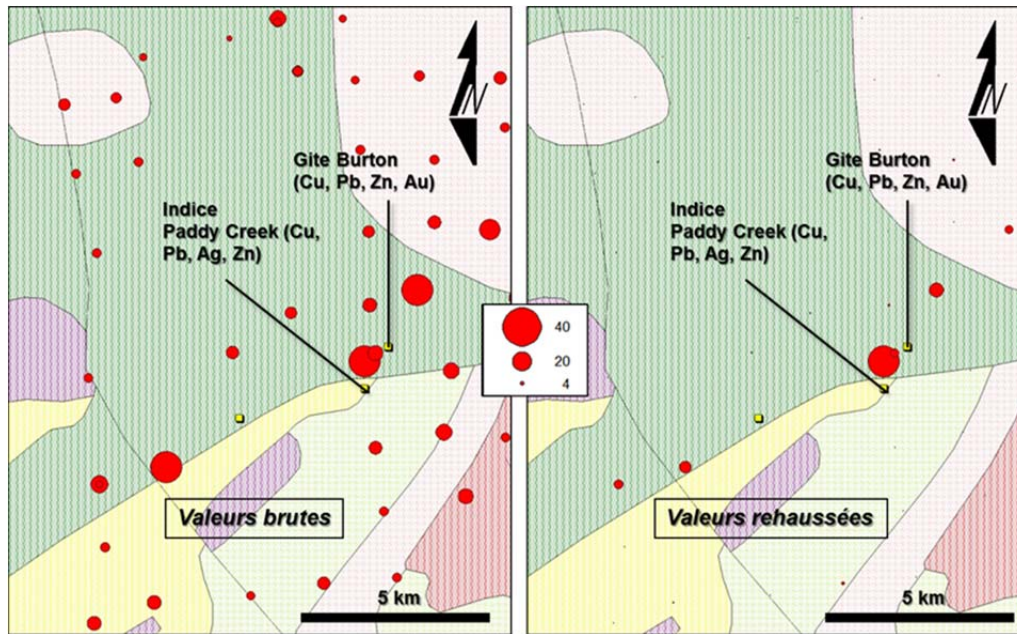


Figure 29. Carte de centiles sur une partie du levé MRD015, dans le district de Timmins, pour le signal zincifère avant et après rehaussement.

9 CONCLUSION, DISCUSSION, RECOMMANDATIONS

- Il se produit une forte ségrégation des métaux associée à la pédogénèse, induisant des écarts importants entre les niveaux de bases dans les horizons successifs du sol. Puisque des niveaux de base spécifiques existent à chaque horizon, les seuils d'anomalie doivent être déterminés de manière spécifique aussi. Une valeur aurifère anormale dans l'horizon C est typiquement inférieure au *background* de l'humus-Ah. La profondeur d'échantillonnage, et la nature pédologique de l'horizon échantillonné, se présentent donc comme des paramètres de première importance pour la réussite des levés. Plusieurs profils-types de concentration dans les sols différenciés ont été identifiés dans cette étude et corroborent les résultats préliminaires de Klassen (2003) :
 - Profils enrichis relativement dans l'horizon C (dominés par le lessivage pédogénétique, et dans une moindre mesure par l'accumulation inorganique) : Cu et Ni;
 - Profils enrichis dans humus-Ah (dominés par l'accumulation organique) : Pb, Zn, Au.
- 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. C'est un signal très versatile, fortement influencé par des facteurs externes (conditions météorologiques, contamination aérienne...). Il est par ailleurs très faiblement corrélé aux signaux métalliques des horizons B et C, ce qui pourrait évoquer une divergence de sources (humus-Ah : signal exclusivement hydromorphique; horizon C : signal mixte ou essentiellement clastique).
- Les teneurs métalliques des horizons B et C montrent systématiquement une corrélation positive. Elles traduisent donc un signal commun, bien que de façon différente car affecté par différents

facteurs externes. Ce signal est performant pour l'exploration, sa fraction anormale étant spatialement associée aux minéralisations connues. Toutefois, les niveaux de base et anomalies sont presque systématiquement plus élevés et mieux contrastés dans l'horizon C.

- Ces résultats démontrent que l'horizon C est l'horizon à privilégier pour l'exploration minière en métaux de bases, au moins pour ce qui est des substances Pb, Zn et Cu. 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.
- L'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 (Trépanier, 2012 : projet Consorem 2011-05). Dans l'horizon C, le signal en arsenic montre une performance bien meilleure pour la détection des gîtes/indices aurifères que l'or lui-même. Celle des autres traceurs aurifères classiques (Sb, W) est très faible.
- À l'étape de l'échantillonnage, des imprécisions dans la reconnaissance de l'horizon échantillonné (B ou C, qui sont les plus confondus) peuvent induire des difficultés d'interprétation reliées aux écarts de niveaux de base et de seuils d'anomalie. Il est possible de limiter ce biais en appliquant à l'étape de l'interprétation des corrections basées sur les caractéristiques chimiques standards de ces horizons indiquées sur le **Tableau 1** (standards du ministère canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire) et impliquant Al, Fe, et le carbone organique. Les profils médians obtenus sur l'ensemble des stations multi-horizons compilées dans cette étude, pour Fe, Al, et l'indice d'altération CIA (Nesbitt et Young, 1982; $CIA = 100 * Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + Ca_2O)$) sont présentés ci-dessous (**Figure 30**). Ces valeurs peuvent aussi servir de guides pour la vérification chimique des niveaux pédogéniques, à l'étape de l'interprétation. La reconnaissance des horizons lors de l'échantillonnage est ici très fiable, assurée par des spécialistes de l'OGS.

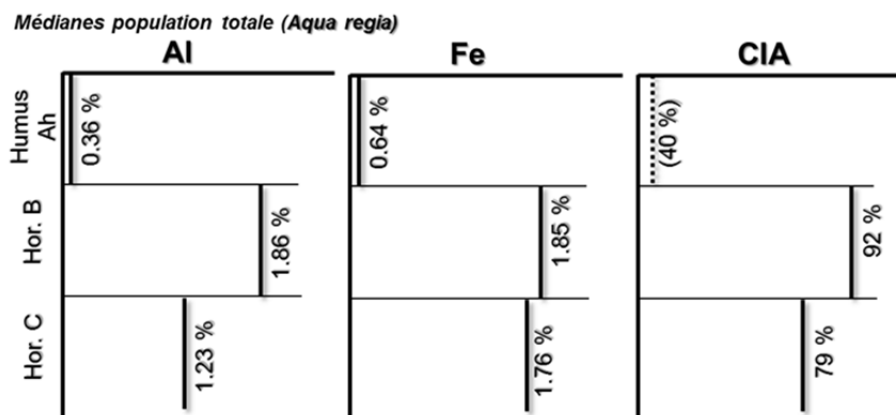


Figure 30. Caractéristiques chimiques moyennes des trois horizons d'échantillonnage du sol (compilation de toutes les stations multi-horizons des levés introduits dans ce projet). CIA : *chemical index of alteration* (Nesbitt et Young, 1982), ratio immobiles / mobiles utilisé en géologie environnementale, paléoclimatologie, etc.

- Une méthode originale de rehaussement des anomalies en métaux de base est proposée dans ce projet, basée sur le nivellement du *background* métallique associé aux phyllosilicates dans les horizons B et C. L'efficacité de cette méthode de rehaussement est statistiquement validée pour Pb, Zn et Cu.

- Pour finir, tous les échantillons traités dans ce projet sont pris dans du till glaciaire. L'échantillonnage d'autres types de sédiments glaciaires pour l'exploration minière est une pratique courante depuis plusieurs décennies, bien qu'*a priori* très peu approprié en particulier pour les sédiments des vastes plaines argilo-glaciaires telles que celles couvrant l'essentiel du NO de l'Abitibi. L'impact quantitatif de la nature glaciaire du sédiment échantillonné n'a pas été traité dans ce projet, faute de temps. Cet aspect demeure à être surveillé de près lors des levés, et devra être étudié dans des projets à venir.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier les chercheurs du Consorem Sylvain Trépanier, Stéphane Faure et Benoit Lafrance, ainsi que Réal Daigneault, pour leur contribution très significative à toutes les étapes du projet, ainsi que Geneviève Boudrias et Julie Menier pour la relecture et l'édition du présent rapport.

10 REFERENCES

- ARC, 1998. Le système canadien de classification des sols, troisième édition Agriculture et Agroalimentaire Canada Publication 1646, Groupe de travail sur la classification des sols, 187 p. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/intro.html>
- Bajc, A.F. 1999 Till and Humus Compositional Database, Eastern Part of the Shebandowan Greenstone Belt, Northwestern Ontario. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release - Data 44
- 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. 1ere édition. Pergamon Press.
- Cameron, E.M, Hamilton, S., McClenaghan, M.B., 2004. Cross Lake: Geochemical data and interpretations on soil samples, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
- Consorem, 2001, Ciblage de minéralisation par la dispersion glaciaire dans la Sous-province d'Abitibi, projet 2001-04
- Delmas-Gardas C., 2000. Influence des conditions physico-chimiques sur la mobilité du plomb et du zinc dans un sol et dans un sédiment en domaine routier. Thèse de doctorat, Université de Pau, France, 192 p.
- Deschênes, L., Chassé, R., Giroux, M., Bastien, C., Jean, L., Bécaert, V., Martineau, G., Côté, G., 2006. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. Programme D'aide À La Recherche Et Au Développement En Environnement (PARDE), Chaire industrielle en assainissement et gestion des sites, École Polytechnique de Montréal.
- Fedikow, M.A., 2006. Aqua regia, Mobile Metal Ions and Enzyme LeachSM soil geochemical survey results from the Timmins area: Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey, Open File Report 6179, 22p.
- Kettles, I. M., Garrett, R.G., Bauke, S.T., 1998. Till, soil, and stream sediment geochemistry in the vicinity of the Manitouwadge Greenstone Belt. Commission géologique du Canada, Dossier public 3562, 1998; 210 pages; 1 diskette/disquette, doi:10.4095/209402
- Klassen, R.A., 2003. Soil profiles in naturally metal-rich terrains of eastern Canada: physical properties and geochemical data. Open File 1745, 1CDROM.
- Lamontagne, L. et Nolin, M.C., 1997. Dossier des noms de sols du Québec 1997. SISCan. Système d'information des sols au Canada. Équipe pédologique du Québec, Centre de recherches et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada (Sainte-Foy)
- Lintern et al, 2009, A new look at ionic gold, *Geochim. Cosmochim. Acta* doi: 10.1016/j.gca.2008.12.019
- McMartin, I., Henderson, P.J., Nielsen, E., 2000. Impact of a base metal smelter on the geochemistry of soils of the Flin Flon region, Manitoba and Saskatchewan. Canadian Journal of Earth Sciences vol. 36, no. 2, 1999; p. 141-160
- Morris, T.F. 1996. Geochemical and heavy mineral data, surficial sediment sampling program, Separation Lake Area, Northwestern Ontario Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release - Data 21

- Morris, T.F. 1999. Geochemical and heavy mineral database from overburden, Wawa region, northeastern Ontario; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release-Data 40
- Morris, T.F. 2001. Geochemical and Till Pebble Lithology Data Related to the Schreiber-Killala Lake Overburden Mapping and Sampling Program, Northwestern Ontario; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release – Data 74
- Nesbitt, H.W. et Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 199, 715-717.
- Perié, 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*, 49p.
- Snäll, S. et Liljefors, T., 2000. Leachability of major elements from minerals in strong acids. *Journal of Geochemical Exploration* 71 : 1–12
- Searcy, C.A. 2001. Miscellaneous database related to the drift exploration for platinum group elements, northwestern Ontario; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release Data 71
- Takeo, N., 2005. Atlas of Eh-pH diagrams, Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan, Open File Report No.419
- Tardif, N.P., 2000. Till compositional database, River Valley area, Northeastern Ontario. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release Data 53
- 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*
- 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
- Yafa, C., John, G. et Farmer, J.G., 2006. A comparative study of acid-extractable and total digestion methods for the determination of inorganic elements in peat material by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 557 : 296–303