

# consorem

CONSORTIUM DE RECHERCHE EN EXPLORATION MINÉRALE

## Guide d'utilisation de l'environnement secondaire pour l'exploration minérale

Projet 2022-01

*Première édition*

Silvain Rafini, géo. Ph.D.

Sylvain Trépanier, géo. M.Sc.



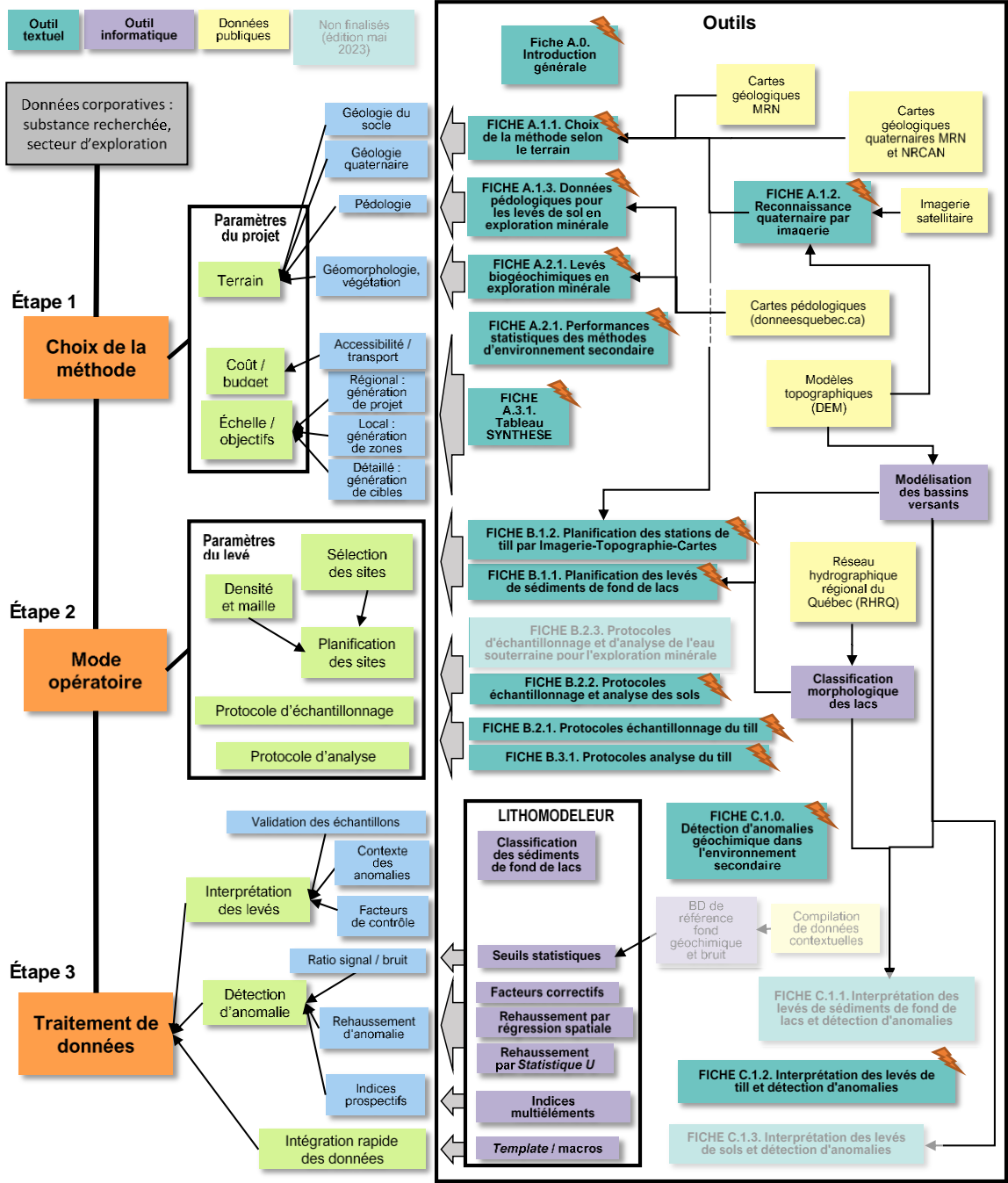
## Table des matières

ABRE DE DÉCISIONS : ENVIRONNEMENT SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE .....	i
LISTE DES FICHES .....	ii
FICHE A.0. – INTRODUCTION GÉNÉRALE AU GUIDE D'UTILISATION DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE.....	1
FICHE A.1.1. – CHOIX DE LA MÉTHODE SELON LES PARAMÈTRES DU TERRAIN .....	10
FICHE A.1.2. – RECONNAISSANCE DES TERRAINS QUATERNAIRES PAR IMAGERIE-DEM POUR LES LEVÉS DE GÉOCHIMIE SECONDAIRE EN EXPLORATION MINÉRALE.....	22
FICHE A.1.3. – DONNÉES PÉDOLOGIQUES POUR L'EXPLORATION MINÉRALE .....	34
FICHE A.1.4. – LEVÉS BIOGÉOCHIMIQUES EN EXPLORATION MINÉRALE.....	50
FICHE A.2.1. – COMPARAISON DES PERFORMANCES STATISTIQUES DES MÉTHODES DE GÉOCHIMIE SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE.....	59
FICHE A.3.1. CHOIX DE LA MÉTHODE SELON L'ÉCHELLE, LES OBJECTIFS, L'ACCESSIBILITÉ ET LE BUDGET .....	69
FICHE B.1.1. PLANIFICATION DES LEVÉS DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC POUR L'EXPLORATION MINÉRALE.....	71
FICHE B.1.2. – PLANIFICATION DES STATIONS DE TILL PAR IMAGERIE, TOPOGRAPHIE, CARTES QUATERNAIRE .....	80
FICHE B.2.1. – PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TILL POUR L'EXPLORATION MINÉRALE .....	87
FICHE B.2.2. – PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE DES SOLS POUR L'EXPLORATION MINÉRALE .....	92
FICHE B.3.1. – PROTOCOLES D'ANALYSE DU TILL POUR L'EXPLORATION MINÉRALE ..	106
FICHE C.1.0. – DÉTECTION DES ANOMALIES PROSPECTIVES POUR L'EXPLORATION MINÉRALE .....	118
FICHE C.1.2 – INTERPRÉTATION DES LEVÉS DE TILL ET DÉTECTION DES ANOMALIES	136
ANNEXE 1 : Boîtes à outils ArcGIS pour la modélisation des bassins versants autour des lacs	153
ANNEXE 2 : REHAUSSEMENT D'ANOMALIES DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC PAR REGRESSION SPATIALE .....	177

# ABRE DE DÉCISIONS : ENVIRONNEMENT SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

Cliquez sur ce symbole pour un hypertexte vers la fiche

Cliquez sur ce symbole pour retrour à l'arbre de décisions



## LISTE DES FICHES

ÉTAPE	Catégorie	Paramètre	Nom fiche	Référence de la fiche
			<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	<i>A.0.</i>
<b>A. CHOIX DE LA MÉTHODE</b>	<b>1. Terrain</b>	<i>Géologie du socle</i>	<i>Choix méthode selon le terrain</i>	<i>A.1.1</i>
		<i>Géologie quaternaire</i>	<i>Reconnaissance des terrains quaternaires pour l'exploration par la géochimie secondaire</i>	<i>A.1.2.</i>
		<i>Pédologie</i>	<i>Données pédologiques pour le levés de sols en exploration minérale</i>	<i>A.1.3.</i>
		<i>Géomorphologie, végétation</i>	<i>Levés biogéochimiques en exploration minérale</i>	<i>A.1.4.</i>
	<b>2. Performances statistiques</b>		<i>Comparaison des performances statistiques des méthodes de géochimie secondaire</i>	<i>A.2.1.</i>
	<b>3. Coûts</b>	<i>Accessibilité et transport</i>	<i>Choix de la méthode selon l'échelle, les objectifs, l'accessibilité et le budget</i>	<i>A.3.1.</i>
		<i>Coûts d'analyse</i>		
<b>4. Échelle et objectifs</b>				
<b>B. MODE OPÉRATOIRE</b>	<b>1. Planification des sites</b>	<i>Densité du levé</i>	<i>Voir fiche A.3.1.</i>	
		<i>Selection des sites, analyse du terrain</i>	<i>Planification des levés de sédiments de fond de lacs pour l'exploration minérale</i>	<i>B.1.1.</i>
			<i>Planification des stations de till par Imagerie-Topographie-Cartes</i>	<i>B.1.2.</i>
	<b>2. Protocole d'échantillonnage</b>	<i>Protocole Till</i>	<i>Protocoles d'échantillonnage du till pour l'exploration minérale</i>	<i>B.2.1.</i>
		<i>Protocole Sols</i>	<i>Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale</i>	<i>B.2.2.</i>
		<i>Protocole Sédiments de fond de lacs</i>	<i>Voir fiche B.1.1.</i>	
		<i>Protocole Eau souterraine</i>	<i>Protocoles d'échantillonnage et d'analyse de l'eau souterraine pour l'exploration minérale</i>	<i>B.2.3.</i>
	<b>3. Protocole d'analyse</b>	<i>Protocole Till</i>	<i>Protocoles d'analyse du till pour l'exploration minérale</i>	<i>B.3.1.</i>
		<i>Protocole Sols</i>	<i>Voir fiche B.2.2.</i>	
		<i>Protocole Eau souterraine</i>	<i>Voir fiche B.2.3.</i>	
<b>C. INTERPRÉTATION DES LEVÉS</b>	<b>Interpétation des levés et détection d'anomalie</b>		<i>Détection d'anomalies géochimique dans l'environnement secondaire</i>	<i>C.1.0.</i>
		<i>Levés de sédiments de fond de lacs</i>	<i>Interprétation des levés de sédiments de fond de lacs et détection d'anomalies</i>	<i>C.1.1.</i>
		<i>Levés de tills</i>	<i>Interprétation des levés de till et détection d'anomalies</i>	<i>C.1.2.</i>
		<i>Levés de sols</i>	<i>Interprétation des levés de sols et détection d'anomalies</i>	<i>C.1.3.</i>



## FICHE A.0. – INTRODUCTION GÉNÉRALE AU GUIDE D'UTILISATION DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### Présentation de la fiche

Cette fiche présente une introduction à la problématique et aux objectifs généraux du projet, une description du guide d'utilisation de l'environnement secondaire (ES) pour l'exploration minérale qui a été générée dans ce projet, et enfin une mise en contexte scientifique décrivant les mécanismes impliqués dans le transport métallique et le développement d'anomalies dans l'ES à partir d'une source primaire.

---

### INTRODUCTION

Le succès d'un levé d'ES pour l'exploration minérale dépend de plusieurs choix effectués à toutes les étapes de la réalisation du levé : choix de la méthode, choix des modes opératoires, choix des outils d'interprétation des résultats et de détection d'anomalies. Depuis sa création en 2000, le CONSOREM a consacré 16 projets de recherche à ces thématiques au travers desquels ont été élaborés un certain nombre de guides des bonnes pratiques aux étapes successives d'un levé. Ces résultats contribuent concrètement à améliorer l'utilisation des méthodes d'ES par la communauté des géologues d'exploration au Québec. Ces projets ont abordé tant les méthodes conventionnelles till (2 projets), sols (2 projets), sédiments de fond de lac (3 projets) et de ruisseaux (2 projets), que les méthodes moins conventionnelles telles que l'analyse des sols par extraction séquentielle (1 projet), et les méthodes émergentes telles que l'hydrogéochimie souterraine (5 projets). Cette dernière, l'hydrogéochimie souterraine pour l'exploration minérale, est une méthode originale développée intégralement à l'occasion des travaux du CONSOREM.

La présente synthèse est réalisée dans le cadre des projets CONSOREM 2021-01 et 2022-01 « Intégration / synthèse des outils de traitement de l'environnement secondaire ». Le mandat de ces projets était de synthétiser et rendre accessible l'important volume de contributions produit à l'occasion des 16 projets susmentionnés. Plutôt qu'un simple inventaire, ce travail ambitionne d'intégrer les contributions au sein d'un système de décision structuré permettant d'accompagner le praticien dans ses choix à toutes les étapes de la réalisation d'un levé. Il s'agit donc d'un guide intégré d'utilisation de l'ES pour l'exploration minérale.

---

## PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'OUTIL

Le guide d'utilisation de l'ES pour l'exploration minérale consiste en un [arbre de décision](#) et une série de [fiches](#) dont la liste est présentée plus bas. L'arbre de décision est la structure principale de l'outil, le squelette. Il permet de visualiser le déroulement d'un levé d'ES en répertoriant les paramètres à prendre en considération aux étapes successives ainsi que les outils ressource, ou fiches, contenant les informations pertinentes à propos de ces paramètres afin d'accompagner l'utilisateur dans ses choix. Les fiches comportent un niveau de détail important.

### Choix de la méthode

La première étape d'un levé d'environnement secondaire consiste à faire le choix approprié de la méthode. Le terme méthode est employé ici pour décrire non seulement le médium échantillonné, tel que le till, le sol ou les sédiments de fond de lac, mais aussi le mode opératoire et dans certains cas les indicateurs géochimiques utilisés. Par exemple, la méthode « Till – As dans la fraction fine » se distingue de la méthode « Till – grains d'or ». Bien que ces deux méthodes permettent d'explorer l'or dans le till, leurs performances varient selon un certain nombre de paramètres relatifs au terrain, accessibilité, paramètres géologiques et pédologiques, et au projet *sensu stricto*, objectifs du levé, budget, taille de la zone d'investigation, densité visée. De la même manière, la méthode « Sol – Horizon B/C – aqua regia » se distingue de la méthode « Sol – extraction séquentielle ». Bien que ces deux méthodes échantillonnent le médium sol, elles ciblent des types d'anomalies profondément différentes en termes de mode de transport et de développement, si bien que ces méthodes ne sont pas efficaces et pertinentes dans les mêmes contextes.

Le choix approprié de la méthode implique donc la prise en compte de paramètres reliés à la nature du terrain d'une part et aux caractéristiques budgétaires et stratégiques du projet d'autre part. L'arbre de décision offre une visualisation structurée de ces éléments décisionnels. Les caractéristiques de terrain se déclinent en paramètres géologiques, pédologiques, morphologiques et climatiques. Les éléments morphologiques et climatiques ne sont pas jugés prioritaires dans un premier temps et l'accent est mis sur les éléments géologiques et pédologiques, qui sont au contraire déterminants dans le choix approprié de la méthode. Les paramètres géologiques portent essentiellement sur la nature des terrains glaciaires, et moindrement sur la géologie du socle. La reconnaissance des sédiments glaciaires est l'élément le plus important dans l'évaluation de la faisabilité d'un levé et dans le choix d'une méthode appropriée. La raison principale est que la nature des sédiments (till d'ablation, till de base, dépôts glaciolacustres, -fluviaux ou -alluviaux) reflète leurs conditions de mise en place, qui déterminent le réalisme des postulats fondamentaux des méthodes en ce qui a trait aux liens génétiques entre le matériel échantillonné et le socle sous-jacent, et aux possibilités de développement d'anomalies. Ces aspects sont détaillés dans la [fiche A1.1. « Choix de la méthode selon les paramètres du terrain »](#). L'acquisition de connaissances de base sur la géologie quaternaire du terrain investigué, à un stade précoce du projet, est donc une étape extrêmement importante. Ceci peut être réalisé de plusieurs manières complémentaires : (1) par un levé d'orientation, autrement dit un travail de terrain axé sur la reconnaissance des formations quaternaires et des contrôles glaciaires en présence ; (2) par l'analyse des couches d'information publique d'imagerie satellitaire qui couvrent l'ensemble du territoire et, dans une moindre mesure, topographique (Digital Elevation Model, DEM, et notamment le DEM à très haute résolution de type LIDAR qui couvre la moitié sud de la Province) et hydrographique. Ces données sont accessibles sur différents sites internet gouvernementaux.

Une méthodologie de caractérisation des terrains glaciaires à partir de ces couches, basée sur l'identification morphologique de structures d'écoulement glaciaire discriminantes, est détaillée dans la [fiche A.1.2 « Reconnaissance des terrains quaternaires par imagerie-DEM pour les levés de géochimie secondaire en exploration minérale »](#). Les caractéristiques pédologiques sont une autre couche d'information importante pour le choix d'une méthode appropriée au terrain, en particulier pour l'échantillonnage du médium sol. Il existe en effet différents types de sols au Québec, podzols, gleysols, luvisols, pour les plus importants ordres pédologiques, dont seul le podzol est un bon candidat pour un usage en exploration minérale. Ces aspects peuvent être investigués au moyen d'un levé d'orientation ou d'analyse de couches d'information publiques, tel que détaillé dans la [fiche A.1.3. « Reconnaissance pédologique pour l'exploration minérale par la géochimie secondaire »](#).

Les paramètres stratégiques et budgétaires du projet sont aussi des déterminants essentiels dans le choix de la méthode. D'une part, les méthodes varient fortement en termes de coûts d'échantillonnage et d'analyse, et de difficultés logistiques. D'autre part, les méthodes ne sont pas efficaces aux mêmes échelles et aux mêmes densités ou mailles. Enfin, elles ne procurent pas strictement les mêmes informations. Il en résulte que le choix de la méthode est un problème fondamentalement multiparamétrique. Ces aspects sont résumés dans la [fiche A.3.1. « Choix de la méthode selon l'échelle, les objectifs, l'accessibilité et le budget »](#), qui tente de les intégrer dans un tableau synthétique, contenant des appels vers d'autres fiches pour les éléments nécessitant une analyse plus profonde.

Pour finir, un choix éclairé de la meilleure méthode prendra en compte les comparatifs de performances pour l'exploration minérale calculés sur des bases de données régionales dans le Bouclier canadien. Ces calculs établissent des statistiques régionales sur l'amplitude des anomalies développées autour des minéralisations connues, dans différents médias, pour différents indicateurs géochimiques, et suivant différents modes opératoires. L'utilisateur se référera à la [fiche A.2.1. « Comparaison des performances statistiques des méthodes de géochimie secondaire »](#).

### Choix des modes opératoires

Les choix de modes opératoires portent d'une part sur la planification des stations d'échantillonnage, d'autre part sur les protocoles d'échantillonnage et d'analyse, tel qu'illustré sur l'arbre de décision ci-dessous. L'étape de la planification des stations d'échantillonnage permet généralement d'améliorer très significativement les chances de réussite d'un levé, en diminuant l'impact des inévitables biais d'échantillonnage causés par l'hétérogénéité du médium investigué. En d'autres termes, le signal analysé, quel qu'il soit, présente une certaine variabilité naturelle reliée à différents facteurs génétiques et environnementaux. Cela complexifie la détection des anomalies à l'étape de l'interprétation. Il est toutefois possible de baisser cette variabilité en améliorant l'homogénéité du médium échantillonné. Trois exemples sont présentés ici :

- 1- Les travaux du CONSOREM ont montré d'une part que le signal du cuivre (Cu) mesuré par aqua regia /ICP-MS dans les sédiments de fond de lac est fortement influencé par la composition même du sédiment (fraction granulométrique, ratio organique/détritique) et d'autre part, que cette variabilité naturelle peut être diminuée en sélectionnant préalablement les stations d'échantillonnage selon des variables géométriques du lac et la position de

l'échantillon dans le lac. L'utilisateur se référera à la [fiche B.1.1. « Sélection des lacs pour les levés d'exploration minérale »](#).

- 2- La géochimie d'un till et ses liens génétiques avec le substrat rocheux présente une forte variabilité naturelle, déterminée par le ratio de matériel local versus exotique qu'il contient. La sélection de stations d'échantillonnage basée sur la prise en compte de paramètres de morphostructure glaciaire en imagerie satellitaire, permet largement d'améliorer l'homogénéité du médium échantillonné, ce qui améliorera substantiellement la qualité du levé. Cette étape de planification des stations d'échantillonnage est d'autant plus importante pour le levé de till qu'il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage de ce médium et que le choix des stations doit tenir compte de la méthode. Ces aspects sont détaillés dans la [fiche B.1.2. « Reconnaissance des stations de till par imagerie satellitaire »](#).
- 3- Le niveau de base géochimique d'un sol est fortement contrôlé par ses caractéristiques pédologiques, le type de sol et la nature de l'horizon échantillonné. La sélection des stations d'échantillonnage selon des observations géomorphologiques contribue à baisser le bruit géochimique causé par la variabilité pédologique des échantillons.

Les protocoles d'échantillonnage sont une autre étape d'importance primordiale pour la qualité et le succès d'un levé d'ES. L'utilisateur se référera aux **fiches B.2.1, B.2.2., B.2.3. et B.2.4. pour prendre connaissance des bonnes pratiques recommandées dans les protocoles d'échantillonnage pour chacune des méthodes classées par médium**. Pour chaque méthode, le respect d'un protocole rigoureux permet de garantir la qualité du signal en termes de précision et de justesse, autrement dit l'évitement de contaminations de l'échantillon (justesse) d'une part, et d'autre part l'identification précise du médium échantillonné (précision). Les protocoles d'échantillonnage indiquent aussi les paramètres à noter sur le terrain, ou facteurs de contrôle, qui seront un apport précieux à l'étape de l'interprétation des analyses. Par exemple, les informations sur la granulométrie d'un affleurement de till, l'observation éventuelle de structures d'écoulement, de compaction ou de litage, la lithologie et la morphologie des blocs et galets rapportées sur le site d'échantillonnage, sont très valorisables pour l'interprétation et permettent de mettre en perspective les données géochimiques.

#### Interprétation des levés

La troisième et dernière étape de ce guide porte sur l'interprétation des données. Un certain nombre d'outils, ou méthodes, ont été générés à l'occasion des projets de recherche réalisés au CONSOREM durant les 20 dernières années pour le traitement des données géochimiques et la détection d'anomalie. Une présentation synthétique de ces outils est offerte sous la forme de fiches dédiées, et par ailleurs ces outils font appel à différents traitements statistiques rendus accessibles aux utilisateurs au sein d'un outil-logiciel original. Ce dernier est implémenté sous la forme d'un « **Mode Environnement Secondaire** » dans le **logiciel LITHOMODELEUR**, développé par le CONSOREM.

On distingue deux étapes principales dans le traitement des données d'ES : (1) l'interprétation des analyses, c'est-à-dire la vérification de la validité des échantillons et de l'homogénéité géochimique, analysés notamment à la lumière des paramètres de contrôle notés sur le terrain ; (2) la détection des anomalies *sensu stricto*. La détection d'anomalie peut être faite suivant plusieurs approches, selon la méthode et le contexte :

- a) Par l'application de seuils d'anomalies (p.ex. 95<sup>e</sup> centile) établis d'après la connaissance de distribution du signal de base. Cette approche a l'avantage d'être simple, mais requiert de disposer de larges bases de données, d'une part, et d'autre part elle ne tient pas compte de la variabilité du signal de base selon les facteurs contextuels (environnemental, limnologique, glaciologique, etc.). Elle sera applicable, en première approximation, pour les méthodes ayant un fort ratio signal/bruit, ce qui est souvent le cas pour les indicateurs minéralogiques (p.ex., grenats G10 dans les tills pour l'exploration de diamant).
- b) Pour les méthodes ayant un plus faible ratio signal/bruit, ce qui est fréquent pour les indicateurs géochimiques (p.ex., Cu dans les sédiments de fond de lac), la détection d'anomalie est très nettement améliorée par des techniques de rehaussement d'anomalie ou d'indicateurs multiéléments. Le rehaussement consiste soit à corriger la variabilité du niveau de base au moyen de marqueurs géochimiques spécifiques, ce qui permet de détecter des anomalies par rapport à un niveau de base variable (méthodes de ratios ou de régression spatiale), soit par des traitements géostatistiques (p.ex. méthode « Statistique U »).

L'utilisateur se référera donc à l'**outil-logiciel** ainsi qu'aux **fiches explicatives**, ainsi qu'à l'**aide dans le logiciel** contenant une explication détaillée des outils de traitement.





Le **transport glaciaire** (Figure A-1a) est le transport de matériel de roc arraché lors de la progression des glaciers. Les trains glaciaires évoluent verticalement et horizontalement suivant une forme caractéristique en éventail à partir du point d'arrachement. Leur dimension détectable est généralement kilométrique, mais peut atteindre dans certaines régions plusieurs dizaines de kilomètres (p. ex. : ceinture de Cape Smith) ou même des centaines de kilomètres (minéraux indicateurs du diamant dans les Prairies canadiennes). Au cours de ce transport, le matériel subit une forte abrasion et un affinement granulométrique liés à la charge du glacier et au contact des particules les unes sur les autres (fort ratio particules/glace à la base des glaciers), ainsi que des transformations minéralogiques (argilisation), produisant un fractionnement du signal métallique qui devra être corrigé à l'étape de l'analyse des données à des fins d'amélioration des performances (rehaussement d'anomalies : voir [fiche C.1.2 « Interprétation des levés de till et détection d'anomalies »](#)).

Le **ruissellement** (Figure A-1b) est l'écoulement de faibles débits d'eau distribuée à la surface et dans les premiers horizons du sol, essentiellement lors d'évènements pluvieux, avant coalescence vers des ruisseaux. Ce courant transporte une charge minérale dissoute et une charge minérale solide.

L'**écoulement de surface** (Figure A-1b) correspond au flux d'eau porté par le réseau hydrographique (ruisseaux, rivières, fleuves, lacs). Le courant est de haute énergie, il peut transporter une charge minérale solide dense, ainsi qu'une charge dissoute.

L'**écoulement souterrain** (Figure A-2a) est le déplacement de l'eau dans les aquifères depuis les zones de recharges vers les exutoires. Il est très lent, contient uniquement une charge minérale dissoute. L'écoulement profond est régional tandis que la direction et le débit de l'écoulement peu profond sont gouvernés par la localisation et l'élévation des zones de recharge locales.

La **migration verticale** (Figure A-2b) des éléments et leur accumulation dans le sol à l'aplomb de la source métallifère produisent un signal de type *exogène* dans le sol. Différents mécanismes peuvent être à l'origine de cette mobilisation verticale des éléments : diffusion des cations par polarisation spontanée (pile électrochimique), convection de bulles de gaz d'hydrocarbures (Soil Gaz Hydrocarbons) portant une charge métallique adsorbée, autres. Ces éléments exogènes sont faiblement fixés dans le sol et se mesurent par extraction faible (voir [fiche B.2.3. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale »](#)).

Pour la plupart des éléments, *le signal métallique transporté sous forme solide est de magnitude beaucoup plus forte que celui transporté par hydromorphisme*. En effet, la charge métallique transportable par hydromorphisme est limitée par la solubilité des métaux dans l'eau, qui est toujours faible dans les conditions d'eaux superficielles en comparaison à la charge métallique solide. En contrepartie, *le transport clastique est un mécanisme de surface qui ne peut s'opérer qu'à partir d'un corps métallifère affleurant ou subaffleurant* (figure A), tandis que *le transport par hydromorphisme d'une anomalie métallique émanant de corps métallifères peut se produire à toutes les profondeurs* (p.ex. l'hydrogéochimie souterraine est efficace pour détecter des minéralisations enfouies jusqu'à plus de 1 km). Par conséquent, la recherche d'anomalies hydromorphiques dans l'eau souterraine est préconisée pour l'exploration profonde, tandis que l'exploration peu profonde privilégiera la recherche d'anomalies clastiques.



Les relations entre une méthode et un type de transport ne sont pas toujours linéaires et peuvent s'avérer complexes. Globalement (figure A) :

- Le signal mesuré dans le till est transporté de manière uniquement clastique;
- Le signal mesuré dans l'eau souterraine est transporté de manière uniquement hydromorphique;
- Le signal mesuré dans les sédiments de fond de lac et de ruisseaux est transporté de manière clastique par ruissellement et de manière hydromorphique par écoulement de surface et souterrain avec la précipitation de minéraux secondaires, typiquement des (hydr-)oxydes de Fe-Mn, très communs dans ces matériaux. À noter que des lacs et ruisseaux situés sur des environnements de till auront pour source détritique un matériel déjà transporté de manière clastique par le drainage glaciaire;
- Le signal mesuré dans le sol est plus complexe encore et varie selon la méthode d'analyse utilisée (*extraction séquentielle*, voir **fiche B.2.3. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale »**). Le sol contient :
  - Un signal **endogène** contenu dans le substrat minéral du sol, soit directement celui du roc en l'absence de couverture sédimentaire, soit celui des sédiments préalablement transportés. Une partie de ce signal est située dans les minéraux primaires de l'horizon échantillonné, une autre est transportée très localement lors de la différenciation du sol (pédogénèse) et précipitée sous forme de minéraux secondaires dans l'horizon enrichi;
  - Un signal **exogène** constitué des cations faiblement fixés dans le sol après leur migration verticale depuis des minéralisations sous-jacentes. Signal par nature très faible et très instable, il est détectable dans les sols développés directement sur du roc ou sur des terrains couverts par des sédiments perméables et/ou peu épais;
  - Un signal **exogène** constitué d'éléments dissous transportés à flanc de colline par ruissellement à partir de minéralisations affleurantes situées en amont topographique.

Il est contenu dans les minéraux secondaires de l'horizon enrichi du sol : (hydr-)oxydes de Fe-Mn, carbonates. Notons pour finir que ces paramètres de transport déterminent en grande partie les propriétés statistiques des différents signaux mesurables dans l'environnement secondaire : magnitude du niveau de base, variabilité du niveau de base (bruit de fond), rapport signal/bruit c.-à-d écart entre les valeurs anormales et le niveau de base (détectabilité des anomalies). Pour certaines méthodes, p.ex., l'hydrogéochimie, le niveau de base peut être difficilement détectable pour certains éléments peu solubles tels que l'argent (Ag) tandis que les anomalies sont de très forte magnitude. Le ratio signal/bruit est très élevé. À l'opposé du spectre, on peut mentionner le signal du cuivre (Cu) dans les sédiments de fond de lac, toujours bien au-dessus de la limite de détection, mais montrant une variabilité de base d'amplitude importante au regard de celle des anomalies (faible ratio signal/bruit), si bien que la détection de *vraies* anomalies nécessite le recours à des techniques de rehaussement du signal (voir **fiche C.1.1. « Interprétation des levés de sédiments de fond de lac et détection d'anomalies »**). Ces aspects sont détaillés dans les fiches du volet « Interprétation », ils sont à l'origine des performances variables des différentes méthodes (voir [fiche A.2.1 « Comparaison des performances statistiques des méthodes de géochimie secondaire pour l'exploration »](#)).

## FICHE A.1.1. – CHOIX DE LA MÉTHODE SELON LES PARAMÈTRES DU TERRAIN



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche vise à décrire l'influence des paramètres de terrain sur l'efficacité des différentes méthodes de géochimie de l'environnement secondaire pour l'exploration minérale. Elle procure des guides de bonnes pratiques pour le choix d'une méthode appropriée au terrain. Les paramètres de terrain considérés sont la géologie du socle, la géologie des sédiments glaciaires et la pédologie.

---

### INTRODUCTION

L'efficacité des différentes méthodes de géochimie de l'environnement pour l'exploration minérale varie drastiquement selon la nature du terrain investigué. En effet, les méthodes sont basées sur différents postulats concernant le transport et le développement potentiel des anomalies secondaires à partir d'une source primaire. Ces postulats sont réalistes dans certains contextes géologiques, totalement irréalistes dans d'autres. Il est donc critique de valider, préalablement à la réalisation d'un levé, que ces postulats sont vérifiés, ou à toutes fins pratiques plausibles, sur le terrain investigué. Cette étape du choix d'une méthode appropriée au terrain est déterminante pour le succès du levé d'environnement secondaire à des fins d'exploration.

---

### GÉOLOGIE QUATERNAIRE : NATURE DE TERRAINS ET FAISABILITÉ DES MÉTHODES

Dans le contexte du Québec, il existe plusieurs grandes catégories de dépôts de surface : dépôts alluviaux, lacustres, marins, glaciomarins, glacio-lacustres et glaciaires. . Les tills font partie des dépôts glaciaires et se déclinent eux-mêmes en deux types, les tills de fond, dits sous-glaciaires, et les tills d'ablation, dits supra-glaciaires. Ces différents types de sédiments se mettent en place dans des conditions de dépôt très variables durant la progression et/ou le retrait glaciaire. Une conséquence est que les particules qui les composent peuvent être de source locale, exotique, unique (homogène) ou multiple (hétérogène).

La plupart des méthodes de géochimie secondaire pour l'exploration minérale font implicitement le postulat selon lequel **le sédiment glaciaire échantillonné peut être utilisé comme proxy pour le socle local**. En effet, à des fins d'exploration, une anomalie métallique détectée dans le sédiment doit pouvoir être attribuée à une source métallifère dans le socle local. Ceci est vrai dans certains cas seulement. La faisabilité d'un levé sur un terrain donné consiste à vérifier que la couverture glaciaire présente sur la propriété contient des sédiments qui valident *a priori* ce postulat de la source locale. Deux méthodes font exception : 1- l'analyse du signal exogène dans le sol, qui mise cependant sur une **perméabilité élevée du sédiment et/ou une faible épaisseur** ; 2- l'analyse de l'eau souterraine, qui à l'inverse fonctionnera mieux en contexte de couverture sédimentaire épaisse et/ou imperméable.

Le praticien pourra se référer à la base de données de la commission géologique du Canada pour prendre connaissance de la cartographie des dépôts de surface généraux sur un secteur visé et également à la base de données du Système d'information géominère du Québec (SIGÉOM) qui présente, en plus des zones morphosédimentologiques générales, une cartographie récente et détaillée de plusieurs feuillets SNRC. Ces données sont accessibles sur le site du SIGÉOM ([https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/11102\\_indexAccueil?l=f](https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/11102_indexAccueil?l=f) ). Également, pour la moitié sud du Québec, des cartes de dépôts de surface détaillées sont disponibles sur le site des données ouvertes du gouvernement du Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/depots-de-surface>). La figure A présente une mise en carte de ces données relativement faiblement détaillées ainsi qu'un quadrillage référencé des secteurs sur lesquels des cartes détaillées ont été réalisées. Par ailleurs, une méthodologie d'interprétation des terrains superficiels par imagerie satellitaire est détaillée dans la **fiche A.1.2. « Reconnaissance quaternaire par imagerie »**.

#### Dépôts glaciolacustres et glaciomarins (argileux à silteux)

- Composé de particules silteuses et argileuses de sources multiples et toujours exotiques;
- Se déposent dans des environnements de faibles énergies, dans les parties profondes des bassins proglaciaires. Souvent en formations épaisses (> 20 m);
- **La chimie primaire de ces sédiments n'est jamais un proxy pour le socle local → signal endogène, inutile en exploration, quelle que soit la méthode;**
- **Ce matériel est très imperméable → signal exogène du sol hautement improbable pour toute épaisseur d'argile > 3 m;**
- **L'UNIQUE MÉTHODE FAISABLE SUR CE TYPE DE TERRAIN EST L'HYDROGÉOCHIMIE SOUTERRAINE – TOUTE AUTRE MÉTHODE EST À PROSCRIRE.**

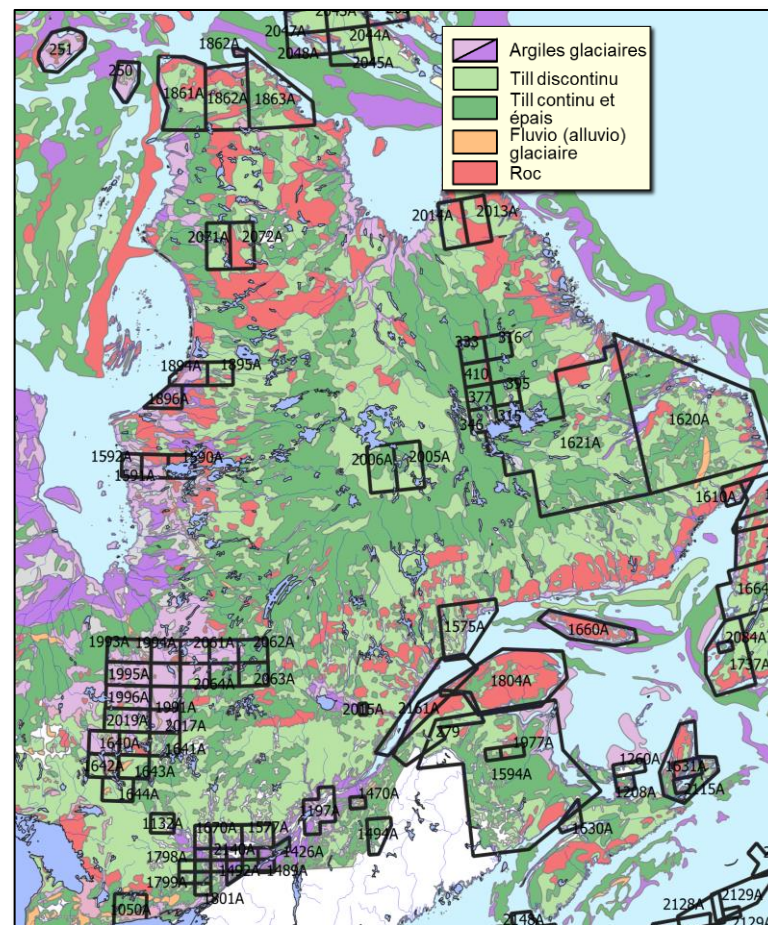


Figure A : Carte géologique quaternaire du Québec, d'après la base de données fédérale (<https://open.canada.ca/data/en/dataset/> ; Open file 8236 ; [https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan\\_nrcan/](https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_nrcan/) ). Les rectangles noirs indiquent les secteurs disposant d'une carte quaternaire détaillée par la commission géologique du Canada ainsi que le numéro de l'Open File associé.

### Dépôts fluvioglaciaires

- Sédiments déposés dans le lit de rivières sous- ou intraglaciaires (tunnels), transportés par l'eau de fonte dans un courant d'énergie forte;
- Forme des longs cordons linéaires de largeur hectométrique à kilométrique (eskers), contenant souvent des stratifications entrecroisées (rides de courant);
- Le matériel est trié par le courant, de granulométrie homogène (homométrique) grossière souvent sableuse, très perméable;
- Source en grande partie exotique puisque les particules peuvent rester en suspension sur de longs trajets, toutefois l'aire d'approvisionnement du matériel détritique est plus restreinte que les plaines argiloglaciaires;
- **La chimie primaire de ces sédiments ne peut être utilisée directement comme un proxy pour le local**, mais pour le socle distal le long du cordon;
- **TERRAIN DÉCONSEILLÉ POUR TOUTES LES MÉTHODES DE GÉOCHIMIE SECONDAIRE, À L'EXCEPTION 1- DU SIGNAL EXOGÈNE DU SOL, 2- DE L'HYDROGÉOCHIMIE SOUTERRAINE POUR L'EXPLORATION EN PROFONDEUR.**

### Dépôts glaciaires (Till)

- Sédiments hétérogranulaires constitués d'une matrice argilo-silto-sableuse et de blocs et cailloux erratiques;
- Non-stratifié, non trié;
- Les particules sont arrachées au roc pendant la progression du glacier;
- Fraction fine (silt et argile) augmente avec distance de transport;
- Type d'ablation, supra-glaciaire : matériel resté en suspension dans le volume du glacier sur de longues distances puis libéré à la fonte ; source exotique;
- Till de fond, sous-glaciaire : matériel de source locale arraché par le glacier lors de sa progression et resté à la base du glacier
- **La géochimie du till sous-glaciaire est un excellent proxy pour le socle local, tandis que le till supra-glaciaire a une forte composante exotique;**
- **TERRAIN FAVORABLE POUR LA GÉOCHIMIE SECONDAIRE APRÈS VÉRIFICATION DU TYPE DE TILL SOUS-GLACIAIRE, NON SUPRA-GLACIAIRE.** Cette vérification doit idéalement être effectuée à plusieurs étapes 1- pour l'évaluation de la faisabilité des méthodes, cf. **fiche A.1.2. « Reconnaissance des terrains quaternaires pour l'exploration par la géochimie secondaire »** ; 2- pour la sélection des stations d'échantillonnage, cf. **fiche B.1.2. « Reconnaissance des stations de till par imagerie »** ; 3- lors de l'échantillonnage, cf. **fiche B.2.1. « Protocoles d'échantillonnage du till pour l'exploration minérale »** ; 4- à l'étape de l'interprétation des données, cf. **fiche C.1.2. « Interprétation des levés de till et détection d'anomalies »**.

### Roc affleurant

- Signal des minéralisations est détectable dans le sol à l'endroit des minéralisations (signal endogène), en aval topographique des minéralisations (signal exogène et possiblement endogène : ruissellement) ou à l'aplomb des minéralisations (signal exogène : migration verticale);



- Signal des minéralisations est détectable dans les sédiments de fond de lac et de ruisseaux alimentés par le bassin versant contenant la minéralisation;
- Signal des minéralisations est détectable dans l'eau souterraine, si les minéralisations sont profondes. En effet, l'absence de sédiments implique que l'eau souterraine est rechargée sur place, son temps de résidence est donc moins long, à profondeur égale, que dans un aquifère confiné. Il en résulte une salinité plus faible dans les niveaux peu profonds, conditions moins propices à la formation de halos (ligands chlorurés moins actifs).
- **TERRAIN FAVORABLE POUR LA GÉOCHIMIE SECONDAIRE PAR LES MÉTHODES SOLS, LACS, RUISSEAUX, ET EAU SOUTERRAINE À FORTE PROFONDEUR (figure B).**

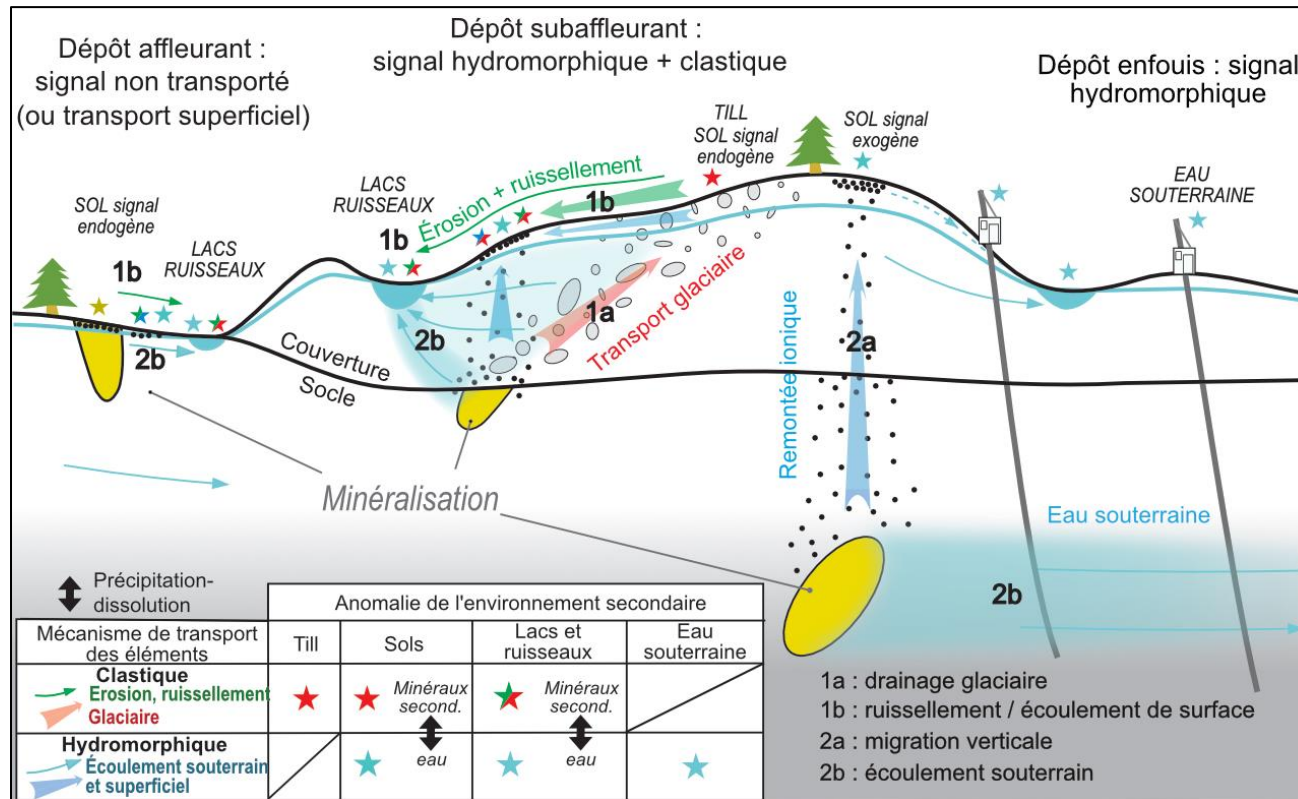


Figure B : Schéma synthétique des différentes méthodes de géochimie de l'environnement secondaire et de transport métallique à partir d'une source métallifère affleurante (gauche), subaffleurante (centre) et enfouie (droite).

**TABLEAU SYNTHÈSE - FAISABILITÉ DES MÉTHODES SELON LA NATURE DU TERRAIN**

	Paramètres de terrain	MÉTHODE						
		Sédiments de fond de lac	Sédiments de ruisseaux	Till - Fraction fine	Till – Minéraux lourds	Sols – Signal endogène	Sols – Signal exogène	Hydrogéochimie souterraine
Géologie quaternaire	Roc	Très bon	Très bon	--	--	Très bon	Très bon	Bon pour exploration profonde
	Till de fond Till de fond oxydé	Très bon	Très bon	Très bon Bon	Très bon Mauvais	Très bon	Très bon	Très bon
	Sédiments fluvioglaciaires et alluvions glaciaires	Mauvais	Moyen	--	--	Mauvais	Très bon	Bon pour exploration profonde
	Argiles glaciolacustres et glaciomarines	Très mauvais	Très mauvais	--	--	Très mauvais	Très mauvais	Très bon
Géologie du socle	Haut grade métamorphique	--	--	<i>A priori</i> moins bon potentiel	Très bon : minéralogie	<i>A priori</i> moins bon potentiel	<i>A priori</i> moins bon potentiel	<i>A priori</i> moins bon potentiel
	Bas grade métamorphique	--	--	Très bon	Très bon	<i>A priori</i> meilleur potentiel	<i>A priori</i> meilleur potentiel	<i>A priori</i> meilleur potentiel
Pédologie	Podzols, brunisols	--	--	--	--	Très bon	Très bon	--
	Luvisols	--	--	--	--	Bon	Bon	--
	Gleysols	--	--	--	--	Mauvais	Très mauvais	--
	Sols organiques	--	--	--	--	Très mauvais	<i>A priori</i> moins bon potentiel	--

---

## INFLUENCE DE LA GÉOLOGIE DU SOCLE SUR LA FAISABILITÉ DES MÉTHODES

L'état des connaissances sur l'influence de la géologie primaire sur la faisabilité et les performances des méthodes est moins avancé que pour la géologie quaternaire. Toutefois les observations suivantes ont pu être faites, de manière qualitative, d'après l'expérience des auteurs du présent guide.

### Grade métamorphique

Le métamorphisme s'accompagne de changements dans les propriétés physiques et chimiques des minéraux, qui ont des implications sur l'efficacité des différentes méthodes de géochimie secondaire. Les changements minéralogiques causés par le métamorphisme évoluent globalement vers des minéraux moins hydratés, moins sulfurés et de granulométrie plus grossière. Les minéraux sulfurés en contact avec les silicates des roches encaissantes réagissent avec les silicates durant le métamorphisme pour former d'autres minéraux. Un exemple est la réaction de la sphalérite avec les aluminosilicates pour former la gahnite ( $ZnAl_2O_4$ ), un minéral très résistant et dense. Une conséquence de la granulométrie plus grossière est leur reconnaissance minéralogique plus facile par la méthode de la **minéralogie des concentrés de minéraux lourds du till**. Une autre conséquence est que les minéraux métamorphiques sont globalement plus résistants à l'abrasion et à la météorisation. En général, ces contextes sont donc favorables à la présence de minéraux marqueurs résistants qui seront plus facilement détectables dans les concentrés de minéraux lourds du till. Par exemple, le passage du grade schiste vert au grade amphibolite est associé à un transfert d'une partie du signal des minéralisations sulfurées vers des minéraux non sulfurés plus résistants : sphalérite → gahnite tel qu'évoqué plus haut, arsénopyrite → lollingite. De plus, le signal porté par ces minéraux marqueurs, en haut grade, est aussi moins labile si bien qu'il présente moins de risque de perte par oxydation du till en surface.

**En conclusion, aux facies métamorphiques amphibolite et supérieurs, la reconnaissance de minéraux indicateurs dans les concentrés de minéraux lourds du till sera plus performante pour l'exploration que l'analyse de la fraction fine du till. A l'inverse, l'analyse de la fraction fine du till sera plus efficace que les concentrés de minéraux lourds dans les roches de plus faibles faciès métamorphiques.**



---

## INFLUENCE DE LA PÉDOLOGIE SUR LA FAISABILITÉ DES MÉTHODES

Il existe au Québec, en dehors de la zone de pergélisol, cinq grands ordres pédogénétiques : les luvisols, les gleysols, les podzols, les brunisols et les sols organiques. Les caractéristiques de ces sols, leur formation, ainsi que leurs performances pour l'exploration minérale sont détaillés dans la **fiche A.1.3. « Reconnaissance pédologique pour l'exploration par la géochimie secondaire »**. Ces sols contiennent par une extrême variabilité de milieux en termes de constituants organiques, minéraux et de propriétés physico-chimiques résultantes de la pédogénèse : degré de météorisation, lessivage ou enrichissement, capacité de rétention ionique, fractionnements géochimiques, saturation en eau, potentiel redox, pH. Il en découle que les performances de ces différents milieux pour l'exploration minérale sont d'une extrême variabilité (cf. fiche A.1.3). D'une manière générale, **les horizons les plus performants pour l'exploration sont les horizons minéraux inférieurs plus ou moins météorisés de types B et C**, bien drainés (non saturés en eau), enrichis en Fe-Mn, oxydés, peu organiques et à dominante non argileuse, située à des profondeurs accessibles (< 1m). De tels horizons se développent typiquement dans des sols très différenciés montrant un horizon organique O peu épais, de type podzol, brunisol ou luvisol, qui constituent trois ordres ayant de grandes similarités. Les terrains contenant de fortes épaisseurs de sols organiques, développés typiquement sur des substrats argileux peu drainés ou dans des cuvettes de pied-de-versant (pentes faibles), ou encore dans des zones de battement de la nappe phréatique peu profonde, sont peu favorables pour l'exploration. Les horizons minéraux inférieurs situés sous ces terrains peuvent s'avérer absents ou trop profonds et non-échantillonnables, ils seront par ailleurs typiquement relativement riches en matière organique, réducteurs, argileux ou gleyifiés, souvent saturés en eau, ce qui en fait des milieux peu propices au développement d'anomalies. Ces considérations très générales sur la faisabilité des sols pour l'exploration sont cataloguées sur le tableau synthèse ci-dessus. Des détails sont disponibles dans la fiche A.1.3.

Le choix de recourir à la géochimie des sols pour l'exploration minérale nécessite donc de vérifier préalablement si le terrain visé contient *a priori* des types de sols pouvant potentiellement développer des anomalies, autrement dit des sols montrant de bonnes performances pour l'exploration. Pour cela, le praticien pourra recourir à la base de données du Service d'information sur le sol du Canada (CanSIS), au Ministère fédéral Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), disponible sur le lien suivant (mai 2022) :

<https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/5ad5e20c-f2bb-497d-a2a2-440eec6e10cd>

Ainsi que sur le site de Données Québec (lien de mars 2023) :

<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/depots-de-surface>

Des cartes pédologiques du Québec et du Canada, issues notamment de cette base de données, sont présentées en figures C, D, E et F. Les figures D et E, couvrant le sud du Québec sont particulièrement utiles pour l'exploration. Elles permettent de déterminer le type de sol dominant sur un terrain donné, et d'anticiper la faisabilité d'un levé de sol sur ce terrain. À noter qu'il s'agit ici du type *dominant*, et qu'une certaine variabilité des sols sera observée localement selon la géomorphologie, les conditions de drainage, la profondeur de la nappe phréatique des différents sites.

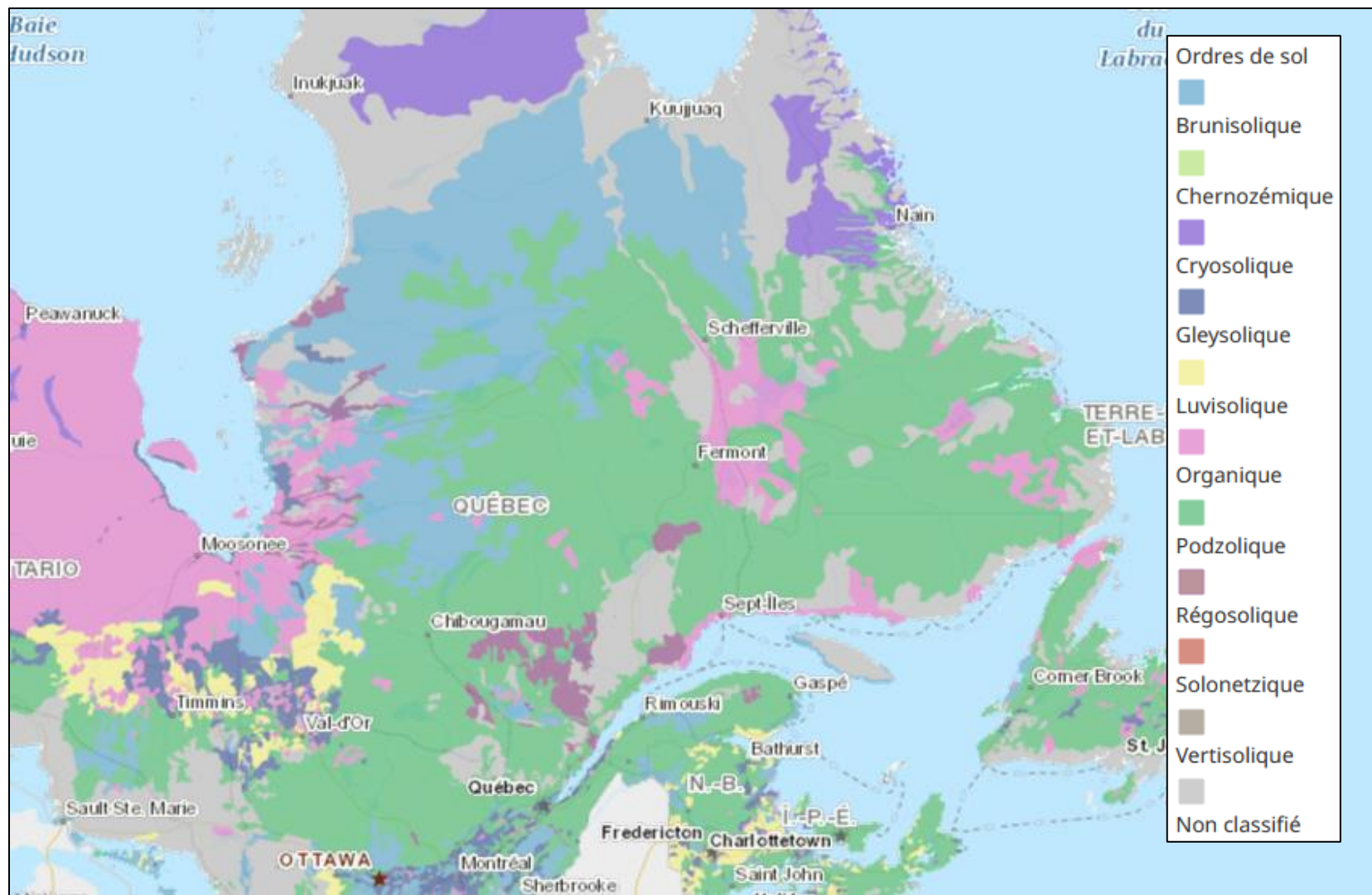


Figure C : Cartes générales des pédopaysages du Québec, Consultez : <https://sis.agr.gc.ca/siscan/index.html>.



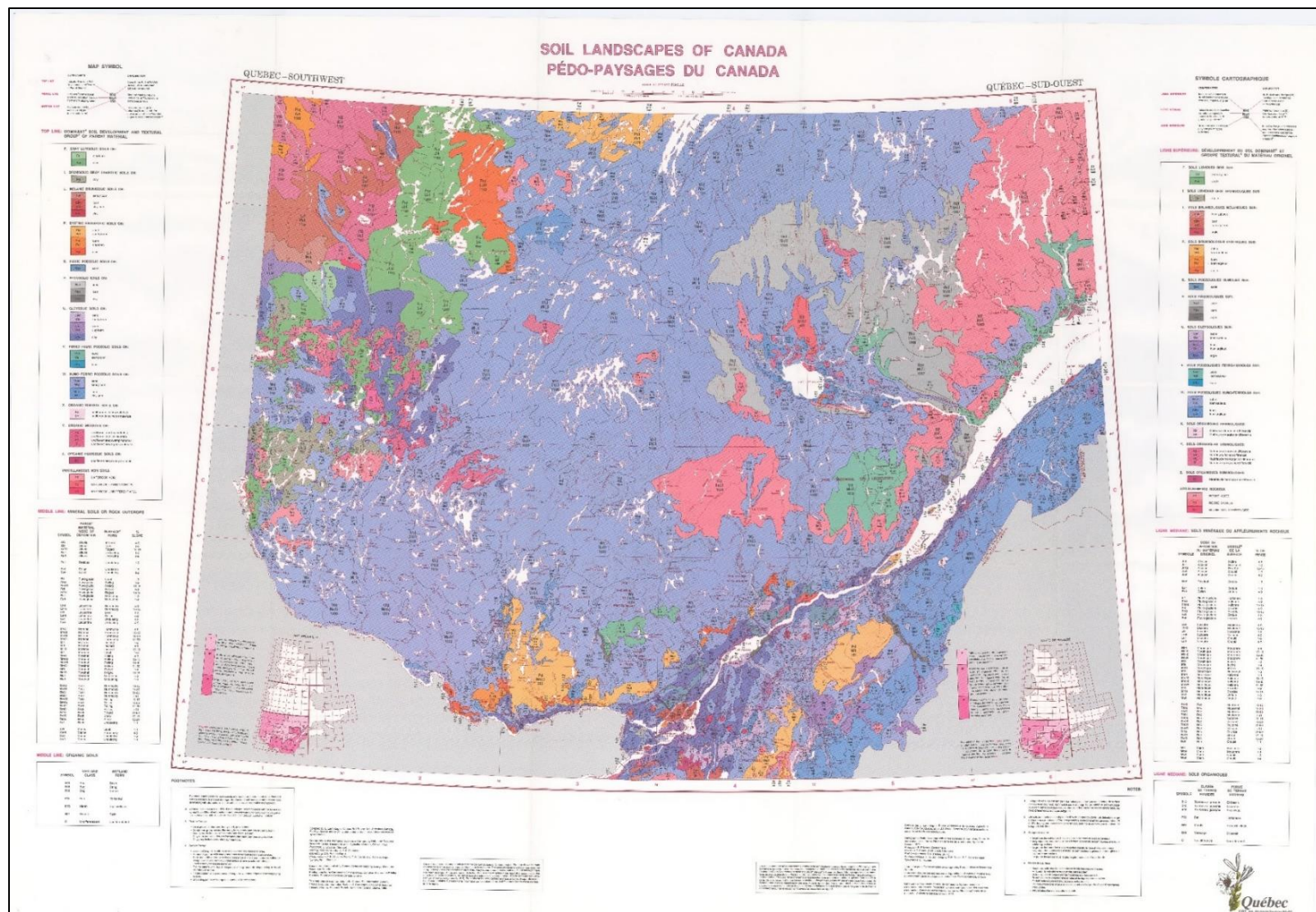


Figure D : Cartes détaillées des pédopaysages du sud du Québec, Consultez : [https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/maps/slc/1m/v1/slc\\_1m\\_v1\\_quebec\\_sw.jpg](https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/maps/slc/1m/v1/slc_1m_v1_quebec_sw.jpg)

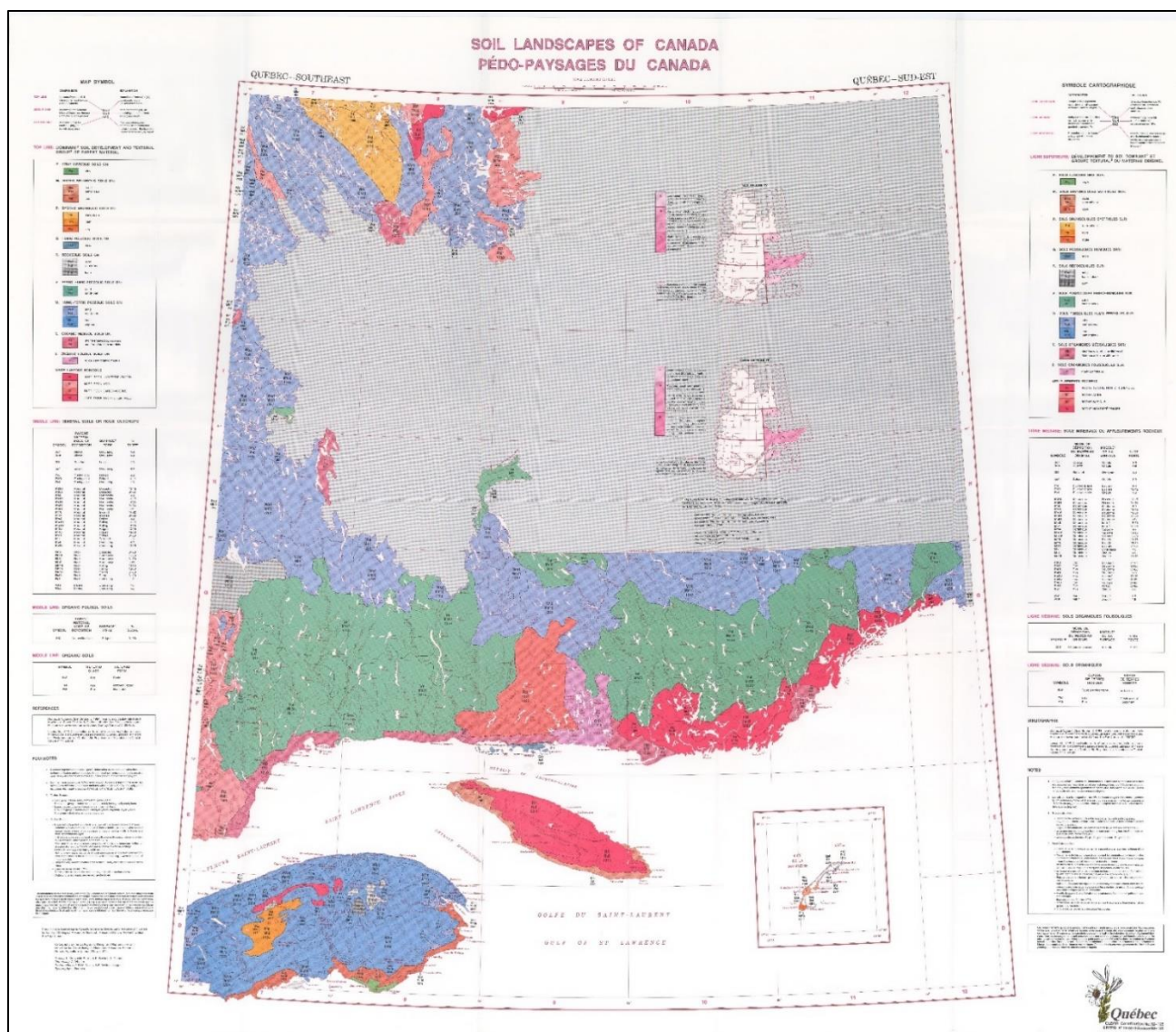


Figure E : Cartes détaillées des pédopaysages du sud du Québec :  
[https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/maps/slc/1m/v1/slc\\_1m\\_v1\\_quebec\\_se.jpg](https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/maps/slc/1m/v1/slc_1m_v1_quebec_se.jpg)





## FICHE A.1.2. – RECONNAISSANCE DES TERRAINS QUATERNAIRES PAR IMAGERIE-DEM POUR LES LEVÉS DE GÉOCHIMIE SECONDAIRE EN EXPLORATION MINÉRALE

### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche explique une méthodologie de reconnaissance des terrains quaternaires à partir de couches d'information accessibles publiquement : imagerie satellitaire, topographique (DEM, *Digital Elevation Model*), réseau hydrique régional (RHR). Cette information intervient dans le choix de la méthode de géochimie secondaire pour l'exploration minérale (cf. **fiche A.1.1. « Choix méthode selon la géologie des terrains »**)

---

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les méthodes de géochimie secondaire pour l'exploration minérale en contexte glaciaire tel qu'au Québec font implicitement certains postulats dont le plus commun est que le sédiment glaciaire échantillonné peut être utilisé comme proxy pour le socle local. En effet, une anomalie métallique détectée dans le sédiment doit pouvoir être attribuée à une source métallifère dans le socle local. Ceci est vrai dans certains cas seulement et il convient de vérifier que le type de sédiment couvrant le secteur visé valide *a priori* ce postulat de la source locale et non exotique. L'usage de la géochimie de l'environnement secondaire pour l'exploration minérale, et le choix approprié de la méthode nécessite d'acquérir préalablement une connaissance sur le type de sédiment glaciaire présent sur le terrain exploré. Cette étape permettra de faire un choix approprié de la méthode, ce qui améliorera drastiquement les chances de réussite du levé. Cette connaissance préalable des terrains glaciaires peut-être acquise au moyen d'un levé d'orientation sur le terrain, porté sur l'observation géologique quaternaire. Une autre manière, complémentaire à celle-ci, est l'analyse de la morphologie des formations glaciaires à travers les couches d'information publiques d'imagerie satellitaire, et dans une moindre mesure de topographie détaillée et d'hydrographie. Cette approche consiste à identifier des textures et des structures ou morphostructures glaciaires caractéristiques de certains types de couverts sédimentaires. Elle vise plus spécifiquement à distinguer les couverts de type till supra-glaciaire, till sous-glaciaire, sédiments fluvio-alluvio-glaciaires et sédiments glaciolacustres ou glaciomarins. **Parmi ces catégories de couvert glaciaire, seul le till de fond est utilisable comme un proxy géochimique pour le socle local.**

Cette fiche présente une méthodologie d'identification des formations de till de fond à partir des données d'imagerie satellitaire.

## TILL DE FOND ET TILL D'ABLATION

**Le till d'ablation supraglaciaire** est un matériel d'abrasion ayant voyagé dans la partie supérieure du glacier (figure 1) au cours de sa progression, puis libéré dans les eaux de fonte lors du retrait glaciaire. Le matériel est resté en suspension durant toute la progression du glacier si bien qu'il voyage sur de grandes distances et présente une forte composante exotique, ce qui explique son inutilité pour l'exploration : ce n'est pas un proxy pour le socle local. Il recouvre le till de fond, par sédimentation.

**Le till de fond sous-glaciaire** est un matériel ayant voyagé à la base du glacier puis ayant été déposé sous le glacier durant la progression glaciaire (figure 1). Ces dépôts se forment par placage sous le glacier, produisant des reliefs ensembles fuselés très caractéristiques (*drumlins*) ainsi qu'en aval des butes de socle. Ce matériel est de source locale et peut être utilisé en exploration comme proxy pour le socle local. Il a subi une forte abrasion durant sa progression à la base du glacier, en raison de la charge du glacier et du rapport particules minérales/glace élevée qui s'y trouve.

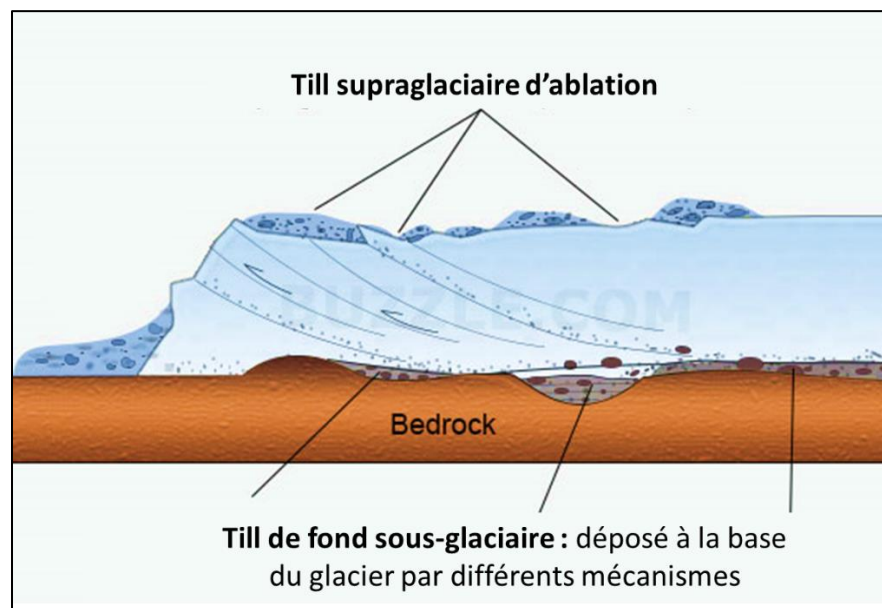
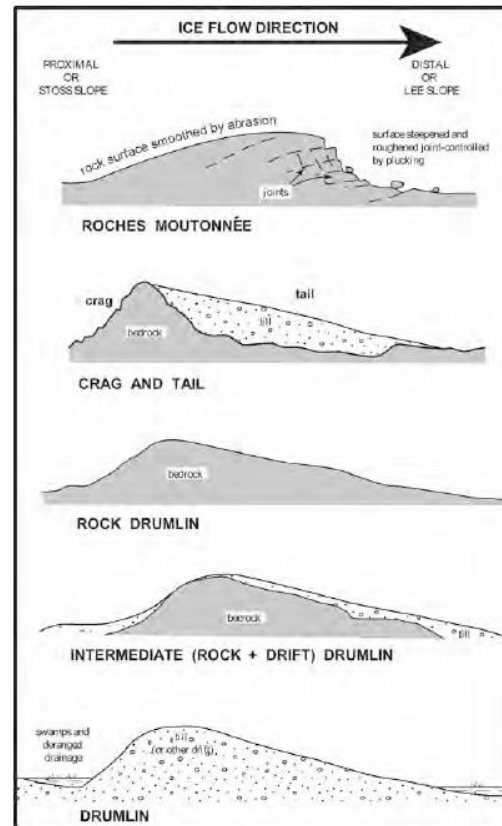


Figure 1 : Position schématique d'un till d'ablation supra-glaciaire et d'un till de fond sous-glaciaire au sein d'un glacier



## RECONNAISSANCE DES MORPHOSTRUCTURES GLACIAIRES

La méthodologie est basée sur l'identification de morphostructures caractéristiques des conditions de dépôt des tills sous-glaciaire. Ce matériel se dépose à la base des glaciers durant le parcours prograde. Il s'agit de particules arrachées directement au socle local et transportées sous la forme de trainées ou de placages. La dynamique de transport et de dépôt est donc gouvernée par le déplacement de la masse glaciaire sur la surface irrégulière du substrat. La résistance du substrat et ses irrégularités topographiques donnent lieu à une variété de formes caractéristiques, dont une typologie est esquissée sur la figure 2.



(Ryder, 1995)

Figure 2: Exemple de typologie morphologique des structures de drainage glaciaire

### Les traînées morainiques derrière abri (« crag & tail »)

Morphostructures caractéristiques des tills sous-glaciaires fréquentes à la Baie-James. Ce sont des collines asymétriques (figure 3a) composées d'une zone en amont glaciaire abrupte et souvent affleurante, d'un sommet souvent affleurant (*crag*) et d'une zone en aval glaciaire en pente douce et recouvertes de till sous-glaciaire (*tail*), souvent avec *drumlins*. Le mode de développement de ces structures est détaillé sur la Figure 3. Le till peut être échantillonné en aval glaciaire du sommet du «*crag*».

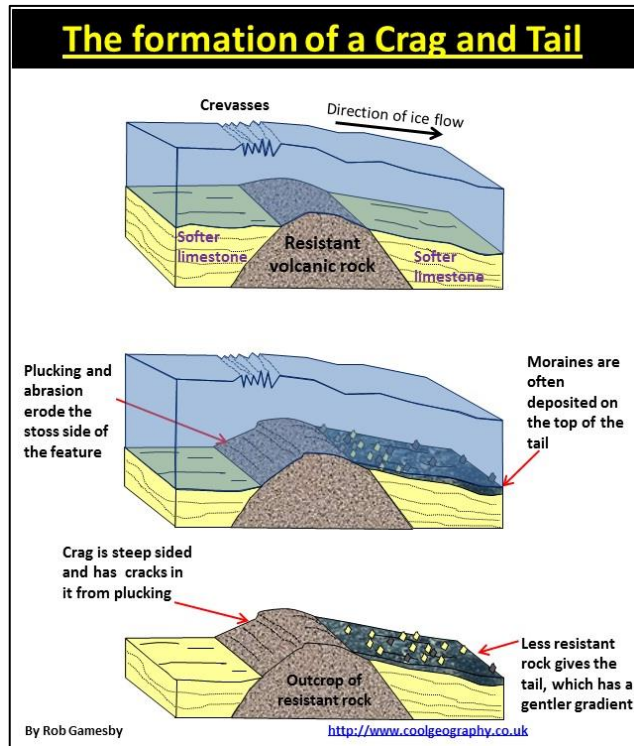


Figure C : Formation des morphostructures de type traînées morainiques derrière abri (« crag &

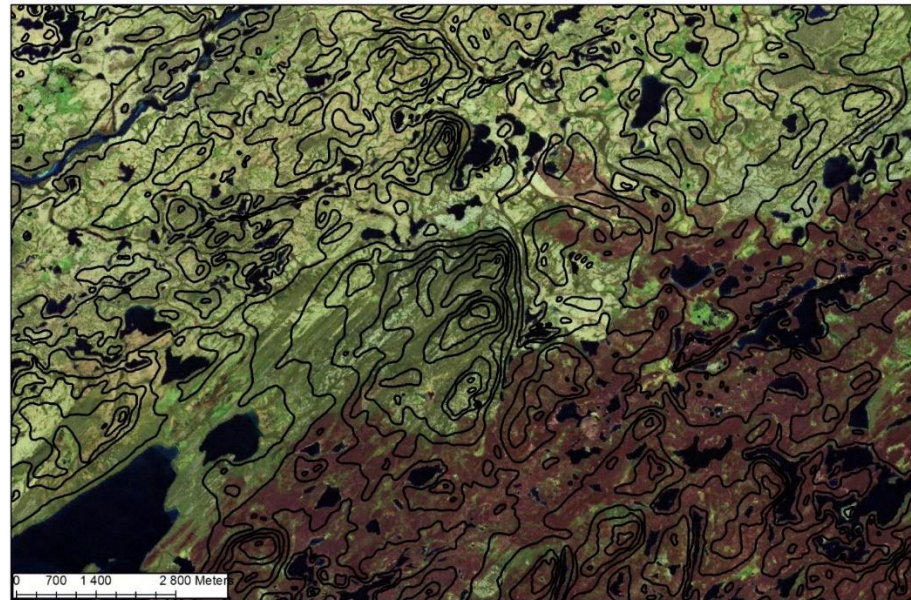


Figure 3a : Morphostructures de type « crag & tail » observées en imagerie satellitaire.

Les drumlins, ou « formes fuselées »

Morphostructures très communes du till sous-glaciaire (figure 4). Ils sont le produit de la déformation du till ou du socle sous-jacent par la glace. Leur détection en imagerie est rendue possible par leur forme très caractéristique, visible sur les figures 4a et 4b et par le fait qu'ils sont typiquement observés en grand nombre et non pas isolés, et constituent des « champs » de *drumlins*. Même si le terrain fuselé montre que le till de fond domine, il peut être couvert par une mince couche de till d'ablation supraglaciaire qui moule le till sous-glaciaire. Il faudra donc suivre le protocole d'échantillonnage pour valider la nature du till par l'observation de terrain et au besoin creuser sous la mince couche (voir **fiche B.2.1 « Protocoles d'échantillonnage du till pour l'exploration minérale »**).



Figure 4 : Drumlin ou « forme fuselée ». La flèche indique le sens d'écoulement glaciaire.

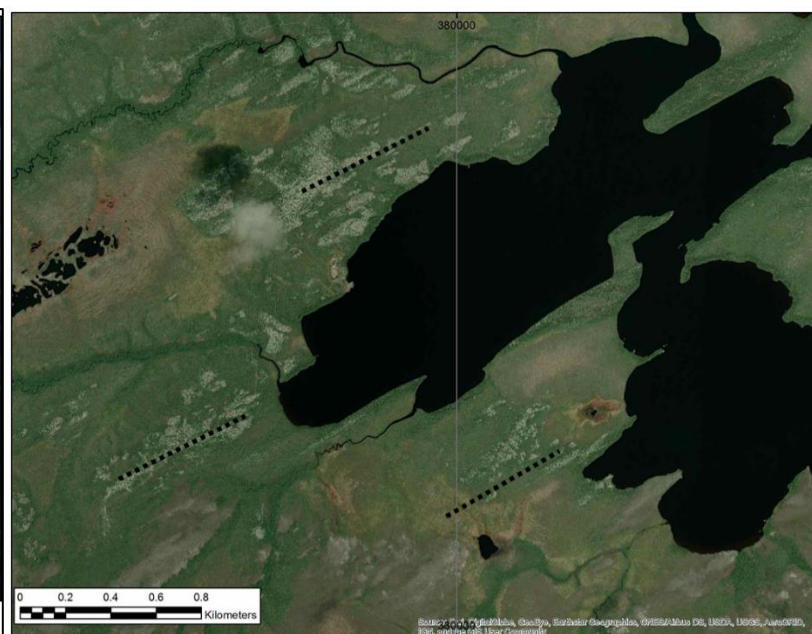


Figure 4a : Formes fuselées observées en imagerie satellitaire.



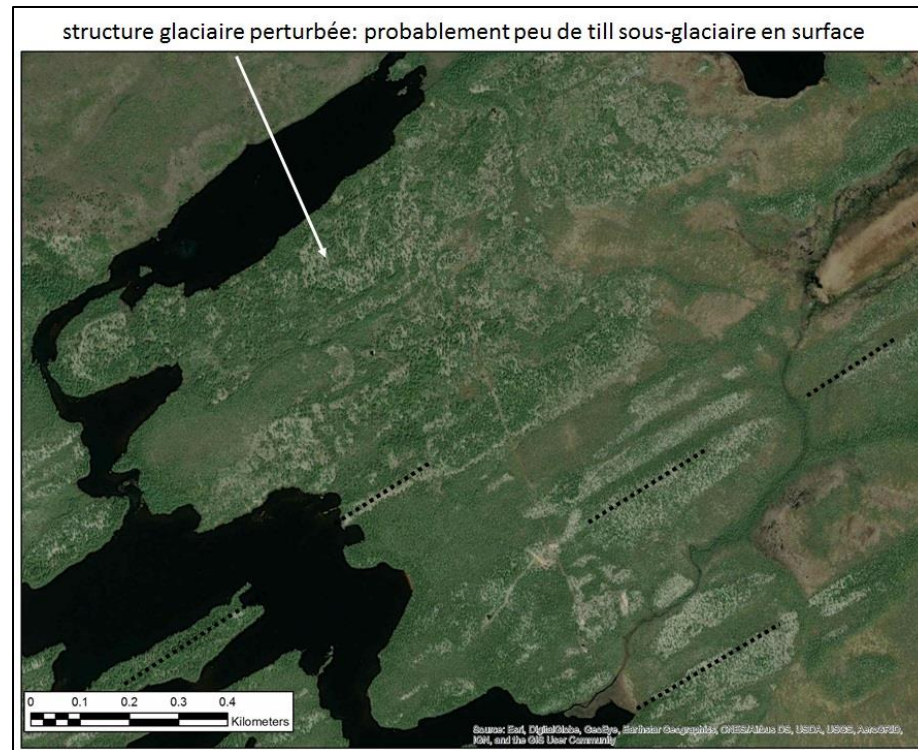


Figure 4b : Formes fuselées observées en imagerie satellitaire.

### Moraines de Rogen ou « moraine côtelée »

Morphostructures caractéristiques du till sous-glaciaire. Croissants perpendiculaires à la direction d'écoulement glaciaire (figures 5 et 6). Les pointes des croissants sont typiquement vers l'aval glaciaire. Certaines moraines sont superposées par des linéations glaciaires et/ou des drumlins. Les moraines de Rogen et les drumlins sont souvent ensemble.

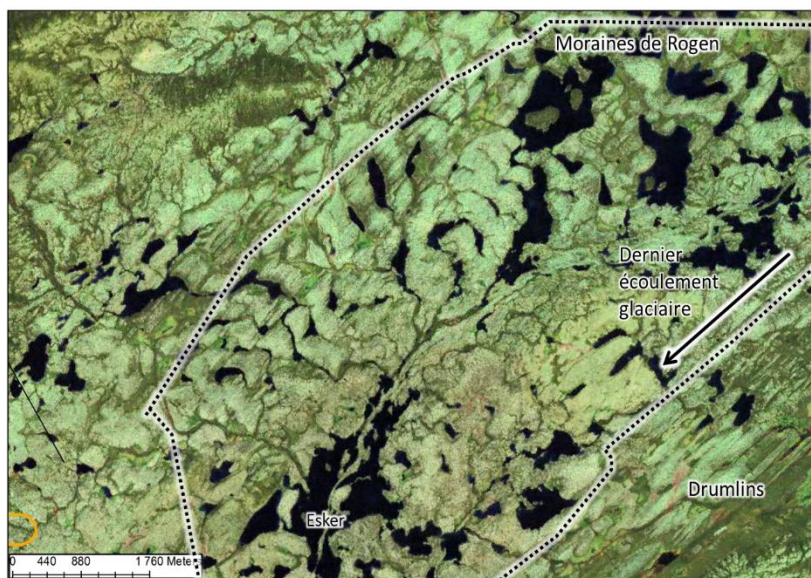


Figure 5 : Moraine de Rogen observée en imagerie satellitaire.  
Note: esker au milieu de la figure (fluvioglaciaire; matériel formé trié par des chenaux d'eau sous la glace).



Figure 6 : Moraines de Rogen et drumlins observés en imagerie satellitaire.



### Moraines de De Geer

Ces morphostructures (figure 7) sont formées au contact entre le glacier et le bassin marin. L'environnement de dépôt qu'ils indiquent n'est **pas propice à l'exploration**, car le matériel est transporté sur de longues distances.

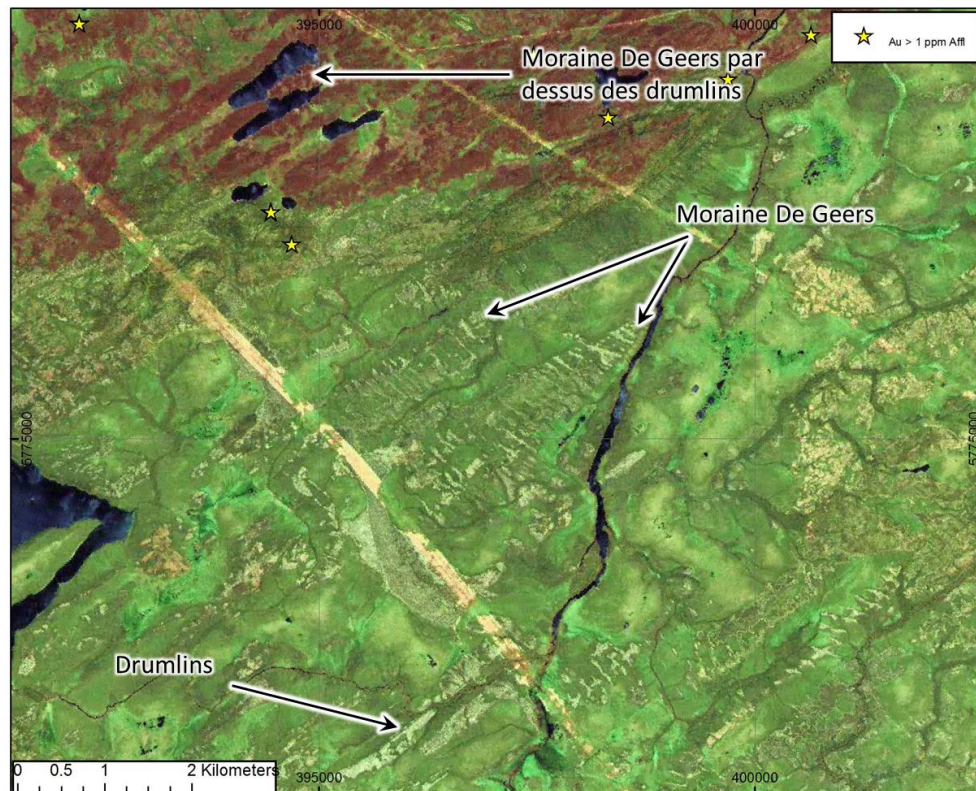


Figure 7 : Moraines de De Geer observées en imagerie satellitaire.

---

## COUCHES D'INFORMATION PUBLIQUE UTILISÉES ET SOURCES

La principale couche d'information utilisée pour la reconnaissance des morphostructures caractéristiques est l'imagerie satellitaire. Le DEM à haute résolution peut être utilisé ainsi que le réseau hydrographie détaillé. Ces couches d'information sont accessibles gratuitement. Les données Landsat sont disponibles à une résolution de 15 mètres (panchromatique) ou 30 mètres (bandes de fréquences individuelles) pour tout le Québec. Les données Sentinel sont disponibles à une échelle de 10 mètres (visible) ou 20 mètres (infrarouge) pour tout le Québec.

Il faut noter que dans plusieurs régions du Québec, des cartes de dépôts de surface réalisées par des experts en géologie du quaternaire / géomorphologie sont disponibles. Ces cartes ont différents niveaux de détail, mais dans plusieurs cas elles sont suffisamment détaillées pour obtenir une évaluation rapide et efficace de la nature du couvert quaternaire. Elles sont complémentaires avec la méthodologie présentée ici et ces cartes devraient être consultées au départ d'un projet. Les sources suivantes sont notamment très utiles :

- Couche « F10E15\_ZONE\_MORPH\_SEDIM » du SIGÉOM, disponible dans les données SIGÉOM à la carte, thème « Géologie du Quaternaire »
- Cartes des dépôts de surface réalisées par la Commission Géologique du Canada, très détaillées notamment en Abitibi (disponibles par le site GEOSCAN, cartes de « série A »).

La couche « Dépôts de surface » des données de « Forêt ouverte » du Gouvernement du Québec, qui fournissent des cartes de dépôts de surface très détaillées pour les régions forestières du Québec, et moins détaillées, mais toujours utiles dans la moitié Nord-du-Québec.



## FICHE A.1.3. – DONNÉES PÉDOLOGIQUES POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### Objectif de cette fiche

Cette fiche a pour objectif de procurer au praticien les outils nécessaires afin de faire les choix appropriés lors de la réalisation d'un levé de sol pour l'exploration minérale. Elle contient des notions de pédologie fondamentales pour la compréhension du milieu ainsi que des informations sur le comportement métallique dans le sol et les performances des différents horizons pour l'exploration.

---

### INTRODUCTION

Est appelée sol la pellicule décimétrique à métrique de terre formée à l'interface entre les milieux lithosphère et atmosphère. Cette zone de contact est le lieu d'interactions actives entre les deux milieux telles que la désintégration des minéraux par les eaux météoriques (oxydation, hydrolyse), permettant la libération de métaux nutritifs et l'approvisionnement minéral des plantes dont la décomposition par humification produira les acides organiques qui contribueront en retour à la destruction du réseau cristallin des minéraux, et l'argilisation (*p. ex.*, formation d'illite ou de kaolinite à partir des silicates ferromagnésiens et des feldspaths). La nature et l'intensité des transformations physico-chimiques apportées au substrat diffèrent significativement d'un sol à l'autre en fonction de différents paramètres, tels que l'importance de l'accumulation et de la décomposition organique, le potentiel redox et l'acidité, le degré de saturation en eau et sa variabilité temporelle, la chimie et la perméabilité du substrat. Il en résulte une grande variabilité de sols, constituant une classification vaste et complexe.

Les sols diffèrent par l'épaisseur et la composition des horizons pédogénétiques successifs qui les constituent : matière organique non-humifiée, acides organiques, minéraux quartzo-feldspathiques primaires, argiles, oxydes de Fe-Mn et carbonates secondaires. **Les horizons distincts des sols constituent en soi des milieux très différents sur le plan physico-chimique.** Les niveaux de base métalliques dans ces différents milieux sont très variables, déterminés entre autres par les affinités des métaux avec les composants de chaque milieu – capacité à se complexer ou s'adsorber sur les composants en place. D'autre part, les performances pour l'exploration minérale sont très variables entre les différents horizons : la capacité des horizons à développer des anomalies à proximité de gîtes métallifères est fortement déterminée par la nature physico-chimique de chaque horizon. Par exemple, les horizons organiques du sol ont des niveaux de base élevés en  $Zn^{2+}$  et  $Au^{2+}$  en raison de la capacité de ces ions à se complexer avec les acides organiques, ce qui fait de l'humus un site d'accumulation « de base » pour ces substances. Toutefois, l'horizon humus ne développe pas d'anomalies significatives en présence de minéralisations, qui seront au contraire davantage détectables dans les horizons minéraux sous-jacents. La raison est que les affinités de  $Zn^{2+}$  et  $Au^{2+}$  avec les acides organiques masquent en concentration le signal des anomalies associées aux minéralisations.

**De manière relativement universelle, les horizons les plus performants pour l'exploration sont les horizons minéraux inférieurs plus ou moins météorisés développés dans des sols de type *podzol* ou *brunisol*. Les sols de type *gleyisol* sont à proscrire pour l'exploration.** Les caractéristiques typologiques de ces sols sont développées plus bas dans cette fiche. En premier lieu, la faisabilité d'un levé de sol consistera donc à vérifier sur le terrain ciblé la présence de sols d'un type potentiellement favorable pour l'exploration, *podzol* ou *brunisol*. Le praticien évitera d'échantillonner des sols de type *gleyisol* présents sur son terrain, et s'abstiendra de réaliser un levé de sol si l'ensemble de son terrain contient essentiellement des *gleyisol*, ce qui souvent est le cas dans les régions couvertes de sédiments argiloglaciaires. Cette évaluation préalable de la faisabilité d'un levé de sol requiert l'analyse des cartes de couverture quaternaire, disponibles sur différents sites de données publiques (voir **fiche A.1.1. « Choix de la méthode selon les paramètres du terrain »**).

D'autre part, on distingue dans les sols deux types de signaux métalliques : 1- le signal endogène, composé d'éléments *in situ* ayant subi une remobilisation locale durant la pédogénèse ; 2- le signal exogène, composé d'éléments *ex-situ* ayant migré depuis une source distale. Des informations approfondies sur la formation de telles anomalies et leur détection sont fournies plus bas dans cette fiche. Selon la nature du signal recherché, les protocoles d'échantillonnage et d'analyse varient fondamentalement (cf. **fiche B.2.2. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols pour l'exploration minérale »**).

Il importera donc au praticien de faire les choix appropriés quant aux protocoles d'échantillonnage et d'analyse, aux méthodes d'interprétation des levés, de contrôle sur la qualité des échantillons, et enfin aux outils de détection des anomalies.

## DONNÉES PÉDOLOGIQUES ET CLASSIFICATION DES SOLS

On trouve au Québec cinq grands ordres de sols : les gleysols, les sols organiques, les luvisols, les brunisols, et les podzols qui sont largement dominants (figure A ; et voir fiche A.1.1. figures D, E, F). Les deux premiers sont des sols peu drainés, souvent réducteurs, saturés en eau et riches en matière organique. Les trois suivants sont des sols bien drainés composés d'horizons bien différenciés. Un des processus importants de cette différenciation est la météorisation intense des minéraux, permise par le lent développement des acides humiques et fulviques dans des conditions de très basse température (podzolisation), suivie du transfert vertical, par hydromorphisme, des éléments passés en solution, puis de leur fixation dans un horizon minéral inférieur enrichi. Ce mécanisme génère la différenciation très caractéristique d'un **horizon lessivé (éluvial) de couleur souvent blanchâtre**, sus-jacent à **un horizon enrichi de couleur brunâtre à rougeâtre**.

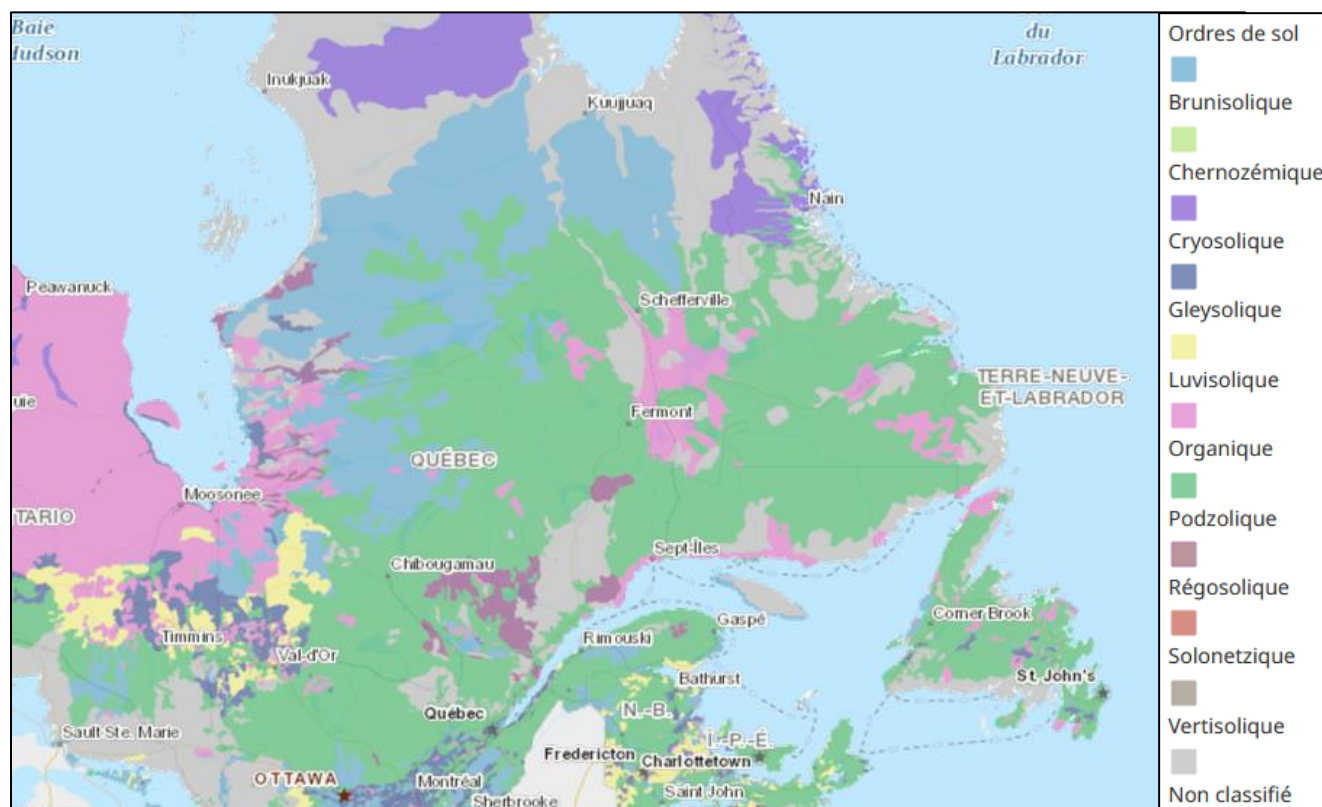


Figure A : Carte générale des pédopaysages du Québec, Consultez : <https://sis.agr.gc.ca/siscan/index.html>.

La séquence de base des horizons formant un sol est : O – A – B – C. Plusieurs déclinaisons existent au sein de ces horizons selon leurs spécificités organiques ou minérales, telles que présentées au tableau 1. L'horizon O est organique, les types Of, Om et Oh traduisent un degré variable de décomposition des fibres en humus. L'horizon A est un horizon minéral appauvri, plus ou moins riche en matière organique (Ah) et plus ou moins bien lessivé (Ae). L'horizon B est un horizon minéral enrichi, le spectre Bh, Bt, Bf, Bm, Bca, Bg reflète des tendances organiques, argileuses, ferreuses, manganifère, carbonatées et gleyifiées. Le lessivage des horizons supérieurs des sols (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) et en éléments plus mobiles Fe, Mn et certains métaux tels que Cu, Ni.

Tableau 1. Caractéristiques générales des horizons des sols. Les propriétés chimiques indiquées sont tirées de la classification des sols conventionnelle produite par le Ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les équivalences en perte au feu (PAF) sont tirées de la présente étude et de Perié et Ouimet (2008). CO : carbone organique. \*Extractible au pyrophosphate de sodium.

<b>HORIZON O</b>				
<i>Horizon organique (mousses, brindilles, terre végétale...). Bien développé en milieu mal drainé. LFH : Litière, Fibres, Humus</i>				
<b>Horizon fibrique Of</b> <i>Peu décomposé, riche en fibres</i>		<b>Horizon mésique Om</b> <i>Intermédiaire</i>		<b>Horizon humique Oh</b> <i>Très décomposé, peu de fibres CO* &gt; 15% (approx. PAF &gt; 30%)</i>
<b>HORIZON A</b>				
<i>Horizon minéral ± enrichi en MO</i>				
<b>Ah</b> <i>Fort enrichissement MO, couleur sombre 5 &lt; CO* &lt; 17 % (approx. 2.5 &lt; PAF &lt; 8.3 %)</i>		<b>Ae</b> <i>Forte éluviation (c.a.d., lessivage), perte d'argiles (texture grossière), perte de fer (couleur pale, cendrée)</i>		
<b>HORIZON B</b>				
<i>Horizon minéral enrichi en oxydes Fe, Mn, argiles, ± enrichi en MO</i>				
<b>Bh</b> <i>Fort enrich. MO, couleur sombre vis-à-vis horizon C</i>	<b>Bt</b> <i>Fort enrich. argile (textures fines, cutanes d'argiles)</i>	<b>Bf-Bm</b> <i>Fort enrich. oxydes ; brunification : oxyde Fe CO* &lt; 5 % (approx. PAF &lt; 2.5 %) ; Al* &gt; 0.1 % (argiles) ; Al* &gt; 0.3 % (sables) ; Fe* &gt; 0.3 %</i>	<b>Bca</b> <i>Fort enrichissement en carbonates secondaires</i>	<b>Bg</b> <i>Textures marmorisées, gleyifiées (milieu réducteur mal drainé)</i>
<b>HORIZON C</b>				
<i>Horizon minéral moins affecté par la pédogénèse</i>				
<b>Cg</b> <i>Gleyfication</i>		<b>Cca</b> <i>Enrichis en carbonates secondaires</i>		

Les sections suivantes décrivent les caractéristiques des ordres (issu de SYSCAN, [Système canadien de classification des sols](#)). Les horizons indiqués en gras sont discriminants.

**L'ordre des podzols** (figure 1) (étym. : du russe, *sous les cendres*) est constitué de la séquence suivante : humus/**Ah** – **Ae** – (Bh) – **Bf/Bc**. Autrement dit, un horizon A très éluvial, de couleur blanchâtre et d'aspect cendré, superposé à un horizon B fortement enrichi en (oxy-(hydr-))oxydes de Fe, Mn ainsi qu'en matière organique à des degrés variables. Ils se forment typiquement dans des conditions de drainage moyen, sur des matériaux parentaux acides de texture grossière à moyenne, sous une végétation de forêt ou de bruyère, dans des pédoclimats frais à très froid, humide à perhumide. Habituellement, les sols podzoliques peuvent se reconnaître facilement sur le terrain. Ils ont des horizons de surface organiques, L, F et H, mais aussi Of ou Om, suivi d'un horizon éluvial Ae de couleur pâle qui peut cependant être absent. La plupart des sols podzoliques ont un horizon B brun rougeâtre à noir, dont la limite supérieure est abrupte et des horizons inférieurs B ou BC dont les couleurs deviennent progressivement de teinte plus jaune et de saturation de couleur plus faible en profondeur, exception faite des matériaux parentaux de couleur rougeâtre à l'origine. **Les horizons B et C de ces sols sont des milieux très favorables à l'échantillonnage pour l'exploration minérale** par la méthode des acides forts/anomalies endogènes (voir détails dans section suivante et dans la fiche **fiche B.2.3. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale »**).

**L'ordre des brunisols** se caractérise par un plus faible degré de pédogénèse et une différenciation moins marquée des horizons. La séquence type est : humus/**Ah** – (Ae) – **Bm**. Ces sols ont un horizon Bm de couleur brunâtre, possiblement avec une faible accumulation d'argile (Btj), d'oxydes de Fe (Bfj), ou des deux. La présence d'un horizon éluvial Ae est facultative. L'ordre comprend aussi les sols ayant un horizon Bf de moins de 10 cm d'épaisseur. L'horizon Bm peut posséder une teinte plus rouge que celle du matériau sous-jacent et peut toutefois se développer dans des matériaux de n'importe quelle couleur, soit gris, brun, noir ou rouge ou dans lesquels la texture varie du gravier à l'argile. Les brunisols se forment sur des substrats bien à imparfaitement drainés, sous couvert forestier (forêt boréale ou mixte avec des arbustes et des herbes) ainsi que dans la lande ou la toundra. **Les horizons B et C de ces sols sont des milieux favorables à l'échantillonnage pour l'exploration minérale** par la méthode des acides forts/anomalies endogènes (voir détails dans section suivante et dans la fiche **fiche B.2.3. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale »**).

**L'ordre des luvisols** (figure 1) est constitué de la séquence humus/**Ah** – **Ae** – **Bt**. Les luvisols se forment typiquement dans des conditions de drainage bonnes à parfaites, par exemple sur des sédiments triés alluvionnaires, ils sont représentés essentiellement au SE de la Province du Supérieur (figure A). L'horizon éluvial est de couleur pâle et l'horizon B est enrichi en argile silicatée. On pense que, durant la formation des sols luvisoliques, il y a suspension d'argile dans la solution du sol près de la surface, descente de cette argile en suspension avec la solution du sol et déposition de l'argile déplacée à une profondeur où le mouvement descendant de la solution du sol cesse ou devient très lent. De façon caractéristique, ces sols se sont formés sous une végétation de forêt, avec pédoclimats subhumides à humide, doux à très froid. Certains sols luvisoliques se développent sur des matériaux parentaux acides et d'autres se rencontrent dans les zones de transition prairie-forêt. **L'horizon C (et moindrement le B), de ces sols, sont des milieux favorables à l'échantillonnage pour l'exploration minérale** par la méthode des acides forts/anomalies endogènes (voir détails dans section suivante et dans la fiche **fiche B.2.3. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols l'exploration minérale »**).



**L'ordre des gleysols** (figure 1) est constitué de la séquence caractéristique suivante : humus/**Ah** – (Bg) – (Cg). 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.

Ces sols contiennent un horizon organique souvent très épais, pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, de sorte que les horizons minéraux inférieurs sont difficilement échantillonnables. Ces horizons minéraux sont par ailleurs gleyifiés, c.-à-d. marmorisés, ce qui indique l'influence de conditions prolongées de réduction et de saturation en eau périodique ou permanente au cours de la pédogenèse du sol. La saturation d'eau peut être due à une nappe phréatique peu profonde ou à l'accumulation temporaire d'eau au-dessus d'une couche relativement imperméable, ou les deux. **Ces sols sont des milieux défavorables à l'échantillonnage pour l'exploration minérale.**

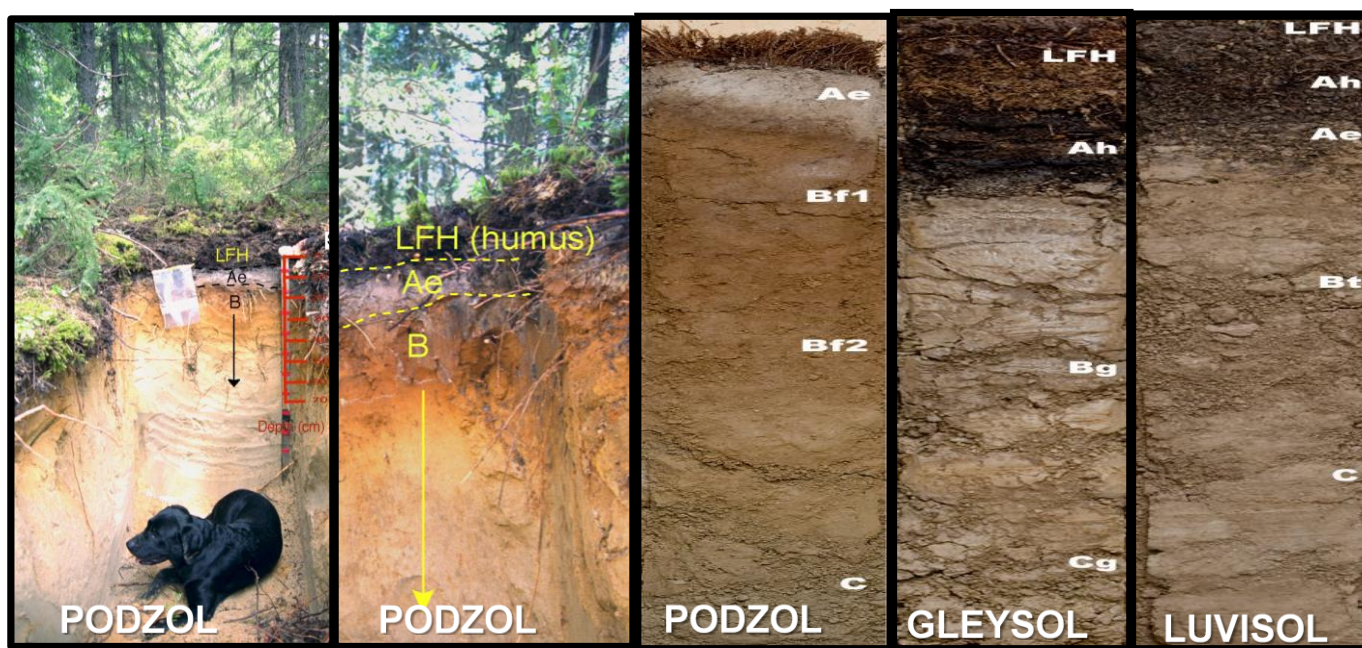


Figure 1. Photos de podzols, gleysol et luvisol (1re et 2e gauche : crédits Camiro – Cross Lake ; autres : site web OGS)

Bien que, à climat égal, la nature du substrat ne soit pas l'unique facteur contrôlant le type de sol (d'autres facteurs de premier ordre sont la profondeur de la nappe phréatique, l'accumulation et la décomposition organique, la géomorphologie du terrain), il demeure les corrélations suivantes :

- 1- Les tills sont des substrats favorables au développement de podzols, sur les terrains légèrement pentés ou sur les sommets de reliefs ondulés ;
- 2- Les sédiments triés, typiquement très perméables (dépôts alluvio-fluvio-glaciaires), sont propices à la formation de luvisols ;
- 3- Les sédiments argileux, ou les zones de cuvette dans lesquelles la nappe phréatique y est peu profonde sont propices à la mise en place de gleysols ou de sols organiques. Ces sols sont très fréquents en Abitibi, où ils occupent en grande partie la vaste plaine argiloglaciaire du lac tardiglaciaire Ojibway (figure A).

Pour finir, 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). Les clefs de la reconnaissance pédologique sont données sur le site du système canadien de classification des sols à l'adresse suivante : [https://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/chpt03\\_a.html](https://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/chpt03_a.html)

Ces travaux émanent 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.

---

## GÉOCHIMIE DES SOLS POUR L'EXPLORATION : FAVORABILITÉ, SIGNAUX DE BASE ET ANOMALIES

### Transfert métallique durant la pédogénèse et niveaux de base

La pédogénèse induit une redistribution des éléments dans le sol, incluant les métaux d'intérêt pour l'exploration ainsi que leurs marqueurs. Les sulfures sont des phases minérales labiles, autrement dit peu résistantes à la météorisation. La déstabilisation des sulfures durant la pédogénèse, principalement par oxydation, entraîne la libération des métaux dans la phase aqueuse. Les métaux sont transportés par infiltration de l'eau météorique vers les horizons inférieurs, B et C. Dans ces horizons, les minéraux préférentiels de fixation des métaux par adsorption sont les phyllosilicates primaires et secondaires du fait de la forte capacité d'échange cationique de ces minéraux, ainsi que les oxydes Fe-Mn essentiellement secondaires, qui contiennent une grande quantité de sites d'adsorption spécifique et non spécifique. Par ailleurs, l'acidité de l'horizon B est moins forte que les horizons supérieurs en raison d'une plus faible concentration en acides organiques (< 5% de carbone organique extractible au pyrophosphate de Na). Ce pH plus élevé diminue la mobilité des métaux dissous et favorise par conséquent leur fixation, par adsorption ou précipitation. L'horizon B est donc un milieu de réception et d'accumulation métallique par excellence, toutefois cette capacité de fixation évolue suivant la très grande variabilité compositionnelle de ces milieux, entre les pôles organiques (Bh), argileux (Bt), et ferrugineux (Bt, Bm). Pour finir, les acides organiques humiques et fulviques forment des complexes très stables avec certains métaux transitionnels ou précieux incluant l'or. La matière organique humifiée est donc un milieu de fixation privilégié de certains métaux en solution.

Il en résulte que la pédogénèse s'accompagne d'une très forte remobilisation métallique, produisant différents profils de concentration métalliques selon les propriétés de chaque métal, sa mobilité, sa sensibilité au pH, ses affinités avec les acides organiques, les phyllosilicates et les oxydes amorphes. Les profils types de concentration sont présentés sur la figure 2, pour un sol fortement différencié (podzol). Ces profils ont été établis d'après la littérature (Klassen, 2003) ainsi que par l'analyse de bases de données régionales (Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06). Les profils de concentration dominés par le lessivage dans l'horizon A et l'accumulation inorganique dans l'horizon B sont ceux de Fe, Mn, Al. À noter que certains métaux, tels que Cu et Ni, présentent un profil marqué par un lessivage dans l'horizon minéral supérieur Ae, qui ne donne pas lieu à une fixation dans l'horizon inférieur. Un troisième type de profil est dominé par l'accumulation organique, autrement dit la propension du métal à former des complexes avec les acides fulvique et humiques, il s'agit par exemple de Zn et Au.

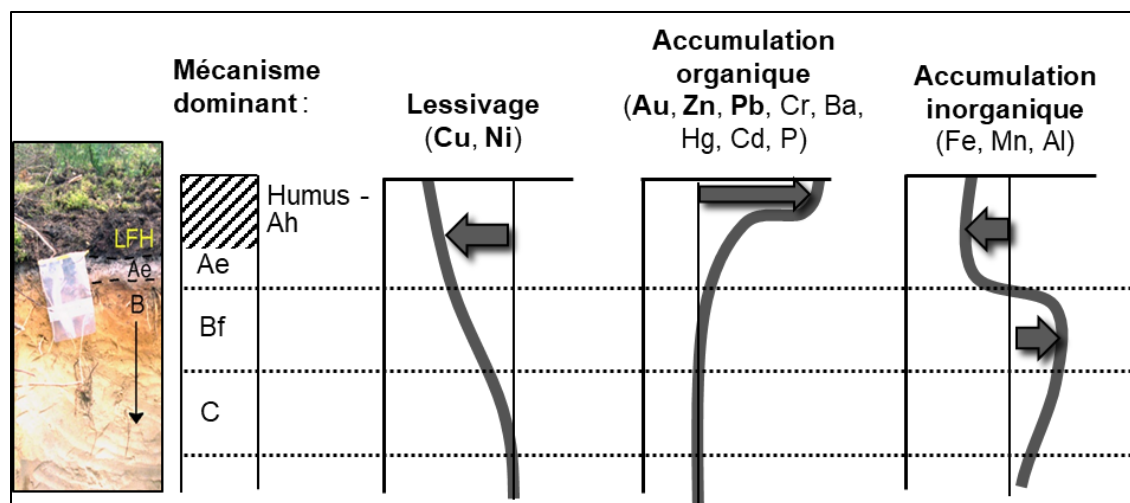


Figure 2 : Profils de concentration métallique dans un sol fortement différencié de type podzol (Klassen, 2003 ; Rafini, 2012 – projet CONSOREM 2011-06).

### **Comportement de l'or au cours de la pédogénèse**

Les profils de concentrations en Au dans les sols montrent systématiquement des niveaux de base plus élevés dans l'horizon organique humus que dans les horizons minéraux sous-jacents. Le profil de concentration présenté en figure 3, issu des données produites par l'OGS (*Ontario Geological Survey*) dans 373 stations d'échantillonnage multihorizons dans le secteur de Sudbury (MRD 061), montre que le niveau de base aurifère dans l'humus a une valeur médiane de 12.6 ppb (humus < 177  $\mu\text{m}$ , aqua-regia/FA-ICP) contre 1.06 et 1.75 ppb dans les horizons B et C (< 63  $\mu\text{m}$ ). Ce profil est 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. Ceci reflète vraisemblablement les affinités de Au avec les ligands organiques, qui font de l'horizon humus un site d'accumulation naturelle de l'or en concentration ultratrace.

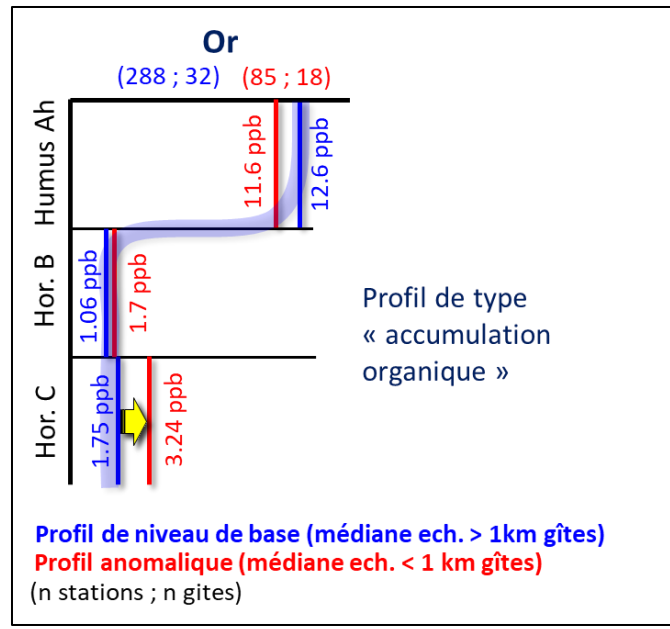


Figure 3 : Comportement de l'or dans un sol fortement différencié de type podzol. Données OGS (stations multihorizon), MRD61, n = 373 (secteur de Sudbury, Ontario).

Le profil de concentrations aurifère dans les sols différenciés de l'ordre des podzols, présenté en figure 3, révèle une forte affinité de l'or avec la matière organique humifiée. En allant plus loin, la compilation de plusieurs levés aurifères dans l'humus contenant des analyses du carbone organique (CO) confirme cette affinité (figure 4) : il existe une corrélation positive significative entre ces deux signaux, avec un coefficient Pearson égal à 0.33 (n = 411). Un résultat analogue est obtenu avec la perte au feu (PAF) du sol, qui est un autre marqueur de son contenu organique. Cette corrélation positive entre les concentrations aurifères du sol et son contenu organique, indiqué tant par le CO que par la PAF, 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.

De par son très faible potentiel ionique ( $z/r = 0.72$ ), l'or est un élément extrêmement stable et inerte. Il est communément admis que l'existence d'or ionique est limitée, voire inexistante, dans les conditions Eh-pH-température standards superficielles, pour des compositions chimiques standards. Dans les conditions de forte activité des ligands halogènes *chlorure* et *bromure*, l'or est toutefois mobilisé par les complexes anioniques  $AuCl^-$  et  $AuBr^-$ , (Lintern et al., (2009).



Il peut aussi s'agir d'une corrélation dite *partielle*, traduisant les corrélations des deux signaux à un même tiers paramètre, qui pourrait en l'occurrence être le pH-Eh. En effet, l'humus est typiquement l'horizon le plus acide du sol du fait du développement des acides organiques. Dans certains contextes de faible drainage, il devient aussi réducteur avec la saturation, par un excès de matière organique, de la capacité oxydante des eaux météoriques peu renouvelées. La mobilité ou la stabilité de Au dans le sol, c.-à-d. sa propension à se complexer, demeurer dans l'eau, ou au contraire à se fixer sur le substrat solide par adsorption et, possiblement, par complexation avec les ligands organiques immobiles, est déterminée, et possiblement favorisée, par le caractère acide et réducteur du milieu.

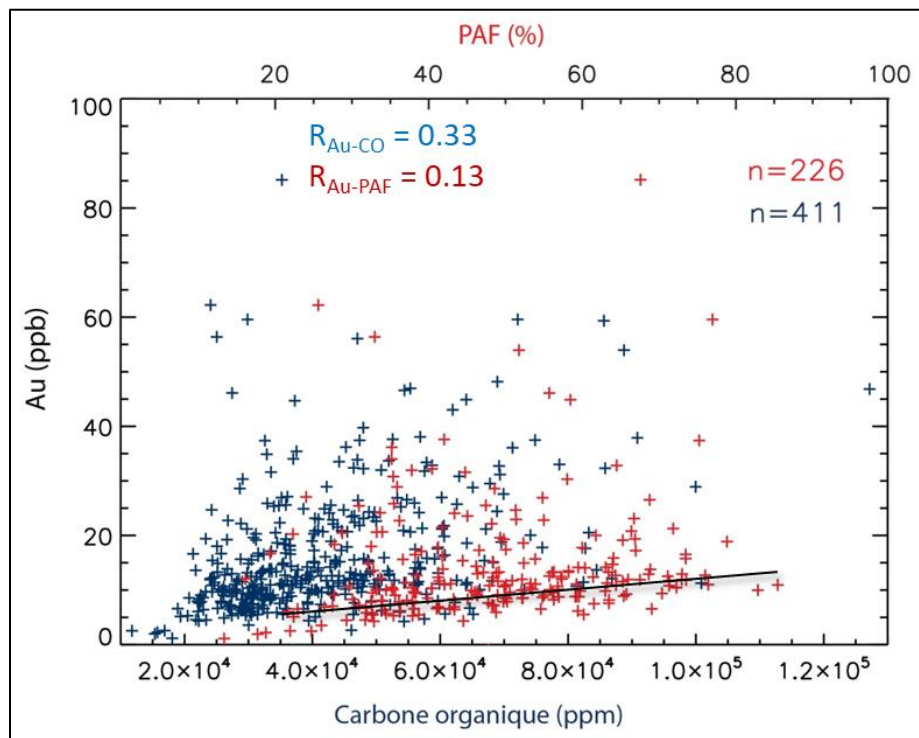


Figure 4 : Relation entre la concentration en or et le contenu organique dans les horizons organiques des sols. CO extractible au Na-pyrophosphate. Données OGS, MRD61 (n = 411), MRD (n = 226).

Notons pour finir que, en contextes d'oxydation d'un dépôt sulfuré caractérisés par une activité élevée du soufre dans l'eau souterraine, les ligands thiosulfates  $\text{S}_2\text{O}_3^-$  ont la capacité de mobiliser Au.

**Développement des anomalies endogènes dans le sol**

Bien que les profils de niveaux de base soient variables selon les éléments, comme expliqué dans la section précédente, les horizons dans lesquels se développent les anomalies à proximité de gîtes métallifères sont systématiquement les horizons minéraux inférieurs du sol, autrement dit l'horizon B et l'horizon C. Ceci est démontré sans équivoque par l'analyse de plusieurs bases de données régionales de géochimie des sols sur des stations multihorizons produits par l'OGS dans la Province du Supérieur (Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06). Un exemple est présenté par la figure 5, qui montre les statistiques d'évolution du signal cuprifère dans les trois horizons Ah, B et C, dans la région de Timmins (Ont., données OGS, MRD015) à différentes distances des gîtes cuprifères. Ces statistiques sont établies sur un nombre total de 918 stations d'échantillonnages multihorizons, le détail du nombre de stations et du nombre de gîtes pour chaque tranche de distance est donné dans la légende. La nature exacte des horizons échantillonnés n'est pas contrôlée ni vérifiée par la géochimie dans cette étude, ce qui induit certainement une imprécision et une baisse de performance. En dépit de ceci, **l'analyse met clairement en évidence le développement d'un signal anomalique cuprifère dans l'horizon C, et moins dans l'horizon B, et l'absence totale d'un tel signal dans l'horizon organique Ah/humus.**

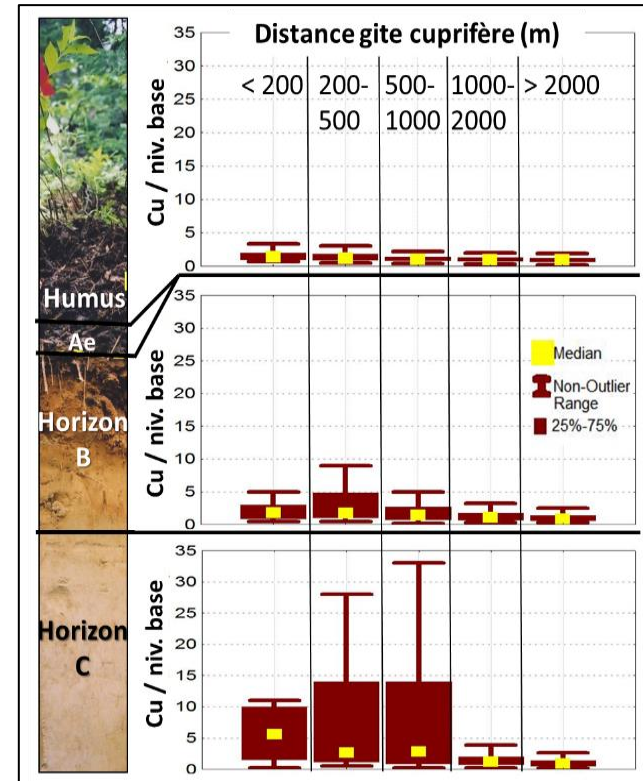


Figure 5 : Évolution du signal Cu dans les horizons d'un sol à différentes distances des gîtes cuprifères dans le secteur de Timmins, Ontario (données OGS, MRD015). Les valeurs sont rapportées au niveau de base de chaque horizon (médianes). Nombre de stations et nombre de gîte par tranche de distance : >2km, 608 stations ; 1-2km, 96 stations/42 gites ; 0.5-1km, 51 stations/23 gites ; 0.2-0.5km, 39 stations/16 gites ; < 0.2km, 30 stations/9 gîtes.

Les statistiques de concentrations en plusieurs métaux d'intérêt pour l'exploration, Cu, Zn, Ni, Pb, Au, sont présentées sur la figure 6 à partir de la même base de données du secteur de Timmins (MRD015) et d'une base de données additionnelle analogue à celle-ci produite par l'OGS dans le secteur de Sudbury (MRD061). L'évolution du signal métallique depuis le niveau de base, indiqué par les échantillons distaux aux gîtes, jusqu'au profil anormalique mis en évidence par les échantillons situés à moins de 1 km des gîtes, confirme les conclusions précédentes : pour tous ces éléments, **le profil anormalique montre un enrichissement dans l'horizon C toujours supérieur à l'enrichissement de l'horizon B, tandis que l'horizon organique n'est jamais enrichi à l'exception de Zn (contaminations ?)**. Ceci, indépendamment du profil de niveau de base.

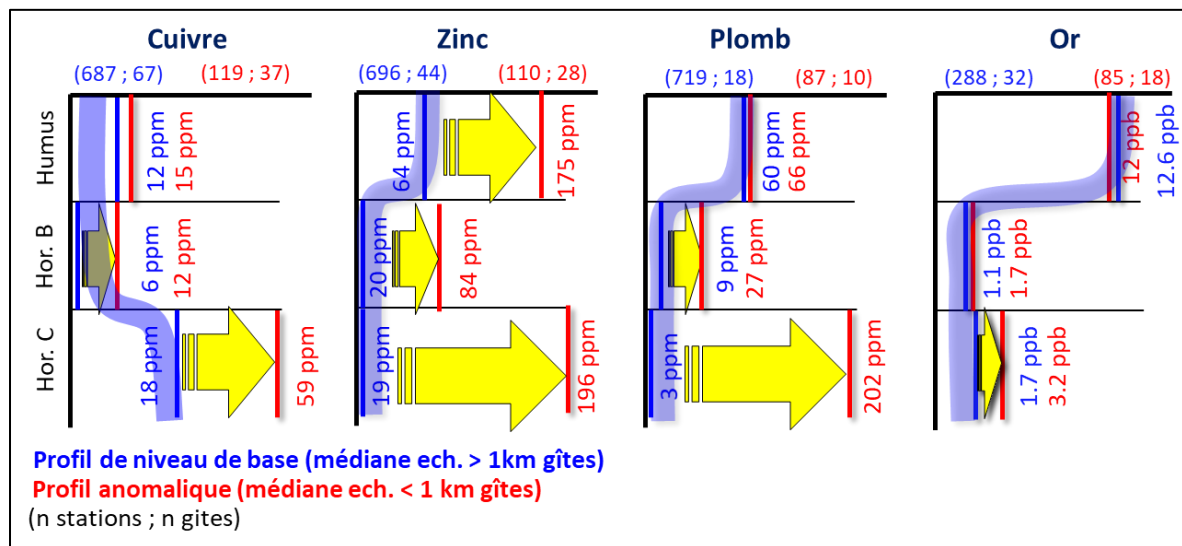


Figure 6 : Concentrations médianes en Cu, Zn, Pb et Au dans les horizons d'un sol différencié. Profil de niveau de base en bleu (échantillons loin des gîtes) et profil anormalique en rouge (échantillons proches des gîtes). Les flèches jaunes illustrent l'enrichissement dans le profil anormalique. Données OGS (Au : MRD061, Autres : MRD015). Le nombre de stations et de gîtes est indiqué entre parenthèses.

L'horizon organique Ah/humus présente un niveau de base élevé en plusieurs éléments tels que Au, Zn, Pb, ayant des affinités avec les acides organiques, comme expliqué précédemment. Toutefois, les anomalies à proximité des gîtes métallifères ne se développent pas dans cet horizon, mais dans les horizons minéraux inférieurs. **Il est donc primordial de bien noter ici que le milieu montrant un niveau de base élevé n'est pas le milieu montrant un fort enrichissement dans le profil anormalique.** Une des raisons, qui n'est toutefois pas suffisante, est que l'enrichissement relatif est diminué par un niveau de base élevé.

### Non-reproductibilité du signal métallique de l'horizon organique humus/Ah

Les concentrations métalliques dans l'horizon organique sont un signal peu reproductible, très versatile et sensible aux contaminations et aux variations saisonnières. Une station analysée anormale en Au dans l'humus (36 ppb, FA/AN), rééchantillonnée 19 fois le mois suivant dans un rayon de 10 m n'a fourni aucune valeur supérieure au seuil de détection de 5 ppb ! (Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06). Par ailleurs, la reproductibilité des données a été testée sur une traverse à un mois d'intervalle, en juin en période chaude et sèche, et en juillet dans des conditions pluvieuses. Les coefficients de corrélation  $R^2$  entre les deux séries d'analyses sont inférieurs à 0.1 pour Cu, Zn, Ni, Ag, Au ! (Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06). La versatilité du signal métallique de l'horizon humus est illustrée aussi par les contaminations systématiques en Zn et Cu mesurées dans l'environnement de la fonderie de Flin-Flon (McMartin et al., 2000) et en Ni, Cu dans l'environnement de la fonderie de Sudbury (Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06). Ces contaminations atteignent deux ordres de grandeur en amplitude et sont détectées sur de très grandes distances, de l'ordre de la 100aine de km dans le camp de Flin-Flon. Pour terminer, les concentrations en Zn et Au de l'horizon Ah/humus et de l'horizon C ont été comparées sur un très grand nombre de stations d'échantillonnage multi-horizons, grâce à une compilation par Rafini (2012) de 8 bases de données générées par l'OGS dans la Province du Supérieur (Figure 7). Sur cette figure, la présence de minéralisations est indiquée par la distance aux gîtes zincifères (Figure 7A) et par le compte de grains d'or (Figure 7B). Les valeurs médianes et anormales (95<sup>e</sup> centile) sont indiquées par des lignes, dans chaque horizon (sur chaque axe). Ces diagrammes permettent plusieurs observations importantes : 1- les valeurs anormales du signal métallique mesuré dans l'humus/Ah et dans l'horizon C montrent une faible corrélation ; 2- **seules les valeurs anormales mesurées dans l'horizon C sont corrélées avec la présence de minéralisations, les valeurs anormales dans l'humus/Ah seulement ne présentent aucun lien avec les minéralisations.**

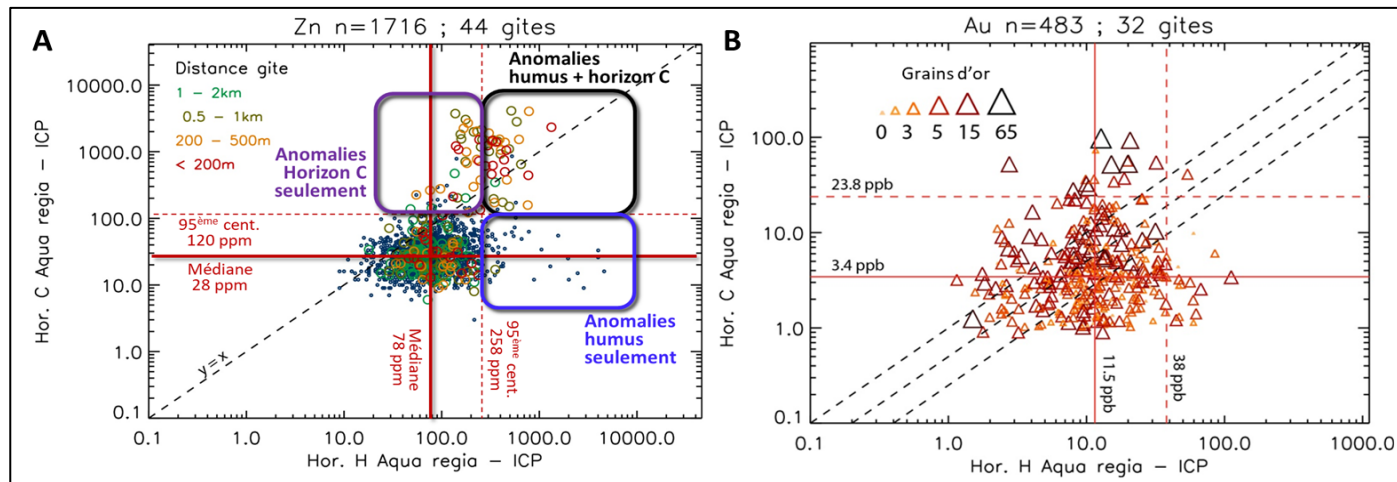


Figure 7 : Diagrammes des concentrations en A) Zn et B) Au, dans les horizons Ah/humus et C, avec symbolisation selon la minéralisation, A) proximité d'un gîte zincifère identifié, B) compte de grains d'or dans l'échantillon. Données prélevées par l'OGS dans différentes régions de la Province du Supérieur (détails dans Rafini, 2012, projet CONSOREM 2011-06) : MRD015,



---

## RÉFÉRENCES

- 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>
- Aspandiar, M. F., Anand, R. R., & Gray, D. J., 2008, *Geochemical dispersion mechanisms through transported cover: implications for mineral exploration in Australia*. CRC Leme.
- Cameron EM, Stewart Hamilton, M. Beth McClenaghan, 2004, Cross Lake: geochemical data and interpretations on soil samples, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
- Carey M.L., McPhail D.C. et Taufen P.M. 2003, Groundwater flow in playa lake environments: impact on gold and pathfinder element distributions in groundwaters surrounding mesothermal gold deposits, St. Ives area, Eastern Goldfields, Western Australia, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3:57-71
- Gray D.J., 1998, Characteristics of gold distribution and hydrogeochemistry at the Carosue Dam Prospect, Western Australia: Preliminary Report.
- Gray D.J., 2001, Hydrogeochemistry in the Yilgarn Craton. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1:253-264.
- Hamilton, S. M., Cameron, E. M., McClenaghan, M. B., & Hall, G. E. M., 2004, Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden. Part I: methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1), 33-44.
- 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
- Rafini, S., 2011, Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts. Projet CONSOREM 2016-05, 42 p.
- Rafini, S., 2010, détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI : Synthèse, études de cas, perspectives. Projet CONSOREM 2010-07, 49p.
- Rafini S., 2017, Hydrogéochimie des eaux souterraines appliquées à l'exploration minérale – Phase 1. Projet CONSOREM 2016-05, 65 p.
- Taylor, G., & Eggleton, R. A., 2001, *Regolith geology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Smee B., 2003, Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples, *Explore*, 18:1-19

## FICHE A.1.4. – LEVÉS BIOGÉOCHIMIQUES EN EXPLORATION MINÉRALE

### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche permet de guider le praticien en exploration minérale pour utiliser les écorces des épinettes noires lors des levés d'exploration en contexte boréale, de la planification d'un levé en passant par le traitement des données et l'interprétation des résultats. Il s'agit de conseils préliminaires suggérés à la suite d'une première phase d'évaluation de la méthode.

---

### PRINCIPES

#### Documents source

Le projet CONSOREM 2022-03 (M. Gigoux) s'est intéressé à l'évaluation de la méthode biogéochimique appliquée à l'exploration minérale au Québec, plus spécifiquement en Abitibi. Un total de 9 levés d'écorces, répartis à l'échelle de l'Abitibi et compilant plus de 5500 données homogènes en protocoles de préparation et d'analyse, a permis d'appréhender les différents paramètres de contrôle de la géochimie des écorces d'épinettes noires : métabolisme, pédogénèse, tourbières, géomorphologie, etc. Ce travail a permis de présenter le potentiel et les limites de la méthode pour l'exploration minérale en contexte boréal.

#### Description de la méthode

La méthode biogéochimique est basée sur le fait que les racines de la plante pénètrent les horizons du sol et aient accès aux sédiments meubles, au roc fracturé et aux eaux souterraines locales leur permettant d'accumuler certains éléments métalliques dans leurs écorces, leurs aiguilles et/ou leurs feuilles (Colin Dunn, 2007). En d'autres termes, la biogéochimie est basée sur la capacité de la plante à absorber, concentrer et métaboliser les métaux dans ses tissus. Selon Hulme *et al.*, (2006), la géochimie de l'humus et des végétaux peut être considérée comme l'extension en surface du substrat géologique. Cependant la relation entre la présence de minéralisation dans le sous-sol et les compositions géochimiques des tissus des végétaux n'est pas toujours simple à déterminer. Bien que l'utilisation de la biogéochimie en exploration débute autour de 1940 en Russie et en Suède (Tklich, 1938; Brundin, 1939), dans des contextes comparables à ceux du Québec, son application est encore sous-utilisée par les compagnies minières en dépit de son potentiel existant.

#### Résumé des bonnes pratiques

- Sélectionner des épinettes aux diamètres de tronc homogènes, entre 10 et 20 cm idéalement, au regard des corrélations positives existantes entre les bruits de fond des éléments métalliques (médianes) et les classes de diamètre des épinettes. La stratégie est de choisir des épinettes assez matures dont les tissus aient eu le temps nécessaire d'accumuler les éléments nutritifs et non nutritifs.
- Éviter les zones de tourbières et les zones potentiellement contaminées (bord de route, chemins de fer, fonderie, usine, mine en activité, etc.).

- Avantage à réduire les écorces en cendre au stade de préparation des échantillons avant analyse pour la détection de l'or pour limiter les effets de dilution des faibles teneurs. Le choix des protocoles de préparation et d'analyses des échantillons doit se décider en fonction de la substance recherchée et des contextes environnementaux.
- Ne pas utiliser les valeurs brutes analysées pour la détection des anomalies, mais privilégier les méthodes statistiques multivariées pour le calcul des seuils anomaux.

---

## **CONTRÔLE DU FOND GÉOCHIMIQUE**

### **Métabolisme, pédogénèse et géomorphologie**

L'épinette noire est une essence uniquement présente en Amérique du Nord et naturellement absente ailleurs dans le monde (Gagnon et Morin, 2001). Quand on s'intéresse à l'épinette, il est nécessaire de comprendre son interaction avec son environnement. Les principaux paramètres qui peuvent influencer la géochimie des végétaux sont les suivants : le métabolisme et la croissance de la plante, le type de sol, la qualité du drainage du sol, l'épaisseur du sol, le type de dépôt de surface, la géomorphologie, la profondeur du système racinaire, les variations saisonnières. Les éléments nutritifs de la plante peuvent rentrer en concurrence directe avec ceux recherchés en exploration. Ajoutés à ces divers paramètres d'influence, les effets de la contamination anthropique ne sont pas toujours simples à quantifier et peuvent avoir un rôle à jouer. Les écorces sont exposées aux dépôts passifs de pollution atmosphérique, de pluies acides, de poussières de route, mines et autres.

Les médianes des teneurs en éléments métalliques sont positivement corrélées au diamètre de l'épinette et à la pente sur laquelle va se développer les conifères (Figure 1A, B, C, D, E, F, G). Les résultats du projet ont également démontré l'effet des tourbières sur les teneurs en métaux dans les écorces d'épinettes qui grandissent dans les tourbières (Figure 1H, I, J). Le bruit de fond géochimique est de 1,2 à 2 fois supérieur à celui des épinettes en dehors des tourbières. À l'échelle du levé, les teneurs en or dans les écorces des épinettes dans les tourbières peuvent être jusqu'à 3 fois plus élevées comme à Megiscane. Tandis qu'à l'échelle de tous les levés, la différence est très faible au regard des mauvaises qualités d'analyses. Les moyennes et médianes des teneurs en éléments essentiels et non essentiels dans les écorces sont synthétisées dans le tableau 1. Il existe une suite d'éléments qui sont très mal détectés dans les écorces non réduites en cendre : Au, Se, Be, Pd, Pt, Re, Sn, Te, W. Les proportions d'échantillons en dessous de la limite de détection sont généralement supérieures à 30% et/ou avec une proportion de valeurs uniques très faible. Pour ces raisons, cette suite d'éléments ne sera pas considérée pour la partie suivante des traitements statistiques. À noter que cette étude a finalement été limitée à des levés d'écorces dans des contextes d'exploration loin de minéralisations connues ce qui a permis d'établir le bruit de fond des teneurs en différents métaux, mais pas de documenter les signatures métalliques au-dessus de gisements ou de gîtes. Ainsi, il se peut que la détection de certains éléments soit faible ou inexistante dans les écorces pour cette raison-là, ajoutées au fait que les écorces n'aient pas été réduites en cendre. En effet, la réduction en cendre permettrait de rehausser la détection de certains éléments comme l'or, au détriment de la perte de certains volatiles comme l'antimoine.

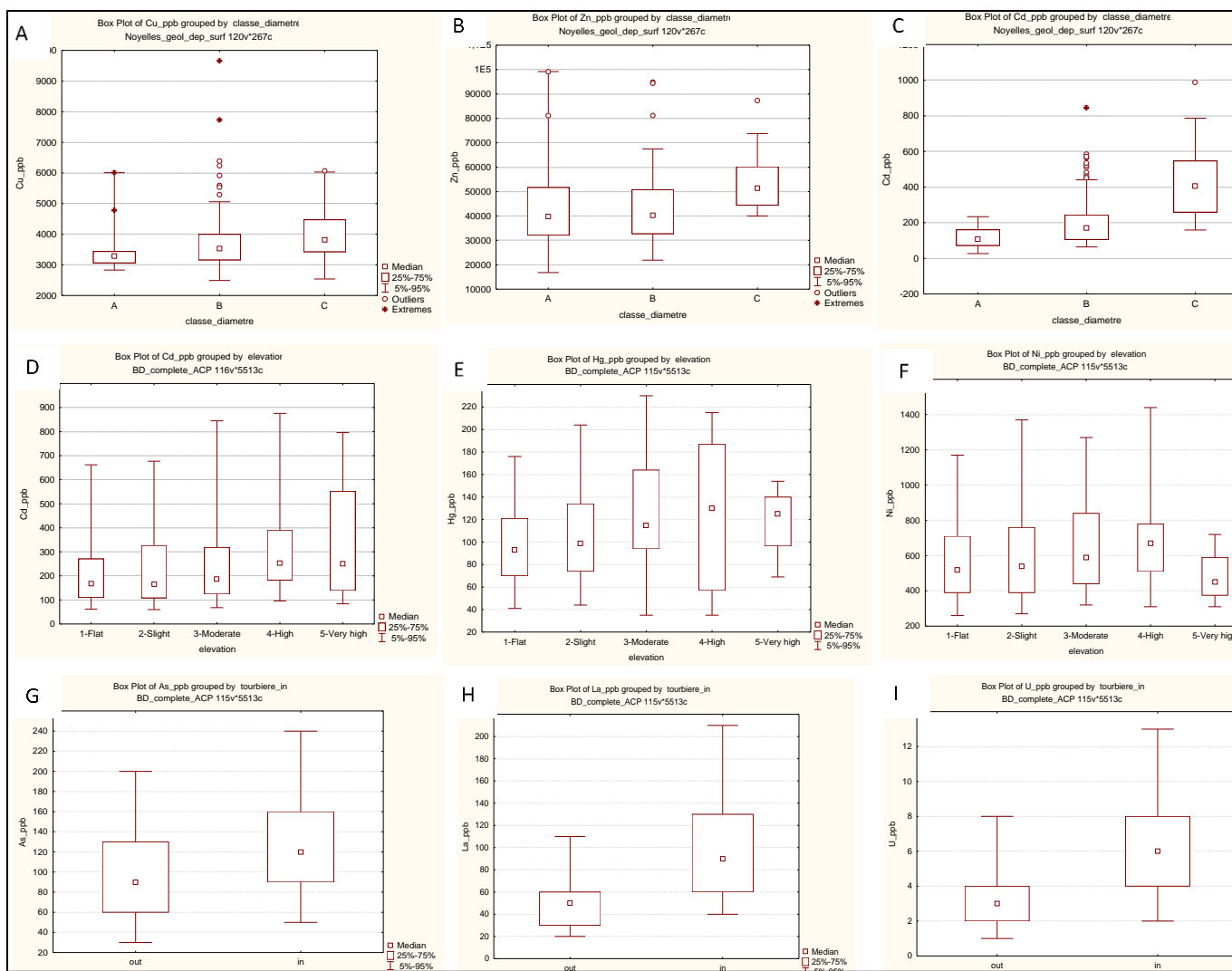


Figure 1. Distribution box-plot des teneurs en métaux en fonction des paramètres environnementaux et métaboliques; A, B,C : teneurs Cu, Zn, Cd en fonction des classes de diamètres des troncs d'épinettes noires. Classe A entre 0 et 10 cm, classe B entre 11 et 20 cm, classe C entre 11 et 27 cm; D, E, F : teneurs Cd, Hg, Ni en fonction de l'intensité de la pente, de plate à très pentue; G,H,I : teneurs As, La et U en fonction de la localisation des épinettes dans la tourbière ou en dehors.

Tableau 1 : Moyenne et médiane des éléments essentiels et non essentiels dans les écorces d'épinettes noires non réduites en cendre calculés à partir de la compilation des 9 levés en Abitibi. Les éléments en gris sont mal analysés ou non détectés. Les concentrations en or sont indiquées à titre indicatif, la limite de détection étant de 0,2 ppb.

*Essentiels*

	B ppm	Ca ppm	Co ppb	Cu ppb	Fe ppm	K ppm	Li ppb	Mg ppm	Mn ppb	Mo ppb	Na ppm	P ppm	Rb ppb	Se ppb	Sr ppb	Ti ppb	Zn ppb
Moyenne Écart-type	4 ± 1	8361 ± 1650	82 ± 38	3237 ± 362	82 ± 11	342 ± 82	24 ± 7	189 ± 25	360537 ± 34998	29 ± 3	13 ± 2	130 ± 27	872 ± 334		15863 ± 4355	1996 ± 351	50222 ± 3980
Médiane dans les tourbières	3	8380	73	3380	119	300	30	175	269000	40	14	124	650		12800	2955	56100
Médiane en dehors des tourbières	4	7980	72	3110	71	320	20	186	371000	20	11	125	860		16400	1760	49100

*Non essentiels*

	Ag ppb	Al ppm	As ppb	Au ppb	Ba ppb	Be ppb	Bi ppb	Cd ppb	Ce ppb	Cr ppb	Cs ppb	Ga ppb	Ge ppb	Hf ppb	Hg ppb	In ppb	La ppb
Moyenne Écart-type	21 ± 2	58 ± 8	103 ± 24	0,2 ± 0,3	63999 ± 15896		24 ± 5	192 ± 80	107 ± 11	408 ± 94	18 ± 10	21 ± 4	5 ± 1	2 ± 0,3	99 ± 16	3 ± 1	55 ± 5
Médiane dans les tourbières	22	83	120	0,3	48550		31	148	117	600	16,5	32		2,6	95	3,6	90
Médiane en dehors des tourbières	19	54	90	0,2	65900		18	176	93	400	16,2	17		1,7	94	2	50
	Nb ppb	Ni ppb	Pb ppb	Pd ppb	Pt ppb	Re ppb	Sb ppb	Sn ppb	Ta ppb	Te ppb	Th ppb	Tl ppb	U ppb	V ppb	W ppb	Y ppb	
Moyenne Écart-type	7 ± 1	518 ± 124	2718 ± 817				37 ± 5		1 ± 1		17 ± 4	8 ± 3	4 ± 0,5	138 ± 17		28 ± 3	
Médiane dans les tourbières	10	630	4220				50		1,1		25	5	6	210		47	
Médiane en dehors des tourbières	6	500	2240				30		1,1		14	8	3	120		24	



---

## ANALYSE STATISTIQUE DE LEVÉS RÉGIONAUX

### Rehaussement d'anomalies (données d'écorces non réduites en cendre)

À partir de la méthode statistique par analyse en composante principale (ACP), les résultats ont démontré que 60 % du signal géochimique des écorces d'épinettes noires sont contrôlés par les paramètres environnementaux (tourbière et pH) et métaboliques (croissance et diamètre) et que le signal anormal des minéralisations est dans le 40 % restant (Figure 2A et B).

- Les éléments les mieux corrélés avec la composante 1 sont les suivants par ordre décroissant : Ce, Y, La, V, U, Ga, Ti, Bi, Al. Il s'agit des éléments qui sont les plus impactés par les tourbières avec des concentrations jusqu'à 2 fois plus élevées dans les écorces (Figure 1I). À partir de cette observation, et de l'influence des tourbières sur les valeurs de la composante 1 (Figure 2C), l'interprétation est que la composante 1 reflète les tourbières qui sont contrôlées essentiellement par le pH. En effet les REE, dont les concentrations sont les plus élevées dans les écorces d'épinettes dans les tourbières, sont essentiellement contrôlées par l'acidité du milieu et les conditions d'oxydoréduction.
- Les éléments les mieux corrélés à la composante 2 sont les suivants, par ordre décroissant : Rb, K, P, Mg, Co et Cs. Ce sont des éléments essentiels au métabolisme de l'épinette et également des éléments qui composent la fraction détritique du till. Il existe une corrélation positive entre les valeurs de la composante 2 et la pente (Figure 2D). L'intensité de la pente et la nature des dépôts de surface sont interreliées : une pente forte est associée à des dépôts glaciaires ou du roc. Ces environnements favorisent un drainage de meilleure qualité et la croissance des végétaux via un meilleur accès aux éléments nutritifs essentiels au métabolisme.
- Les éléments les mieux corrélés à la composante 3 sont les suivants, par ordre décroissant : Ca, Zn, Ba, Cd, Pb, Mn, Sr, Hg. Il s'agit des éléments toxiques (Ba, Cd, Pb, Hg) accumulés dans l'écorce et des éléments essentiels au métabolisme (Zn, Mn, Sr) et à la composition de l'écorce (riche en Ca). La corrélation positive entre les classes de diamètre de tronc et les valeurs de la composante 3 démontre ici l'effet de la croissance et le métabolisme du médium choisi (figure 2E). Il existe également une corrélation positive entre les valeurs de la composante 3 et l'intensité de la pente, ce qui valide la connexion entre les environnements favorables (composante 2) et la croissance des épinettes.

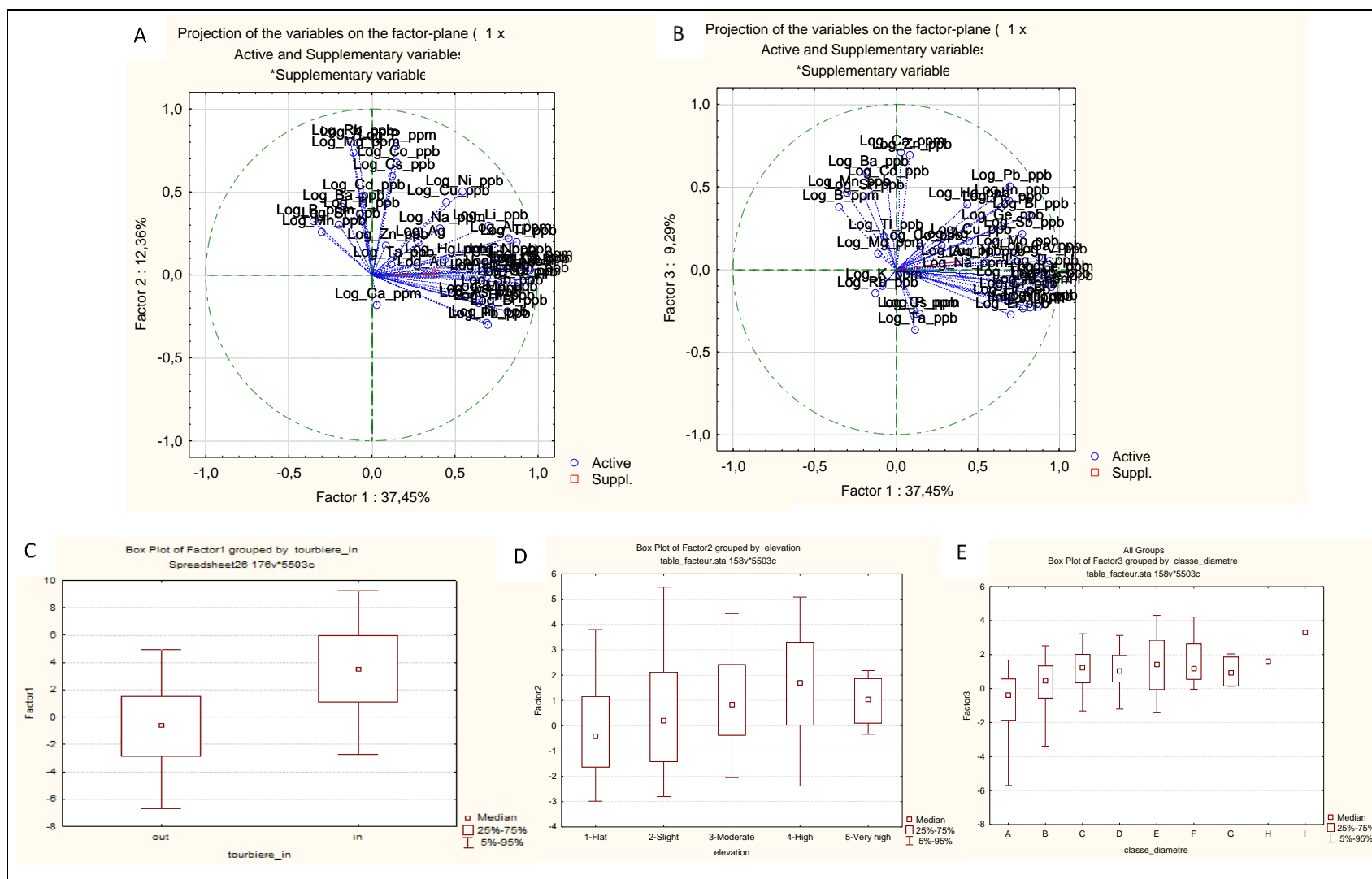


Figure 2 : résultats des ACP pour les valeurs LOG des éléments; A : composante 1 en fonction de la composante 2; B : composante 1 en fonction de la composante 3; C : distribution diagramme en boîte (box plot) des valeurs de la composante 1 en fonction de la présence de tourbières; D : distribution diagramme en boîte (box plot) des valeurs de la composante 2 en fonction de l'intensité de la pente; E : distribution diagramme en boîte (box plot) des valeurs de la composante 3 en fonction des classes de diamètre des troncs d'épinettes noires.

Afin de faire ressortir les échantillons anomaux, l'utilisation des statistiques multivariées a été privilégiée. Ainsi, la méthode par analyse résiduelle sur composante principale (Trépanier *et al.*, 2005; Bonham-Carter et Grunsky, 2018) a été utilisée, permettant de filtrer les effets des tourbières et du métabolisme, dans le but de calculer les anomalies résiduelles et les seuils anomaux pour chacun des métaux d'intérêt (ex : Cu, Zn, Ni, Ag, Pb, Hg, Li, Cs). L'or a été cependant exclu des calculs statistiques au regard des mauvaises qualités de détection et d'analyse sur les écorces non réduites en cendre des levés compilés (52 % des données < LDD). Seuls des seuils anomaux à partir des valeurs brutes ont été suggérés pour détecter les écorces anormales en or en fonction de la présence de tourbières ou non. Les valeurs de seuils à utiliser pour l'or exclusivement à partir des valeurs brutes des écorces non réduites en cendre sont exposées dans le tableau 2.

Les seuils anomaux à utiliser pour les autres métaux à partir de la distribution des valeurs résiduelles ont été directement intégrés dans les calculs d'indices rendus accessibles dans le logiciel LithoModeleur 4.4.1, dans le module « environnement secondaire ». La résiduelle est la différence entre la valeur observée et la valeur prédite par la régression linéaire multiple. Les seuils sont déterminés à partir des ruptures de pente de la distribution normale des résiduelles et des populations d'échantillons qui s'éloignent de cette distribution normale.

Tableau 2 : Seuils anomaux pour l'or calculés à partir des valeurs brutes (ppb) dans les écorces d'épinettes noires non réduites en cendre. En fonction de l'environnement (tourbière ou non), des seuils différents sont à utiliser.

	95ieme centile	97ieme centile	99ieme centile
Dans les tourbières	1 ppb	1,2 ppb	2,5 ppb
En dehors des tourbières	1,5 ppb	1,9 ppb	3,2 ppb

Plusieurs cibles pertinentes pour l'exploration et concordantes avec d'autres données géologiques (structurale, géophysique, indices minéralisés, découvertes récentes) ont pu être générées sur les différents levés grâce à la méthode d'analyse résiduelle sur composante principale sur la géochimie des écorces d'épinettes noires non réduites en cendres.

---

## **SYNTHÈSE : STRATÉGIE DE PLANIFICATION ET DE TRAITEMENTS**

### **À l'étape de la planification des levés, le praticien cherchera donc :**

1. À identifier la localisation des tourbières, le type de dépôts de surface, les zones urbanisées, déboisées ou revégétalisées sur la dimension du levé ;
2. À planifier les stations et la ou les maille (s) d'échantillonnages des épinettes en fonction de l'étape précédente.

### **Sur le terrain :**

1. À choisir des épinettes de diamètre homogène si possible entre 10 et 20 cm (épinette mature), jusqu'à 30 cm ;
2. À éviter les contaminations *in situ* et à utiliser le matériel adéquat pour l'échantillonnage d'écorce.

### **À l'étape de traitement :**

1. Ne pas utiliser les valeurs brutes, sauf pour l'or où les seuils anomaux peuvent être considérés en fonction de la présence de tourbière ou non ;
2. Privilégier la méthode d'analyse résiduelle sur composante principale et utiliser les indices de calculs disponibles dans LithoModeleur 4.4.1 en fonction de la qualité des analyses (QA/QC à réaliser au préalable) ;

Finalement, la meilleure approche est d'adapter les différents protocoles (échantillonnage, préparation, dissolution, analyses) aux environnements du levé et à la substance recherchée.

---

## **LIMITATIONS ET PERSPECTIVES**

À retenir que cette étude s'est limitée à la compilation de levés d'écorces éloignés de minéralisations connues, qui a permis d'établir le bruit de fond des teneurs en différents métaux les écorces non réduites en cendre des épinettes noires d'Abitibi. Néanmoins, aucune donnée n'a été collectée directement au-dessus d'un gîte ou d'un gisement connu pour prouver la validité de la méthode à reconnaître les empreintes associées aux minéralisations significatives. Ainsi la question de l'efficacité de la méthode en contexte d'exploration reste en suspens. La suggestion d'un projet collaboratif avec le groupe MISA, étendu sur plusieurs années, serait de 1) valider l'existence d'une empreinte géochimique au-dessus de gîtes ou de gisements connus en utilisant l'épinette noire au moyen de plusieurs études de cas au Québec (ex : Abitibi, Baie-James, Grenville) ; 2) déterminer la composition et la géométrie de ces empreintes, si elles existent, ainsi que les facteurs environnementaux, métaboliques et métallogéniques gouvernant leur mise en place ; et 3) développer des protocoles de traitement utilisables en routine dans les travaux de vectorisation en exploration minérale, au moyen d'analyse statistique des données de référence acquises et compilées.

---

## RÉFÉRENCES

- Bonham-Carter, G.-F et Grunsky, E.-C. (2018). Two ideas for analysis of multivariate geochemical survey data: proximity regression and principal component residuals. *In Handbook of Mathematical Geosciences*, B.S. Daya Sagar, Qiuming Cheng, Frits Agterberg., Fifty years of IAMG, p911.
- Brundin, N.-H. (1939). Method of locating metals and minerals in the ground, U.S. Patent 2, 158,980.
- Dunn, C.-D. (2007). Biogeochemistry in mineral exploration, Vol. 9 (ed. Hale, M.), 1-450 (Elsevier, 2007).
- Gagnon, R., Morin, H. (2001). Les forêts d'épinette noire du Québec: dynamique, perturbations et biodiversité. *Le Naturaliste canadien*, 125, 26-35.
- Gigoux, M., Trépanier, S., (2023). Évaluation de l'efficacité de la méthode biogéochimique d'échantillonnage d'écorce d'épinette en exploration. Livraison sous format PPT 2022-03.
- Hulme, K.-A., Dunn, C.-E., Hill, S.-M. (2006). Biogeochemistry for mineral exploration in Canada and Australia: a comparison based on international collaboration. *Regolith, Consolidation and Dispersion of ideas*, 161-165.
- Tkalich, S.-M. (1938). Testing plants as indicators in geological prospecting and exploration (in Russian), *Vestn. Dal'nevostochnogo fil. Acad. Nauk* 32 : 3-25.
- Trépanier, S. (2005). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport Consorem 2005-03, p82.

### Références des données publiques utilisées

Carte des dépôts de surface : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/depots-de-surface>

Imagerie satellite Sentinelle : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/images-satellites-mosaiques-sentinel-2>

Rapport du quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional : Berger et al., 2015. Norme de stratification écoforestière, Ministère des forêts, de la Faune et des Parcs, secteur des forêts, octobre 2008, réédition septembre 2015, ISBN PDF 978-2-550-73857-2, p111.

Rapport ALS (protocoles réduits en cendre versus non en cendre): <https://www.alsglobal.com/en/geochemistry/generative-exploration/biogeochemistry>



## FICHE A.2.1. – COMPARAISON DES PERFORMANCES STATISTIQUES DES MÉTHODES DE GÉOCHIMIE SECONDAIRE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche présente une synthèse des résultats du projet 2012-07 (Rafini, 2012) consacré au calcul statistique des performances des différentes méthodes d'analyse de l'environnement secondaire (ES) pour l'exploration minérale au Québec.

### MÉTHODOLOGIE

Le Québec compte un très grand nombre de gîtes métallifères découverts, répertoriés dans le SIGEOM. D'autre part, le MRNF a réalisé, ou compilé, de très larges bases de données de géochimie d'ES à l'échelle de la Province. Ces jeux de données rendent possible l'établissement de statistiques rigoureuses et globales sur le développement d'anomalies géochimiques autour des gîtes connus. Un tel exercice permet de comparer les performances de différents indicateurs géochimiques, différentes méthodes et différents médias, pour l'exploration minérale. Les paramètres de performance retenus sont le **contraste** et la **distance de doublement  $d_2$** , qui caractérisent respectivement l'intensité et l'extension des anomalies. Le contraste est une grandeur statistique standard donnée par le logarithme népérien de la cote, qui est le ratio des proportions d'échantillons anomaux dans deux populations distinctes d'échantillons. Dans le cas présent, on comparera les proportions d'échantillons anomaux dans une population cible localisée proche des gîtes (Population 1), avec le reste de la base de données (Population 2) constituant le *background* :

$$\text{Contraste} = \text{Ln}(\text{Cote}) = \text{Ln}\left(\frac{n_{\text{anom.Pop1}}/n_{\text{total.Pop1}}}{n_{\text{anom.Pop2}}/n_{\text{total.Pop2}}}\right)$$

L'augmentation du contraste en s'approchant des gîtes constitue en soi une validation de l'efficacité d'une méthode puisqu'elle reflète l'augmentation de la probabilité d'anomalie proche des gîtes. Toutes les méthodes de géochimie de l'ES pour l'exploration valident positivement cette accentuation du signal géochimique proche des gîtes. L'approche utilisée ici permet toutefois d'aller plus loin en comparant les « morphologies » des anomalies révélées par les différentes méthodes, c'est-à-dire non seulement l'accentuation du signal géochimique, mais aussi la distance de rayonnement de ce signal anormal, ceci de manière objective et quantitative. La distance de doublement  $d_2$  est une mesure statistique de la distance de détection des anomalies, correspondant précisément à la distance à laquelle la proportion d'anomalies est le double de la normale. En d'autres termes, la distance à laquelle la cote est égale à 2, et donc le contraste est égal à  $\text{Ln}(2) = 0.7$ .

La figure 1 illustre deux types de morphologie d'anomalies, anomalie à contraste élevé et de faible extension *versus* anomalies peu contrastées très étendues. Le paramètre  $d_2$  est aussi illustré sur cette figure.

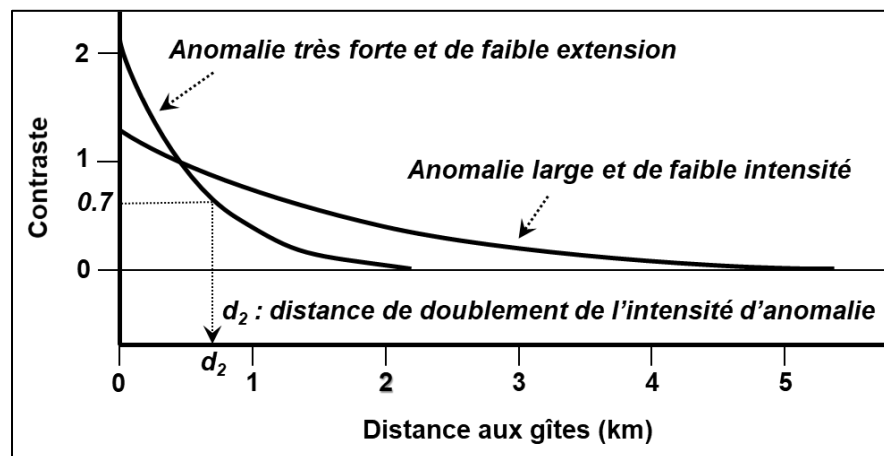


Figure 1 : Morphologie des anomalies indiquée par l'augmentation statistique du contraste à proximité des gîtes et par la distance de doublement d'anomalie,  $d_2$ .

La force de cette méthodologie est que les calculs de performance sont réalisés sur de très larges bases de données et sont donc statistiquement très robustes. Un exemple est illustré sur la figure 2, pour Cu et Zn dans les sédiments de ruisseaux. Les courbes d'augmentation du contraste à proximité des gîtes présentées en figure 2B sont extrêmement fortes sur le plan statistique, comme en atteste le nombre d'échantillons et de gîtes considérés :  $n_{ech} = 22\ 513$ ,  $n_{gites} = 446$ . C'est donc un résultat très fiable. En contrepartie, la couverture géographique des bases de données n'est pas homogène et n'est pas identique entre les différents médias, ce qui tend à affaiblir la robustesse des comparaisons entre médias. On distingue trois types de couvertures :

- 1- Les levés extrêmement étendus, d'échelle provinciale, réalisés par le MRNF pour les méthodes sédiments de fond de lac et sédiments de ruisseaux. Les données de sédiments de fond de lac du MRNF couvrent la quasi-totalité du Québec et sont d'une excellente qualité. Les données de sédiments de ruisseaux présentent aussi une couverture quasi totale dans la partie sud de la Province (figure 2A), bien que moins homogène en termes de protocoles;
- 2- Les levés régionaux de tills et de sols, réalisés par le MRNF et son homologue ontarien l'OGS (*Ontario Geological Survey*), généralement conscrits à des régions géologiques précises, typiquement des ceintures de roches vertes, et présentant souvent des mailles plus denses;

- 3- De levés locaux, multimédias, à l'échelle du gîte. Il s'agit du gîte aurifère La Grande Sud, dans la Baie-James. Ce site est un cas exceptionnel de gîte caractérisé couvert par des levés de sols et de tills avec des mailles denses (quelques 10aines de m) dans un secteur par ailleurs couvert par les levés régionaux du MRNF pour les sédiments de ruisseaux et de fond de lac avec des mailles plus larges : 250 m pour les ruisseaux, 1.3 km pour les lacs. Les levés de tills et de sols sont des données historiques de la compagnie Virginia. L'échantillonnage du till a été fait pour la géochimie de la fraction fine et pour la géochimie et la caractérisation des minéraux lourds incluant le compte de grains d'or.

Les comparaisons de performances quantitatives entre différents médias sont donc effectuées en tenant compte de ces écarts de couverture, d'échelle et de maille. Les sédiments de fond de lac et de ruisseaux sont comparés directement à partir de l'analyse des bases de données complètes du MRNF, en faisant le postulat très réaliste selon lequel l'imprécision causée par l'incomplétude de la couverture d'échantillons de sédiments de ruisseaux à l'échelle de la Province relativement à celle des échantillons de fond de lac est diluée dans la quantité d'échantillons considérés ( $n_{ech\_ruisseaux} > 230\ 000$  ech) et la très vaste superficie des levés (figure 2B). À l'opposé, les tills et les sols sont comparés directement sur la base d'observations locales autour du gîte La Grande Sud. Les statistiques comparatives sont établies par l'analyse des anomalies développées autour de ce gîte.

Si ces analyses comparatives des médias deux à deux, c.-à-d. ruisseaux vs lacs, et tills vs sols, sont statistiquement plus robustes pour les différentes raisons évoquées ici, la synthèse comparative entre les 4 médias demeure pertinente du fait de l'utilisation de paramètres de performances uniques que sont le contraste à 1 km et la distance de doublement. Ces résultats sont présentés ci-dessous sous la forme de **tableaux de performances détaillées**, d'un **tableau de performances général**, et de synthèse des conclusions.

Dans tous les cas, les levés utilisés permettent de comparer quantitativement et très rigoureusement, pour chacun des médias, les performances des différentes méthodes propres au média (p. ex, compte de grain d'or vs Au dans la fraction fine, ou encore sol horizon B vs sol humus) et les indicateurs géochimiques (As, Sb, W, Zn, Cu, etc.), grâce à des stations d'échantillonnages multiméthodes et des analyses multiéléments. Les résultats sont consignés dans les **tableaux de performances détaillées** ci-dessous, toutefois l'utilisateur consultera le rapport CONSOREM 2012-07 (Rafini, 2012) pour un accès au détail des résultats statistiques sur les différents levés régionaux utilisés. Les comparaisons de performance entre les méthodes de till *grain d'or* et *traceurs fraction fine* ainsi qu'entre les différents indicateurs géochimiques dans la fraction fine (As, Sb, Cu, Zn, Mo, W, etc.) ont été établies par l'analyse de 5 bases de données régionales de l'OGS dans les régions ontariennes de Red Lake, Beardmore-Geraldton, Matheson, Peterlong-Radisson et Swayze. Voir les projets CONSOREM 2010-05 et 2011-05 (Trépanier, 2010, 2011) pour plus de détails. Ces résultats ont été confirmés à l'échelle plus locale grâce aux données du gîte La Grande Sud présentées plus haut. Les comparaisons de performance entre les différents horizons du sol et entre les différents indicateurs géochimiques pour chaque horizon du sol ont été établies par l'analyse de 3 bases de données régionales de l'OGS dans les régions ontariennes de Timmins ( $n = 869$ ), Sudbury ( $n = 396$ ) et dans le nord-ouest de l'Ontario ( $n = 149$ ). Voir le projet CONSOREM 2011-06 (Rafini, 2011) pour plus de détails.

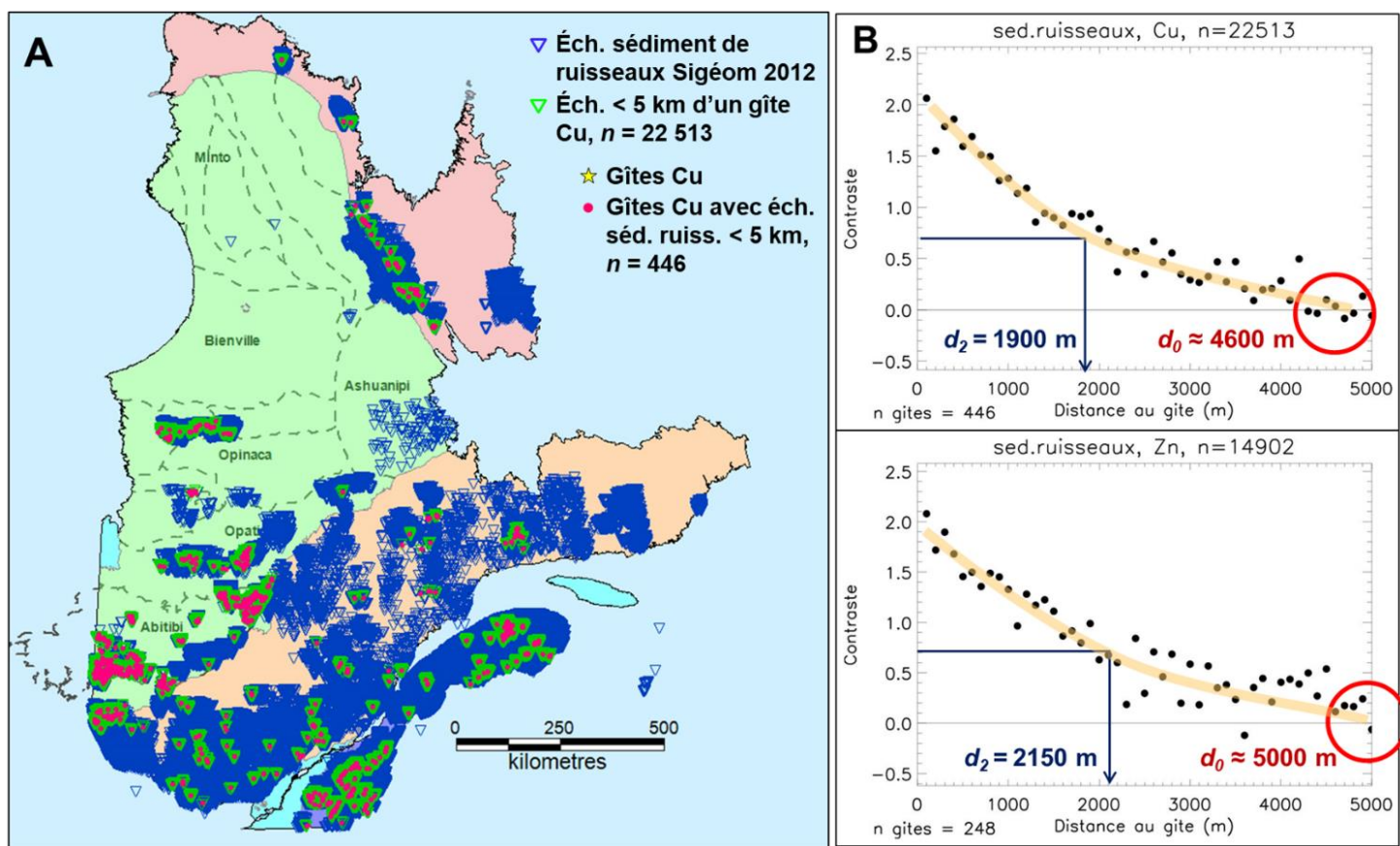


Figure 2 : A. Répartition géographique des échantillons de ruisseaux dans la base de données du SIGEOM 2012. B. Morphologie des anomalies en Cu et en Zn développées dans l'environnement des gîtes cuprifères et zincifères dans les sédiments de ruisseaux, sur l'ensemble de la base de données.

TABLEAU DE PERFORMANCES GÉNÉRAL

Élément	Substance	Ruisseaux (1)		Lacs(1)(2)		Sols(3)		Till(4)	
		Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque
<b>Cu</b>	<b>Cu</b>	★★★★	Rehausst StatU	★★★	Rehausst régression spatiale	★★★	Hor C ; rehausst phyllo (3)	★★★	Fraction fine ; rehausst Al ou RN (4)
<b>Zn</b>	<b>Zn</b>	★★★★	Rehausst StatU	★	Rehausst régression spatiale	★★★★	Hor C ; rehausst phyllo (3)	★★★	Fine (rehausst Al) ; mx lourds (val brutes) (4)
<b>Pb</b>	<b>Pb</b>	★★	Rehausst StatU	<i>Ineff.</i>	–	★★★★	Hor C ; rehausst phyllo (3)	–	Fine (rehausst Al) ; mx lourds (val brutes) (4)
<b>Ni</b>	<b>Ni</b>	★★★★	Rehausst StatU ; /Cr	★★★★	Rehausst régression spatiale	<i>Ineff.</i>	–	–	–
<b>Au</b>	<b>Au</b>	★★★	Rehausst StatU	<i>Ineff.</i>	Rehausst régression spatiale	–	Horizon C	★★ ★★★★	Fraction fine Grains d'or
<b>As</b>	<b>Au</b>	★★	Rehausst StatU	★★	Rehausst régression spatiale	★★★	Horizon C	★★★	Fraction fine
<b>Sb</b>	<b>Au</b>	★	Rehausst StatU	★	Rehausst régression spatiale	<i>Ineff.</i>	–	★★★	Fraction fine
<b>Bi</b>	<b>Au</b>	★	Rehausst StatU	<i>Ineff.</i>	–	–	–	–	–
<b>W</b>	<b>Au</b>	<i>Ineff.</i>	–	<i>Ineff.</i>	–	–	–	★	Fraction fine

(1) Rafini, 2012 (Projet CONSOREM 2012-04)  
 (2) Trépanier, 2005 (Projet CONSOREM 2004-09)  
 (3) Rafini, 2011 (Projet CONSOREM 2011-06)  
 (4) Trépanier, 2010 (Projet CONSOREM 2010-05)  
 (5) Trépanier, 2011 (Projet CONSOREM 2011-05)



**TABLEAUX DE PERFORMANCES DÉTAILLÉES – EXPLORATION AURIFÈRE**

<b>Medium / élément</b>	<b>Subst.</b>	<b>Contraste (&lt;1km d'un gîte)</b>	<b>Statistique établie sur (nombre échantillons ; nombre de gîtes) *</b>	<b>Distance de doublement</b>
Lacs Sb	Au	<b>1</b>	110 ; 101	<b>~ 2100 m</b>
Lacs As	Au	<b>0.98</b>	233 ; 188	<b>~ 3400 m</b>
Lacs Se	Au	<b>0.6</b>	110 ; 101	<b>~ 1600 m</b>
Lacs W	Au	<b>0.24</b>	110; 101	~ 900 m
Lacs Bi	Au	<b>0.16</b>	102 ; 93	~ 1400 m
Lacs Au	Au	<b>-0.22</b>	99 ; 91	~ 800 m
Lacs Te	Au	<b>-0.43</b>	93 ; 86	~1400 m

\* Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km

<b>Medium / élément</b>	<b>Subst.</b>	<b>Contraste (&lt;1km d'un gîte)</b>	<b>Statistique établie sur (nombre échantillons ; nombre de gîtes) *</b>	<b>Distance de doublement</b>
Ruisseaux As	Au	<b>1.23</b>	903 ; 246	<b>1600 m</b>
Ruiss As+Sb	Au	<b>1.23</b>	569 ; 105	
Ruisseaux Au	Au	<b>1.09</b>	495 ; 121	950 m
Ruisseaux Sb	Au	<b>1.05</b>	622 ; 132	900 m
Ruisseaux Bi	Au	0.94	218 ; 49	1000 m
Ruiss As+Bi	Au	0.98	421 ; 76	
Ruisseaux Mo	Au	0.69	1611 ; 317	400 m
Ruisseaux W	Au	0.38	465 ; 119	300 m
Ruisseaux Se	Au	-0.46	381 ; 98	

\* Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km

---

## PRINCIPALES CONCLUSIONS SUR LES PERFORMANCES POUR L'EXPLORATION AURIFÈRE

- **Meilleurs traceurs aurifères dans l'environnement secondaire :**
  - Sédiments de ruisseaux : As, suivi de Au (efficacité moyenne);
  - Sédiments de lacs : Sb, suivi de très près par As;
  - Till : grain d'or est plus efficace que fraction fine et métaux lourds (projet 2011-05);
  - Till fraction fine : As suivi de Au et Sb;
  - Sols : As horizon C.
- **Ordre de préférence :**
  - *Till (grain d'or) > till (As, Au, Sb fraction fine) >\* sols (As horizon C) ; \* Observation locale seulement (LGS);*
  - *Ruisseaux (As, Sb, Au) > lacs (Sb, As).*
- **Traceurs aurifères à proscrire :**
  - Sédiments de ruisseaux : W, Se;
  - Sédiments de lacs : Au, W, Bi, Te;
  - Sols : Au (humus, horizon B, horizon C).
- **Traceurs efficaces dans sols horizons B/C :**
  - As = Cd > Co >>> Mo, Sb, Ba.
- **Distances de traçage des anomalies aurifères :**
  - As permet un traçage distal;
  - Ruisseaux : signal As anomal double à 1.6 km des gîtes aurifères (Au, Sb, Bi : 0.9 km);
  - Ces distances semblent être 2x plus grandes dans les lacs (anomalies aurifères 2x plus étendues);
  - Ruisseaux : signal As anomal disparaît totalement à 5 km des gîtes aurifères (≈ 10 km dans les lacs);
  - Sol : traçage toujours proximal (< 1 km).

**TABLEAUX DE PERFORMANCES DÉTAILLÉES – Exploration métaux de base**

Medium / élément	Subst.	Contraste	Statistique établie sur (n éch. ; nombre de gîtes) *	Distance de doublement
Lacs Ni_niv	Ni	<b>1.77</b>	72 ; 60	
Lacs Ni_res	Ni	1.63	39 ; 35	
Lacs Cu_niv	Cu	1.29	287 ; 232	
Lacs Cu_res	Cu	<b>1.45</b>	123 ; 111	
Lacs Zn_niv	Zn	0.78	120 ; 98	
Lacs Zn_res	Zn	<b>1.31</b>	51 ; 48	
Lacs Pb	Pb	<b>0.72</b>	58 ; 44	1000 – 5000 m

\* Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km  
 \_niv : nivellement par bandes (Trépanier, 2005 : projet CONSOREM 2004-09)  
 \_res : valeur résiduelle de la régression spatiale avec 9 variables explicatives (Al, K, Fe, Mn, Mg, Cr, V, Ti, La)

Medium / élément	Substance gîte	Contraste (<1km d'un gîte)	Statistique établie sur (nombre échantillons ; nombre de gîtes) *	Distance de doublement
Ruisseaux Cu	Cu	<b>1.54</b>	1870 ; 330	1900 m
Ruisseaux Zn	Zn	<b>1.51</b>	1091 ; 180	<b>2100 m</b>
Ruisseaux Pb	Pb	<b>1.51</b>	744 ; 120	1900 m
Ruisseaux Ni	Ni	<b>1.97</b>	300 ; 54	4700 m
Ruisseaux Ni/Cr	Ni	<b>1.71</b>	75 ; 20	<b>2000 – 2500 m</b>

\* Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km

---

## PRINCIPALES CONCLUSIONS SUR LES PERFORMANCES POUR L'EXPLORATION DE MÉTAUX DE BASE

- Les sédiments de ruisseaux sont systématiquement plus performants que les sédiments de lacs;
- Sols : en toutes circonstances (métaux de base ou précieux), l'horizon C montre une performance nettement plus grande que dans l'humus et légèrement plus grande que dans l'horizon B;
- Lacs : Cu et Ni sont performants tandis que Zn et Pb sont non performants;
- Sols (horizon C) : c'est l'inverse ! Zn et Pb sont performants tandis que Cu et Ni sont non performants;
- Plusieurs combinaisons suggèrent que les sites d'accumulation, c.-à-d. des sites de l'environnement secondaire dans lesquels un élément s'accumule naturellement, ne sont pas des bons candidats pour la détection des minéralisations : Au dans l'humus, Zn et Pb dans les sédiments de fond de lac.

FICHE A.3.1. CHOIX DE LA MÉTHODE SELON L'ÉCHELLE, LES OBJECTIFS, L'ACCESSIBILITÉ ET LE BUDGET

Gîte recherché	ÉTAPE 1 : CHOIX DE LA MÉTHODE												ÉTAPE 2 : MODE OPÉRATOIRE				Remarque	Exemples d'anomalies
	BUDGET ET ECHELLE		TERRAIN			MÉTHODE							PLANIFICATION DU LEVÉ		PROTOCOLES OPÉRATOIRES			
	Echelle	Transport et accessibilité	Terrain quaternaire (Fiche A.1.2. "Reconnaissance des terrains quaternaires pour l'exploration")	Géologie du socle (Fiche A.1.1. "Choix de la méthode selon Le terrain")	Terrain géomorphologie / pédologie	Médium	Élément	Nom méthode	Note performances statistiques de la méthode (Fiche A.2.1. "Comparaison des performances statistiques des méthodes")	Coût analyse (approx.)	Coût total analyse + échantillonnage	Objectifs	Notes coût / bénéfice	Planification des stations d'échantillonnage	Grille	Protocole échantillonnage		
Regional-local Génération de projets	Héliporté; accès facile partout	Tout sauf plaine argilo-glaciaire épaisse et till exotique	Aucun impact	Tous terrains avec présence de lacs	Sédiments de fond de lacs	As Sb	As-Sb dans les sédiments de lacs pour explo Au régionale et locale	2/4 1/4	55 \$		Identification de bassins versants anomaux	Levé héliporté env. 100 ech / jour	Fiche B.1.1	1 – 3 km 200 m – 2 km	Fiche B.2.2	Aqua regia, INAA	Levés publics sur toute la province 1/13 km2 Levés publics dans certaines régions	Kwijibo ; LGS
Regional-local Génération de projets	A cette échelle, demande bon accès au terrain au sol pour être efficace --> en général peu efficace si héliporté --> faire seulement 1kg (fines) dans ce cas	Till sous-glaciaire	Mx indicateurs : favorable en terrain de haut grade métamorphique car minéraux marqueurs résistants (ex : sphalérite --> ghanite ; arsénopyrite --> lollingite)  Terrains de bas grade métamorphique  Favorable pour minéralisations sulfurées (gîtes "Au +")	Proportion de zones humides < 50 %	Till	Grains d'or Minéraux indicateurs Au, As, Sb Au As Sb W	Compte de grains d'or pour exploration locale Au Minéraux indicateurs pour exploration locale Au Géochimie des concentrés de minéraux lourds pour exploration locale Au Géochimie de la fraction fine pour exploration locale Au	4/4 3/4 3/4 2/4 3/4 3/4 1/4	Grains Au + Fines: 250\$  Fines: 40\$; XRF portable: 5\$ (location appareil)		Identification des trainées glaciaires anomaux ; maximiser l'information	Efficacité de l'échantillonnage varie beaucoup selon accès (héliporté vs. au sol)	Fiche B.1.2	500 m - 2 km	Fiche B.2.1 Fiche B.2.1	Manuel (pelle), 15 kg  Manuel (pelle), 1 Kg Lab Fines < 63 microns Au-MEA XRF Portable sur < 2mm As-Cu-Zn		La Grande Sud, Eleonore; Young Davidson
Regional-local Génération de projets	A cette échelle, demande bon accès au terrain au sol pour être efficace --> en général peu efficace si héliporté	Tout sauf plaine argilo-glaciaire épaisse et till exotique	Aucun impact	Terrains avec reliefs	Sédiments de ruisseaux	Au As Sb Bi Autres	Au-As-Sb-Bi dans les sédiments de ruisseaux pour explo Au régionale et locale	3/4 2/4 1/4 1/4 ND			Identification de bassins versants anomaux	Efficacité de l'échantillonnage varie beaucoup selon accès (héliporté vs. au sol)		100 m - 3 km		Aqua regia, INAA, BLEG, compte de grains or	Levés régionaux publics (MERN) : Province du Grenville (3 ech par 10 km2), Gaspésie (3 éch par km2).	Porphyre de Murdochville Cu-Au-Mo, gîte Reboul Au+ (skarn aurifère Gaspésie ; anomalie Cu-Zn-Pb), gîte Castor Au-As-Sb (Reduced Intrusion related gold system, anomalie As)



Gîte recherché	ÉTAPE 1 : CHOIX DE LA MÉTHODE												ÉTAPE 2 : MODE OPÉRATOIRE			Remarque	Exemples d'anomalies	
	BUDGET ET ECHELLE		TERRAIN			MÉTHODE							PLANIFICATION DU LEVÉ		PROTOCOLES OPÉRATOIRES			
	Echelle	Transport et accessibilité	Terrain quaternaire (Fiche A.1.2. "Reconnaissance des terrains quaternaires pour l'exploration")	Géologie du socle (Fiche A.1.1. "Choix de la méthode selon Le terrain")	Terrain géomorphologie / pédologie	Médium	Élément	Nom méthode	Note performances statistiques de la méthode (Fiche A.2.1. "Comparaison des performances statistiques des méthodes ")	Coût analyse (approx.)	Coût total analyse + échantillonnage	Objectifs	Notes coût / bénéfice	Planification des stations d'échantillonnage	Grille			Protocole échantillonnage

Au orogénique ou relié aux intrusions	Local Identification des zones favorables	A cette échelle, les considérations d'accès et de transport ont moins d'importance qu'à l'échelle plus régionale	Till sous-glaciaire	Grains d'or : tous terrains Mx indicateurs : favorable en terrain de haut grade métamorphique car minéraux marqueurs résistants (ex : sphalérite --> ghanite ; arsénopyrite --> lollingite)	Proportion de zones humides < 50 %	Till	Grains d'or	Compte de grains d'or pour exploration locale Au	4/4	Grains Au + Analyse HMC: 250\$	Identification des trainées glaciaires anormales ; maximiser l'information	Fiche B.1.2	100 - 200 m	Manuel (pelle), 15 kg	Fiche B.2.1	Fiche B.2.1	Compte grains d'or, concentrés Mx lourds S.G. >3.2, compte de cailloux	La Grande Sud; Eleonore; Young Davidson ; Serpent
							Minéraux indicateurs	Minéraux indicateurs pour exploration locale Au	3/4						Fiche B.2.1	Fiche B.2.1		
							Au, As, Sb	Géochimie des concentrés de minéraux lourds pour exploration locale Au	3/4									
	Au	Géochimie de la fraction fine pour exploration locale Au	2/4	Fines: 40\$; XRF portable: 5\$ (location appareil)	Tills 1kg: 150\$ / éch tout compris hélicopté	Identification des trainées glaciaires anormales distales ; maximiser l'information	Fiche B.2.1	Manuel (pelle), 1 Kg	Fiche B.2.1	Lab Fines < 63 microns Au-MEA XRF Portable sur < 2mm As-Cu-Zn								
	As		3/4															
	Sb		3/4															
	W		1/4															
	Détaillé Ciblage pour tranchées / forages	A cette échelle, les considérations d'accès et de transport ont peu d'importance		Terrains de bas grade métamorphique Favorable pour minéralisations sulfurées (gîtes "Au +")			Au, traceurs	Géochimie de la fraction fine pour exploration détaillée Au	ND	Fines: 40\$; XRF portable: 5\$ (location appareil)	Identification des trainées glaciaires anormales proximales ; maximiser l'information		25-50m	Tarrière, 1 Kg	Fiche B.2.1			

Gîte recherché	ÉTAPE 1 : CHOIX DE LA MÉTHODE												ÉTAPE 2 : MODE OPÉRATOIRE				Remarque	Exemples d'anomalies						
	BUDGET ET ECHELLE		TERRAIN			MÉTHODE							PLANIFICATION DU LEVÉ		PROTOCOLES OPÉRATOIRES									
	Echelle	Transport et accessibilité	Terrain quaternaire (Fiche A.1.2. "Reconnaissance des terrains quaternaires pour l'exploration")	Géologie du socle (Fiche A.1.1. "Choix de la méthode selon le terrain")	Terrain géomorphologie / pédologie	Médium	Élément	Nom méthode	Note performances statistiques de la méthode (Fiche A.2.1. "Comparaison des performances statistiques des méthodes")	Coût analyse (approx.)	Coût total analyse + échantillonnage	Objectifs	Notes coût / bénéfice	Planification des stations d'échantillonnage	Grille	Protocole échantillonnage			Protocole analytique					
Local-Détaillé Identification des zones et ciblage pour tranchées / forages	Présence de forages ; propriétés travaillées	Tous terrains, favorable avec couverture sédimentaire épaisse et/ou argileuse	Tous terrains, favorable pour exploration profonde	Aucun impact	Eau souterraine	Au, traceurs	Hydrogéochimie souterraine exploration locale Au	ND	150 \$		Détection de halos hydrogéochimiques dans l'aquifère profond		Orientation suivant le métallotecte local	1 - 2km	Échantillonnage passif au bailer	Métaux ultra-traces, Terres rares, Au-PATH (ALS)								
Détaillé Ciblage pour tranchées / forages		Roc Till de fond	Aucun impact	Sols de type podzol ; terrains moyennement drainés à bien drainés ; proportion de zones humides < 50 %	Sol	As, Cu, Zn, Co, Cd	As, Cu, Zn, Co, Cd par XRF portable dans horizon B/C pour exploration détaillée Au	ND	5 \$		Signal endogène		Éviter cuvettes, vallées et zones humides, privilégier les zones de relief (bon drainage)  Orientation suivant le métallotecte local	25-50m	Horizon B/C	XRF portable sur < 2mm								
						As	As dans horizon B/C pour exploration détaillée Au	3/4	30 \$		Sur du till : identification des trainées glaciaires anormales (minéralisations sub-affleurantes)													
						Cu, Zn, Cd, Co	Métaux de base dans horizon B/C pour exploration détaillée Au polymétallique	3/4	30 \$		Sur du roc : identification de minéralisations affleurantes													
							Extraction séquentielle et SGH dans le sol pour exploration détaillée Au	ND			Signal exogène													

## FICHE B.1.1. PLANIFICATION DES LEVÉS DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### **OBJECTIF DE CETTE FICHE**

Cette fiche procure les connaissances requises pour la planification d'un levé de sédiments de fond de lac : reconnaissance typologique des lacs par leurs caractéristiques morphologiques, analyse spatiale des bassins versants. La fiche explique succinctement les principes et fondements de la démarche qui est proposée, puis en détaille les étapes et le développement.

---

### **PRINCIPES**

#### **Documents sources**

Les projets Consorem 2004-09 et 2005-03 (S. Trépanier) se sont intéressés à la variabilité statistique du fond géochimique des sédiments de lacs sur le territoire québécois, tandis que le projet 2020-05 (M. Gigoux) s'est attardé sur la classification typologique des lacs par une approche déterministe. Ces trois projets permettent la mise au point de protocoles d'utilisation optimisant les performances de la méthode pour l'exploration.

#### **Idées maitresses**

- Les travaux susmentionnés de Trépanier (2004, 2005) ont analysé à l'échelle régionale les relations statistiques objectives entre le fond géochimique des sédiments des lacs du Québec et un certain nombre de paramètres intrinsèques et environnementaux reflétant, entre autres, les conditions limnologiques, le mode d'alimentation, le degré de comblement et d'eutrophisation (« maturité » des lacs), la géologie du socle, la géologie quaternaire, le contexte géomorphologique, le climat ;
- Le fond géochimique des sédiments de lacs présente une forte variance, dont une proportion est régionalisée (« domaines géochimiques »), causée vraisemblablement par les facteurs environnementaux, géologie du socle, climat, géomorphologie, et une autre qui est non régionalisée, causée davantage par les facteurs intrinsèques, facteurs limnologiques, maturité du lac, mode d'alimentation. Ces différents facteurs d'influence ne sont pas tous indépendants ;
- Les travaux conduits lors du projet susmentionné de Gigoux (2020) démontrent que certains types de lacs sont davantage couplés avec la géologie du substrat et offrent de meilleures performances en exploration minérale. Le projet présente des outils de classification des lacs d'après des variables morphologiques d'une part, et d'après des variables géochimiques d'autre part ;
- La plupart des métaux d'intérêt ont une variabilité de fond (bruit) comparable ou supérieure à l'amplitude des anomalies métallogéniques (signal). En d'autres termes : de faibles rapports signal/bruit.

- Par conséquent, le fait de pouvoir distinguer entre les anomalies vraies, prospectives, c.-à-d. de nature métallogénique, et les anomalies *fausses*, non prospectives, c.-à-d. reflétant uniquement un fond localement très élevé, nécessite de comprendre, quantifier et corriger la variabilité de fond. Ceci peut être fait de différentes manières :
  1. À l'étape de l'opération du levé au moyen d'une planification des sites prenant en considération la classification des lacs selon des critères morphologiques afin de limiter la variabilité de fond inhérente aux différents types de lacs ;
  2. À l'étape de l'interprétation, en regroupant les échantillons par type de lac d'après la classification selon des critères morphologiques et géochimiques (nivellement du fond géochimique) ;
  3. À l'étape de l'interprétation, en modélisant le fond géochimique par une méthode statistique de régression spatiale multivariée, afin de rehausser les anomalies *vraies*.

#### **Organisation des fiches B.1.1. et C.1.1.**

- La **fiche B.1.1. « Planification des levés de sédiment de fond de lac pour l'exploration minérale »** détaille les étapes de la classification des lacs, ainsi que la planification des levés pour l'échantillonnage considérant les types de lacs, leur distribution spatiale dans les bassins versants, la densité et la dimension du levé.
- La **fiche C.1.1. « Interprétation des levés de sédiments de fond de lac pour l'exploration minérale »** présente les outils de traitement des données de géochimie des sédiments de lacs, et de détection des anomalies prospectives par des approches statistiques et déterministes.

---

#### **CLASSIFICATION DES LACS ET DES SÉDIMENTS LACUSTRES, PERFORMANCES POUR L'EXPLORATION**

Les travaux de M. Gigoux proposent une nouvelle classification multivariée des lacs d'après des variables morphologiques, ainsi qu'une classification des sédiments de lacs d'après des variables géochimiques. L'étude quantifie l'influence de ces classes sur le fond géochimique et propose des classes présentant les meilleures performances potentielles pour l'exploration minérale. Les deux classifications sont corrélées : à certains types de lacs est associée la prédominance de certains types de sédiments.

#### **Classification des sédiments**

Pour la **classification des sédiments**, les paramètres exerçant directement ou indirectement, un contrôle de premier ordre sur le fond géochimique sont, outre les méthodes de dissolution et d'analyse : la profondeur, le rapport matière organique/détritique, le type de matière organique, le type de matière détritique. La classification proposée intègre ces facteurs dans des variables géochimiques spécifiques : Mg, Na, Ca, Fe, K, Al et la perte au feu (LOI, *Loss Of Ignition*), au moyen des deux diagrammes suivants (figure 1).

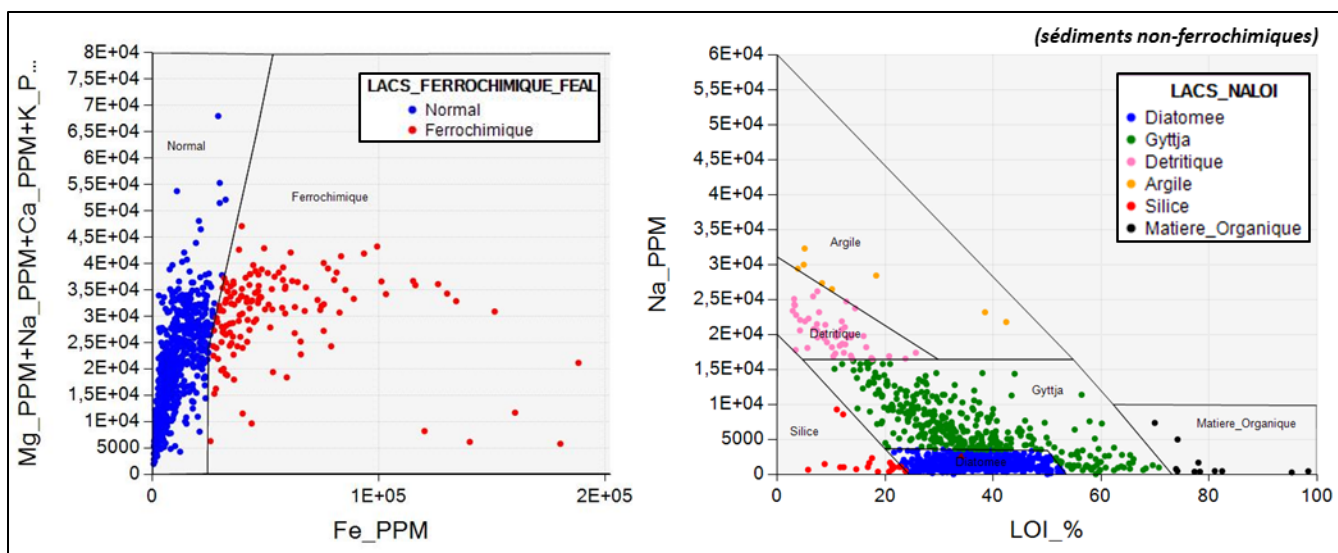


Figure 1 : Diagrammes de classification des sédiments de fond de lac. Na doit être une analyse totale (activation neutronique, par exemple), les autres éléments Fe, Ca, Mg, K, Al doivent être extraits par aqua regia. Diagramme Na-LOI modifié de GM 71699, Girard et al. (2020).

Le diagramme Fe vs (Mg+Na+Ca+K+Al) permet de classer les échantillons ferrochimiques, c.-à-d. dominés par la précipitation d'(hydr)oxydes de fer. Dans un deuxième temps, les échantillons de la classe non-ferrochimique sont à leur tour classifiés par le diagramme Na-LOI suivant la proportion et la nature des composants détritiques et organiques. Ce diagramme est issu des travaux de IOS Services Géoscientifiques (GN 71699, Girard et al., 2020). **On identifie ainsi 7 types de sédiments de fond de lac (Gigoux, 2020) : ferrochimiques, argileux, détritiques, siliceux, à gyttja, à diatomées, et organiques.** La classe ferrochimique correspond aux échantillons les plus riches en oxydes ou hydroxydes de fer, leur identification est importante pour l'exploration étant donnée la forte capacité de fixation métallique par adsorption de ces minéraux. Les diatomées sont des microalgues unicellulaires microscopiques enveloppées par un squelette siliceux, et la gyttja est un terme suédois pour décrire de la boue formée par la décomposition partielle de tourbe.

Le diagramme Na-LOI nécessite de disposer d'une analyse totale de Na, typiquement par activation neutronique, la récupération de Na par *aqua regia* (+ICP) n'étant que partielle. Une substitution de variable est proposée dans Gigoux (2020) afin de permettre l'utilisation de ce diagramme dans les cas très communs où cette donnée est manquante :

$$Na = 10^{2.79+0.77 \text{Log}(Li)+0.3 \text{Log}(Mg)-0.38 \text{Log}(Rb)+0.12 \text{Log}(Area)}$$



où *Area* est la superficie du lac. Cette relation empirique est établie sur de larges bases de données de sédiments de lacs dans les régions de la Baie James (propriété Mythril, n = 475) et de la Fosse du Labrador (propriété Willbob, n = 694). La classification recourant à ce substitut est validée avec une bonne fiabilité pour l'ensemble des classes excepté *Argile* et *Détritique*.

Les deux diagrammes de classification sont implémentés dans LITHOMODELEUR. Le logiciel propose le diagramme Na-LOI avec et sans substitution de Na.

### **Fond géochimique des types de sédiments et performances pour l'exploration**

L'étude de Gigoux (2020) met en évidence des niveaux métalliques de base inégaux entre les différents types de sédiments, visible tant sur les valeurs médianes que sur les seuils anomaux (valeurs extrêmes) tels qu'illustrés au tableau 1. Cette analyse montre par ailleurs l'influence de la profondeur sur ces valeurs seuil : au sein des sédiments organiques (Gyttja, Diatomées), les lacs plus profonds contiennent un fond géochimique plus élevé.

Tableau 1 : Seuils anomaux et valeurs médianes pour différentes catégories de sédiment (levé Éléonore, Baie-James, n = 924).

Secteur Éléonore	*Peu profond diatomée			● Peu profond gyttja			● Profond gyttja			*Profond diatomée		
	*EXTREME	MEDIANE	Nbre éch. extrêmes	EXTREME	MEDIANE	Nbre éch. extrêmes	EXTREME	MEDIANE	Nbre éch. extrêmes	EXTREME	MEDIANE	Nbre éch. extrêmes
Cu	53.4	15.7	4	72	17.5	1	84.2	26.1	4	-	27.9	-
Zn	83.4	21	2	111	29.7	2	124.3	49.7	1	-	40.8	-
Mo	8.01	2.3	6	7.4	2.24	1	-	3.7	-	16.6	3.78	4
As	2.7	0.2	14	3.9	0.3	3	4.9	0.4	4	3.5	0.3	15
Ni	45.5	13.1	2	54.1	15	2	71.6	20.6	2	-	18.6	-
W	2.6	0.4	8	3.1	0.6	3	4.1	0.8	2	4.3	0.7	9
Sb	0.26	0.03	1	-	0.03	-	0.1	0.03	10	0.18	0.03	2

\*EXTREME= Q3+(Q3-Q1)\*3

La classification des sédiments est donc très **utile à l'étape de l'interprétation des données** afin de ranger les échantillons par groupe typologique, donc par niveaux de bases moins hétérogènes, dans le but de détecter les anomalies statistiques **dans chaque classe**, qui sont plus robustes, car reliées à des seuils propres à chaque classe. Ces aspects sont approfondis dans la **fiche C.1.1. « Interprétation des levés de sédiments de fond de lac pour l'exploration minérale »**.

D'autre part, les travaux Gigoux (2020) ont montré **que certains types de sédiments présentent des corrélations géochimiques plus marquées que d'autres avec le substrat**, et offrent par conséquent de **meilleures performances pour l'exploration**. Il s'agit essentiellement des sédiments à fraction organique élevée, de types **Gyttja et Diatomées**. Dans le secteur d'Éléonore, il est possible de

définir avec une remarquable précision le *trend* aurifère régional à partir des anomalies extrêmes en As dans les *sédiments à diatomées*. Ces types de sédiments présentent aussi le plus fort couplage géochimique avec les tills.

### **Classification des lacs et performances pour l'exploration**

La **classification des lacs** proposée par Gigoux (2020) permet d'anticiper les types de lacs d'après leur morphologie, une approche particulièrement utile **à l'étape de la planification des levés** puisqu'elle permet de dresser un portrait typologique des lacs sur une propriété donnée. Ceci permet au praticien d'anticiper, dans une certaine mesure, les types de sédiments présents dans les différents lacs de la propriété, l'hétérogénéité des lacs au sein de son levé, qu'il pourra planifier en conséquence.

L'analyse des larges bases de données de sédiments de fond lacs dans les régions de la Baie-James et de la Fosse du Labrador, montrent en effet l'existence de **corrélation entre le type de sédiment et le type de lac**. Globalement, les lacs de grande superficie, profonds et de forme complexe sont plus corrélés à une forte composante détritique des sédiments tandis que, à l'inverse, les petits lacs, peu profonds et géométriquement simples, sont statistiquement associés à une composante organique dominante. Ceci reflète vraisemblablement, jusqu'à un certain point, l'évolution typique des lacs dans les contextes québécois, par eutrophisation et comblement, autrement dit par diminution de leur profondeur et augmentation de leur contenu en matière organique, à partir de leur apparition lors de la dernière déglaciation (en négligeant leur éventuelle existence préglaciaire). Suivant ce principe, **les lacs matures (géométriquement simples, peu profonds, relativement eutrophisés) sont le type prospectif** puisque l'on y retrouve une dominance de sédiments à Gyttja ou diatomées, identifiés comme ayant de meilleures performances pour l'exploration lors de l'étude de Gigoux (2020), en opposition aux larges lacs immatures géométriquement complexes, non eutrophisés, à fort détritisme.

Les variables morphologiques brutes considérées dans la classification des lacs sont : superficie, périmètre, longueur, largeur. Ces variables sont reprises dans deux indices morphologiques intermédiaires (Bazoge et Blais, 2005) : le ratio longueur/largeur et l'indice de développement littoral. L'indice de développement littoral (DL) est une quantification de la complexité du contour des lacs, il s'agit d'un ratio pondéré entre le périmètre et la superficie du lac : où  $P$  et  $S$  sont respectivement le périmètre et la superficie du lac (figure 2).

$$DL = \frac{P}{\sqrt{2\pi S}}$$


Figure 2 : Ratio pondéré entre le périmètre et la superficie du lac.

L'indice RLL est simplement le rapport de la longueur sur la largeur du lac (figure 3).



Figure 3 : Indice RLL

La classification des lacs est établie par ces deux variables (figure 4) suivant la grille ci-dessous. Cette classification distingue trois classes : Simple (code S), Complexe (code C), Très complexe (code X).

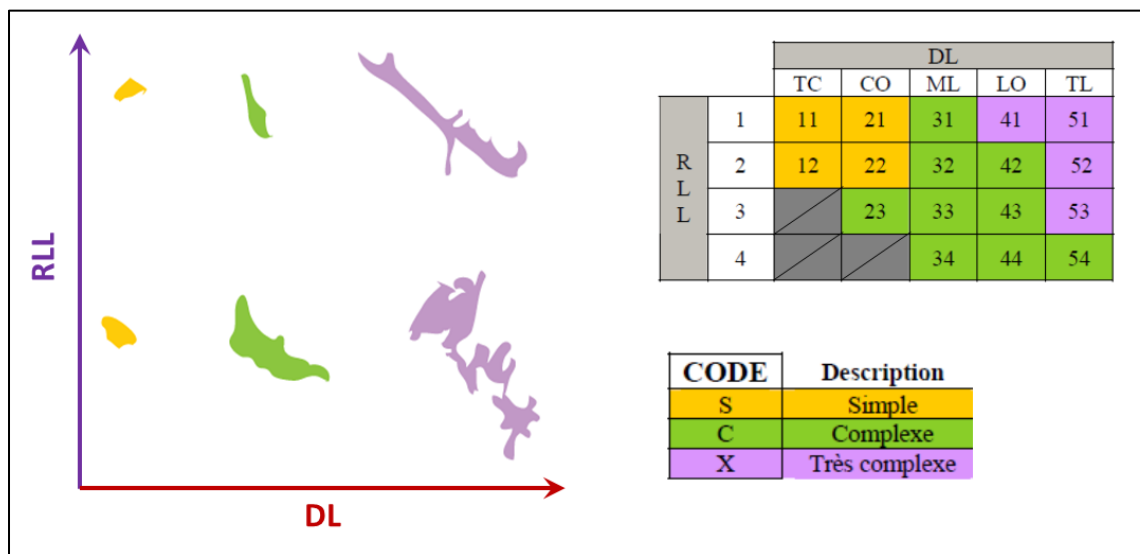


Figure 4 : Codage de la classification morphologique des lacs du Québec par Bazoge et Blais (2005).

Une boîte à outils ArcGIS a été générée pour permettre un calcul automatisé des variables morphologiques à partir des données hydrologiques vectorielles, ainsi que leur classification : [TraitementsLacs.tbx](#) (fichier disponible dans la section membre du CONSOREM livrables du projet 2022-01) dans Les données hydrologiques à haute résolution sont disponibles en Geobase pour le Québec (Géobase du

Réseau hydrographique du Québec, GRHQ) sur les sites de données publiques : [Ministère](#) québécois des Ressources naturelles et des forêts, ou [Données Québec](#).

---

## MODÉLISATION DES BASSINS VERSANTS

Un bassin versant (BV) représente un territoire sur lequel l'ensemble des eaux météoriques s'écoulent vers un même point appelé exutoire. Le BV est délimité physiquement par la ligne de partage des eaux, qui correspond à une ligne de crête topographique séparant deux domaines d'écoulement superficiel. L'apport détritique dans un lac est d'origine exclusive des roches ou sédiments présents au sein du BV. De la même manière, l'apport hydromorphique, c.-à-d. les éléments transportés sous forme dissoute par l'écoulement d'eau, est originaire exclusivement du BV. Par conséquent, **le signal métallique contenu dans un sédiment de lac prend son origine exclusivement au sein du BV**. La géométrie des BV est gouvernée par la topographie, elle peut être plus ou moins complexe selon la morphologie des terrains. La dimension des BV dépend par ailleurs de l'« importance » du lac, c.-à-d. de son degré hiérarchique au sein du système hydrographique : les lacs de grande taille sont généralement à la convergence d'un large réseau hydrographique et sont donc alimentés par un plus large BV que les lacs de petite taille, souvent alimentés par un seul cours d'eau.

La dimension et la répartition spatiale des BV associés aux lacs échantillonnés pour l'exploration sont des paramètres d'intérêt lors de la planification d'un levé, dans la mesure où il permet d'optimiser la surface couverte par le levé. Par exemple, il peut sembler peu optimal, en première approximation, d'échantillonner deux lacs situés en série sur le chemin du même ruisseau – ceci s'apparente à un doublon puisque les terrains des BV de ces deux lacs seront en grande partie superposés. Au contraire, **une planification optimale du levé cherchera à sélectionner les lacs de sorte que tous les BV du secteur d'intérêt soient couverts**. Un exemple d'utilisation des BV est illustré sur la figure 5. L'échantillonnage des lacs marqués d'un point rouge permet de couvrir une surface optimale.

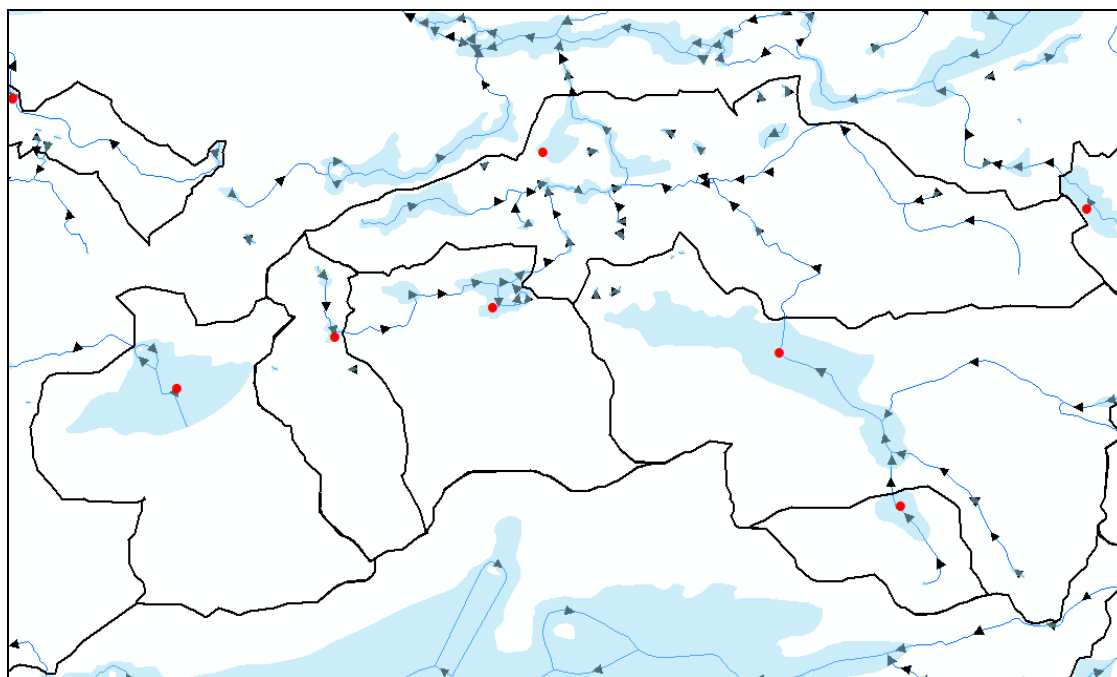


Figure 5 : Bassins versants associés à une sélection de lacs offrant une couverture surfacique optimale. Les lacs sélectionnés sont pointés en rouge. Les flèches indiquent le sens d'écoulement dans le réseau hydrographique.

La modélisation automatique des BV est possible à partir des données topographiques numériques (*Digital Elevation Model*, DEM) et des données hydrographiques (Géobase du Réseau hydrographique du Québec, GRHQ, voir lien plus ci-dessus). Afin de limiter les imprécisions causées par un écart de résolution entre ces deux couches de données, il est recommandé d'utiliser le DEM hydro-cohérent qui a été créé en 2018 (mis à jour en 2020) par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) et Ressources naturelles Canada (RNCAN) dans le cadre de l'Entente de production d'une cartographie numérique à jour du nord du Québec avec la création du produit « Réseau hydro national (RHN) » pour générer le réseau hydrographique structuré du territoire.

Une boîte à [outils ArcGIS pour le calcul des BV](#) (fichier disponible dans la section membre du CONSOREM livrables du projet 2022-01) est disponible. Le détail des différentes étapes réalisées pour modéliser les limites des BV de chacun des lacs est donné dans un [fichier texte](#) en annexe de la présente fiche.



---

## SYNTHÈSE : STRATÉGIE DE PLANIFICATION DES LACS POUR UN LEVÉ D'EXPLORATION

À l'étape de la planification des levés, le praticien cherchera donc :

1. À dresser un portrait des types de lacs présents sur la propriété (« portrait limnologique ») en utilisant la classification des lacs par leur morphologie (outil ArcGIS [TraitementsLacs.tbx](#)) (fichier disponible dans la section membre du CONSOREM livrables du projet 2022-01) ;
2. À modéliser les bassins versants des lacs de la propriété ([outils ArcGIS pour le calcul des BV](#)) (fichier disponible dans la section membre du CONSOREM livrables du projet 2022-01) ;
3. À planifier les stations d'échantillonnage des lacs en utilisant les critères suivants :
  - Privilégier les lacs géométriquement simples et de petite taille (lacs eutrophisés, classe *Simple*), plus *prospectifs* ;
  - Limiter l'hétérogénéité typologique des lacs échantillonnés (uniformité de classe) ;
  - Optimiser la surface couverte par les BV des lacs sélectionnés.

Par ailleurs, les échantillons devront être prélevés au centre des lacs, qui est typiquement le lieu le plus profond. Considérant la corrélation très forte entre la profondeur du sédiment et son fond métallique, ceci permet de maximiser les chances de détection des anomalies.

---

## RÉFÉRENCES

Bazoge, A., Blais, D. (2005). Caractérisation et classification des lacs du bassin versant de la rivière L'Assomption. Rapport en partenariat avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, p19.

Gigoux, M., Trépanier, S., Tremblay M. (2020)

Girard, R., Fournier, N., Villeneuve, P. (2020). Campagne d'échantillonnage de sédiments lacustres, été 2019, Projet Mythril, Baie-James, Québec. IOS, GM 71699, p731.

Trépanier, S. (2004). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac. Rapport Consorem 2004-09, p95.

Trépanier, S. (2005). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – phase 2. Rapport Consorem 2005-03, p82.

## FICHE B.1.2. – PLANIFICATION DES STATIONS DE TILL PAR IMAGERIE, TOPOGRAPHIE, CARTES QUATERNAIRE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche explique une méthodologie de planification des stations de till à l'aide des images satellites, des données topographiques et/ou des cartes de la géologie du quaternaire. Cette information intervient lors de la planification d'un levé de till. **Avant de lire cette fiche, il est conseillé de lire la fiche A.1.2** qui explique la méthode de reconnaissance des terrains quaternaires par imagerie/topographie.

---

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Les méthodes de géochimie secondaire pour l'exploration minérale en contexte glaciaire, tel qu'au Québec, font implicitement certains postulats dont le plus commun est que le sédiment glaciaire échantillonné peut être utilisé comme proxy pour le socle local. En effet, une anomalie métallique détectée dans le sédiment doit pouvoir être attribuée à une source métallifère dans le socle local. Ceci est vrai dans certains cas seulement. Parmi tous les matériaux de surface présents en contexte de dépôts quaternaires, **seul le till sous-glaciaire est en général utilisable comme un proxy géochimique pour le socle local. Lors de la planification d'un levé de till dans un secteur, il est donc important de tenter de vérifier à priori que le type de sédiment qui sera prélevé aux différents sites d'échantillonnage soit bel et bien du till sous-glaciaire.** Ceci est important pour maximiser les résultats et diminuer les coûts d'échantillonnage. L'identification du matériel peut être faite à partir des photographies satellitaires ou aériennes, des cartes topographiques ou des cartes de géologie de surface détaillées qui sont maintenant disponibles dans de nombreux secteurs de Québec.

- La fiche actuelle abordera les aspects plus spécifiques et pratiques de sélection des sites d'échantillonnage en fonction du mode d'échantillonnage retenu : pelle, excavatrice, forages des dépôts de surface (RC, SONIC);
- La densité du levé et la dimension du terrain à couvrir;
- La taille des échantillons : p. exemple, 1kg versus 15kg;
- L'accès aux sites : p. exemple, hélicoptère versus au sol.

## SÉLECTION DES SITES VS. MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE / ACCÈS AU SITES

Le premier paramètre à considérer pour la sélection des sites est la méthode d'échantillonnage qui sera utilisée lors du levé. On distingue ici quatre méthodes d'échantillonnage :

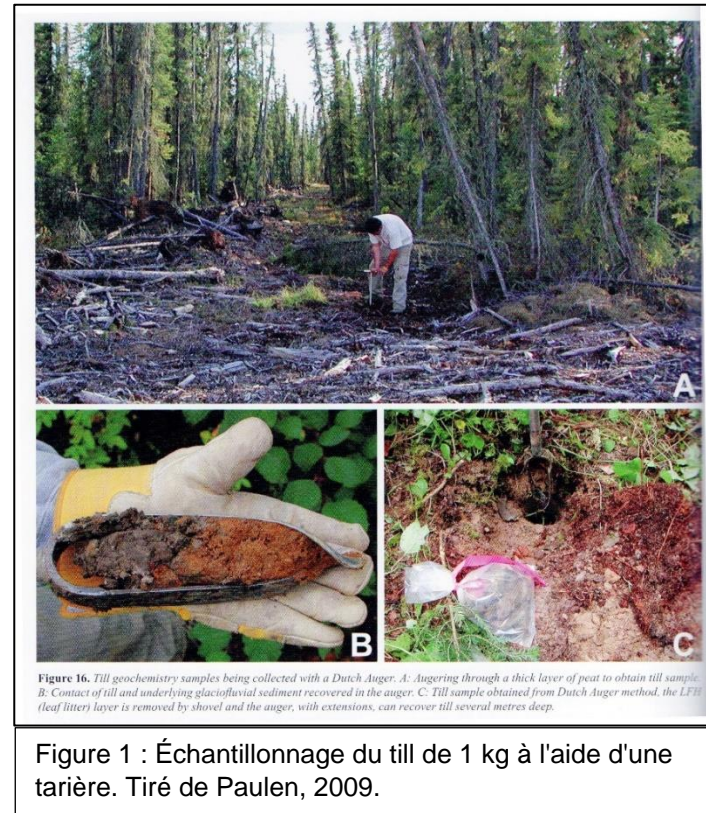
- 1) Tills de 1kg prélevés manuellement (pelle ou tarière);
- 2) Tills de 15 kg prélevés manuellement (pelle);
- 3) Tills prélevés par excavatrice;
- 4) Tills prélevés par forages.

Chacune de ces méthodes implique des considérations différentes dans le choix des sites d'échantillonnage et sera traitée séparément. Pour chacune des méthodes d'échantillonnage, des aspects supplémentaires doivent être considérés dans la sélection des sites : 1) possibilités d'accès au till sous-glaciaire ; 2) possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage.

### LEVÉS DE TILLS DE 1 KG PRÉLEVÉS MANUELLEMENT

#### Possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage

Les levés de tills de 1 kg ont l'avantage de faciliter la logistique d'échantillonnage lors de la réalisation des levés. En effet, les tills de 1 kg, de par leur petite taille, sont facilement transportables. Une équipe d'échantillonnage typique de 2 personnes peut facilement transporter l'équivalent d'une journée d'échantillonnage complète (jusqu'à plusieurs dizaines d'échantillons) sans avoir à déposer les échantillons sur un site de collecte ultérieur ou sur un véhicule. Les possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage ont alors moins d'impacts sur les levés. La petite taille des échantillons permet de les prélever soit avec une pelle ou une tarière (figure 1).



### **Possibilités d'accès au till sous-glaciaire**

Le principal enjeu dans la planification des levés de tills de 1 kg prélevés manuellement est l'accès au till sous-glaciaire. Dans les secteurs où les cartes de dépôts de surface détaillées sont disponibles (par exemple les secteurs couverts par les données « Forêt Ouverte » de la partie sud du Québec (c.-à-d. au sud du 53<sup>e</sup> parallèle), ces cartes devraient être utilisées en priorité pour la planification des sites d'échantillonnage. Autrement, la planification des stations d'échantillonnage manuel peut se faire de deux façons différentes, à partir des photographies satellitaires, photographies aériennes et des données topographiques. La première approche est de reconnaître les morphostructures glaciaires caractéristiques des différents types de dépôts de surface, tel qu'exposé dans la **fiche A.1.2**, pour identifier les secteurs privilégiés pour retrouver du till sous-glaciaire.

La deuxième approche exposée ici s'applique en particulier aux secteurs qui sont couverts de dépôts glaciolacustres ou glaciomarins. Cette approche est illustrée à la figure 2 et à la figure 3. L'idée est que dans ces secteurs, le till sous-glaciaire est le plus susceptible d'affleurer aux endroits de plus forte altitude, qui dépassent le niveau limite des eaux postglaciaires. Dans ces zones, la **carte topographique** devient donc un outil privilégié pour la sélection des stations d'échantillonnage manuel du till. Les endroits où des affleurements sont rapportés (par exemple sur les cartes géologiques) sont aussi des endroits à privilégier, car typiquement le till sous-glaciaire recouvre les pourtours des affleurements. Le till sous-glaciaire se retrouvera alors préférentiellement directement au contact avec le roc et peut être recouvert par le till supra-glaciaire. À l'inverse, les secteurs de basse altitude de topographie plane sont à éviter. En secteur de relief accidenté, le till sous-glaciaire ne se retrouvera pas nécessairement au sommet des reliefs, mais juste autour de ceux-ci. Dans certains cas, les rivières dont le lit creuse profondément dans les dépôts de surface peuvent aussi être considérées, car elles peuvent avoir exposé le till sous-glaciaire sous-jacent par érosion.

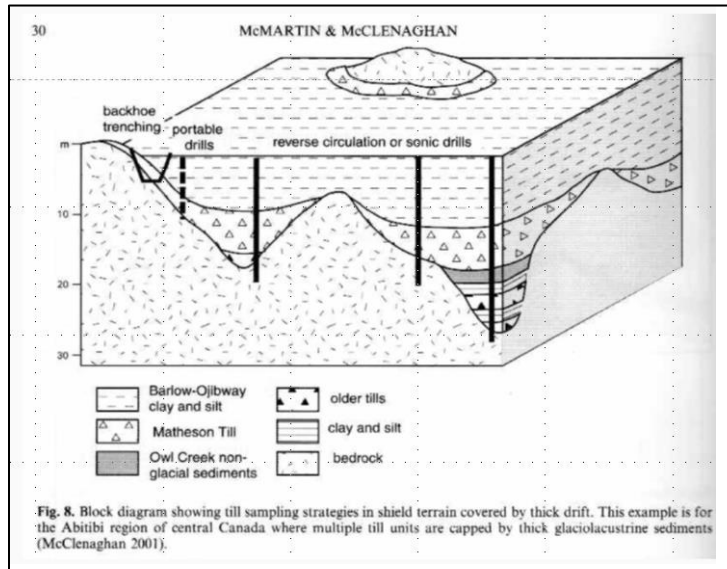


Figure 2 : Bloc diagramme illustrant les stratégies d'échantillonnage de till dans les secteurs couverts par les dépôts quaternaires épais. Tiré de McClenaghan, 2001.

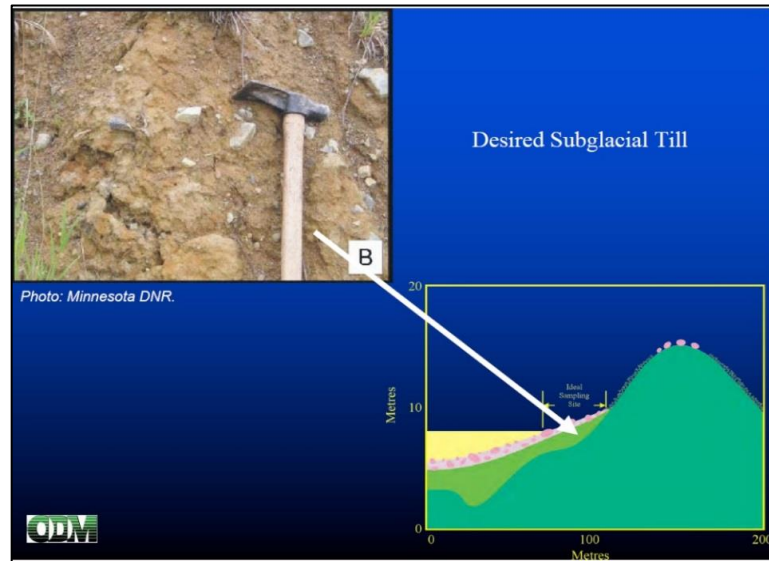


Figure 3 : Localisation idéalisée des sites d'échantillonnage du till sous-glaciaire en contexte de dépôts glaciaires épais. Tiré de Michaud et al., 2007.



## LEVÉS DE TILLS DE 15 KG PRÉLEVÉS MANUELLEMENT

### Possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage

Les levés de tills de 15 kg prélevés manuellement présentent une complexité supplémentaire qui doit absolument être prise en compte lors de la planification des levés de till. Le poids de ces échantillons fait en sorte qu'une équipe typique de 2 échantillonneurs peut transporter typiquement au maximum 4 échantillons avant d'avoir à les ramener à un site de collecte ultérieur. Toujours en raison du poids des échantillons, les distances de marche pour le retour aux sites de collecte doivent être minimisées. En raison de leur taille importante, l'échantillonnage se fait normalement par pelle et non par tarière (figure 4).

Typiquement deux types d'opérations sont possibles pour les levés de till réalisés manuellement, soit par support hélicoptéré ou bien par support au sol (routes ou coupe de lignes). Pour qu'un levé de tills de 15 kg soit optimal pour maximiser les résultats et minimiser les coûts, il faut considérer les accès / points de collecte en plus des zones contenant du till sous-glaciaire. Les images satellites demeurent les meilleures façons de planifier les accès aux sites. Dans le cas d'un levé hélicoptéré, les images satellites permettent de planifier les sites d'atterrissage près des zones de till de base; dans le cas d'un levé au sol, les images satellites permettront de planifier les accès au sol.

### Possibilités d'accès au till sous-glaciaire

Les enjeux d'accès au till sous-glaciaire pour les levés de 15 kg réalisés manuellement, sont essentiellement les mêmes que pour les tills de 1 kg.



Figure 4 : Échantillonnage manuel du till de 15 kg (gros sac en arrière-plan) et 1 kg (sac dans les mains de l'échantillonneur).

---

## **LEVÉS DE TILLS PRÉLEVÉS AVEC UNE EXCAVATRICE**

Dans plusieurs cas, une excavatrice peut-être utilisée pour l'échantillonnage du till sous-glaciaire. Les excavatrices, selon la taille de l'appareil, peuvent permettre d'échantillonner jusqu'à **2,5 à 5 mètres** de profondeur.

### **Possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage**

Pour une planification efficace de ce genre de levé, la planification des accès en utilisant les images satellites et les cartes topographiques est essentielle. Le temps et le coût d'échantillonnage peuvent être élevés si des chemins d'accès doivent être défrichés. Pour qu'un levé de tills par excavatrice permette de maximiser les résultats et de minimiser les coûts, il faut absolument considérer les accès en plus des zones contenant du till sus-glaciaire.

### **Possibilités d'accès au till sous-glaciaire**

Les excavatrices permettent d'aller échantillonner rapidement le till à une plus grande profondeur (de 2.5 à 5m) que les levés faits manuellement (maximum 1.5 mètre). Dans les secteurs où les tills sont minces, ils permettent souvent d'aller échantillonner le till qui est directement au contact du socle (c.-à-d. le till plus proximal, qui soit). Cependant, dans les secteurs de dépôts de surface épais (>5m), comme à beaucoup d'endroits en Abitibi, ils souffrent des mêmes limitations que les levés de till manuels pour l'accès au till de base. On doit donc utiliser les mêmes stratégies qu'énoncées précédemment pour les levés de tills prélevés manuellement pour assurer le succès des levés.

## LEVÉS DE TILLS PRÉLEVÉS PAR FORAGES

La dernière méthode d'échantillonnage du till est à l'aide de forages de dépôts de surface. Les forages peuvent être réalisés par une méthode « Reverse Circulation » ou « Rotosonic ». La méthode « Rotosonic » permet d'avoir une carotte cohérente des dépôts de surface intersectés, mais est plus coûteuse (figure 5 ci-contre : échantillonnage du till par forages « Rotosonic ». Tiré de Paulen, 2009). La méthode « Reverse Circulation » est moins coûteuse (McMartin et al., 2001), mais le matériel récolté n'est pas une carotte cohérente, les types de dépôts sont plus difficiles à interpréter et la fraction très fine est également perdue, ce qui peut être un problème selon la taille des grains de la substance recherchée. Les levés de till réalisés par forages ont le net avantage de fournir une colonne stratigraphique complète permettant une bonne interprétation de la géologie quaternaire et un excellent contrôle sur la nature des échantillons prélevés.



Figure 1 : Échantillonnage du till de 1 kg à l'aide d'une tarière (Tiré de Paulen, 2009).

### Possibilités d'accès aux sites d'échantillonnage

Pour une planification efficace de ce genre de levé, la planification des accès en utilisant les images satellites et les cartes topographiques est également essentielle. La plupart des foreuses de dépôts de surface sont sur chenilles et nécessitent des chemins d'accès en terrain forestier. Cependant, il existe également de petites foreuses « Reverse Circulation » et « Rotosonic » qui sont héliportables et qui permettent d'utiliser la méthode dans des secteurs éloignés des accès.

### Possibilités d'accès au till sous-glaciaire

Les forages de dépôts de surface permettent d'atteindre l'interface entre le roc et les dépôts de surface. Ils ont donc l'avantage de pouvoir être utilisés dans les secteurs de dépôts de surface épais (>5m) et dans les secteurs couverts de sédiments lacustres/marins. De plus, des échantillons du socle sont typiquement récoltés lors des levés, ce qui permet également d'obtenir une information additionnelle très importante. Comme ces méthodes sont coûteuses, il faut cependant considérer qu'elles ne devraient pas être utilisées dans des secteurs où le till de base est accessible manuellement.

---

## COUCHES D'INFORMATION PUBLIQUE UTILISÉES ET SOURCES

Les trois principales couches d'information utilisées pour la planification des stations de tills sont les cartes de dépôts de surface, les cartes topographiques ou DEM, ainsi que les images satellitaires. Les sources suivantes sont très utiles pour les cartes de dépôts de surface :

- Couche « F10E15\_ZONE\_MORPH\_SEDIM » du SIGÉOM, disponible dans les données SIGÉOM à la carte, thème « Géologie du Quaternaire »
- Cartes de dépôts de surface réalisée par la Commission géologique du Canada, très détaillées notamment en Abitibi (disponibles par le site GEOSCAN, cartes de « série A »).
- La couche « Dépôts de surface » des données de « Forêt ouverte » du Gouvernement du Québec, qui fournissent des cartes de dépôts de surface très détaillées pour les régions forestières du Québec (au sud du 53<sup>e</sup> parallèle), et moins détaillées, mais toujours utiles dans la moitié Nord-du-Québec.

Pour ce qui est des images satellites, les données Landsat sont disponibles à une résolution de 15 mètres (panchromatique) ou 30 mètres (bandes de fréquences individuelles) pour tout le Québec. Les données sentinelles sont disponibles à une échelle de 10 mètres (visible) ou 20 mètres (infrarouge) pour tout le Québec. Autrement, des données de très haute résolution (résolution inférieure à 1 mètre) sont disponibles et gratuites en ligne par l'intermédiaire de Google Earth ou Bing Satellite.

## FICHE B.2.1. – PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TILL POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche est un guide des bonnes pratiques pour l'échantillonnage de till en exploration minérale. La réussite d'un échantillonnage de till nécessite d'effectuer sur le site plusieurs observations et mesures, qui permettent de vérifier que le matériel échantillonné soit bien un **till sous-glaciaire** et non un till supra-glaciaire (souvent d'origine distale ou exotique), ainsi que de recueillir les **données qui seront par la suite nécessaires à l'interprétation des résultats**.

---

### IDENTIFICATION DU TILL

#### ÉTAPE I - Éléments nécessaires à l'identification d'un till (toutes ces observations doivent être validées) :

1. Sédiment **non trié** et contenant des **particules de toutes les tailles** : blocs, cailloux, sable, silt, argile;
2. Présence de matériel grossier (> 2 cm). Absence = le matériel n'est pas un till;
3. Matrice fine avec fraction argileuse importante. Absence = le matériel n'est pas un till;
4. Le matériel est « *matrix-supported* », c.-à-d. que **les clastes sont séparés par de la matrice**. Cette caractéristique fait opposition au « *clast-supported* », suivant laquelle les clastes sont en contact les uns avec les autres;
5. Le matériel ne contient aucune stratification fine, d'échelle centimétrique (ne pas confondre avec la fissilité souvent présente dans les tills de fond (voir plus bas)).

#### Éléments supplémentaires non-nécessaires à l'identification d'un till :

1. Couleur gris-beige;
2. Présence de **fissilité**, c.-à-d. un litage horizontal centimétrique causé par la compaction (comparable à une schistosité horizontale).

#### ÉTAPE II - Éléments de distinction entre un till de fond (sous-glaciaire) et un till d'ablation (supra-glaciaire) :

1. La matrice du till sous-glaciaire est **plus compacte** et contient une **fraction fine (silt et argile) plus importante**, souvent dominante sur la fraction sableuse et les cailloux;
2. La matrice du supra-glaciaire est toujours massive et ne contient jamais de fissilité → **fissilité = till sous-glaciaire**;
3. Le till sous-glaciaire contient souvent moins de cailloux;
4. Le till supra-glaciaire est plus perméable, il présente fréquemment une oxydation rendue visible par une teinte brunâtre à rouille ou la présence de croûte ferrugineuse. À l'inverse, le till de fond est plus compact et souvent de couleur grisâtre.



---

## ECHANTILLONNAGE DU TILL

Il existe **quatre modes opératoires** : pelle manuelle, pelle mécanique, tarière, forage percussif. Les **stations d'échantillonnage doivent être planifiées préalablement** par l'analyse d'images satellites, du DEM, du réseau hydrographique, et **selon le mode opératoire disponible** (voir fiche B.1.2 « *Reconnaissance des stations de till par imagerie* »).

### Échantillonnage à la pelle ou à la tarière :

- Creuser à travers le sol jusqu'à atteindre l'horizon non météorisé (oxydation minimale). Typiquement > 0.5 - 1m;
- Prélever sur le bord du fond du trou le matériel nécessaire suivant la méthode retenue (p. ex., 15 kg pour le compte de grains d'or, 1 kg pour l'analyse de la fraction fine, cf. fiche B.3.1. « *Protocoles d'analyse du till pour l'exploration* »);
- Lors d'échantillonnage à la pelle, il peut être nécessaire de **creuser sous le till d'ablation pour trouver le till de fond**;
- En cas d'impossibilité d'échantillonner un till de fond, prendre le till d'ablation sans oublier de reporter l'information.

---

## MESURES ET FICHE DE TERRAIN

### Informations importants à noter lors de l'échantillonnage

- # d'échantillon
- Coordonnées
- Type d'échantillon (ex : 1kg ou 15kg, etc.)
- Couleur
- Structure
- Texture de la matrice
- Humidité
- Tri
- Lithologies des cailloux
- Arrondi des cailloux
- Pourcentage approximatif des cailloux
- Matériel (ex : till, gravier, silt-argile, etc.)
- Géomorphologie glaciaire
- Interprétation (ex : till sous-glaciaire, till supra-glaciaire, etc.)

Pour faciliter, accélérer et uniformiser la prise de note, il est conseillé d'utiliser des fiches avec cases à cocher ou choix prédéterminés.  
**Voir exemple de fiche en annexe.**

## INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES

**Le till supra-glaciaire** (ou d'ablation). Il s'agit de matériel d'abrasion ayant voyagé dans la partie supérieure du glacier au cours de sa progression, puis libéré dans les eaux de fonte lors du retrait glaciaire. Le matériel est resté en suspension durant toute la progression du glacier si bien qu'il voyage sur de grandes distances et présente une forte composante exotique, ce qui explique son inutilité pour l'exploration : ce n'est pas un proxy pour le socle local. Il a subi une abrasion moins forte (charge moins importante dans la partie supérieure du glacier et moins de contact entre les particules minérales), il n'a pas subi de compaction, puis a subi par contre un lessivage des particules argileuses dans les eaux de fonte. Il recouvre le till de fond, par sédimentation. L'absence de particules argileuses et de compaction font qu'il présente une perméabilité non-négligeable et infiltré par les eaux météoriques, si bien que ce matériel montre souvent une oxydation visible jusque plusieurs mètres sous la surface (couleur beige, brune ou orangée, croute ferrugineuse) (figures A et B).



Figure A : Till supra-glaciaire. Noter la matrice sableuse et non-argileuse et l'absence de fissilité (matrice massive). Glacier Horstman, Pic de Blackcomb, BC.



Figure B : Till supra-glaciaire. Noter la présence d'une légère stratification marquée par des variations granulométriques (cailloux et graviers).



**Le till sous-glaciaire** (ou de fond). Il s'agit de matériel ayant voyagé à la base du glacier puis ayant été déposé sous le glacier durant la progression glaciaire. Ces dépôts se forment par placage sous le glacier, produisant des reliefs ensembles fuselés très caractéristiques (*drumlins*) ainsi qu'en aval des butes de socle. Ce matériel est de source locale et peut être utilisé en exploration comme proxy pour le socle local. Il a subi une forte abrasion durant sa progression à la base du glacier, en raison de la charge du glacier et du rapport particules minérale /glace élevée qui s'y trouve. Il a subi une forte compaction, allant localement jusqu'à la pression-dissolution, manifestée par un litage décimétrique très caractéristique (fissilité) analogue à une schistosité horizontale. Cette compaction et la matrice argileuse font que le till de fond est peu perméable et moins sujet à l'oxydation que le till supra-glaciaire (figures C et D).



Figure C : Till sous-glaciaire. Noter 1. la granulométrie hétérogène avec matrice fine, 2. le caractère « clast-supported », 3. la présence de fissilité. Ile de Skye, Écosse. Photo de Benn et Evans, 2010.



Figure D : Till sous-glaciaire. Mêmes remarques. Photo de Benn et Evans, 2010.

## ANNEXE

Exemple de fiche d'échantillonnage du till

Sample ID		No Proposition	
UTMX		UTMY	
Type Ech	15 kg <input checked="" type="checkbox"/> 1 kg <input type="checkbox"/>		
Couleur	Gris <input checked="" type="checkbox"/> Beige <input type="checkbox"/> Brun <input type="checkbox"/> Brun foncé <input type="checkbox"/> Noir <input type="checkbox"/>		
Structure	Compact <input checked="" type="checkbox"/> Lâche <input type="checkbox"/> (1 seul choix)	Fissile <input type="checkbox"/> Massif <input checked="" type="checkbox"/> Stratifié <input type="checkbox"/>	
Texture matrice	Sableuse <input type="checkbox"/> Silteuse <input checked="" type="checkbox"/> Argileuse <input type="checkbox"/>		
Humidité	Sec <input type="checkbox"/> Légèrement humide <input checked="" type="checkbox"/> Humide <input type="checkbox"/> Très humide <input type="checkbox"/>		
Tri	Non trié <input checked="" type="checkbox"/> Trié <input type="checkbox"/> (un seul choix)		
Lithologies cailloux	Granitoides <input type="checkbox"/> Volc. Maf. <input type="checkbox"/> Métaséds <input type="checkbox"/> Gneiss <input checked="" type="checkbox"/> VQz <input type="checkbox"/> FFer <input type="checkbox"/> Intrusions Maf <input type="checkbox"/> Ultramaf <input type="checkbox"/> Schistes <input type="checkbox"/> Grès <input type="checkbox"/>		
Arrondi cailloux	Arrondi <input type="checkbox"/> Subarrondi <input type="checkbox"/> Subanguleux <input type="checkbox"/> Anguleux <input type="checkbox"/>		
Pct Cailloux			
Matériel	Till <input checked="" type="checkbox"/> Gravier <input type="checkbox"/> Gravier + Sable <input type="checkbox"/> Sable <input type="checkbox"/> Silt+Argile <input type="checkbox"/>		
Geomorpho glaciaire	Drumlin <input type="checkbox"/> Moraine Rogen <input type="checkbox"/> <i>Crag&amp;tail</i> <input type="checkbox"/> Moraine de De Geer <input type="checkbox"/> Esker <input type="checkbox"/> Inconnu <input type="checkbox"/>		
Interprétation	Till sous-glaciaire <input checked="" type="checkbox"/> Till supra-glaciaire <input type="checkbox"/> Fluvioglaciaire <input type="checkbox"/> Glaciomarin <input type="checkbox"/> Glaciolacustre <input type="checkbox"/> Littoral <input type="checkbox"/> Inconnu <input type="checkbox"/>		
Commentaires			

## FICHE B.2.2. – PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE DES SOLS POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche procure les connaissances nécessaires au praticien en exploration minérale pour orienter un levé de sol, comprendre les processus impliqués dans la mise en place des empreintes de gîtes métallifères dans les sols, et *in fine* faire les choix de méthode et de protocoles appropriés selon les objectifs du levé et les caractéristiques du terrain. Elle présente un état des connaissances sur les différentes natures de signaux métalliques endogènes et exogènes mesurables dans les sols, leur processus de mise en place, les protocoles d'échantillonnage et d'analyse permettant de les détecter.

---

### INTRODUCTION

La météorisation d'un matériel minéral primaire, roche ou sédiment, par l'action de l'eau météorique, des changements de température et de l'activité biologique, s'accompagne de transformations minérales, de la mobilisation et de la fixation d'éléments, résumées sous le terme pédogénèse, autrement dit : formation des sols. Il existe différents types de sols dont les plus communs sont les podzols, luvisols, gleysols, avec des déclinaisons relativement complexes. Ces aspects, et les implications pour l'exploration minérale, sont développés dans la **fiche A.1.3. « Reconnaissance pédologique pour l'exploration par la géochimie secondaire »**. La fiche A.1.3. décrit le comportement général des métaux au cours de la pédogénèse, et détaille leur remobilisation au sein des différents horizons, dans les sols différenciés les plus communs au Québec, les podzols, qui se développent typiquement sur une roche mère ou sur des sédiments à drainage moyen, typiquement du till. Les conclusions présentées dans la fiche A.1.3. s'appuient en grande partie sur l'analyse de très larges bases de données publiques de géochimie des sols sur le Bouclier canadien (Ontario). Il est important de noter que la grande majorité de ces analyses sont faites au moyen d'une extraction des éléments par *Aqua Regia* suivi d'une analyse par spectrométrie de masse (ICPMS). Ce protocole est relativement standard dans les travaux académiques et gouvernementaux, toutefois la recherche en exploration minérale a investigué un certain nombre d'autres protocoles d'analyse visant à détecter des anomalies métalliques de différentes natures dans le sol. En effet, le contenu métallique des sols peut être de nature endogène ou exogène, c'est-à-dire composé d'éléments *in situ* ayant subi une remobilisation nulle ou très locale durant la pédogénèse, ou au composé d'éléments *ex-situ* ayant migré depuis une source distale subséquentement à la formation du sol. Des informations approfondies sur la formation de telles anomalies et leur détection sont fournies plus bas dans cette fiche. Selon la nature du signal recherché, les protocoles d'échantillonnage et d'analyse varient fondamentalement. L'habitus de ces différents signaux métalliques dans le sol, les mécanismes de transport qui leurs sont associés, ainsi que les protocoles d'échantillonnage et d'analyse permettant des les détecter, constituent l'objet de la présente fiche.

## MÉTAUX ENDOGÈNES ET EXOGÈNES DANS LES SOLS

Les sols sont le lieu d'importantes remobilisations locales 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 induits par la déstabilisation des sulfures est illustré par la figure 1. Les horizons de réception et d'accumulation inorganique des métaux sont théoriquement les horizons B et C. Dans ces horizons les métaux sont fixés par les minéraux secondaires et/ou à forte capacité d'adsorption tels que les argiles (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 (voir Rafini, 2011, Projet CONSOREM 2010-07). Bien que porté par les phases minérales secondaires argile et oxydes Fe-Mn, ce signal est issu d'une remobilisation locale d'un signal de source interne durant la pédogénèse, il n'est donc pas à proprement parler exogène. Il peut exister par ailleurs dans les sols un signal métallique strictement exogène en ce sens qu'il était initialement absent du substrat et s'est mis en place *après* la formation du sol. Ce signal est issu de sources externes et sa mise en place est associée à des mécanismes de transport et d'acquisition totalement indépendants de la pédogénèse. Il est représenté sur la figure 1 (« b, Amont hydraulique », « c : Migration ionique »). Les mécanismes impliqués dans la mise en place des anomalies métalliques exogènes à partir des sources métallifères externes sont décrits plus loin dans cette fiche. En conclusion, les horizons B et C des sols sont le lieu de réception d'un signal métallique endogène remobilisé localement à partir du lessivage de l'horizon A susjacent et d'un signal métallique strictement exogène.

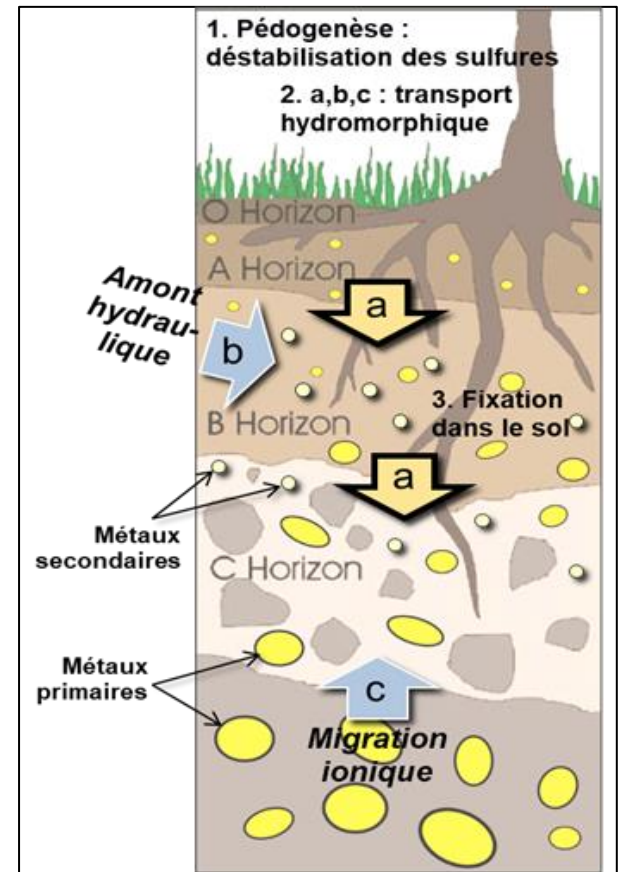


Figure 1 : Comportement des sulfures pendant la pédogénèse. Les métaux exogènes (secondaires) sont fixés par précipitation minérale ou par adsorption sur le substrat solide. Modifié de Rafini (2011).



La figure 2 résume de manière schématique les différents types de disposition des signaux endogènes et exogènes mesurables dans les sols. Les métaux primaires (figure 2, points roses) constituent le signal purement endogène porté par les minéraux primaires, c.-à-d. initialement présents dans le sol. Les anomalies métalliques endogènes peuvent indiquer la présence des sources métallifères dans le substrat, qu'il s'agisse de la roche, auquel cas la source est *in situ*, ou de sédiments glaciaires transportés auquel cas la source est en amont glaciaire. À l'opposé du spectre, les métaux strictement exogènes constituent le signal acquis subséquentement à la formation du sol et par des mécanismes indépendants, ils sont fixés par adsorption à la surface des argiles et des oxydes Fe-Mn (Figure 2, points bleus), ou bien ils sont libres et portés par la phase liquide aqueuse (Figure 2, points turquoise). Entre ces deux pôles sont présents les métaux portés par les phases minérales secondaires, typiquement les carbonates ou oxydes Fe-Mn (Figure 2, points jaunes). En effet, ces minéraux contiennent des métaux issus de remobilisations locales associées à la pédogénèse tels qu'expliqués ci-dessus, et des métaux strictement exogènes issus de sources solides externes au sol. La proportion de ces deux types de signaux dans les minéraux secondaires est difficilement évaluable et varie probablement d'un site à l'autre, toutefois, on peut anticiper que le signal remobilisé localement soit d'une amplitude nettement supérieure au signal exogène transporté sur de plus grandes distances. Le signal de source interne présent dans les minéraux secondaires masquera donc vraisemblablement un signal la présence d'un strictement exogène.

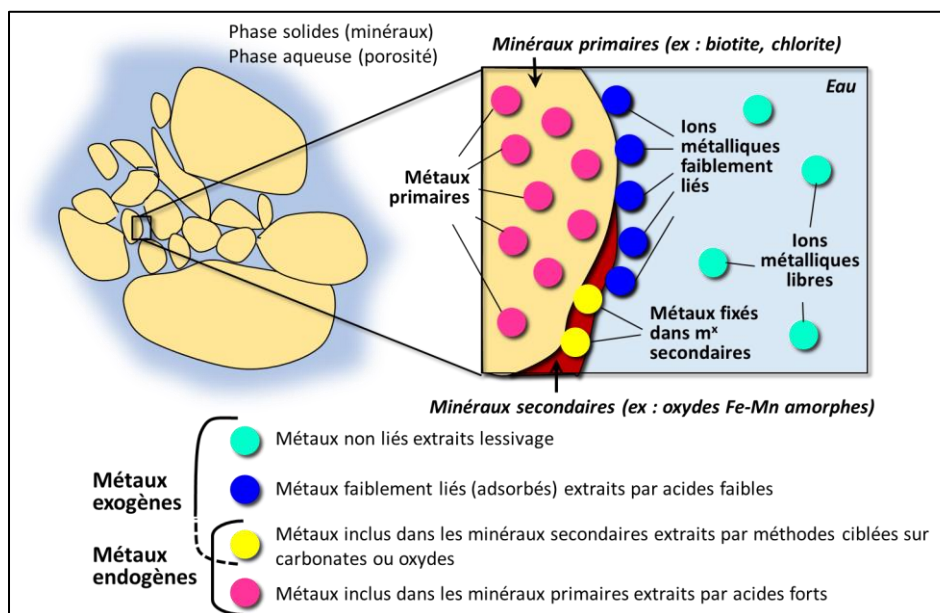


Figure 2 : Représentation schématique de la disposition des métaux endogènes et exogènes dans les sols. Modifié de Rafini (2011).

## DÉVELOPPEMENT DES ANOMALIES EXOGÈNES

Le signal exogène est transporté exclusivement par hydromorphisme, autrement dit sous forme dissoute dans la phase fluide de l'environnement (eau). Il est probablement fréquent que le transport exogène se produise par simple ruissellement à flanc de colline depuis un corps métallifère affleurant en amont topographique du site échantillonné. Il s'agit dans ce cas d'un transport à forte composante horizontale (Figure 1, « b, Amont hydraulique »), formant des anomalies très proximales à la source, relativement simples à localiser. Toutefois, la disposition des anomalies exogènes du sol peut aussi impliquer des mécanismes de remontée purement verticale du signal anomalique depuis la source enfouie en profondeur (Figure 1, « c, Migration ionique » et Figure 3A). Dans ce cas, les anomalies exogènes se développent dans le sol directement à l'**aplomb des corps métallifères**.

À la différence des anomalies endogènes ou des anomalies exogènes formées par ruissellement, la composante horizontale du transport est dans ce cas négligeable (Figure 3B).

Les mécanismes de migration verticale des anomalies exogènes émanant de sources profondes (Figure 3) sont de différents types, selon la nature du signal ciblé par la méthode. La théorie de la **méthode MMI** stipule que les cations migrent par diffusion ionique au sein d'un champ électrochimique induit par l'oxydation de la partie supérieure du sulfure massif (Cameron et al., 2004 ; voir détails dans Rafini, 2011). Ce phénomène, connu depuis les années 70 est bien documenté en Australie (Aspandiar et al., 2008), répond avant tout d'un fait d'observation : les premières études rapportant des anomalies de surface suggérant un transport vertical de métaux ioniques depuis des sources profondes remontent aux années 70 (Bolviken et Logn, 1975 ; Govett, 1976), elles ont été par la suite largement confirmées (e.g., Smee, 1983 ; Hamilton, 1998 ; Cameron et al., 2004). Des moteurs de différentes natures ont été proposés pour expliquer ces observations, aucun ne fait actuellement l'objet d'un plein consensus dans la communauté scientifique, en dépit d'un débat scientifique actif depuis quatre décennies, remarquablement synthétisé par Aspandiar et al (2008) : pompe sismique (surpressions de fluide générées par le cycle sismique : restreint aux contextes de tectonique active), convection thermique (induites par les réactions exothermiques de lessivage d'un gisement sulfuré : presque aucune documentation), diffusion chimique (gradient de concentration : extrêmement lent), diffusion électrochimique par polarisation spontanée et/ou par gradient redox.

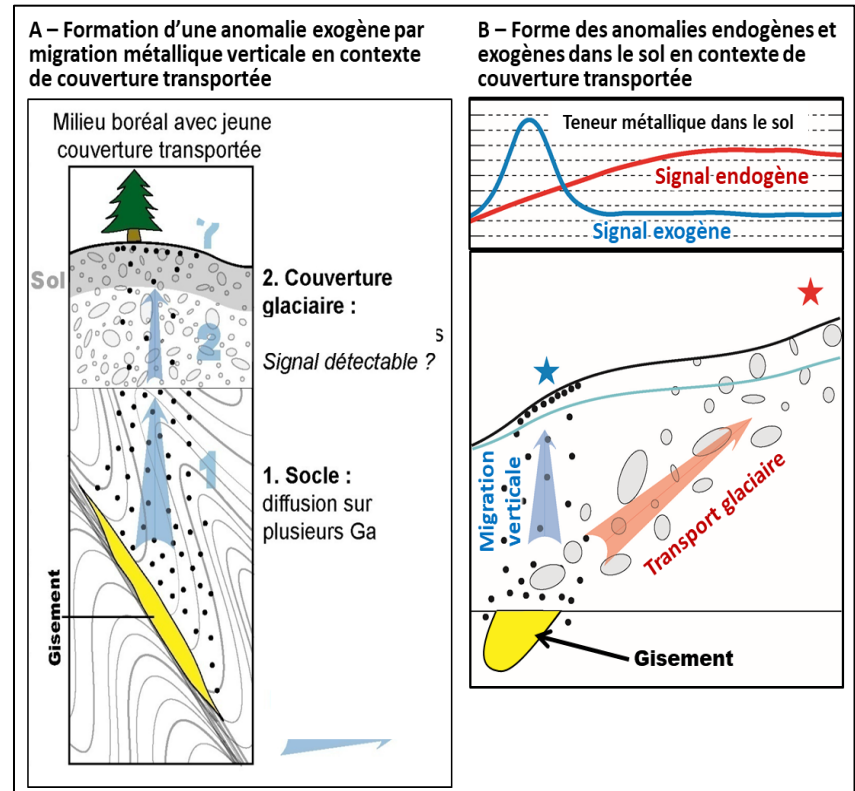


Figure 3 : Mise en place et géométrie des anomalies exogènes par migration verticale. Modifié de Rafini (2011).

La **faisabilité de la méthode MMI**, c'est à dire la validité des postulats de la méthode selon lesquels le signal mesuré résulte d'une accumulation par migration ionique verticale depuis une source enfouie (Figure 3) est questionnable dans les contextes québécois recouverts par une couverture de sédiments glaciaires jeune, d'âge holocène. Étant donné l'extrême lenteur du processus de diffusion ionique mobilisé par **convection électrochimique**, il est peu vraisemblable qu'un signal détectable puisse s'accumuler à travers des sédiments holocènes de type till ou à plus forte raison argileux, dès lors que leur épaisseur dépasse le mètre. Le choix de cette méthode devra donc considérer la perméabilité et l'épaisseur de la couverture sédimentaire glaciaire sur le secteur d'intérêt. Les observations conduites sur le VMS de Cross Lake (Ontario) par Hall et al. (2004) et Hamilton et al. (2004) tendent à la valider. Au contraire, les tests réalisés par Rafini (2011) montrent que le signal métallique mesurable par cette méthode dans les sols du Bouclier canadien, sur différents sites incluant le VMS de Cross Lake, est intrinsèquement contrôlé par la géochimie endogène du sol et par les conditions Eh-pH, ce qui invalide la méthode.

Pour finir, les ions H<sup>+</sup> ont un coefficient de diffusion extrêmement plus élevé que les cations métalliques et ont la capacité de s'accumuler rapidement dans les sols et générer des **anomalies de pH détectables à l'aplomb de sulfures massifs** (Smee, 1983, 2003, 2009). La géométrie de ces anomalies peut prendre une forme circulaire (*Giant Rings*) très caractéristique (Hamilton et al., 2004). Ces structures très spectaculaires sont observées en différents lieux sur le Bouclier canadien.

Le signal exogène formé par migration verticale n'est pas forcément de nature métallique et peut impliquer un effet secondaire de la présence de minéraux métallifères en profondeur. C'est le cas de la **méthode SGH** (*Soil Gas Hydrocarbons*), qui détecte des concentrations anormales en hydrocarbures dans le sol, indiquant de la présence d'un massif sulfuré dans le socle sous-jacent. Selon cette méthode, les hydrocarbures sont libérés par le métabolisme bactérien au contact des sulfures en profondeur. Le mécanisme de transport vertical impliqué dans le développement des anomalies détectables par la méthode SGH est d'une autre nature, il s'agit d'une simple remontée par différence de densité. Pour finir, d'autres mécanismes de migration verticale ont été proposés dans la littérature (voir synthèse dans Rafini, 2011) : convection d'eau souterraine induite par les réactions exothermiques du sulfure massif, transport des métaux adsorbés sur les parois des bulles de gaz de CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> subissant une remontée isostatique, pompe sismique le long des failles-valve actives.

---

## PROTOCOLES D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SOLS

Les analyses d'échantillons de sol se font par défaut par digestion **aqua regia** suivie d'une analyse ICP-MS ou ICP-ES. Cette méthode de digestion est un mélange d'acides (HCl, HNO<sub>3</sub>) conçu pour dissoudre les minéraux sulfurés, elle dissout par ailleurs relativement bien les oxydes et carbonates secondaires, beaucoup moins bien les silicates. Par conséquent, il s'agit du **signal métallique endogène** dans le sol, autrement dit les métaux *in situ* présents dans le substrat rocheux ou sédimentaire, éventuellement remobilisés localement dans des phases secondaires durant la pédogénèse. Le **signal métallique exogène**, lorsqu'il est présent, est typiquement de plus faible amplitude, de plusieurs ordres de grandeur inférieurs au signal endogène, il est par conséquent difficilement détectable et nécessitera le recours à des méthodes spécifiques d'**extraction sélective**.

### Extraction par acides forts

Les méthodes de digestion communément réunies dans la catégorie des acides forts sont des mélanges de HCl, HNO<sub>3</sub>, HFB<sub>4</sub> 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<sup>+</sup> vont être libérés, et 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 extractable* », des mélanges dits de **concentration totale** (Yafa et Farmer, 2006). La première catégorie consiste en un mélange de HCl et HNO<sub>3</sub> en proportion variables. L'**aqua regia** correspond à la proportion 3:1 tandis que l'HNO<sub>3</sub> 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 (HNO<sub>3</sub>), 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 HBF<sub>4</sub> ou HClO<sub>4</sub>.

Les écarts entre les taux de **récupération par aqua regia vs multi-acide** 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 baryum. 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 (i.e., matière organique désintégrée). Il y a alors risque de volatilisation de certains éléments incluant Se, Tl, As, Hg... 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 (Snall 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 tamisé à différentes mailles, c'est un autre 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.

#### **Extraction sélective : force d'extraction et nature du signal extrait**

Les laboratoires commerciaux proposent un certain nombre de méthodes d'extraction partielle et sélective pour les échantillons de sédiments. Ces méthodes sont dites **partielles** en ce qu'elles ne dissolvent qu'une portion relativement réduite des éléments présents dans le sol, et **sélectives** en ce qu'elles sont conçues pour extraire le signal de phases hôtes spécifiques, qu'elles soient minérales, organiques ou aqueuses. La figure 4 présente un inventaire des méthodes d'extraction partielle sélective et des phases hôtes ciblées. La force d'extraction est variable, du simple lessivage avec de l'eau désionisée à l'extraction par acides forts, aqua regia et multi-acides, cette dernière étant une extraction dite totale et donc par définition non sélective. Le caractère sélectif des méthodes d'extraction partielle est bien illustré sur la Figure 4, du plus faible au plus fort niveau d'extraction :

- L'*eau désionisée* cible un signal exogène contenu exclusivement dans la phase aqueuse, autrement dit les métaux libres en solution (Figure 2, point turquoise);
- La méthode *MMI* (Mobile Metal Ions) cible les métaux libres en solution et les métaux faiblement adsorbés sur le substrat solide, essentiellement les argiles et oxydes Fe-Mn amorphes secondaires (Figure 2, points turquoise et bleus);
- La méthode *Na-Pyrophosphates* dissout la matière organique et cible donc un signal fixé par les acides humiques et fulviques;
- La méthode *Amonium Acetate* cible les métaux fixés par les carbonates secondaires (Figure 2, point jaune);



- Les méthodes *Hydroxylamine hydrochloride* et *Enzyme Leach* ciblent les métaux endogènes et exogènes fixés par les oxydes Fe-Mn secondaires amorphes (Figure 2, point bleu et jaune);
- La méthode *aqua regia* cible les métaux à dominante endogène présents dans les phases minérales primaires et secondaires (Figure 2, points jaunes et roses).

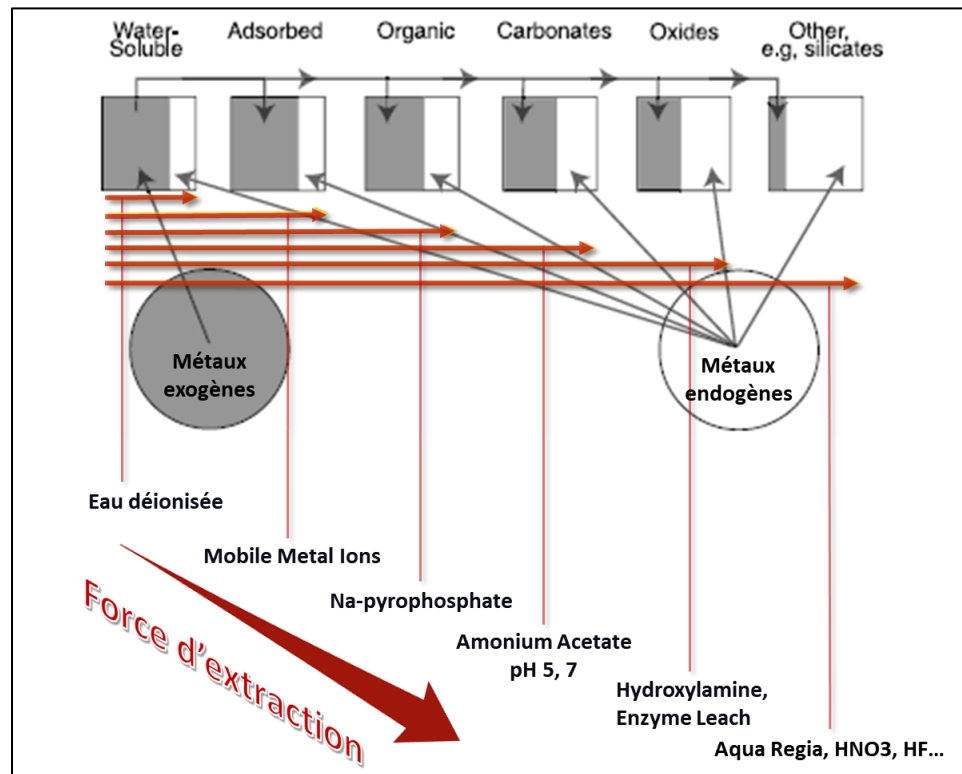


Figure 4. Proportion d'éléments exogènes et endogènes dans les différentes phases hôtes du sol et méthodes d'extraction sélective correspondantes. Modifié de Cameron et al., 2004.

On observe de forts écarts d'amplitude entre les anomalies métalliques mesurables par ces différentes méthodes d'extraction. La figure 5 montre ces écarts à travers deux études de cas sur deux gîtes importants, le sulfure massif volcanogène zincifère de Cross Lake en Ontario, Canada, et le porphyre cuprifère de Spence au Chili. La figure illustre parfaitement le fait que l'amplitude de l'empreinte mesurable augmente proportionnellement à la force d'extraction de la méthode. Ceci reflète en premier lieu le simple fait qu'une plus grande masse de matériel

est dissoute par les méthodes d'extraction les plus fortes. En allant plus loin, ces écarts d'amplitude reflètent aussi les écarts d'amplitude entre les signaux endogènes et exogènes, respectivement mesurés par extraction forte et faible. Le signal exogène est par définition transporté par hydromorphisme depuis des sources distales. La charge transportable est plafonnée par la capacité de transport de l'eau souterraine, en termes de concentration (solubilité) lors du transport advectif, ou de flux (taux de transfert de masse) lors du transport diffusif. En contrepartie, le signal endogène est essentiellement non transporté et n'est donc pas sujet à une telle limitation en amplitude.

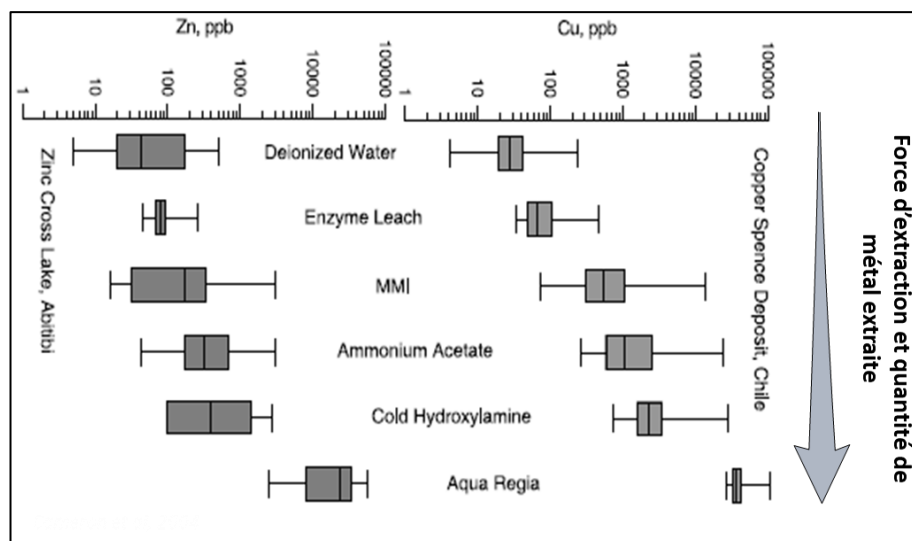


Figure 5. Amplitude des anomalies mesurées par différentes méthodes d'extraction sélective et aqua regia sur les gîtes SMV de Cross Lake (Ontario, Canada, n = 54) et porphyrique de Spence (Chili, n = 63). Modifié de Cameron et al., 2004.

Une conséquence importante de ces écarts d'amplitude intrinsèques aux signaux endogènes et exogènes est que le premier masquera le deuxième dès lors que la méthode d'extraction s'attaque à des phases hôtes susceptibles de porter les deux signaux. De plus, le signal exogène étant faible en amplitude, **l'influence des variations locales de Eh, pH du sol est non-négligeable** sur la détectabilité des anomalies. À l'étape de l'échantillonnage, il est nécessaire de mesurer les facteurs de contrôle Eh, pH, et à l'étape de l'interprétation des levés et de la détection d'anomalies, les valeurs géochimiques devront être mises en perspective avec ces paramètres afin de **distinguer les anomalies « vrais », c.-à-d. prospectifs, des « fausses » causées uniquement par des variations locales des propriétés du sol**. Il existe d'autres facteurs d'influence significatifs sur le niveau métallique de base dans les sols, notamment la composante phyllosilicatée, qu'il est critique de considérer lors de la détection d'anomalie, ces aspects sont développés dans la **fiche C.1.3. « Interprétation des levés de sols et détection d'anomalies »**.

## PROTOCOLES D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SOL

### Phases hôtes des métaux endogènes et exogènes dans les horizons d'un sol différencié

La figure 6 est une tentative schématique de synthèse des modifications minérales et métalliques induites par la météorisation 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. 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. Les carbonates secondaires ne sont pas représentés, car ils sont moins importants dans les sols acides de type podzol, dominants au Québec. Dans l'horizon humus-Ah, à forte composante organique (> 15% de carbone organique extractible au pyrophosphate de Na), les **acides organiques humiques et fulviques forment de complexes très stables avec les métaux secondaires, incluant l'or et le zinc**. La matière organique humifiée est donc un milieu de fixation privilégié de certains métaux en solution. Il est important de noter que ces notions reflètent directement les profils moyens de concentration métallique au sein des différents horizons obtenus par l'analyse statistique de larges bases de données régionales en Ontario et au Québec, ces aspects sont décrits en détail dans la **fiche A.1.3. « Données pédologiques pour l'exploration minérale »**.

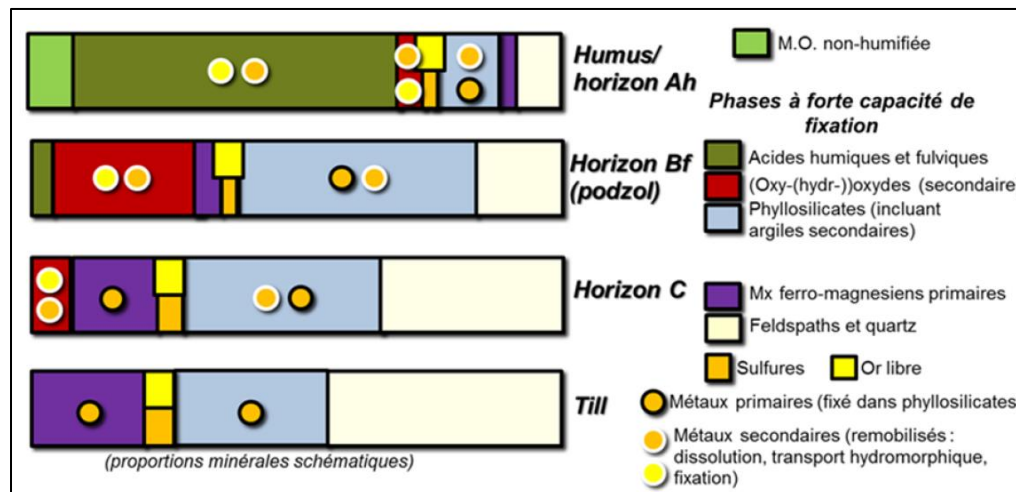


Figure 6. Répartition schématique des métaux et des phases hôtes dans les différents horizons d'un sol différencié. Modifié de Rafini (2012).

**Synthèse : charte des méthodes géochimiques dans les sols**

En conclusion et synthèse des informations présentées dans cette fiche, il est possible d’esquisser une charte d’utilisation des méthode d’extraction sélective et aqua regia dans les différents horizons d’un sol différencié (podzol). Une telle charte est présentée sur la figure 7.

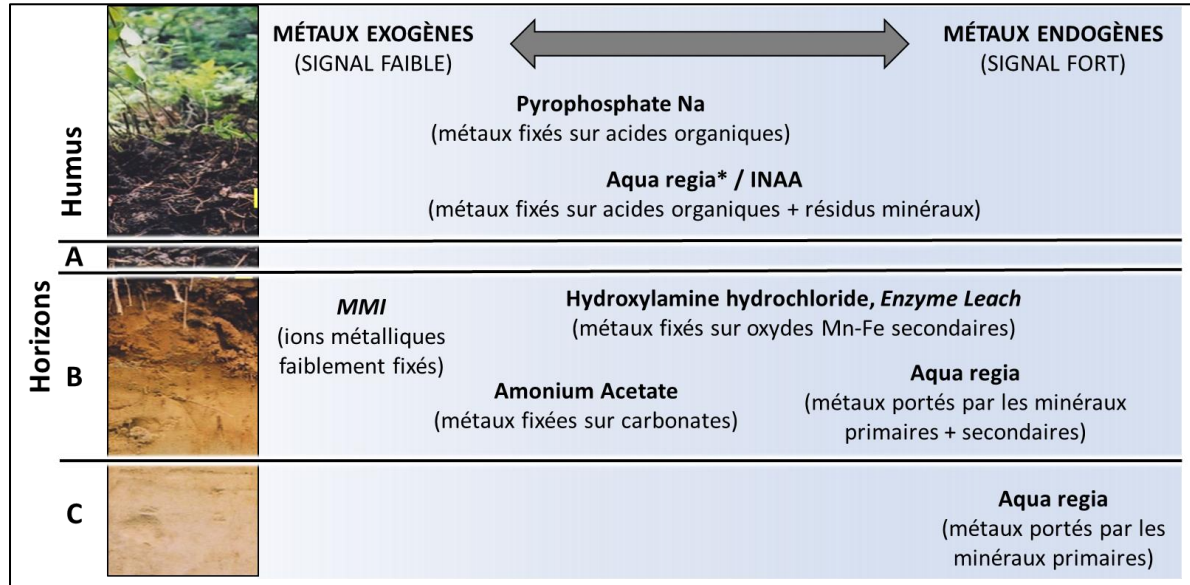


Figure 7. Charte des méthodes de géochimie des sols pour l’exploration minérale. \*Aqua regia avec calcination, voir texte.

Tel que mentionné dans le paragraphe précédent ainsi que dans les Figures 4 et 6, la **charge métallique contenue dans la phase organique**, principal composant de l’horizon humus, est par définition remobilisée. Son origine peut-être exogène ou endogène (remobilisation *in situ* des métaux du sol). Le protocole d’analyse de ce contenu métallique peut être *Na-Pyrophosphates* ou *aqua regia*. En cas d’extraction par aqua regia, les échantillons devront être préalablement calcinés à 500°C afin de désintégrer la matière organique qui neutralise la capacité d’extraction de la solution. Cette étape de calcination implique un risque de volatilisation de certains éléments d’intérêt incluant Se, Tl, As, Hg.

**L'horizon B** offre une gamme relativement large de méthodes selon la nature du signal recherché. La méthode MMI révèle un signal théoriquement exogène, un signal faible en amplitude (Figure 5), tandis que, à l'opposé du spectre, l'aqua regia dissout la quasi-totalité des métaux si bien que le signal détecté sera à dominante endogène, forte en amplitude (Figure 5). L'analyse de larges bases de données publiques d'Abitibi conduite par Rafini (2011) et la comparaison statistique des signaux aqua regia et MMI démontre 1- que le signal MMI mesurable dans les sédiments holocènes de l'Abitibi duplique le signal aqua regia, c.-à-d. qu'il reflète avant le signal endogène du sol, 2- que le signal MMI est très significativement contrôlé par les propriétés locales du sol et en particulier les fluctuations de Eh-pH.

En conclusion, le très jeune âge des sédiments est tel que **le signal exogène recherché par la méthode MMI est inexistant ou très faible** dès lors que l'épaisseur et la perméabilité de la couverture glaciaire dépassent certains seuils (voir section « Développement des anomalies exogènes »). Le signal mesuré traduit donc en premier lieu la composition endogène du sol et ses propriétés Eh-pH. La détection d'un éventuel signal exogène recherché théoriquement par la méthode nécessite donc un certain nombre de corrections impliquant entre autres de connaître la composition endogène du sol en éléments majeurs, analysés par aqua regia, ce qui questionne l'intérêt de la méthode. Il est important de noter que le protocole d'échantillonnage recommandé par les propriétaires de la méthode MMI n'est pas à *horizon fixe*, mais est à *profondeur fixe* depuis la base de l'humus.

Les méthodes *Enzyme Leach* et *Amonium Acetate* ciblent respectivement les phases minérales carbonatées et les oxyde Fe-Mn. Les signaux mesurés par ces méthodes sont extraits de ces phases minérales hôtes ce qui dans une certaine mesure et dans certains cas peut refléter un signal exogène. Cette affirmation demeure relativement théorique, en l'absence d'étude comparative de ces signaux avec le signal endogène aqua regia.

Pour finir, le signal métallique détectable dans l'horizon C est un signal endogène. Cet horizon n'ayant subi qu'une faible météorisation, son contenu métallique n'est pas additionné de remobilisations locales ou exogènes telles que dans l'horizon B. la méthode appropriée dans cet horizon est donc l'aqua regia. Il est important de noter que les performances de l'horizon C pour l'exploration sont globalement supérieures aux autres horizons : l'empreinte des gîtes est davantage développée dans cet horizon (voir **fiche A.1.3. « Reconnaissance pédologique pour l'exploration par la géochimie secondaire »**). Cette observation tend à questionner l'intérêt d'analyser les sols plutôt que le till, si ce n'est la facilité d'accès de ce milieu. La légère météorisation de l'horizon C implique une oxydation des sulfures qui produit un lessivage du signal métallique, il est documenté que ce processus engendre une baisse de performance de la géochimie des tills pour l'exploration (voir **fiches B.2.1. « Protocoles d'échantillonnage des tills pour l'exploration minérale »** et **B.3.1. « Protocole d'analyse des tills pour l'exploration minérale »**).



---

## RÉFÉRENCES

- Aspandiar M.F., R.R. Anand and D.J. Gray (2008) Geochemical dispersion mechanisms through transported cover: implications for mineral exploration in Australia, CRC LEME open file report 246
- Bolviken, B., Logn, O., 1975. An electrochemical model for element distribution around sulphide bodies. in: Elliot, I., Fletcher, K. (Eds.), *Geochemical Exploration 1974*. Elsevier, Amsterdam, pp. 631–648.
- Cameron EM, Stewart Hamilton, M. Beth McClenaghan, 2004 : Cross Lake: geochemical data and interpretations on soil samples, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
- Govett, G.J.S., 1976. Detection of deeply buried and blind sulphide deposits by measurement of HC and conductivity of closely spaced surface soil samples. *J. Geochem. Explor.* 6, 359–382.
- Hall, G.E.M., Hamilton, S.M., McClenaghan, B.M. 2004 CROSS LAKE OVERVIEW: LINES 6 AND 40, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
- Hamilton S.M. 1998 Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain *Journal of Geochemical Exploration* 63 (1998) 155–172
- Hamilton S, Eion Cameron, Beth McClenaghan, Gwendy Hall 2004 Deep penetrating geochemistry – Cross Lake final report, rapport CAMIRO projet 99E01 Deep penetrating geochemistry - MRD168
- Rafini, S., 2011. Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI : synthèse, étude de cas, perspectives.. Rapport, projet CONSOREM 2010-07. 46p.
- Rafini, S., 2012. Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts. Rapport, Projet CONSOREM 2011-06, 45p.
- Snäll, S. et Liljefors T. 2000 Leachability of major elements from minerals in strong acids *Journal of Geochemical Exploration* 71 : 1–12
- Smee, B.W., 1983. Laboratory and field evidence in support of the electrochemically enhanced migration of ions through glaciolacustrine sediment. *J. Geochem. Explor.* 19, 277–304.
- Smee, BW 2003, Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples, *Explore*, 118 p. 1-19.
- Smee, BW 2009, Soil micro-layer, airborne particles, and pH: The Govett connection, proceedings of the 24<sup>th</sup> International Applied Geochemical Symposium, Fredericton, New-Brunswick, Canada, June 1st-4<sup>th</sup>
- Yafa C. John G. 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.

## FICHE B.3.1. – PROTOCOLES D'ANALYSE DU TILL POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche présente les différentes méthodes existantes pour l'analyse du till en exploration minérale, leurs spécificités, avantages et limites, ainsi que des recommandations sur leur usage.

---

### CONCENTRÉS DE MINÉRAUX LOURDS

#### DESCRIPTION

- Le concentré de minéraux lourds correspond à la fraction la plus dense des particules moyennes et fines (< 2 mm) du till;
- Cette fraction est constituée de différents minéraux : généralement, silicates ferromagnésiens (pyroxenes, grenats, amphiboles, epidote), oxydes, sulfures, et métaux natifs tels que les grains d'or. La minéralogie des concentrés varie selon la méthode de concentration;
- Les particules denses sont extraites en laboratoire au moyen de plusieurs procédés de fractionnement par densité : table à secousse, liqueurs denses. Différentes densités de liqueurs denses peuvent être utilisées selon les minéraux que l'on veut récupérer. Les liqueurs denses les plus utilisées sont le bromoforme (densité = 2.84 g/cc) and di-iodo-méthane (densité = 3.31 g/cc). Cette dernière est la plus utilisée;
- Cette concentration nécessite **entre 10 et 15 kg de matériel de till initial** pour le compte et caractérisation des grains d'or par les méthodes classiques, et au moins 10 à 20 kg pour les minéraux indicateurs de kimberlites. Des quantités plus faibles de matériel initial peuvent être utilisées dans le cas d'éléments/minéraux plus abondants (ex. : sulfures dans les tills frais). Les méthodes plus récentes telles que ARTGold qui récupèrent un nombre de grains d'or d'un ordre de grandeur (8-10x) supérieur aux méthodes classiques dans les tills permettent d'envisager des échantillons plus petits (en principe de 1 à 1.5 kg, mais ceci reste à démontrer);
- Il existe plusieurs méthodes d'analyse du concentré de minéraux lourds (figure A) : 1- analyse géochimique de Au et multiéléments par INAA et ICP-ES/MS après dissolution par aqua regia ; 2- comptes des minéraux des concentrés, analyses individuelles de ces minéraux et, pour les grains d'or, caractérisation de la taille et morphologie des grains (intensité de l'abrasion : grains intacts, grains modifiés, grains roulés); 3- compte lithologique des cailloux;
- L'usage typique en exploration est de faire simultanément ces méthodes, qui procurent des informations complémentaires.

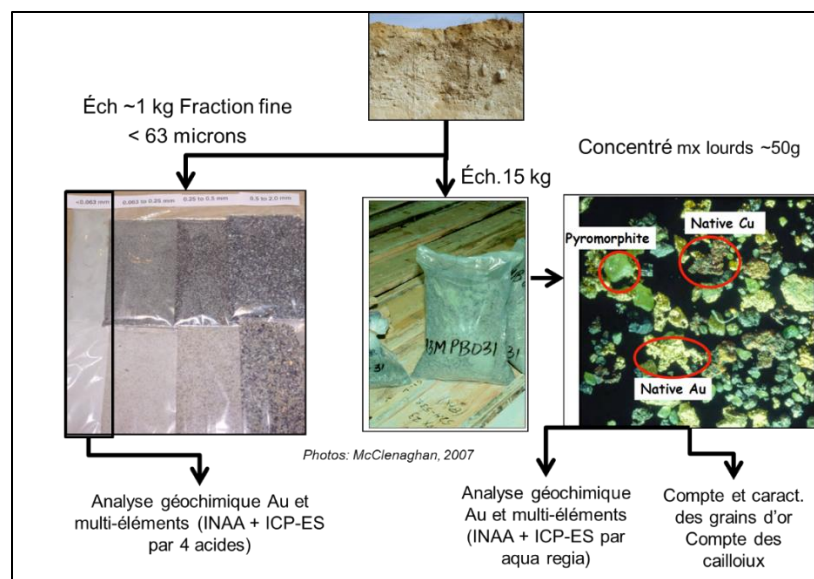


Figure A : Méthodes d'analyse du till pour l'exploration. Rapport Consorem 2010-05, S. Trépanier.

### SIGNAL ANOMAL ET AUTRES INFORMATIONS APPORTÉES

- Le compte de grains d'or permet la détection de trainées glaciaires anormales en or. La coexistence spatiale et la répétition de plusieurs échantillons anormaux en grains d'or indiquent avec une bonne certitude la présence d'une **source aurifère en amont glaciaire**;
- La **morphologie des grains d'or** procure une information qualitative sur la distance de transport glaciaire et donc sur la distance de la source aurifère (figure B). Il est démontré que la somme des grains intacts + modifiés est un **marqueur plus performant que le nombre total de grains**, pour les minéralisations proximales;
- Les méthodes de compte et caractérisation des grains d'or les plus récentes permettant une récupération et caractérisation des très petits grains d'or, tel que ARTGold, indiquent qu'il y a également une dépendance entre la taille des grains et leurs formes; les grains plus petits étant typiquement plus intacts que les gros;
- **L'analyse des minéraux indicateurs** procure des informations importantes sur le **contexte géologique** (lithologie, facies métamorphique, etc.) **et métallogénique** (présence de sulfures ou minéraux d'altération caractéristiques);
- **L'analyse des cailloux** procure des informations sur la lithologie de la source, très utiles à l'étape de l'interprétation du levé (recherche de la source des anomalies);

- Dans certains contextes, **la teneur aurifère du concentré** permet de détecter des anomalies, toutefois ces données sont le plus souvent peu reproductibles en raison d'un **effet pépite très fort** sur ce signal (voir plus bas);
- La géochimie du concentré de minéraux lourds en **éléments marqueurs** des minéralisations aurifères fournit un signal reproductible, **exempt d'effet pépite**. Les éléments marqueurs varient d'un site à l'autre et d'un échantillon à l'autre selon 1- la géologie, la minéralogie et les géochimies trace des minéralisations (typiquement, Ag, As, Sb, W, Te pour des minéralisations orogéniques, plus Bi, Mo, Cu, Zn, pour des minéralisations reliées à des intrusions), 2- la distance de transport glaciaire (résistance physique à l'abrasion des minéraux hôtes), 3- l'oxydation du till près de la surface (résistance chimique à la météorisation des minéraux hôtes, p. ex. : la dissolution des sulfures entraîne la perte du signal As contenu dans l'arsénopyrite tandis que le signal W est plus résistant, car contenu dans des oxydes  $X^{2+}WO_4$ ).

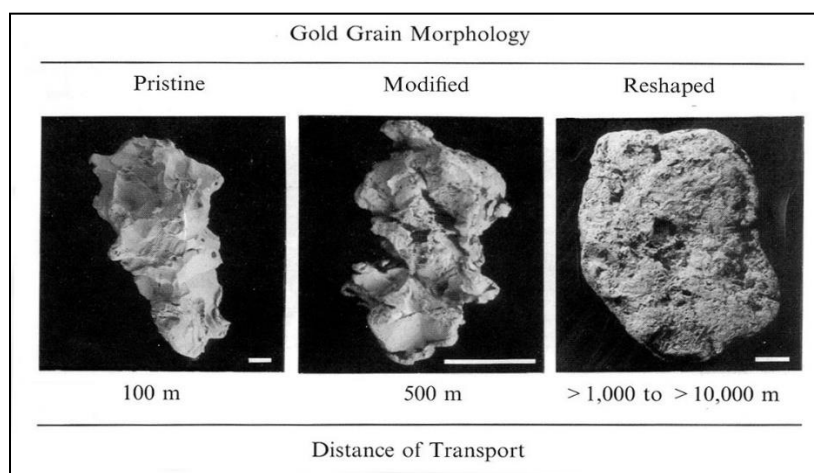


Figure B : Morphologie des grains selon la distance de transport (Averill, 2001). Rapport Consorem 2011-05, S. Trépanier.

## AVANTAGES

### • Minéralogie des concentrés :

- Avantage principal et majeur : **effet pépité** très faible sur le compte de grains d'or ! Ces données ont donc une **meilleure reproductibilité** que les méthodes géochimiques;
- L'analyse des cailloux fournit des **informations subsidiaires très pertinentes** sur la lithologie et le contexte métallogénique de la source;
- Évaluation qualitative de la distance de la source minéralisée (morphologie des grains d'or).

### • Géochimie des concentrés :

- Concentre l'or pour l'analyser avec une meilleure précision analytique et augmenter le ratio signal/bruit pour améliorer la détection des anomalies;
- Détecte l'or inclus dans les sulfures ou les grains d'or recouverts d'oxydes secondaires;
- Détecte l'or grossier.

## LIMITES

- Échantillons lourds (10 – 15 kg) pour le compte de l'or par les méthodes classiques, ce qui implique des difficultés logistiques et coût d'échantillonnage important, en particulier si les conditions d'accès sont mauvaises. Pour l'or, cependant, les méthodes qui permettent de récupérer un nombre de grains plus important (comme ARTGold, 10 fois plus) permettent d'envisager des échantillons plus petits, ce qui diminue les difficultés. On peut utiliser des concentrés plus petits pour des minéraux/éléments plus abondants (ex. : sulfures dans les tills frais);
- Coût d'analyse élevé (180\$ pour comptes de grains d'or, 70\$ pour analyse complète d'un concentré, coûts plus élevés pour les méthodes minéralogiques plus complexes comme indicateurs de kimberlites);
- Délai d'analyse au laboratoire est long en raison du grand nombre d'étapes du procédé de concentration et traitement du concentré;
- **Détection incertaine des anomalies en traceurs mobiles surtout dans le cas du till oxydé prélevé près de la surface**, car ils sont essentiellement contenus dans les sulfures, qui sont des minéraux peu résistants chimiquement et physiquement;
- **Détection incertaine du signal aurifère contenu dans les sulfures, surtout dans le cas du till oxydé prélevé près de la surface**, pour les mêmes raisons;
- **Forte variabilité naturelle du contenu « background » en minéraux lourds des tills**, entre autres en fonction des lithologies dominantes (figure C). Cette variabilité s'observe aussi à l'échelle d'un même levé.



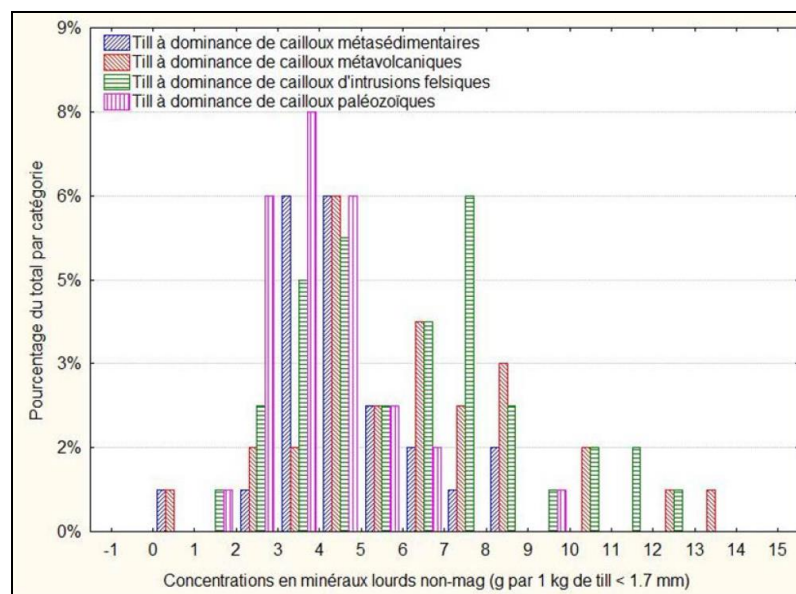


Figure C : Variabilité du contenu en minéraux lourds selon la lithologie dominante du till dans le secteur de Timmins. Données du Dossier Public 3675, CGC. Rapport Consorem 2010-05, S. Trépanier.

- **Biais de récupération lors du concentré :**

- **Forts écarts entre les taux de récupération des minéraux lourds** par les différents laboratoires (plusieurs ordres de grandeur) : résultats inter-laboratoires en général non compatibles (correction possible par normalisation, cf. fiche C.1.2. « *Interprétation des levés de till et détection d'anomalies*);
- **Forte variabilité de la proportion d'or récupérée dans le concentré de minéraux lourds**, selon la granulométrie de l'or et la méthode d'extraction : entre 5 et 80 % du contenu chimique total en or dans le till. Certaines méthodes (ARTGold) semblent plus performantes sur ce point.

- **Minéralogie des concentrés :**

- **Forte variabilité du niveau de base en grains d'or dans les tills.** La compilation de Averill (2001) dans la Province du Supérieur indique une variabilité entre 2 et 20 grains/kg (méthodes classiques), mais des écarts plus importants ne sont pas impossibles dans d'autres régions. En conséquence, les **seuils anomaux** du compte de grains d'or sont variables aussi, ce qui peut poser des

**difficultés à l'étape de la détection d'anomalies** (certaines méthodes de rehaussement s'appliquent (voir la fiche C.1.2. « *Interprétation des levés de till et détection d'anomalies*);

- Ne détecte pas l'or inclus dans les sulfures;
- Ne détecte pas bien l'or en très fines particules (les méthodes les plus récentes comme ARTGold semblent récupérer des grains d'or plus petits);
- Ne détecte pas les grains d'or recouverts d'oxydes secondaires (till oxydé).

• **Géochimie des concentrés :**

- Teneur chimique en or dans le concentré **peu représentative de la quantité réelle d'or** dans le till en raison de la perte de l'or très fin lors du procédé de concentration. Cette perte de signal est moins importante dans les échantillons fortement aurifères (> 800 ppb avec facteur de concentration de 200) et lorsque l'or est grossier, toutefois dans ce cas les signaux sont **peu reproductibles en raison d'un effet pépité très fort** causé par la granulométrie grossière de l'or.

---

## **FRACTION FINE**

### DESCRIPTION

- Analyse de l'or et de la composition multiélément de la fraction fine du till, par ICP-ES/MS et INAA, après digestion par 4 acides ou aqua-regia;
- Obtenue par tamisage avec une maille à 63 µm : argiles + silts. Plus rarement, 177 µm ou 2 µm.

### PERFORMANCE DES MARQUEURS AURIFÈRES

- Au + traceurs As > Sb >> W

### RECOMMANDATIONS

- Le contenu en or dans la fraction fine du till est essentiellement porté par la fraction < 63 µm, de plus l'effet pépité est plus important sur les échantillons de granulométrie supérieure → **utiliser une maille 63 µm plutôt que 177 µm améliore la représentativité et la reproductibilité de l'échantillon;**
- **contrôler avec le laboratoire la masse de matériel utilisé pour l'analyse** (0.5 g, 30 g, 50 g). Plus cette masse est importante, meilleure sera la reproductibilité des analyses (l'effet pépité diminue linéairement avec la masse de l'échantillon);
- Possibilité d'améliorer la reproductibilité en analysant l'or par cyanuration, à partir d'échantillons de 500 g. Dans ce cas, prévoir des échantillons plus gros que 1 kg.

### AVANTAGES

- Analyse peu dispendieuse (40 \$);
- Échantillons légers (1 kg) → diminue les coûts et difficultés de transport;
- Analyse rapide par le laboratoire;
- Détecte l'or très fin;
- Permet de détecter les **anomalies en traceurs aurifères** (ex. As, Sb, Cu) même si le till est oxydé.

### LIMITES

- **Effet pépite important** sur le signal Au. La reproductibilité est souvent inférieure à 50 % avec 95 % de confiance (augmente avec la masse et la teneur de l'échantillon, diminue avec la taille des grains d'or);
- Signal aurifère est de relativement faible magnitude (pas de concentration) → les anomalies sont **détectables sur de plus faibles distances** de drainage;
- Les **levés utilisant différentes mailles de tamisage ne sont pas compatibles** (différents le même niveau de base et seuils d'anomalie).

---

## PERFORMANCE DES MÉTHODES ET CHOIX

### PERFORMANCES

- Les **comparaisons de performances statistiques à l'échelle régionale pour l'exploration** montrent que le compte de grains d'or dans les concentrés de minéraux lourds est la méthode offrant le meilleur traçage des minéralisations aurifères dans le till, suivie des traceurs As et Sb dans la fraction fine, puis de Au dans la fraction fine;
- Les anomalies aurifères dans le concentré de minéraux lourds sont détectables sur de plus grandes distances que dans la fraction fine : limite de détection plus faible.

### AUTRES CRITÈRES

- La méthode des **minéraux lourds fournit un meilleur signal en qualité et en quantité d'information** (grains d'or, contexte lithologique et métallogénique), mais elle est 4 fois plus chère à l'analyse que la méthode de la fraction fine, l'échantillonnage est plus complexe et coûteux en raison de la masse importante requise (échantillons de 10-15 kg), et l'analyse par le laboratoire est plus longue (concentration) → le **choix de la méthode sera déterminé par le rapport coût/bénéfice, variable pour chaque projet** selon 1- l'accessibilité du terrain ; 2- les besoins en information, selon le degré d'avancement du projet ; 3- la surface à couvrir, 4- les contraintes budgétaires;
- Un till oxydé (couleur brunâtre à rouille) ne doit pas être analysé pour les concentrés de minéraux lourds si on s'intéresse aux sulfures. L'oxydation des sulfures libère le signal métallique, qui sera potentiellement adsorbé par les argiles, si bien que l'analyse de la fraction fine (As, Sb, W, Cu, Zn) fournira dans ce cas des meilleurs résultats.

## FICHE C.1.0. – DÉTECTION DES ANOMALIES PROSPECTIVES POUR L'EXPLORATION MINÉRALE



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche comporte une explication avancée des problématiques de détection d'anomalie prospective à partir de levés de géochimie de l'environnement secondaire. Les notions de signal métallogénique et de bruit de fond géochimique sont d'abord présentées, puis différentes approches de détection d'anomalies sont discutées selon les rapports signal/bruit des méthodes : détection par seuils d'anomalies sur base de données de référence, détection avec rehaussement d'anomalie par nivellement du bruit de fond suivant les approches déterministes, statistiques, et spatiales.

---

### **INTRODUCTION**

Après réception des résultats du laboratoire, **le traitement des levés** d'environnement secondaire a pour objectif la détection des anomalies et le ciblage prospectif. Le traitement des levés est composé de deux étapes distinctes : 1- **l'interprétation** des levés, 2- la **détection d'anomalies**. L'interprétation constitue en quelque sorte une étape d'analyse et de validation du jeu de données, préalablement à l'identification d'anomalies robustes, statistiquement valides et « contrôlées ». L'interprétation des levés inclut donc un retour sur la qualité des données, non seulement la qualité analytique sensu-stricto mais aussi en termes de contrôle sur les différentes formes d'imprécision, de bruit opératoire et naturel.

Cette fiche fait référence à de nombreuses reprises au concept de **méthode**. On entend ici par méthode la combinaison d'un milieu d'échantillonnage tel que sol horizon B, till, sédiments de fond de lac, etc., d'un protocole d'échantillonnage, et d'un protocole analytique, lui-même composé d'un éventuel traitement physique des échantillons (p.ex., tamisage) et d'un type d'analyse. Par exemple, l'or analysé dans la fraction fine du till est une méthode distincte du compte du nombre de grains d'or d'origine délicate dans un concentré de minéraux lourds ; l'or analysé dans le concentré est une troisième méthode distincte.

La détection des anomalies d'une méthode en tant que telle dépend de **l'amplitude des anomalies par rapport au bruit de fond de la méthode** dans la région d'intérêt. Différents processus peuvent influencer le bruit de fond des différentes méthodes et dans certains cas, des traitements devront être utilisés pour rehausser les anomalies significatives et cohérentes pour l'exploration et obtenir des cibles prospectives robustes. Différents facteurs influençant le bruit de fond des indicateurs / éléments seront discutés et des corrections possibles seront proposées également.

---

## DETECTION DES ANOMALIES

La variabilité des concentrations géochimiques mesurables dans l'environnement secondaire à des fins d'exploration minérale est décomposable à toute fin pratique en deux processus : le bruit de fond géochimique, et les anomalies prospectives dues aux corps minéralisés.

Les anomalies prospectives sont des valeurs anormalement élevées dans les zones d'empreinte des minéralisations, c'est ce que l'on cherche à détecter et que l'on désigne par **signal**. Le facteur d'enrichissement des marqueurs géochimiques au sein de ces empreintes, en comparaison au niveau de base environnant, détermine l'amplitude du signal anomal recherché. **L'amplitude des anomalies est très variable** d'un milieu d'échantillonnage à l'autre et d'une méthode à l'autre.

Le **bruit de fond géochimique**, aussi nommé effet matriciel, constitue toute la variabilité des données non liée au signal, c'est-à-dire **l'ensemble des fluctuations géochimiques, naturelles ou anthropiques, non liées à la présence de corps minéralisé**. Le bruit se trouve donc être une variable complexe, car il regroupe plusieurs facteurs d'influence très diverse, indépendants et dépendants, régionalisés et non régionalisés, permanents et transitoires. Il en résulte que la variabilité spatio-temporelle du bruit est souvent difficile à décrypter de façon déterministe et exigera le recours à des outils statistiques avancés. De façon analogue au signal, **l'amplitude du bruit de fond varie significativement** d'un milieu d'échantillonnage à l'autre et d'une méthode à l'autre.

Un paramètre clef pour le traitement des données d'environnement secondaire en exploration minérale est le **rapport signal/bruit**, autrement dit le rapport d'amplitude entre le signal et le bruit. Ce rapport est variable selon les méthodes. Il est le critère principal à prendre en considération pour choisir l'approche appropriée à l'étape de la **détection d'anomalie**. Dans le cas des méthodes à fort ratio signal/bruit (Figure 1A), l'amplitude du signal est grande devant le bruit de fond si bien que les valeurs élevées reflètent avec un bon niveau de confiance la présence de minéralisations. La détection d'anomalie peut être faite par une approche statistique simple. Les méthodes à faible ratio signal/bruit (Figure 1B), ce qui est le cas de la plupart, impliquent une fluctuation importante du niveau de base et par conséquent une incertitude sur la nature des valeurs élevées, qui peuvent être causées par des minéralisations (vraie anomalie, figure 1B) ou bien des processus sans lien avec des minéralisations (fausse anomalie, figure 1B). Dans ce cas, la détection d'anomalie nécessite le recours à des traitements statistiques avancés.

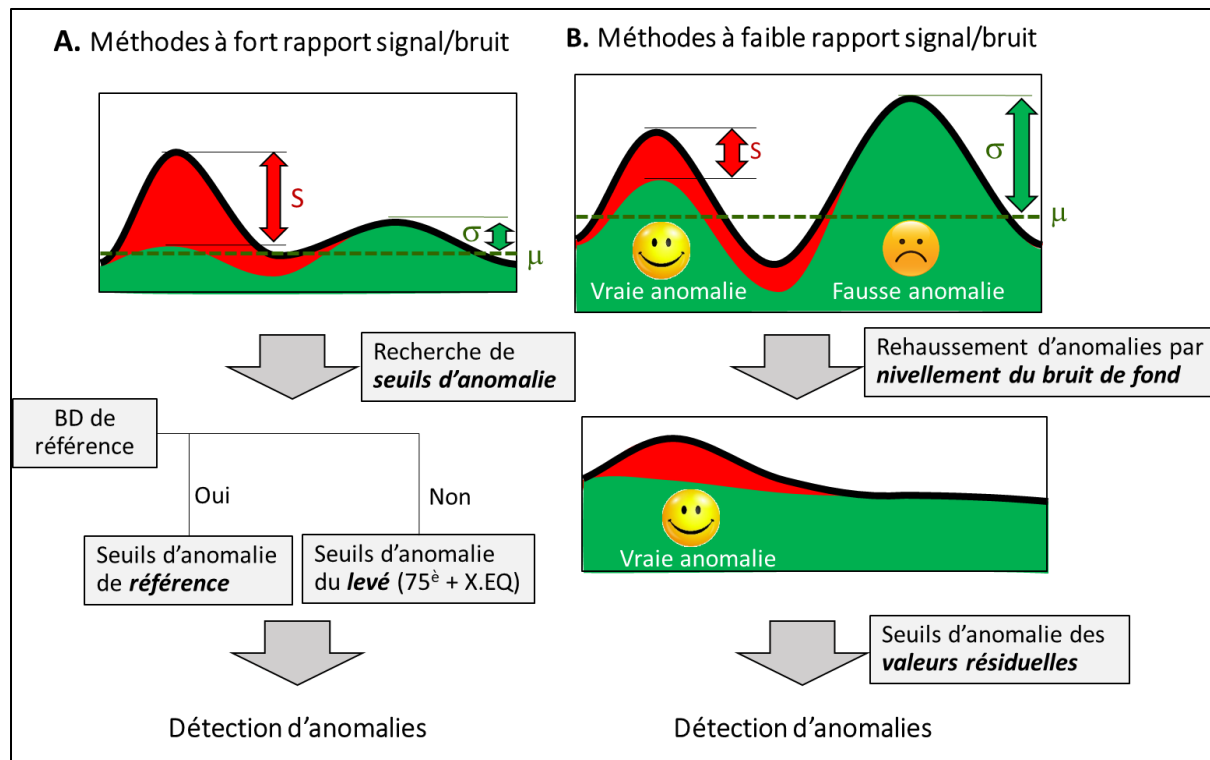


Figure 1 : Organigramme des approches de détection d'anomalie selon le rapport signal/bruit des méthodes. Signal anomal : S ; niveau de base moyen; bruit (écart-type du niv. de base).



### **Méthodes à fort ratio signal/bruit**

Le fort rapport signal/bruit, observé dans certaines méthodes, traduit un faible effet matriciel, une bonne précision analytique et/ou un fort facteur d'enrichissement dans les empreintes. **Les méthodes à ratio signal/bruit élevé sont relativement rares**, il s'agit 1- des méthodes minéralogiques telles que les minéraux indicateurs dans les concentrés de minéraux lourds du till, et 2- de l'hydrogéochimie souterraine.

Pour les minéraux indicateurs, un exemple ultime est les grenats G10 pour la détection des kimberlites : l'identification d'une simple occurrence indique sans équivoque la présence d'une kimberlite. Dans ce cas, le bruit est nul, l'imprécision analytique (erreur d'identification) est nulle, les anomalies sont booléennes (*oui* ou *non*), la méthode est qualitative. Le nombre de minéraux indicateurs informe sur la proximité et l'importance du corps minéralisé. Certains autres minéraux indicateurs, tels que les grains d'or, se retrouvent cependant en fond géochimique dans les roches non prospectives et ont par conséquent un niveau de base ; les variations de ce niveau de base, c.-à-d. le bruit de fond, demeurent faibles en comparaison à l'augmentation du nombre de minéraux dans les zones d'empreinte des gîtes.

Dans l'eau souterraine, l'amplitude des anomalies de Zn dissous mesurées par Rafini (2020) dans l'empreinte profonde de gîtes zincifères en Abitibi est de l'ordre de 300 (facteur d'enrichissement), tandis que l'amplitude du bruit est inférieure à un demi-ordre de grandeur (écart-type des bases de données régionales). Par conséquent, le ratio signal/bruit atteint la centaine, un rapport exceptionnellement élevé dû au **caractère très homogène du médium eau souterraine**, autrement dit un effet matriciel très faible, contrôlé essentiellement par un processus unique et continu : les échanges eau-roche (salinisation continentale).

La détection d'anomalie par les méthodes à fort ratio signal/bruit ne nécessite **pas de traitement avancé** et se fait par la **simple application de seuils d'anomalie statistiques** : les échantillons dépassant le seuil d'anomalie sont des cibles prospectives. Les seuils d'anomalie sont préférablement établis de manière universelle à partir de bases de données de référence (Figure 1A). En l'absence de tels **seuils d'anomalie de référence**, il est possible de calculer des seuils directement sur le levé à partir de la fonction de distribution de la variable (substance recherchée ou marqueur prospectif). Le calcul des seuils d'anomalie à partir du levé se fait de la manière suivante : seuil d'anomalie = valeur du 75<sup>e</sup> centile + X fois l'écart interquartile, avec X = 1.5 ou 3 selon la « force » (robustesse) de l'anomalie recherchée. Le calcul des seuils d'anomalie à partir du levé est moins robuste que les seuils établis sur des bases de données de référence, car il s'appuie sur une population d'échantillons possiblement moins représentative du niveau de base et influencée de manière non marginale par le signal recherché : **on gardera donc un regard critique sur ce qui est caractérisé *anomal* dans le jeu de données du levé** par l'application de cette formule universelle. Par exemple, une propriété contenant un nombre important de zones minéralisées est, en soi, anormale, le seuil devrait donc y être plus bas que dans une propriété normale. Cette formule constitue un standard pour pallier à l'absence de données de référence sur le niveau de base régional, elle est relativement arbitraire. Cette approche demeure cependant plus robuste que les simples seuils par centiles fixes (95<sup>e</sup>, 99<sup>e</sup>, typiquement) qui génèrent automatiquement des anomalies dans tous les jeux de données.

### **Méthodes à faible ratio signal/bruit**

Pour la plupart des méthodes, toutefois, l'amplitude globale du bruit, tous facteurs confondus, est comparable ou supérieure à l'amplitude du signal anormal recherché : le rapport signal/bruit est faible. Une analyse quantitative des amplitudes de bruits de différentes natures, en comparaison au signal, est développée dans la section suivante de cette fiche.

Dans le cas des méthodes à faible ratio signal/bruit, **le niveau de base est significativement variable** à différentes échelles et la détection des anomalies prospectives robustes, anomalies « vraies » (Figure 1B), nécessite donc une connaissance ou un contrôle sur le niveau de base local. Ceci peut être réalisé par différentes approches statistiques de rehaussement d'anomalie. **Le rehaussement d'anomalie cherche à décomposer le signal et le bruit.** Une manière simple consiste à appliquer des modifications aux valeurs brutes qui nivellent le bruit de fond sans affecter le signal métallogénique recherché (Figure 1B). Ces opérations vont du simple ratio par un élément marqueur du bruit de fond (normalisation) à des traitements statistiques multivariés plus complexes, ces aspects sont développés plus bas dans cette fiche. Les anomalies ainsi calculées sont des augmentations relatives à niveau de base local, autrement dit des **anomalies résiduelles**.

---

### **BRUIT DE FOND GÉOCHIMIQUE ET REHAUSSEMENT D'ANOMALIES PROSPECTIVES**

Pour la grande majorité des méthodes géochimiques de l'environnement secondaire, le rapport signal/bruit est faible si bien que **l'analyse du bruit de fond constitue une étape critique**, et malheureusement souvent négligée, du traitement des levés et de la détection d'anomalies. Cette section décrit les différents types de bruit et fournit plusieurs exemples concrets. Les approches statistiques permettant de les corriger afin de rehausser les anomalies prospectives seront décrites au chapitre suivant.

#### **Bruit régionalisé**

Une portion de la variabilité du fond géochimique est régionalisée. Ce bruit est déterminé par des facteurs régionaux : géologie du socle (formations, sous-provinces, provinces), géologie quaternaire, géomorphologie, relief, climat, etc. Il produit des **domaines géochimiques à grande échelle**. Ce bruit est de grande longueur d'onde et sera donc moins responsable des fluctuations à l'échelle d'un levé sur une propriété, par contre il conditionnera le niveau de base moyen du levé.

Des exemples de bruit régional dans les sédiments de fond de lac sont représentés sur les figures 2 et 3, respectivement pour les contenus en Cu et Li dans les régions nordiques de la Péninsule d'Ungava et de la Baie-James. Un domaine géochimique remarquable dans la Péninsule d'Ungava suit un axe NNO-SSE (Figure 2A), cet axe correspond à l'extension septentrionale de la calotte glaciaire du Nouveau Québec. Il s'agit d'une crête de retrait glaciaire produisant une forte empreinte géomorphologique, reflétée de façon très claire par la profondeur des lacs à l'échelle régionale (Figure 2B). La profondeur des lacs est un facteur de contrôle de premier ordre sur le contenu métallique des sédiments, notamment Cu (voir **fiche B.1.1. « Planification des levés de sédiments de fond de lac pour l'exploration minérale »**). À noter que la profondeur est directement reliée au degré d'eutrophisation et de comblement détritique des lacs qui sont des facteurs d'influence limnologique majeurs sur les niveaux de base métalliques et sur la performance des lacs pour l'exploration minérale, ces aspects sont développés dans la fiche B.1.1.

Cette relation entre la profondeur et le niveau de base en Cu est visualisée statistiquement sur la figure 2C : l'écart de niveau de base entre un sédiment de lac peu profond (1 m) et un sédiment de lac profond de 25 m et plus est de l'ordre d'un facteur 3 (ratio des médianes). Cette amplitude est significative devant l'amplitude des anomalies prospectives recherchées, et constitue donc un biais qu'il est nécessaire de prendre en considération pour la détection de ces anomalies.

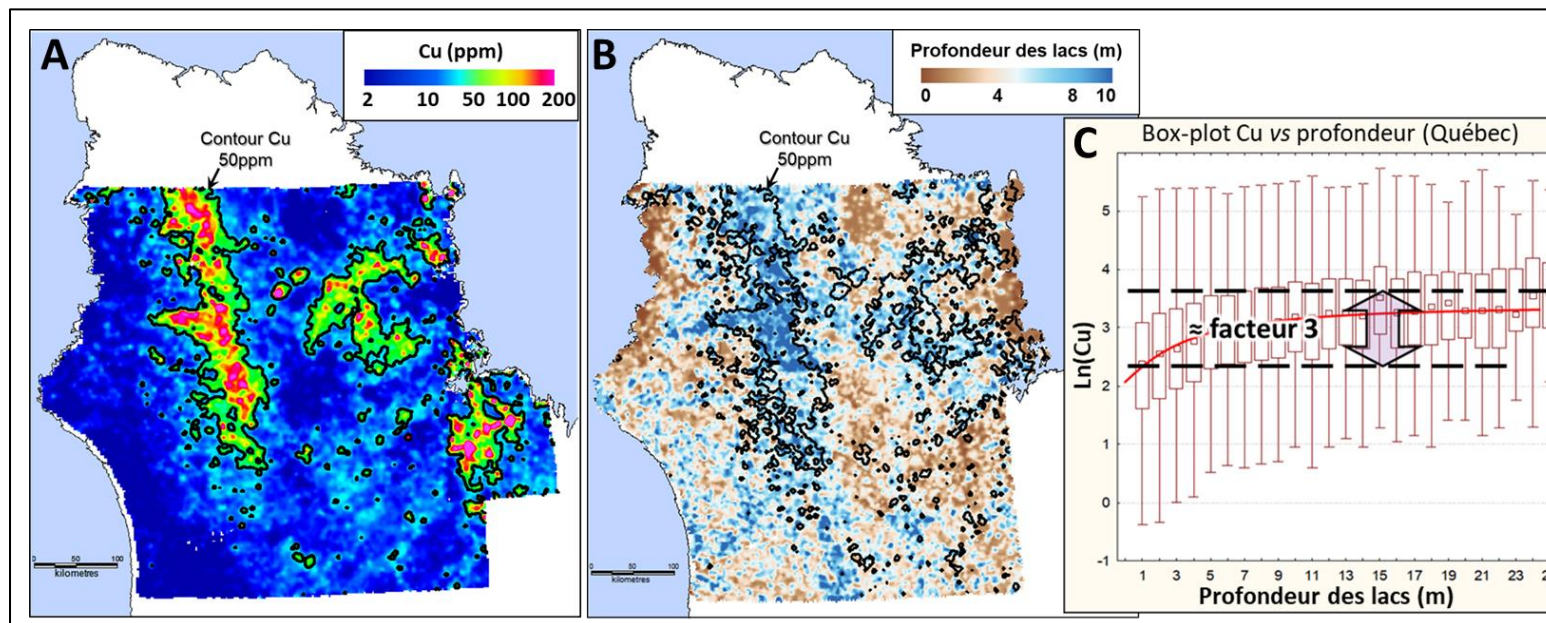


Figure 2 : Relations entre le contenu en cuivre (A) et la profondeur (B) des échantillons de sédiments de fond de lac dans la Péninsule d'Ungava (Nord du Québec). C) Box-plot des valeurs de Cu par tranches de profondeur pour l'ensemble de la Province du Québec (n > 250 000 ech). Données publiques MRNF. Modifié de Trépanier (2006) et Rafini (2013).



La carte du contenu en Li des sédiments de fond de lac de la Baie-James (figure 3) révèle aussi des domaines géochimiques très marqués, gouvernés par deux facteurs de contrôle régionaux : 1- le couvert sédimentaire glaciaire holocène et 2- les ensembles géologiques du socle archéen. La figure indique les limites de la mer de Tyrrell, une mer périglacière d'âge holocène ayant laissé un large domaine couvert par une forte épaisseur de sédiments argileux. Il apparaît clairement que ce contour influence les valeurs en Li, qui sont globalement supérieures dans la plaine argileuse. La figure 3 montre, par ailleurs, que cette influence est combinée avec un effet aussi très marqué des unités composant les sous-provinces géologiques de La Grande, de l'Opatica et de Nemiscau. Le contraste des valeurs en Li observé, de part et d'autre des limites de la mer de Tyrrell, est très abrupte au sein de la sous-province métasédimentaire de l'Opatica (dans la région de la mine Éléonore). Si ce contrôle régional sur la concentration en Li des sédiments de fond de lac est sans équivoque, son explication physique demeure débattue. Il reflèterait à la fois un niveau de Li élevé dans le socle local associé à l'abondance de biotite et/ou de disthène dans certaines formations intrusives ou migmatitiques de la sous-province de l'Opatica, ainsi qu'un enrichissement glaciaire dans la fraction argileuse du till de fond – les régions à haut niveau de base lithinifère correspondent en effet aux zones périphériques de la mer de Tyrrell, où la couverture argileuse est peu épaisse et laisse affleurer de larges secteurs du till sous-jacent (la coexistence de till et d'argile, par définition exotique, pourrait être une clef du problème). Le bruit régional induit donc des écarts significatifs de niveaux de base à grande échelle, qui peuvent être appréhendés de différentes manières à l'étape de la détection d'anomalie.

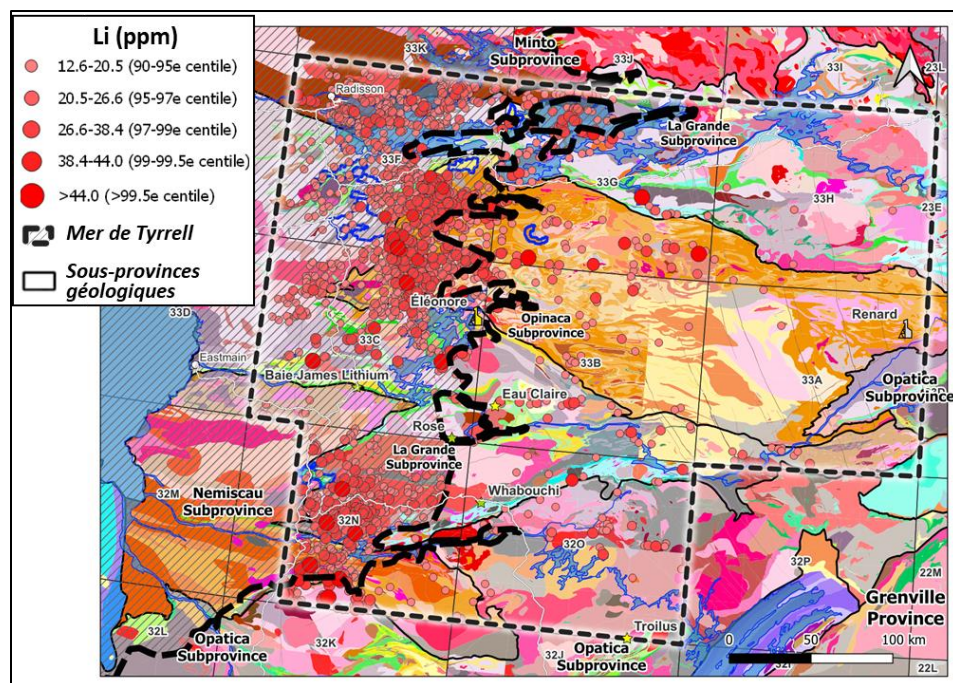


Figure 3 : Contenu en lithium des sédiments de fond de lac dans la Baie-James (Nord du Québec) superposé aux ensembles géologiques archéens (socle) et quaternaires (plaine argileuse de la mer périglacière de Tyrrell). La densité du levé est homogène (maille de 3km), seuls les échantillons > 90e centile sont représentés à des fins de visibilité. Couleurs de fond : géologie du socle, sous-provinces d'Opinaca, Opatica, La Grande, Nesmicau et Minto. Données publiques MRNF. Légende de couleurs standard MRNF. Modifié de Lavoie (2023).

### Bruit non régionalisé

Le bruit non régionalisé est relié aux **fluctuations locales de certains facteurs de contrôle** sur le contenu métallique. À titre d'exemple, on peut citer l'influence du degré d'abrasion des tills sur leur contenu métallique (Figure 4), l'influence de la composition des sols, et notamment la fraction organique et la fraction argileuse sur le niveau de base métallique de l'horizon B (Figure 5), l'influence des facteurs limnologiques sur le fond métallifère des sédiments de fond de lac. Les deux premiers exemples sont développés ci-dessous, le troisième est développé dans la **fiche B.1.1. « Planification des levés de sédiments de fond de lac pour l'exploration minérale »** (typologie des lacs).

Le degré d'abrasion des tills sous-glaciaires est lié à la distance de transport glaciaire subie par le matériel arraché du socle local lors de la progression du glacier. C'est une fonction variable dans l'espace, suivant les variations locales du niveau exposé et de l'épaisseur du couvert glaciaire. Globalement, plus le till est proche du socle, plus la distance de transport est faible, plus le degré d'abrasion est faible, moins sa fraction argileuse (< 2 µm) est importante en comparaison à la fraction silteuse (2 – 63 µm). En l'absence de signal métallogénique, le contenu métallique de base du till est essentiellement porté par la fraction argileuse du sédiment, tel qu'illustré par la figure 4. Ceci est dû au fait que le niveau de base métallique est contenu, dans la roche fraîche, essentiellement dans les minéraux phyllosilicates et ferromagnésiens, lesquels sont moins résistants à l'abrasion mécanique et donc rapidement réduits dans la fraction argileuse, comparativement aux quartzs et feldspaths qui constitueront davantage la fraction silto-sableuse du sédiment. Ces aspects sont détaillés dans la **fiche C.1.2. « Interprétation des levés de till et détection d'anomalie »**. La figure 4 procure en première approximation une estimation quantitative du bruit causé maximal par les variations de la composante argileuse du till, de l'ordre d'un facteur 10 (écart inter-médianes). Cette valeur constitue un plafond puisqu'il correspond aux cas extrêmes de sédiments dénués de fraction silteuse ou argileuse, respectivement.

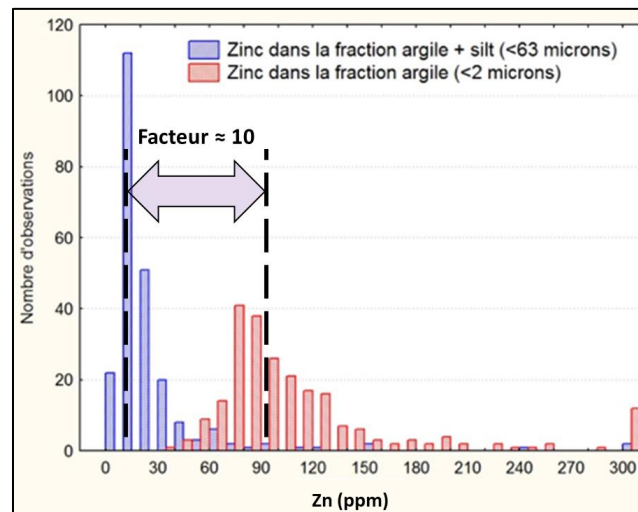


Figure 4 : Distributions des valeurs de Zn dans les fractions argileuses et silteuse d'une même série d'échantillons de tills. Les lignes pointillées représentent les médianes des deux populations et la flèche large l'écart inter-médianes. Modifié de Trépanier (2011).

D'autres exemples de bruit local, non régionalisé, sont représentés sur la figure 5, dans pour les méthodes Zn/Horizon B et Au/Horizon B. L'horizon B est un milieu communément échantillonné pour des levés d'exploration, plusieurs réserves ont été émises à ce sujet dans les **fiches A.1.3. « Données pédologiques pour l'exploration minérale »** et **B.2.2. « Protocoles d'échantillonnage et d'analyse des sols pour l'exploration minérale »**. Bien que l'horizon B se définisse globalement comme un horizon enrichi situé directement sous l'horizon A appauvri, la composition organique et minérale des horizons B présente une certaine variabilité qui se décline en plusieurs sous-types. Les sous-types Bf-Bm, Bt et Bh constituent des pôles respectivement enrichis en oxydes de Fe-Mn, en argiles et en matière organique. Ces aspects sont détaillés dans la **fiche A.1.3. « Données pédologiques pour l'exploration minérale »**. Cette variabilité compositionnelle de l'horizon B induit une variabilité du fond métallique.

L'influence de la composante argileuse sur le contenu en Zn produit une variabilité du niveau de base de l'ordre d'un facteur 10 (Figure 5A). Ceci est dû au simple fait que cet élément est contenu essentiellement dans la fraction argileuse des sédiments tels qu'évoqués plus haut. La composante argileuse est estimée par un indice de phyllosilicates, défini par la somme d'Al, K et Mg normalisés par leurs moyennes. Il est intéressant de noter que cette influence a une composante non régionalisée, reflétée par le fait que les couleurs (levés) se superposent sur la figure 5A, et une composante régionalisée visible par le fait que certains levés ont globalement des fractions argileuses plus élevées (en bleu).

Pour finir, ce contrôle sur Zn n'est pas universel comme le montre le levé en vert sur la figure 5A, qui sort clairement de la tendance. Dans ce cas, le faible niveau de base zincifère traduit vraisemblablement la géologie du socle, composée de grès et arkoses (wacke), tandis que les autres levées tous sont des traverses sur la faille Destor-Porcupine recoupant des formations volcaniques mafiques (voir détails dans Rafini, 2011).

L'influence de la fraction organique sur le fond aurifère de l'horizon B est visualisée sur la figure 5B, sur deux levés régionaux distincts dans la Province du Supérieur. Cette corrélation Au-Matière organique (M.O.) est due aux affinités bien connues de l'or pour la M.O., et à la faculté de cet élément à se complexer avec les acides fulviques et humiques. Comme expliqué en détail dans la **fiche A.1.3. « Données pédologiques pour l'exploration minérale »**, la composition organique des horizons présente une certaine variabilité, elle est comprise entre 1 et 10 % de carbone organique extractible au Na-pyrophosphate, le seuil de 5 % correspondant à la limite entre les sous-types horizons Bh et Bf ([Système canadien de Classification des Sols](#) produits par le Ministère de l'Agriculture et Agroalimentaire Canada). Cette variabilité induit un bruit de fond aurifère dans l'horizon B estimé à un facteur 3 (Figure 5B).



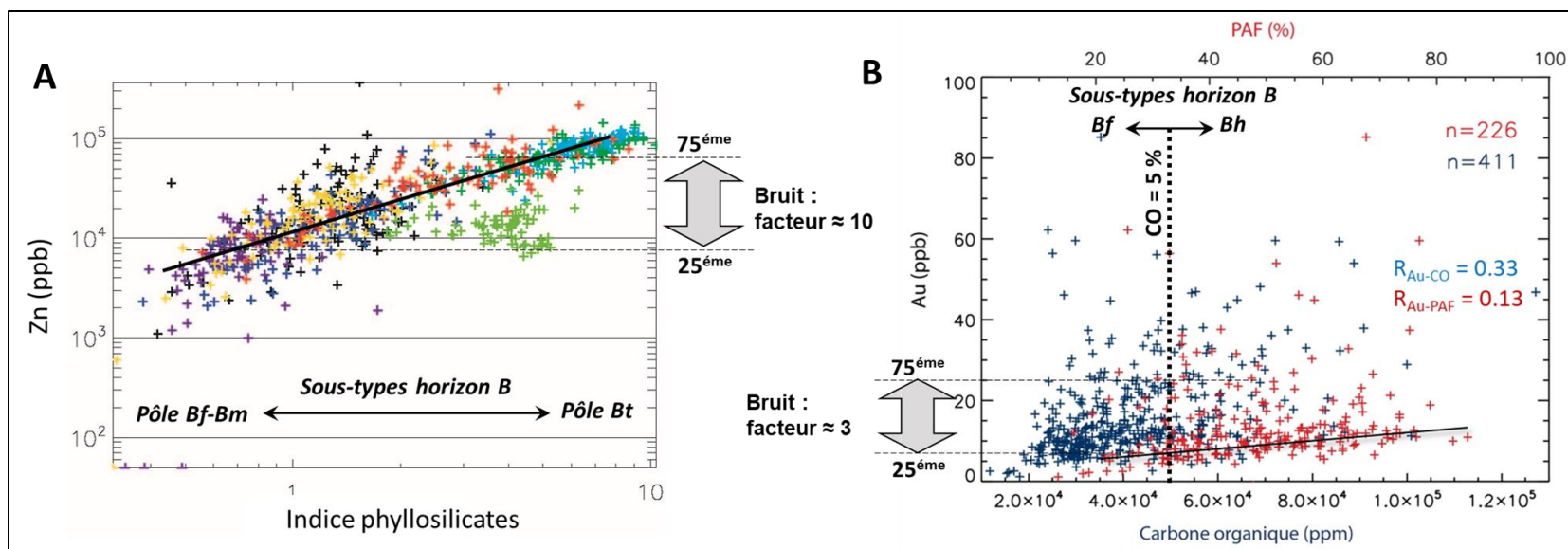


Figure 5 : Influence de la composition fine de l'horizon B sur le fond métallique. Les pôles Bf-Bm, Bt et Bh constituent des sous-catégories de l'horizon B respectivement enrichies en oxydes de Fe-Mn, argiles et matière organique. A) Influence de la composante argileuse sur le contenu Zn (n = 814). Indice phyllosilicates =  $K/K^- + Al/(Al^-) + Mg/(Mg^-)$ . Données OGS dans le secteur de Timmins (Fedikow, 2006), les couleurs indiquent différentes traverses (traverses de 3km avec échantillonnage au 25m, distance entre les traverses de 20 à > 60 km). Tiré de Rafini (2010, 2011). B) Influence de la composante argileuse sur le contenu Au. Le carbone organique indiqué est la fraction extractible au Na-Pyrophosphate (équivalent en % PAF, voir fiches A.1.3. et C.1.3.). Données OGS (MRD061 n = 411, secteur Sudbury ; MRD n = 226). Tiré de Rafini (2012).

L'amplitude du bruit local présenté en figure 6 peut être placée en perspective avec l'amplitude du signal métallogénique, afin de **calculer les ratios signal/bruit des méthodes**. L'amplitude du signal est calculée statistiquement sur deux jeux de données de l'OGS, les MRD061 et MRD015, comprenant la géochimie des trois horizons du sol, humus, B, C, sur des stations de prélèvement distribuées au sein des régions prospectives sises respectivement sur la portion Nord du bassin de Sudbury et dans le secteur de Timmins. Les échantillons sont séparés en sous-groupes statistiques selon leur distance à un corps minéralisé : le groupe « Empreinte métallogénique » correspond aux échantillons localisés à moins de 1 km d'un corps minéralisé (le reste des échantillons constitue le groupe « Background », voir détails dans Rafini, 2012). Les statistiques basiques (médianes) sont établies dans les trois horizons, pour les deux sous-groupes. Ce travail permet de comparer les performances des différents horizons du sol pour l'exploration, ces aspects sont développés dans la **fiche A.1.3. « Données pédologiques pour l'exploration minérale »**.

Pour la discussion qui nous intéresse ici, il permet de quantifier l'amplitude statistique des anomalies prospectives recherchées lors des levés d'exploration, pour une empreinte de dimension kilométrique (rayon d'intégration de 1 km). Celles-ci sont de l'ordre d'un facteur 10 pour les anomalies zincifères dans l'horizon C, un facteur 4 dans l'horizon B, et d'un facteur 2 pour les anomalies aurifères dans l'horizon C (nul dans l'horizon B).

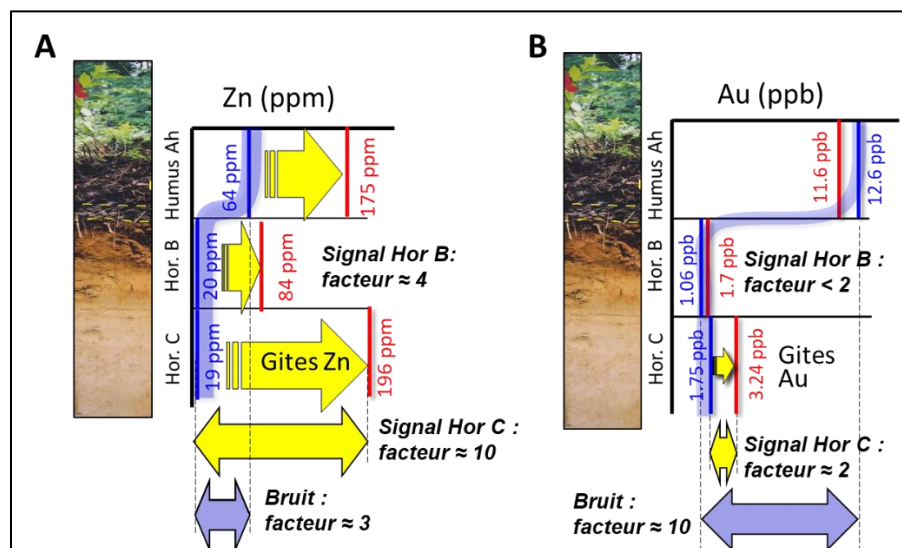


Figure 6 : Profils de niveau de base (en bleu) et anomalique (en rouge) des différents horizons de sols en Zn (A) et Au (B) dans les régions prospectives de Timmins (A) et de Sudbury (B). Les flèches jaunes soulignent l'enrichissement dans le profil anomalique. Données OGS (A : MRD015 : MRD061). Les statistiques sont établies sur A) 696 stations de prélèvement pour le profil de niveau de base, et 110 stations autour de 28 différents corps zincifères pour le profil anomalique ; B) 288 stations de prélèvement pour le profil de niveau de base, et 85 stations autour de 18 différents corps aurifères pour le profil anomalique.

Les exemples analysés dans cette section montrent que **l'amplitude du signal métallogénique dans l'horizon B du sol est toujours très significativement inférieure à l'amplitude du bruit de fond géochimique local**. Par conséquent la détection d'anomalies prospectives (anomalies vraies, figure 1B) nécessite le recours à des méthodes de rehaussement d'anomalie. Bien que ce document ne puisse fournir une liste exhaustive des sources de bruit local, la démonstration est étirable à l'ensemble des méthodes à faible rapport signal/bruit, c.-à-d à toutes les méthodes excepté l'hydrogéochimie souterraine et la minéralogie du till (voir plus haut).

### **Bruit opératoire**

Le bruit opératoire comporte en même temps **l'imprécision sur les protocoles opératoires**, et **l'imprécision sur le milieu échantillonné** qui est en quelque sorte une conséquence de la première. En ce qui concerne les protocoles opératoires, le bruit inséré dans le jeu de données est la conséquence d'un mauvais contrôle sur les modalités de l'échantillonnage (expérience ou encadrement de l'échantillonneur, conditions de terrain, équipements, etc..) et des changements de protocoles d'échantillonnage ou d'analyse entre des levés réalisés année après année. L'imprécision sur le milieu échantillonné est un aspect particulier de l'imprécision des protocoles opératoires puisqu'il s'agit d'une lacune d'uniformisation des usages sur le **contrôle du milieu de prélèvement**. Il y a un certain nombre de décisions de détail à prendre à l'étape même du prélèvement, notamment sur l'identification du matériel échantillonné et la position exacte du prélèvement ; ces décisions traduisent les habitudes de chaque échantillonneur et constituent une source de bruit statistiquement identifiable. Les exemples sont nombreux : 1) pour des levés de sols, le choix de la station de prélèvement exacte selon la géomorphologie, le relief et la végétation locale, l'identification pédologique (type de sol et d'horizon), la position du prélèvement dans l'horizon, la profondeur et l'épaisseur des horizons, etc.; 2) pour des levés de till, le choix de la position exacte de la station d'échantillonnage d'après l'observation du relief, l'analyse visuelle du till et l'identification rigoureuse d'un till sous-glaciaire, etc. ; 3) pour des levés de sédiments de ruisseaux, le choix de la position exacte du prélèvement dans le ruisseau ; 4) pour un levé de sédiments de fond de lac, la présélection des lacs selon leurs caractéristiques morphologiques, le choix de la position exacte de l'échantillon dans le lac, la distance par rapport aux intrants, la modalité d'utilisation de la torpille, etc.

Un exemple de bruit opératoire potentiellement inséré dans un jeu de données de géochimie des sols horizon B à l'étape de l'échantillonnage est illustré sur la figure 6. L'écart de niveaux de base entre l'horizon organique et l'horizon pour Zn et Au est respectivement d'un facteur 3 et 10. Ceci reflète l'affinité de Au avec la matière organique mentionnée plus haut. En contrepartie, le signal recherché (horizon B) a une amplitude d'un facteur 10 et < 2, respectivement. Un mauvais contrôle sur la nature précise de l'horizon échantillonné, entre le pôle humus et le pôle horizon B, sera donc critique pour un levé aurifère, moins critique dans le cas d'un levé zincifère.

## REHAUSSEMENT ET DETECTION D'ANOMALIES PROSPECTIVES

Deux approches de rehaussement statistique des anomalies prospectives sont présentées : le rehaussement des anomalies spatialement corrélées et le rehaussement nivellement du bruit de fond géochimique.

### Rehaussement des anomalies spatialement corrélées

Le rehaussement des anomalies spatialement corrélées est un traitement mono-élémentaire purement géostatistique **basée sur la proximité spatiale des anomalies causées par une source métallifère** dans l'environnement. Cette approche vise donc à détecter les anomalies prospectives multiéchantillon, par la proximité de plusieurs valeurs élevées, et à **supprimer les valeurs élevées isolées**, attribuées au bruit. Il va de soi que le rapport entre la maille d'échantillonnage et la taille des empreintes recherchées est un important facteur déterminant d'efficacité de cette méthode, qui fonctionnera donc mieux sur des levés à mailles rapprochées. Utilisée à l'échelle régionale, sur des levés à maille écartée, cette méthode supprimera les anomalies causées par des corps métallifères ponctuels, puisque ceux-ci auront potentiellement un halo secondaire de dimension inférieure à la maille d'échantillonnage. Un outil standard de rehaussement géostatistique des anomalies est la **statistique U** (disponible dans LithoModelleur). Un exemple de rehaussement par statistique U est présenté à la figure 7, dans le secteur de la Mine aurifère Éléonore (gîte Roberto, Baie-James, Québec). On remarque que le signal aurifère des concentrés de minéraux lourds présente un bruit visible à travers de nombreuses valeurs élevées isolées. Ce bruit est supprimé par le traitement et la trainée aurifère en aval glaciaire de la mine Roberto est remarquablement rehaussée.

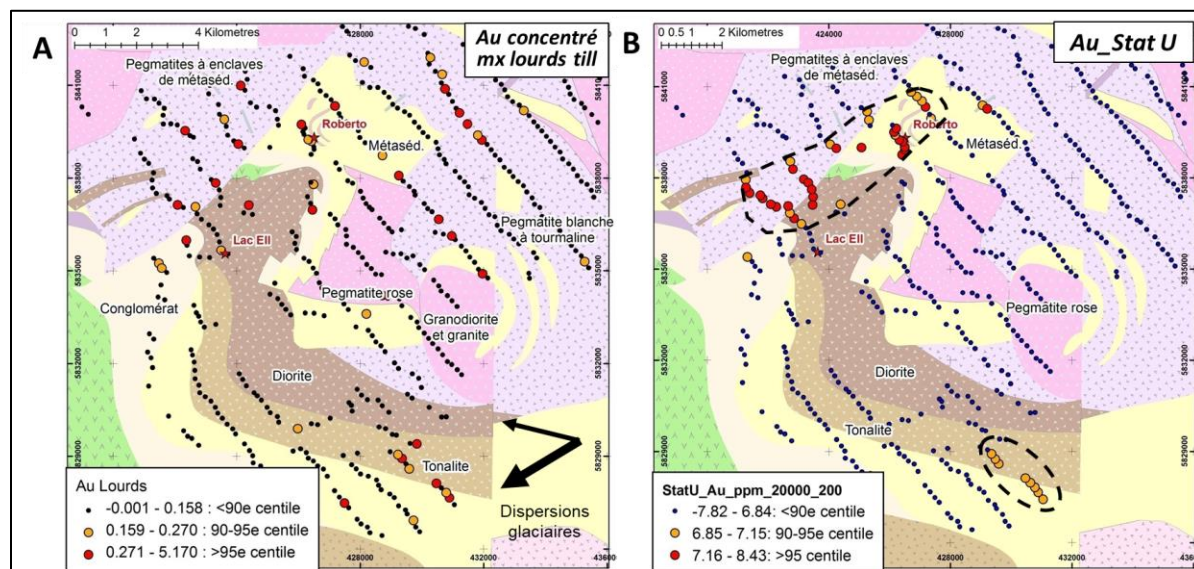


Figure 7 : Rehaussement d'anomalies aurifères par statistique U dans le secteur de la mine Éléonore, Baie-James (Trépanier, 2012). A) données brutes, B) données rehaussées. Le gîte Roberto est le gîte principal de la mine Éléonore.

### **Méthode de calcul de la statistique U**

La méthode de la statistique U (Cheng et al, 1996; Cheng, 1999) retourne au principe de séparation des échantillons provenant d'une population anormale de ceux provenant d'une population formant le signal régional qui est traditionnellement utilisée par les méthodes classiques de discrimination des anomalies géochimiques. Supposons encore une fois qu'on doive séparer ces deux populations dont les valeurs, dans de nombreux cas, se superposent. On émet l'hypothèse que les échantillons formant la population anormale seront regroupés dans l'espace, alors que les échantillons ayant des valeurs élevées appartenant à la population régionale moyenne seront disposés aléatoirement dans la région. On utilise ainsi la distribution spatiale des valeurs pour séparer les deux populations.

Supposons un voisinage de taille fixe centré sur l'échantillon pour lequel on veut évaluer la statistique U. On peut calculer la moyenne des valeurs dans ce voisinage. **Si la valeur obtenue par l'analyse de cet échantillon est supérieure à la valeur moyenne du voisinage, cet échantillon fait potentiellement partie de la population anormale.** Pour déterminer véritablement son appartenance à la population des anomalies, une série de zones tampons circulaires de rayons croissants, centrés sur l'échantillon, sont construites. À chaque rayon, la statistique suivante est calculée (Cheng, 1999) :

$$U(r) = \sqrt{n} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i(r) - \mu \right]$$

où "n" représente le nombre d'échantillons inclus dans une zone circulaire de rayon r,  $\mu$  la moyenne du voisinage et  $c_i(r)$  est la valeur du  $n^{\text{ième}}$  échantillon inclus dans la zone. À partir de  $r = 0$  et en considérant des rayons circulaires de taille croissante, on constate que la valeur de U augmente progressivement en englobant des échantillons successifs dont la valeur est supérieure à la moyenne locale. Lorsque l'on commence à englober des échantillons dont la teneur est plus faible que la moyenne locale, la valeur de U commence à diminuer.

La valeur maximale de U est calculée à partir de tous les rayons utilisés. On peut représenter le choix du rayon par la formule suivante (Cheng, 1999) :

$$|U(r_0)| = \max_{0 \leq r \leq r_{\max}} |U(r)|$$

Le rayon  $r_0$  est le rayon maximum qui ne contient que des échantillons anormaux, du même type que l'échantillon du centre. **La statistique U optimale  $U(r_0)$  est conservée ainsi que le rayon  $r_0$ .** On peut raffiner l'opération en optant pour des ellipses de taille, direction et aplatissement différents plutôt que des zones circulaires (voir Trepanier, 2006, ou l'aide du logiciel LithoModeleur).



### ***Influence de la taille du voisinage sur le résultat***

La taille du voisinage choisie a un effet très important sur les résultats. En effet, la taille du voisinage détermine à la fois le nombre d'échantillons sur lesquels la moyenne locale est calculée et également le rayon maximal d'une anomalie. L'expérimentation avec différents rayons révèle que la taille du voisinage détermine la taille des regroupements de valeurs élevées qui seront rehaussés. Par exemple, on constate qu'un voisinage de 20 km met en lumière des anomalies de plus petite taille qui ne sont pas visibles à des voisinages plus grands. Inversement, les anomalies plus larges disparaissent avec des voisinages plus petits.

### ***Influence de la densité d'échantillons sur le résultat***

Un retour sur la formule de calcul de la statistique U permet de constater que la valeur sera plus élevée si on a une densité d'échantillons plus élevée. Pour éviter ce problème, on peut diviser la valeur obtenue par la densité d'échantillons calculée sur une fenêtre de taille similaire au voisinage utilisé.

### **Nivellement du bruit de fond par classification des échantillons**

Une approche statistique pour le nivellement du bruit local consiste à diminuer l'hétérogénéité du jeu de données en regroupant les échantillons de même type, c.a.d. ayant un niveau de base relativement homogène. Si l'opération est efficace, c.a.d. si elle homogénéise efficacement le fond géochimique et que le bruit est significativement diminué, alors le rapport signal/bruit est augmenté de sorte que les échantillons anomaux puissent être détectés au sein de chaque classe par l'application de seuils d'anomalies standards : 95<sup>e</sup> ou 99<sup>e</sup> centiles, ou bien la valeur du 3<sup>e</sup> quartile + X fois l'écart interquartile ( $X = 1.5$  ou  $3$ ), tel que discuté plus haut dans la section sur les méthodes à rapport signal/bruit élevé. L'efficacité de cette approche est intimement liée à l'efficacité du nivellement par classification, et donc aux paramètres utilisés pour la classification. Il est donc nécessaire au préalable que la source de bruit ciblée soit connue et caractérisée, et que les paramètres de classification utilisés soient identifiés comme étant des marqueurs efficaces de ce bruit.

Un exemple de cette approche est illustré dans la **fiche C.1.1. « Interprétation des levés de sédiments de fond de lac et détection d'anomalies »** : pour les sédiments de fond de lac, la classification consiste à regrouper les échantillons selon le type de sédiment, organique ou détritique avec plusieurs déclinaisons. Elle est efficace dans la mesure où il a été démontré par Gigoux (2020) que ce facteur gouverne de manière significative le fond géochimique. Il s'agit toutefois d'une **correction partielle** du bruit de fond puisque cette approche ne cible qu'un facteur de variation précis du niveau de base, qui englobe en général plusieurs facteurs indépendants, réé régionalisés et non-régionalisés.



**Nivellement du bruit de fond par prédiction du niveau de base**

**Principe**

Une approche universelle pour la correction des variations du niveau de base est de comparer la valeur mesurée à une valeur prédite du niveau de base que l'on devrait normalement avoir dans l'échantillon. Dans cette approche, la valeur prédite est calcul/ée d'après un ou plusieurs marqueurs géochimiques connus du niveau de base. La correction consiste donc à rapporter la valeur mesurée à une valeur calculée normale prédite dans l'échantillon, et enfin à considérer l'écart entre ces deux valeurs (ou le ratio si l'opération est réalisée sur les valeurs logarithmiques). Cet écart est appelé **valeur résiduelle**, il s'agit donc de la **quantité excédant le niveau de base dans l'échantillon**. Ce signal est intrinséquement le signal des anomalies métallogéniques puisque le niveau de base a été défini comme résultant de l'ensemble des processus sans lien avec des processus métallogéniques.

L'opération décrite ici est illustrée par la figure 8. L'Équation 1 est la relation universelle de normalisation des variations de niveau de base, basée sur la connaissance d'une corrélation entre la variable d'intérêt (contenu métallique ou indice prospectif) et une variable gouvernant marqueur du niveau de base. L'exemple donnée en figure 8 correspond au cas le plus fréquent où la corrélation est linéaire sur un diagramme logarithmique. Notons toutefois que dans de nombreux cas l'équation 1 est réduite à un simple ratio,  $Y_r = Y/X$ , en première approximation et en l'absence d'une bonne connaissance quantitative de l'influence de la variable de correction  $X$  sur la variable d'intérêt  $Y$ , c'est-à-dire sans pouvoir caractériser rigoureusement les paramètres  $Y_0$  et  $K$ .

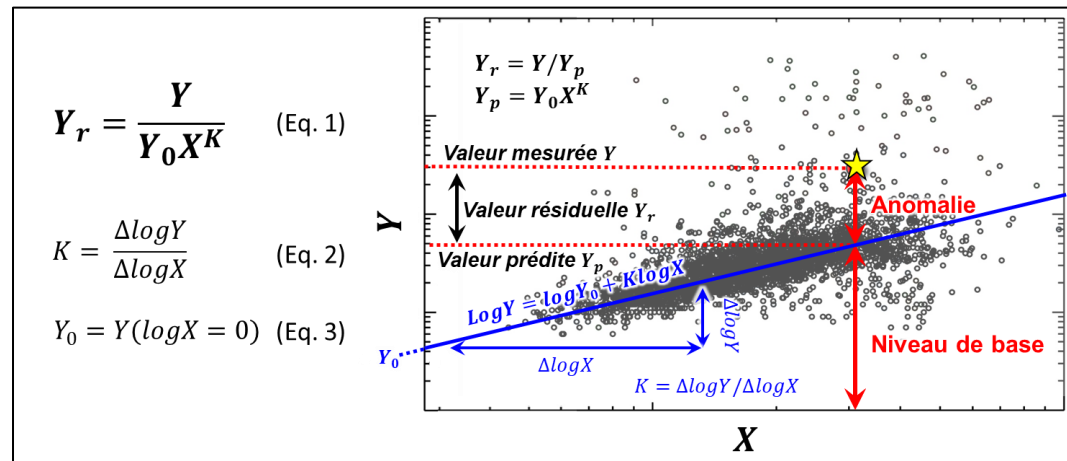


Figure 8 : Y est le marqueur métallogénique (métal seul ou indice prospectif), X du marqueur de niveau de base (indice mono- ou multi-élément).

La variable de correction  $X$  (figure 8) peut-être un indice mono- ou mutli-élément. Elle peut être définie par une approche **déterministe** ou par une approche **statistique**, c'est-à-dire par la correction d'un facteur d'influence physique caractérisé, ou au contraire d'un ou plusieurs facteurs d'influence quantifiés uniquement sur des bases statistiques, mais non-caractérisés physiquement. L'approche statistique intègre plusieurs facteurs d'influences et permet donc une correction plus complète et performante du bruit de fond que l'approche déterministe, qui ne cible qu'un facteur d'influence unique. Cependant l'approche statistique résulte d'une caractérisation statistique du bruit de fond par un traitement multivarié de bases de données régionales (voir plus bas) ; elle nécessite donc d'avoir accès à de telles bases de données.

**Nivellement déterministe du bruit de fond**

Un premier exemple d'identification **déterministe** d'une variable de correction reprend la relation illustrée dans la figure 5A entre le niveau de base Zn et la fraction argileuse dans l'horizon B d'un sol. Ici, la variable de correction  $X$  est un indice multi-élément, il s'agit d'un indice de phyllosilicates (somme réduite des majeurs K, Al, Mg), et son influence sur la variable d'intérêt  $Y$  est quantitativement contrainte (Figure 9). Les valeurs des paramètres  $Y_0$  et  $K$  de la régression sont obtenues par l'application des équations 1, 2, et 3 (figure 9), sur la régression entre Zn et l'indice de phyllosilicates. L'équation de nivellement de Zn est donc la formule de  $Zn_r$  indiquée sur la figure.

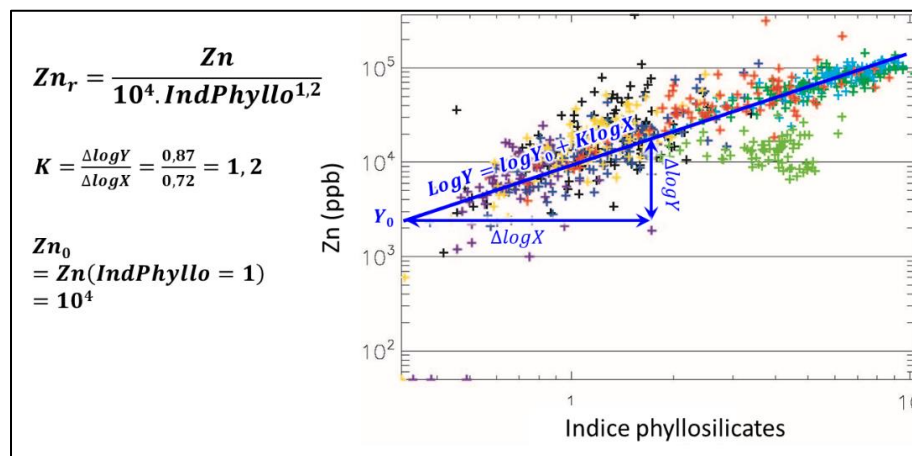


Figure 9 : Détail du calcul des paramètres de régression du niveau de base Zn sur la fraction argileuse de l'horizon B. Voir Figure 5A pour informations sur les données.

Un deuxième exemple de régression par un indice déterministe est le normalisation des données géochimiques de la fraction fine des tills par le contenu en aluminium de l'échantillon. Le degré d'abrasion du till exerce un contrôle de premier ordre sur le niveau de base métallique (Figure 4), et Al est identifiée comme étant un marqueur efficace du degré d'abrasion (fraction argileuse, voir **fiche C.1.2. « Interprétation des levés de till et détection d'anomalies »**).

Dans ce cas, les paramètres de la relation quantitative entre Al et le contenu métallique n'ont pas encore été formellement quantifiés et notre connaissance de cette influence demeure qualitative. La régression est donc réduite à une forme simple  $X_{Métal}/Al$ . L'efficacité de cette normalisation pour le rehaussement des anomalies prospectives en métaux de base a été validée statistiquement sur des levés régionaux (Trepanier, 2011, 2012 ; fiche C.1.2.).

### **Nivellement statistique du bruit de fond**

Ce nivellement implique une analyse statistique des différentes composantes du bruit de fond, autrement dit une « dissection » du bruit, par des outils de traitement multivarié. L'approche consiste à investiguer la variabilité du jeu de données de référence, cette variabilité est considérée comme étant le bruit de fond, ce qui revient à faire le postulat selon lequel le signal métallogénique que l'on cherche à rehausser est un signal marginal, statistiquement anomal, dans le jeu de données. Ceci est vrai pour des levés régionaux ou sur des projets « grass root », mais potentiellement moins vrai sur des levés de propriétés avancées contenant des minéralisations connues (on préférera dans ce cas utiliser une approche de correction déterministe).

L'analyse du bruit de fond par traitement statistique multivarié consiste en la caractérisation quantitative des facteurs indépendants gouvernant la variabilité du jeu de données. L'outil universel pour cette opération est l'**analyse en composantes principales** (ACP). Cet algorithme est une transformation de la matrice de corrélation (ou covariance) visant à en déterminer les valeurs propres, qui sont les composantes principales du jeu de données. L'application de cette méthode permettra donc de réduire la variabilité totale des données géochimiques à un petit nombre de variables peu dépendantes gouvernant le bruit de fond. Ces variables ont une signification physique qui peut être explorée par la recherche de corrélations avec diverses variables de terrain, toutefois cela ne constitue pas une étape nécessaire au processus de rehaussement statistique. Un exemple d'analyse du bruit de fond par cette approche est disponible dans Trépanier (2006) pour les sédiments de fond de lac à l'échelle de la Province de Québec.

Une fois réalisée cette **exploration statistique du bruit de fond**, le niveau de base des contenus métalliques peut être calculé en chaque point, c.a.d. dans chaque échantillon, à partir d'une régression multiple des  $n$  premières composantes principales (en général,  $n < 5$  est suffisant). On obtient une relation linéaire multiple du niveau de base, de la forme :  $Métal_{prédit} = C1.CP1 + C2.CP2 + C3.CP3 + C4.CP4$ , où  $CP1$  à  $CP4$  sont les valeurs des composantes principales calculés par l'ACP, et  $C1$  à  $C4$  sont les coefficients déterminés par la régression multiple. Ce niveau de base métallique est donc la valeur prédite, ce qui permet de calculer **la valeur résiduelle** par le simple ratio entre la valeur mesurée et la valeur prédite. Ces valeurs résiduelles contiennent les anomalies prospectives rehaussées. Cette méthodologie de rehaussement d'anomalie est publiée dans Bonham-Carter et Grunsky (2018) sous le nom « Résiduelle de Composante Principale » (*Principal Component Residuals*).

Dans certains cas, ce traitement est effectué sur une BD de référence autre que le levé d'intérêt, les résultats doivent donc être exportés sur le jeu de données du levé puisque celui-ci ne contient pas les valeurs des composantes principales en chaque point. Cette exportation peut se faire par l'entremise de variables de **substitution** permettant de d'exprimer les composantes principales à travers des variables géochimiques explicatives. Les variables explicatives sont une sélection **d'éléments géochimiques ayant une forte corrélation avec les composantes principale** du bruit de fond que l'on cherche à modéliser, mais n'ayant **pas de corrélation avec le signal métallogénique** que l'on cherche à rehausser. Par exemple, l'étude de Trépanier (2006) mentionnée ci-dessus a montré que les éléments suivants sont des marqueurs efficaces du bruit de fond métallique des sédiments de fond de lac à l'échelle de la Province : Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Mg, K, V, La. Ces variables sont sélectionnées du fait qu'elles sont fortement corrélées ou anti-corrélées aux premières composantes de l'ACP réalisée à l'échelle provinciale, et en particulier à la lithologie du socle (bruit de fond régionalisé, voir plus haut) et à la composition organique/détritique du sédiments (facteurs limnologiques, bruit de fond non-régionalisé, voir plus haut).

Alternativement, les variables géochimiques explicatives peuvent être déterminées par régression multiple des composantes principale, ce qui est plus poussé et plus rigoureux que la simple sélection d'après leurs coefficients de corrélations avec les composantes. Enfin, une fois que les éléments géochimiques explicatifs du bruit de fond sont sélectionnés, la relation de prédiction des niveaux de base métalliques en fonction de ces variables peut être calculée par une régression multiple. On obtient une relation de la forme (en reprenant les éléments explicatifs mentionnés ci-dessous) :  $Métal_{prédit} = C1.Al + C2.Ti + C3.Cr + C4.Mn + C5.Fe + C6.Mg + C7.K + C8.V + C9.La$  . Cette equation permet de calculer les niveaux de base métalliques pour chaque échantillon et donc de calculer les valeurs résiduelles.

Plusieurs exemples de ce traitement sont disponibles dans les travaux du CONSOREM, parmi lesquels le rehaussement des données de sédiments de fond de lac par régression spatiale (Trépanier, 2005 ; projet CONSOREM 2004-09 ; Rafini, 2012 ; projet CONSOREM 2012-02), et le rehaussement des données de biogéochimie par régression non-spatiale (Gigoux et Trépanier, 2023 ; projet CONSOREM 2022-03). En effet, deux utilisation distinctes de l'approche statistique sont envisageable : **spatiale** et **non-spatiale**. Dans le premier cas, le traitement multivarié du bruit de fond est appliqué sur une population de référence locale, au sein d'un certain rayon d'intégration autour du point d'intérêt. Les données de référence sont donc différentes pour chaque point d'intérêt. Dans le deuxième cas, le traitement est appliqué sur une base de référence régionale fixe.

La figure 10 présente le résultat de l'application du nivellement statistique du bruit de fond par régression spatiale, sur le levé de sédiments de fond de lac de la Péninsule d'Ungava, au Québec. Cet exemple reprend l'exemple de contrôle régional de la profondeur des échantillons sur le niveau de base cuprifère présenté sur la figure 2. Après rehaussement, cette relation est totalement corrigée, tel que montré par l'absence de corrélation entre Cu résiduel et la profondeur (Figure 10B). La carte de Cu résiduelle présente un aspect « en pointe de pizza » avec un faible bruit de fond homogène et quelques zones de valeurs élevées, signe que les bruits régionalisés et non-régionalisés ont été efficacement corrigés. Les zones de valeurs élevées sont donc des anomalies rehaussées très prospectives. Elles se corrèlent par ailleurs très bien avec les quelques occurrences métallogéniques de la région (Rafini, 2013).

La méthode de nivellement statistique du bruit de fond par régression spatiale est **accessible dans LITHOMODELEUR**, la manipulation est décrite en détail dans l'**annexe 2 « Rehaussement d'anomalies de sédiments de fond de lac par régression spatiale »**. Bien que cet annexe décrive une application aux sédiments de fond de lac, l'approche est utilisable dans d'autres méthode de l'environnement secondaire si tant est que les variables explicatives utilisées pour modélisation du niveau de base soient adéquatement sélectionnées d'après l'ACP sur une BD régionale, tel qu'expliqué dans le présent chapitre.

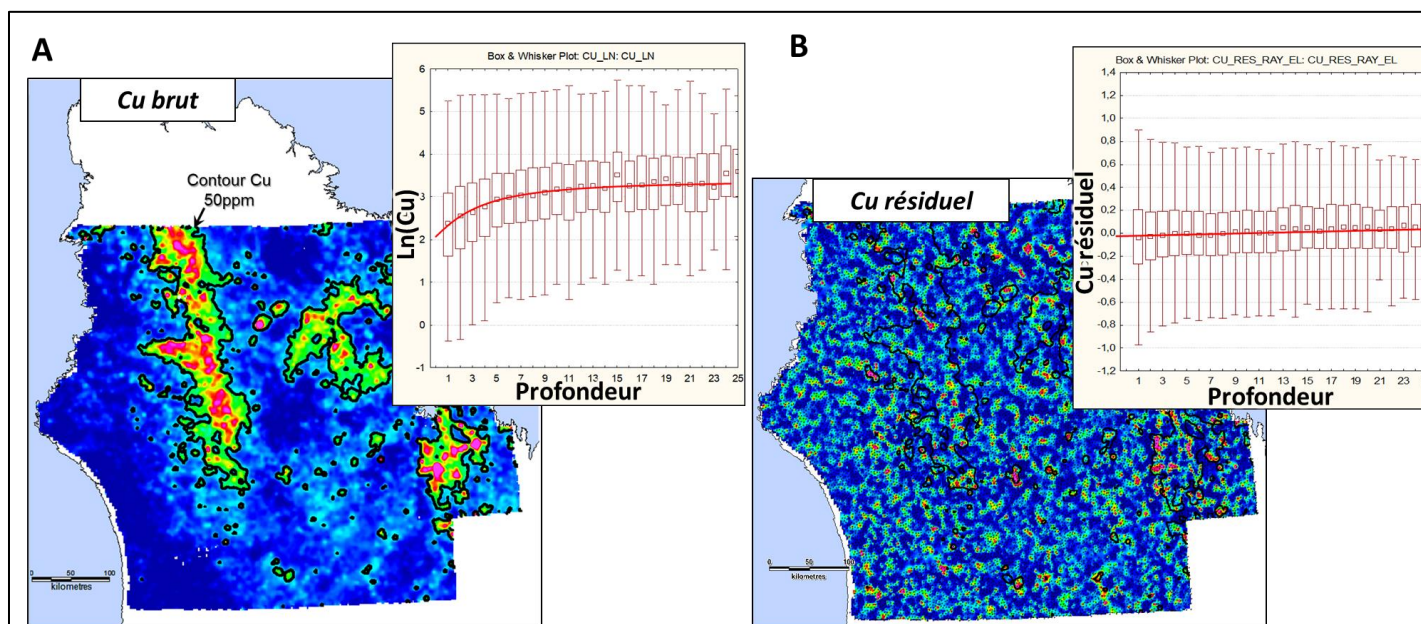


Figure 10 : Exemple d'application du nivellement statistique du bruit de fond par régression spatiale – Cu dans les sédiments de fond de lac dans la Péninsule d'Ungava, Québec. A) avant traitement, B) après traitement. Modifié de Trépanier (2006) et de Rafini (2013).

---

## RÉFÉRENCES

- Bonham-Carter, G.-F et Grunsky, E.-C., 2018, Two ideas for analysis of multivariate geochemical survey data: proximity regression and principal component residuals. *In Handbook of Mathematical Geosciences*, B.S. Daya Sagar, Qiuming Cheng, Frits Agterberg., Fifty years of IAMG, p911.
- Cheng, Q., 1999, Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 65: 175-194.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P. et Bonham-Carter, G.F., 1996, A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 56: 183-195.
- 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.
- Gigoux, M, 2020, Couplage des levés régionaux de sédiments de fonds de lac et de till: nouvelles approches de classification et de traitement, Projet CONSOREM 2020-05
- Gigoux, M., Trépanier, S., 2023, Évaluation de l'efficacité de la méthode biogéochimique d'échantillonnage d'écorce d'épinette en exploration. Livraison sous format PPT 2022-03.
- Lavoie, J., et Trépanier, S. 2023, Traitement statistique par régression spatiale des sédiments de fond de lac, Eeyou Istchee Baie-James, Forum CONSOREM-UQAM, 14 février 2023, UQAM, Montréal.
- Rafini, S., 2010, Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI : Synthèse, études de cas, perspectives, Projet Consorem 2012-07, 49p.
- Rafini, S., 2015, Évaluation de l'efficacité des différentes techniques de géochimie de l'environnement secondaire. 2012-04, 36p.
- Trépanier, S. 2006, Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport Consorem 2005-03, p82.
- Trépanier, S., 2011, Optimisation des données de Till – phase 1, projet Consorem 2010-05.
- Trépanier, S., 2012, Optimisation des données de Till – phase 2, projet Consorem 2011-05.



## FICHE C.1.2 – INTERPRÉTATION DES LEVÉS DE TILL ET DÉTECTION DES ANOMALIES



### OBJECTIF DE CETTE FICHE

Cette fiche explique différents paramètres qui doivent être considérés lors de l'interprétation des données de till et la détection des anomalies dans une méthode. Les paramètres considérés sont le caractère local vs. exotique des tills, la stratigraphie quaternaire et les variations du bruit des indicateurs / éléments dans le till selon la méthode.

---

### PRÉSENTATION GÉNÉRALE

La plupart des levés de till réalisés en exploration minérale visent à évaluer le potentiel du socle local à contenir des minéralisations d'intérêt. Pour ce faire, on doit supposer que le till échantillonné à un endroit précis contient une proportion significative de **matériel d'origine locale, qui peut ainsi inclure des indicateurs d'une minéralisation locale**. Par opposition au matériel d'origine locale, on qualifiera le matériel qui a été transporté sur de longues distance comme étant du **matériel « exotique »**. Ce matériel exotique ne représente pas le contenu du socle local et n'est pas susceptible de contenir des indications de la minéralisations locale non plus. Dans le cas du till supra-glaciaire (transporté au-dessus de la glace), la très grande majorité voire l'entièreté du matériel est typiquement d'origine exotique ; c'est pourquoi le till supra-glaciaire doit normalement être évité pour l'exploration à l'échelle locale. Le till sous-glaciaire, transporté à la base de la glace, est beaucoup plus susceptible de contenir du matériel d'origine locale. Or, ce n'est pas toujours le cas, et le till sous-glaciaire peut également être essentiellement formé de matériel exotique. Il existe des approches pour identifier le caractère local vs. exotique du till, qui seront présentées dans cette fiche.

Cette fiche fait référence à de nombreuses reprises au concept de **méthode**. On entend ici par méthode une combinaison d'un traitement physique du till et d'un type d'analyse. Par exemple, l'or analysé dans la fraction fine du till est une méthode distincte du compte du nombre de grains d'or d'origine délicate dans un concentré de minéraux lourds ; l'or analysé dans le concentré est une troisième méthode distincte.

D'autre part, l'interprétation de la localisation d'une source possible d'une anomalie d'une méthode, détectée dans le till, dépend de 1) la direction de transport, qui est fonction de la dynamique glaciaire d'un secteur (directions et stratigraphie) et 2) de la distance de transport qui dépend de la méthode utilisée et des caractéristiques de la source (par exemple la taille, la direction et la concentration). Les paramètres qui influencent la direction et la distance de la source et l'influence sur les interprétations des anomalies seront discutés.

## IDENTIFICATION DU CARACTÈRE LOCAL VS. EXOTIQUE DU TILL

L'identification du caractère local vs exotique du till échantillonné lors d'un levé est un paramètre important à considérer lors de l'interprétation des levés de till réalisés pour l'exploration à une échelle locale. Si un till échantillonné est d'origine essentiellement exotique, alors ce till n'a pas ou peu de fragments d'origine locale et **ne représente pas le potentiel minéral du secteur local. Ceci est très important pour l'interprétation des levés, car cela signifie également que l'absence d'anomalies dans un till déterminé exotique ne donne aucune indication du potentiel local et ne permet donc pas de dire qu'un secteur est sans potentiel.** Ceci est particulièrement important dans le cas de séquences de till épaisses (>5m).

Le meilleur exemple de l'importance de caractériser la nature locale vs exotique du till est un levé d'orientation effectué dans le secteur de la mine Pamour #5 à Timmins (McClenaghan, 1999; figure 1). Ce levé consiste en une section (14 éch.) d'échantillonnage d'une colonne de till épaisse (20m) situé à quelques dizaines de mètres en aval glaciaire de la zone aurifère minéralisée, qui affleure en sub-surface sous le till. Les résultats de l'extraction des grains d'or de 6 de ces échantillons sur la section sont montrés sur la figure 2. Les résultats montrent que le sommet de la section de till jusqu'à 8 mètres de profondeur n'est pas anomal en grains d'or ; les comptes de grains y correspondent au bruit de fond régional du till dans le secteur. L'échantillon situé à 11 mètres dans la section est modérément anomal, et les deux échantillons à la base sont fortement anomaux en grains d'or. **Un levé de till qui aurait été réalisé en surface à cet endroit n'aurait aucune anomalie et on aurait pu alors faussement conclure que le secteur est sans potentiel. Pourtant, la section est située à quelques dizaines de mètres seulement de la mine d'or.** L'absence d'anomalies dans la moitié supérieure de la section est due au fait que le till supérieur ne contient que peu ou pas de matériel d'origine locale (i.e. de la mine). Comment aurait-on pu déterminer que le till n'est pas d'origine locale?

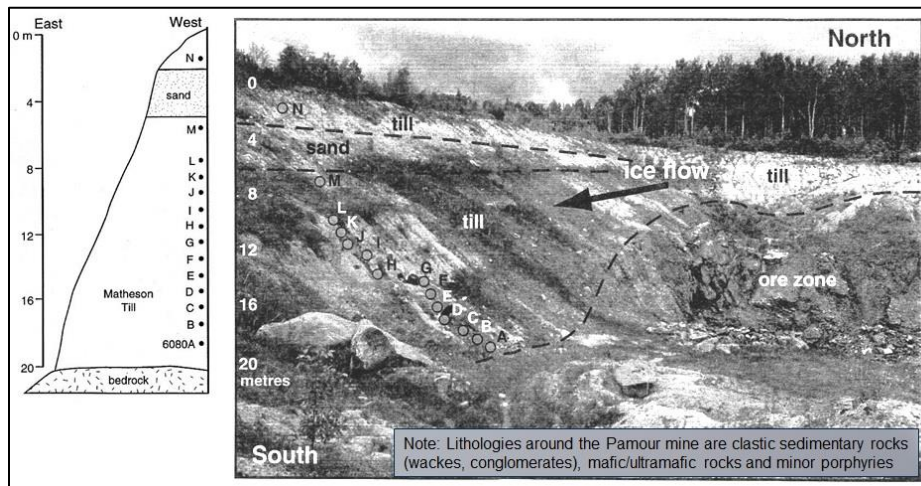


Figure 1 : Section d'échantillonnage de till réalisé à quelques dizaines de mètres en aval glaciaire de la mine Pamour #5 en Ontario (Photo et figure de McClenaghan 1999).

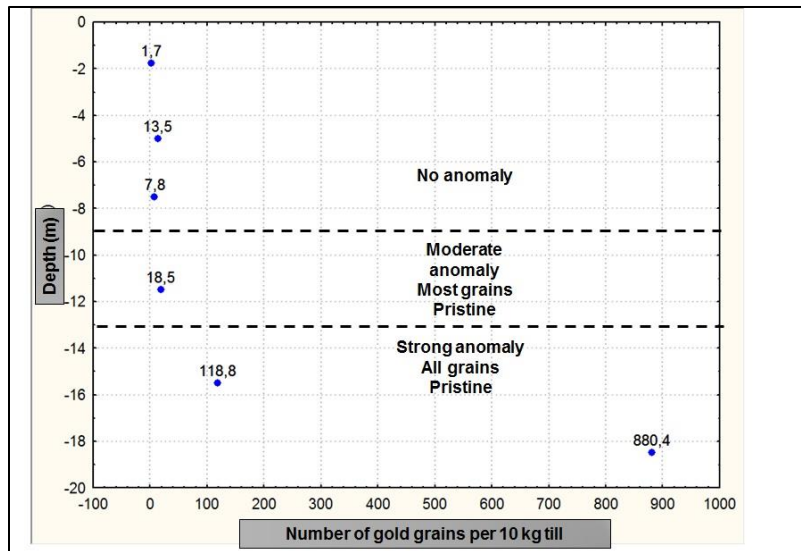


Figure 2. Nombre de grains d'or total dans des tills de 15 kg de la section de la mine Pamour #5 (section de la figure 1) en fonction de la profondeur dans la section. Source des données : Dossier public 3675, Commission Géologique du Canada.

La meilleure façon de déterminer l'origine locale vs exotique du till est d'examiner sa composition vs ce qui est attendu pour un till qui serait d'origine locale. La composition des cailloux du till est le meilleur indicateur. Dans certains cas, la géochimie de la matrice du till peut également être utile.

La figure 3 montre les proportions de cailloux de différentes lithologies dans la section de till de la mine Pamour. La géologie du socle dans le secteur de la mine Pamour est dominée par des roches métasédimentaires et contient également des roches métavolcaniques; il n'y a pas de roches intrusives felsiques en amont glaciaire (sur au moins 15 km). Or, quand on regarde la composition des cailloux du till de la section, on constate que les tills de la partie supérieure de la section sont dominés par des cailloux d'intrusions felsiques (>45%). Les proportions de roches métasédimentaires et métavolcaniques sont faibles et d'environ 10-15% chacune. Donc les tills situés dans la partie supérieure de la section contiennent essentiellement du matériel d'origine lointaine / exotique et une faible proportion de matériel d'origine locale. Ceci explique l'absence d'anomalies en or dans la partie supérieure de la section. A l'inverse, les tills situés à la base de la section sont dominés par des clastes de roches métasédimentaires, ainsi que d'une proportion croissante de cailloux de veines de quartz. Ces tills de la base ont donc incorporé beaucoup de matériel du socle métasédimentaire local et sont fortement anomaux en or.

On aurait donc pu prévoir la nature exotique du till prélevé dans la partie supérieure de la section et que ce till ne représente pas la nature locale du socle en examinant la composition des cailloux du till vs la composition locale du socle.

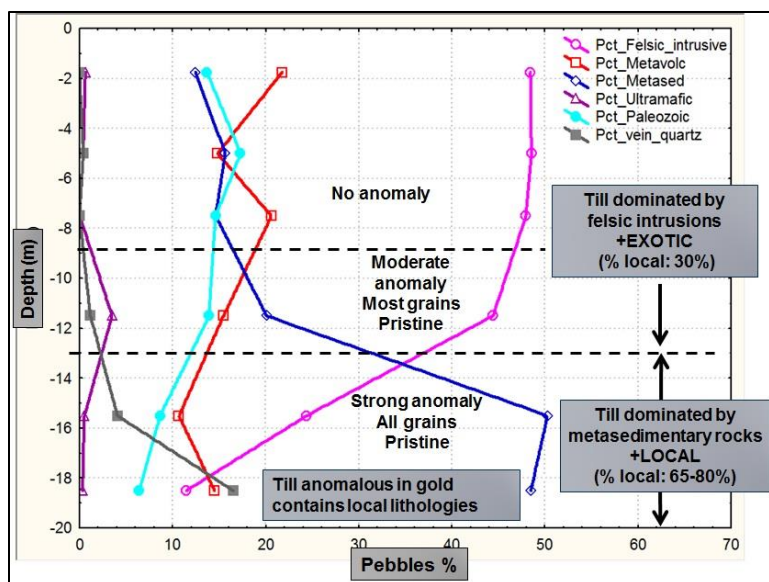


Figure 3 : Proportion de cailloux de différentes lithologies des tills de la section de la mine Pamour #5 (section de la figure 1) en fonction de la profondeur dans la section. Source des données : Dossier public 3675, Commission Géologique du Canada.

Dans certains secteurs, la composition de la matrice du till peut également fournir de l'information sur le caractère local ou exotique du till. En Abitibi, plusieurs tills comprennent des proportions variables de matériel provenant des roches carbonatées paléozoïques des Basses-Terres de la Baie-James. Dans certains tills de l'Abitibi, (comme le till de Cochrane par exemple), les roches carbonatées peuvent être dominantes ; des tills de l'Abitibi contenant une grande proportion de carbonates paléozoïques sont évidents d'origine amplement exotiques et sont peu susceptibles de représenter le socle local. En Abitibi, on peut utiliser alors la composition de la matrice du till pour identifier ceux qui contiennent une large proportion de ces roches, car ces roches sont très riches en calcium (Ca).

Dans le secteur de la ceinture de roches vertes de Manitouwadge en Ontario, par exemple, une teneur en calcium (%) par ICP aqua-regia supérieure à 8% identifie de façon claire les tills contenant plus de 70% de cailloux des Basses-Terres de la Baie James et de la Baie-d'Hudson (Trépanier, 2011).

Pour effectuer une interprétation complète d'un levé de till, l'information sur la nature des cailloux est donc une information importante. Lors de l'échantillonnage, il est recommandé de faire un inventaire qualitatif rapide de la nature des cailloux lors de la prise de notes sur le terrain (voir la FICHE B.2.1. Protocoles échantillonnage du till). Certains laboratoires (tel que ODM) font également un compte sommaire des cailloux (normalement en 3 catégories simples) qui peut également être utile selon le contexte géologique local. La caractérisation détaillée et quantitative des proportions de cailloux peut être faite par les géologues après le levé à partir des fractions grossières extraites lors du traitement et demeure la méthode la plus rigoureuse quoique la plus fastidieuse. Les échantillons de till qui montrent des lithologies très différentes du socle local dans les cailloux sont probablement exotiques et ne représentent alors pas le potentiel du socle local.

---

## DÉTECTION DES ANOMALIES DANS LES TILLS

A partir d'une source minéralisée, les valeurs/teneurs d'une méthode donnée dans le till diminuent de façon exponentielle (fonction exponentielle négative) en s'éloignant de cette source. On désigne ici les valeurs/anomalies de la méthode près d'une minéralisation comme étant le **signal** recherché. D'autre part, les valeurs/teneurs de chaque méthode montrent une certaine variabilité loin des sources minéralisées, qu'on appelle le **bruit de fond**. **En s'éloignant d'une source minéralisée, les valeurs/teneurs d'une méthode diminuent pour éventuellement se confondre avec le bruit de fond de la méthode, distance à laquelle on ne peut plus identifier d'anomalie. On parle du rapport signal/bruit d'une méthode pour désigner l'ampleur des anomalies par rapport au bruit de fond. Le bruit de fond varie grandement selon les méthodes.** Plus une méthode a un ratio signal/bruit élevé, plus il est facile de détecter des anomalies reliées aux minéralisations par rapport au bruit de fond. A l'inverse, il sera plus difficile de détecter des anomalies pour les méthodes ayant un ratio signal/bruit bas (i.e. bruit élevé par rapport au signal recherché).

Les deux paramètres contrôlant le bruit de fond d'une méthode dans le till dans une certaine région sont : 1) la variabilité de l'élément/indicateur dans le socle rocheux d'une région; 2) les phénomènes mécaniques ou chimiques qui se sont produit durant le transport et la météorisation du till lui-même.

Le ratio signal / bruit de chaque méthode dans le till conditionne la méthode de traitement qui doit être utilisée pour identifier des anomalies. Pour les méthodes à ratio signal / bruit élevé, des statistiques simples tel que les centiles ou des seuils régionaux fixes peuvent être utilisées. A l'inverse, les méthodes ayant un ratio signal/bruit bas devront faire l'objet de différents rehaussements pour détecter plus efficacement les anomalies. Les deux extrêmes seront discutés ici.

### Méthodes à ratio signal / bruit élevé

Beaucoup de méthodes minéralogiques (minéraux indicateurs), tels que les minéraux indicateurs du diamant ou les grains d'or dans le till, ont des ratios signal/bruit élevé. Pour ces méthodes, des approches statistiques simples sont souvent suffisantes. Les méthodes non-paramétriques basées sur les centiles sont recommandées plutôt que celles basées sur les moyennes et écart-types. La meilleure méthode est d'utiliser une approche basée sur les centiles et écarts interquartiles, telle que : seuil d'anomalie = 75<sup>e</sup> centile + X fois l'écart-interquartile. La valeur de X permet d'utiliser plusieurs seuils, typiquement 1.5 ou 3. Cette approche a l'avantage de ne pas générer des anomalies dans tous les levés et est disponible dans le logiciel LithoModeleur à partir de la version 4.4. On peut aussi utiliser des centiles fixes (ex : le 99<sup>e</sup>), mais cette approche a le désavantage de générer des anomalies dans toutes les méthodes et levés peu importe si elles sont vraiment significatives. Une dernière approche est de calculer des seuils sur une base de données régionale lorsque des données régionales sont disponibles pour la méthode.

### **Méthodes à ratio signal / bruit bas**

A l'inverse, de nombreuses méthodes ont des ratios signal/bruit relativement bas. Un bruit de fond élevé peut être dû à 1) forte variabilité de l'élément/indicateur dans le socle rocheux d'une région; 2) aux phénomènes mécaniques ou chimiques qui se sont produits durant le transport et la météorisation post-glaciaire du till lui-même. Pour les méthodes à ratio signal/bruit bas, du rehaussement d'anomalies peut être utilisé dans plusieurs cas pour obtenir un signal de meilleure qualité. Les sources principales de bruit dans les données sont expliquées dans cette section, et des solutions applicables à la variabilité texturale des tills sont énoncées. Par la suite, des approches statistiques seront brièvement proposées pour diminuer toutes les sources de bruit.

#### **1 - Variabilité dans le socle**

Les variations des teneurs de l'indicateur/élément ciblé par la méthode dans le socle sont une des deux sources de bruit. Plus les teneurs de l'indicateur sont variables dans le socle loin des minéralisations, plus le bruit sera élevé.

#### **2- Variabilité due aux phénomènes mécaniques ou chimiques du till**

Une autre source souvent négligée de variabilité du bruit de fond dans les tills provient des phénomènes mécaniques et chimiques que subissent les matériaux lors de leur transport et de leur altération post-glaciaire. La source la plus évidente de variabilité est d'origine mécanique et vient des différences entre les résistances mécaniques des minéraux de leur abrasion. En effet, avec l'abrasion progressive des minéraux, les minéraux les plus fragiles, tels que les phyllosilicates, tendent à se retrouver rapidement dans les fractions les plus fines (argile ± silt) des tills. À l'inverse, les minéraux les plus résistants tels que le quartz et les feldspaths se concentrent plutôt dans les fractions sable fin ± silt des tills et il faut beaucoup d'abrasion pour qu'ils se retrouvent dans les fractions plus fines.

Différents processus mécaniques peuvent concentrer ou diluer les minéraux fragiles vs les minéraux plus résistants dans les échantillons de till. Par exemple le délavage du till par des eaux de fonte peut enlever la fraction argileuse contenant plus de minéraux fragiles et sur-concentrer alors la fraction sableuse et les minéraux résistants dans le till entier. Or, plusieurs éléments métalliques (dont Cu, Zn, Ni) ont une affinité très forte avec les phyllosilicates, qui sont les minéraux les plus fragiles. Dans la plupart des roches métamorphiques, par exemple, une forte majorité du zinc, du cuivre et du nickel se retrouvent dans la biotite ou la chlorite. Tout processus qui concentre les phyllosilicates dans un till (naturellement ou au laboratoire) donnera des concentrations plus élevées en de nombreux métaux, peu importe la présence de minéralisation. Il s'agit simplement d'un phénomène mécanique. À l'inverse, tout processus diminuant la proportion relative de phyllosilicates mènera à des teneurs plus faibles en de nombreux métaux. Ceci est illustré à la figure 4, qui compare les teneurs en zinc entre la fraction argile et silt+argile pour les mêmes échantillons de till. Pour plus de détails à ce sujet, voir également le rapport du projet 2010-05 « Optimisation des données de till pour l'exploration » (Trépanier, 2011).



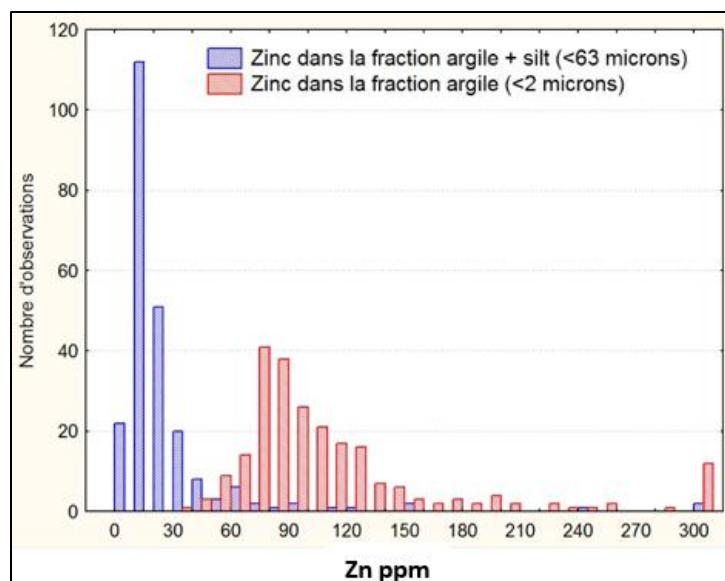


Figure 4 : Comparaison des teneurs en zinc de la fraction argile vs. silt+argile d'une même série d'échantillons de tills. Noter les teneurs beaucoup plus élevées en zinc dans la fraction argileuse vs. silt+argile des mêmes échantillons. Tiré du rapport 2010-05, Consorem (Trépanier, 2011).

Ces processus de concentration mécanique des métaux par les phyllosilicates sont des sources importantes de bruit de fond dans les tills. Pour corriger ce phénomène, on peut utiliser un élément qui est « moniteur » du contenu en phyllosilicates du till.

Le meilleur élément à utiliser est l'**aluminium (Al) analysé après une extraction aqua-regia**, puisque l'essentiel de l'aluminium extrait lors de cette attaque chimique d'une roche provient de la biotite, de la chlorite ou des autres argiles, les feldspaths et la muscovite étant peu solubles dans ces acides. Le contenu en Al de l'extraction aqua-regia est donc un « proxy » pour la quantité de biotite-chlorite-argiles de l'échantillon. On peut donc corriger l'effet de concentration mécanique en phyllosilicates en utilisant un ratio Métal / Al (ex : Cu/Al, Zn/Al), plutôt que les valeurs brutes de ces éléments. Ce type de correction aide à augmenter le ratio signal / bruit pour les méthodes concernant les métaux usuels analysés dans les tills.

### **3- Diminution du ratio signal/bruit par des approches statistiques**

Des approches statistiques peuvent également être utilisées pour diminuer le bruit de fond géochimique lié aux variations de la composition du socle non-minéralisé ou aux variations texturales des tills. L'approche la plus utile est de procéder à des régressions linéaires multiples. L'idée est d'utiliser une série d'éléments chimiques analysées dans les tills qui ne sont pas reliés directement à la minéralisation qui est recherchée, et de prédire statistiquement la valeur d'un élément d'intérêt à partir de ces autres éléments. On calcule ensuite une valeur résiduelle, qui représente la partie de la teneur d'un échantillon dans un élément d'intérêt qui ne s'explique pas par la combinaison d'éléments non-reliés à la minéralisation recherchée. Cette résiduelle devient le nouvel indicateur à utiliser, ce qui devrait diminuer alors le bruit de fond de la méthode. Cette approche de régression + résiduelle peut se faire de façon non-spatiale (dans tous les logiciels de statistiques) ou de façon spatiale (régression spatiale) dans le logiciel LithoModeleur, à partir de la version 4.4. La méthode de régression spatiale est expliquée plus en détails dans le projet 2005-03 « Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac– Phase 2 (Trépanier, 2006) » et dans l'annexe 2 « Procédure pour le traitement de la géochimie de l'environnement secondaire par régression spatiale ». Cette approche statistique permet notamment d'atténuer l'effet de concentration en phyllosilicates discuté plus tôt, en particulier si le till a été analysé après une extraction aqua-regia.

Une autre approche de rehaussement des anomalies repose sur la distribution spatiale des anomalies dans un levé (statistique U). Cette approche s'utilise seulement dans les levés de till où la densité d'échantillonnage est suffisante pour qu'une source minéralisée soit susceptible de se détecter sur plus d'un échantillon. Dans ce cas, la méthode de la statistique U permet de donner un poids plus important aux anomalies qui forment des groupes dans l'espace, par rapport aux anomalies qui seraient isolées. Ce genre de rehaussement peut également être utile dans certains cas. Cette méthode est mise en dans le logiciel LithoModeleur, à partir de la version 4.4 et est expliquée plus en détails dans le rapport 2005-03 Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac– Phase 2.

## IDENTIFICATION DE LA SOURCE PROBABLE DES ANOMALIES DE TILL

Une fois une anomalie dans le till détecté, la question suivante est de savoir à quel endroit se trouve la source de cette anomalie. Les questions qui se posent sont alors 1) la direction vers laquelle se trouve la source et 2) la distance à cette source. Ces deux paramètres seront traités séparément.

### Direction de la source

Suivant une dynamique de dispersion glaciaire simple dans lequel on aurait seulement un épisode de transport glaciaire, la source de l'anomalie serait alors en amont glaciaire. Différents indicateurs géomorphologiques (formes glaciaires comme des drumlins, etc.) ou d'érosion (stries glaciaires) permettent d'identifier les dispersions glaciaires. Dans la plupart des cas, les dispersions glaciaires régionales sont toutefois bien documentées et dans le cas de glaciations continentales du Bouclier canadien (figure 5), ces directions restent assez constantes régionalement pour le même épisode glaciaire, à l'échelle d'un feuillet 1 : 50 000 par exemple.

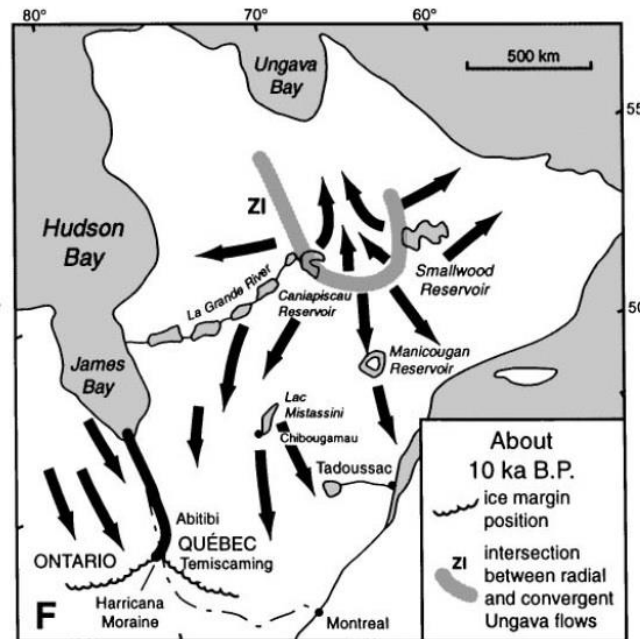


Figure 5 : Dispersion glaciaires lors de la dernière phase glaciaire de l'Inlandsis Laurentidien au Québec. Tiré de Veillette et al., 1999.

Dans la majorité des cas, cependant, on observe plus d'un épisode glaciaire à un endroit donné (figure 6). Pour identifier la direction de la source, il faut alors connaître les différentes dispersions glaciaires et identifier, pour un till donné échantillonné, à quelle dispersion glaciaire ce till appartient. En l'absence d'informations sur la position stratigraphique du till échantillonné, cette détermination peut être difficile à effectuer. Dans certains secteurs, la présence de lithologies spécifiques ou l'aspect général du till peut donner de l'information sur la direction glaciaire (par exemple, la présence d'une lithologie située uniquement dans une certaine direction).

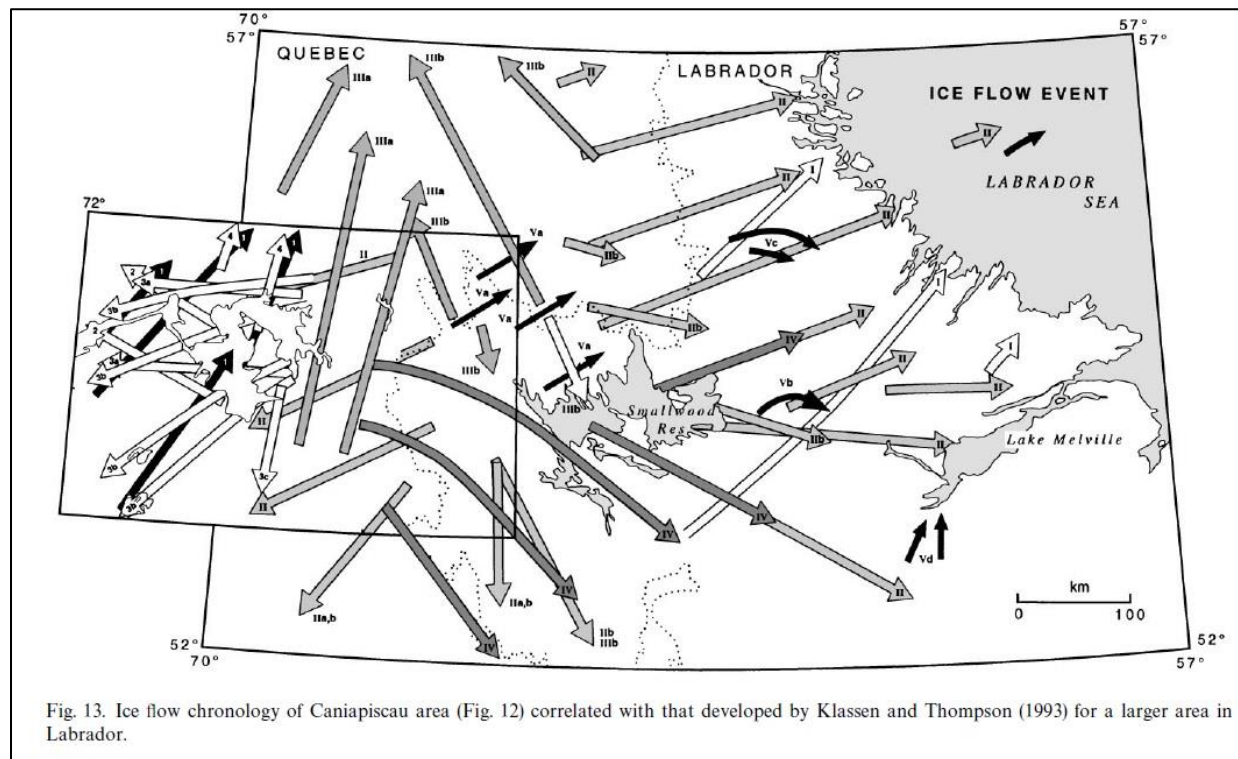


Fig. 13. Ice flow chronology of Caniapiscau area (Fig. 12) correlated with that developed by Klassen and Thompson (1993) for a larger area in Labrador.

Figure 6 : Chronologie des dispersions glaciaire de la partie sud du Labrador. Tiré de Veillette et al., 1999.

Ce qui complique le portrait de la détermination de la direction de la source d'une anomalie est que lorsque l'on a plusieurs épisodes glaciaires dans un même secteur, les niveaux de tills les plus jeunes peuvent alors former ce qu'on appelle une dispersion « palimpseste » (Parent et al., 1996). Dans des secteurs contenant plusieurs tills d'origines différentes superposés, les tills stratigraphiquement supérieurs incorporent en fait du matériel déposé par les tills antérieurs, qui peuvent avoir des directions d'écoulement différentes. Il s'ensuit que dans ces cas, plutôt que de former des directions linéaires de dispersion, on forme des dispersions de formes potentiellement complexes (figure 7). Dans les zones à multiples dispersion où on ne connaît pas le niveau de till qui a été échantillonné, le mieux est de considérer l'éventail des possibilités de source dans la recherche de la source de l'anomalie.

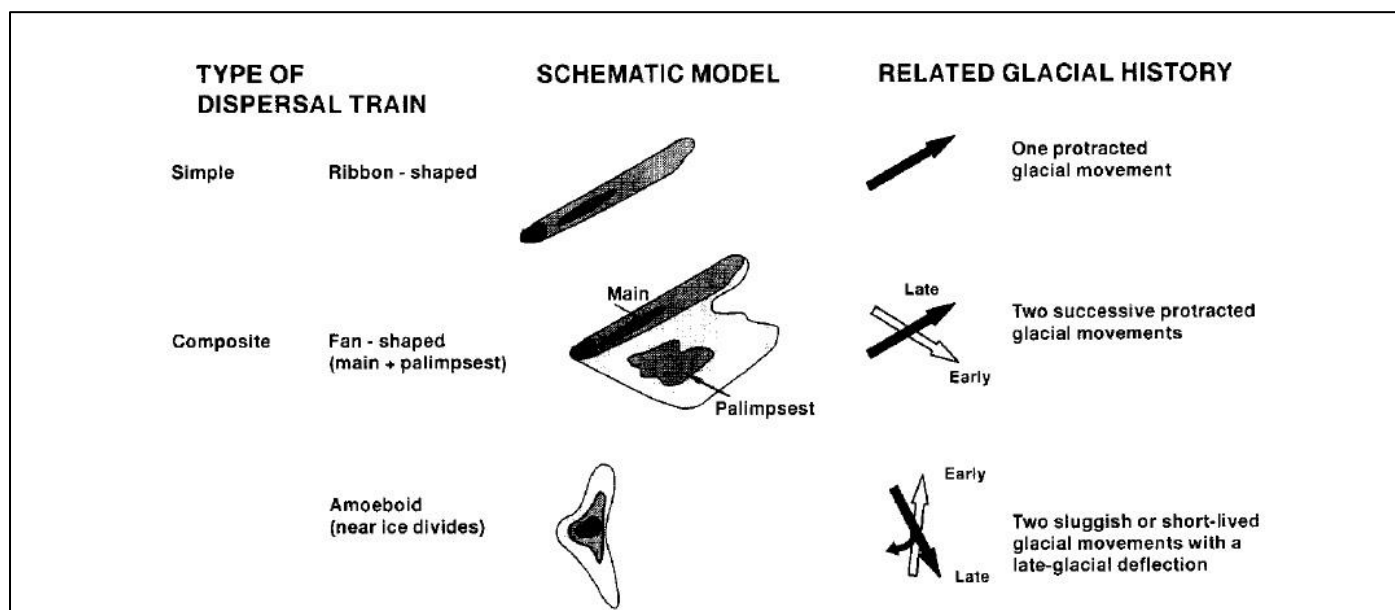


Fig. 8. Classification of glacial dispersal trains and related glacial history. These schematic dispersal patterns may serve as tools for both the interpretation of actual dispersal data and the definition of drift prospecting strategies.

Figure 7 : Dispersions palimpsestes dans les secteurs avec plusieurs épisodes glaciaires de directions différentes.  
Tiré de Parent et al., 1996.

## **Distance de la source**

L'autre paramètre clé dans la recherche de la source d'une anomalie est la distance probable de la source. L'évaluation de la distance de la source à une anomalie détectée par une méthode dans le till est un problème à plusieurs paramètres qui sont essentiellement les suivants : 1) amplitude de l'anomalie ; 2) nature de la méthode elle-même (ex : Au dans fraction fine vs As concentré de minéraux lourds analysé vs compte de grains d'or) ; 3) taille de la source (largeur de la source parallèlement à la dispersion glaciaire) ; 4) concentration de la source dans l'élément/minéral recherché. Ces différents points seront examinés séparément.

### **1- Amplitude de l'anomalie**

Comme mentionné précédemment, à partir d'une source minéralisée, les valeurs/teneurs d'une méthode donnée dans le till diminuent de façon exponentielle (fonction exponentielle négative) en s'éloignant de cette source. La conséquence simple et logique de ceci est que, toutes choses étant égales par ailleurs, **plus une anomalie est intense (i.e. de forte amplitude) par rapport aux variations normales (i.e. bruit de fond) des valeurs d'une méthode, plus la source doit être proche.** C'est le paramètre le plus simple, mais le plus évident dans l'interprétation de la distance à la source probable. Il faut noter que certaines méthodes géochimiques ciblant des éléments peu abondants (comme l'or ou les EGP) peuvent montrer des anomalies de forte amplitude sans lien avec une source particulière. Le cas le plus connu est l'effet pépite pour l'or qui peut causer de fortes anomalies géochimiques en or qui sont causées par la présence d'une particule unique de grande taille. Ces fortes anomalies sont alors géographiquement isolées et n'indiquent donc pas nécessairement une source proximale.

### **2- Méthode**

La distance probable d'une anomalie à sa source dépend aussi fortement de la méthode elle-même. Comme mentionné précédemment, **différentes méthodes montrent différentes variabilités de bruit de fond.** En s'éloignant d'une source minéralisée, les valeurs/teneurs d'une méthode diminuent graduellement pour éventuellement se confondre avec le bruit de fond de la méthode, distance à laquelle on ne peut plus identifier d'anomalie. **Conceptuellement, la distance à laquelle on perd l'anomalie dépend du ratio signal/bruit de la méthode** : si le bruit de fond est élevé, on perdra l'anomalie plus rapidement dans le bruit de fond. **Si on inverse le raisonnement, cette distance est également la distance potentielle à la source d'une anomalie qui est détectée.**

Ainsi, toutes choses étant égales par ailleurs, **plus une méthode a un ratio signal/bruit bas (i.e. beaucoup de bruit vs le signal), plus rapidement on perd le signal d'une minéralisation ; dans ce cas, la source d'une anomalie doit être proche. A l'inverse, plus une méthode a un ratio signal/bruit élevé (peu de bruit vs le signal), plus il sera facile de détecter des anomalies de la méthode loin de la source ; la source d'une anomalie pourra alors être potentiellement lointaine.**



En général, plus une méthode isole une portion précise du till qui contient l'indicateur recherché (ce qui tend à augmenter le ratio signal/bruit de la méthode) plus les anomalies de cette méthode pourront être détectées loin de la source. Par exemple, pour l'exploration aurifère, les distances de détection possibles d'une anomalie en or seront plus grande si on sépare un concentré de minéraux lourds à densité élevée (qui concentre l'or) vs un concentré à densité plus faible (dans lequel l'or est plus dilué) vs l'analyse totale du till (dans lequel l'or est très dilué). Ces différences de distance de détection selon la méthode pour l'exploration de l'or sont illustrées à la figure 8.

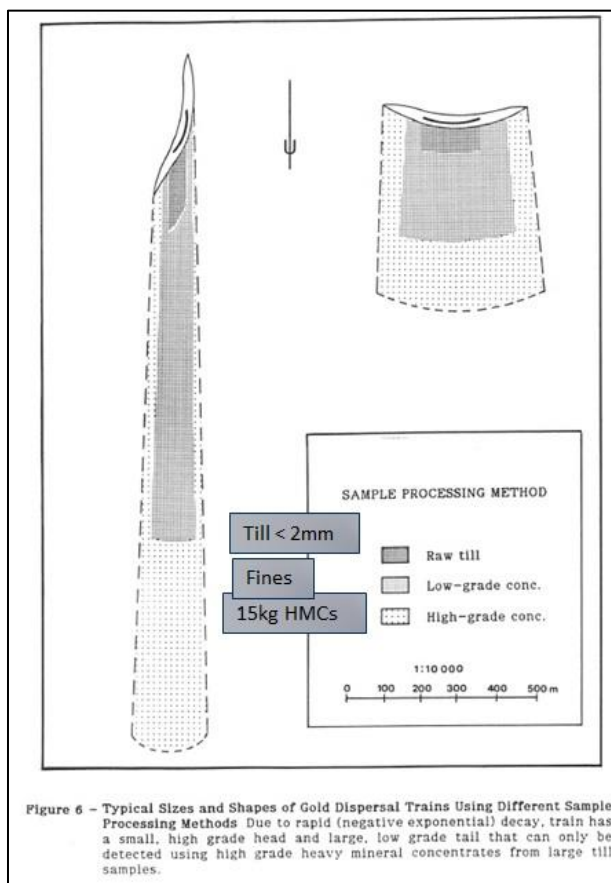


Figure 8 : Longueur de dispersions d'une minéralisation en or selon le médium et l'orientation de la zone minéralisée par rapport à la dispersion glaciaire.

L'exemple le plus frappant illustrant ces différences dans les distances des anomalies vs les sources se retrouve dans l'exploration pour les diamants des kimberlites. Les grenats de type G10 sont un indicateur très spécifique de la présence de kimberlites et presque uniques aux kimberlites. On peut extraire un concentré de minéraux lourds d'un till, extraire les grenats visuellement ou autrement, et les analyser pour identifier les grenats G10 parmi tous les autres types de grenats. De cette façon, on peut arriver à détecter quelques grenats G10 seulement dans de gros volumes de till. Il s'agit d'une extraction d'information très spécifique. Par cette approche, on peut détecter dans le till la présence d'une kimberlite à des dizaines voire des centaines de kilomètres de sa source (figure 9). Si on pense en fonction de ratio signal/bruit, le bruit de fond en grenats G10 des tills est typiquement de 0, alors l'extraction et l'analyse des grenats dans un concentré de minéraux lourds est une méthode avec un **ratio signal/bruit très élevé**, et très efficace. **Les anomalies en grenat G10 peuvent alors être détectées très loin de la source.**

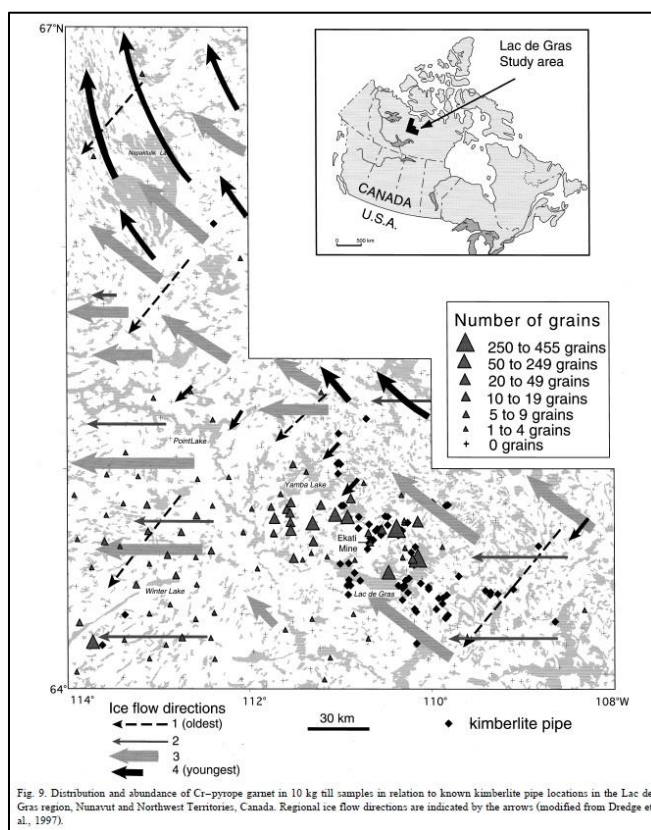


Figure 9 : Dispersions des grenat pyropes riches en chrome à partir des kimberlites du secteur du lac de Gras. Noter que les concentrés de minéraux lourds des tills permettent de détecter les kimberlites à plus de 100 vers l'ouest. Tiré de McClenaghan et al., 2000.

A l'inverse, si on essaie de détecter une kimberlite par la présence d'anomalies géochimiques en chrome dans la fraction fine du till, la détection de la kimberlite sera limitée à quelques kilomètres au plus. Le chrome se trouve dans toutes les roches et tills le contenu en chrome des tills peut varier par la présence de roches riches en chrome autres que les kimberlites ou même par des variations texturales des tills. Comparativement aux grenats G10, l'analyse du chrome dans le till est donc une méthode beaucoup moins spécifique et avec **un ratio signal/bruit bas** pour la détection des kimberlites, et **les anomalies détectées auront une source beaucoup plus proximale**. Il pourra bien sûr également y avoir de fausses anomalies causées par des roches riches en chrome autre que les kimberlites.

La méthode employée et son ratio signal/bruit de fond influence donc beaucoup la distance potentielle à la source d'une anomalie.

### ***3-Taille de la source et son orientation par rapport à la dispersion glaciaire***

La distance à laquelle on peut détecter une anomalie de sa source dépend également de sa taille lorsque celle-ci est mesurée parallèlement à la dispersion glaciaire (figure 8). On comprend qu'une source plus large en général créera une dispersion plus longue, mais la direction de la source vs la dispersion glaciaire influence aussi la distance de dispersion. Une source allongée parallèle à la dispersion glaciaire pourra être détectée beaucoup plus loin qu'une source de même surface, mais perpendiculaire à celle-ci. Dans le cas d'une source allongée parallèle à la dispersion glaciaire à la dispersion, les anomalies près de la source peuvent également paraître démesurément fortes. Ce phénomène est observé dans le domaine de La Grande à la Baie-James, où les ceintures de roches vertes sont parallèles à la dernière dispersion glaciaire.

### ***4- Concentration de la source dans l'élément/minéral recherché***

Le dernier facteur qui influence la distance à la source est la concentration de celle-ci. Une source plus concentrée dans l'élément ou le minéral recherché formera des anomalies plus fortes. Ces anomalies pourront être détectées plus loin de la source lors de la décroissance exponentielle du signal dans le till.

---

## RÉFÉRENCES

McClenaghan, M.B., Paulen, R.C., Ayer, J.A., Trowell, N.F., Bauke, S.D., 1998. Regional till and humus geochemistry of the Timmins-Kamiskotia area, northeastern Ontario (NTS 42A/11, 12, 13, 14). Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3675.

McClenaghan, M.B., Thorleifson, L.H., DiLabio, R.N.W. Till geochemical and indicator mineral methods in mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 16, p.145-166.

McClenaghan, M.B., 1999. Till geochemical signatures associated with gold deposits in the Timmins-Matheson area, Western Abitibi Greenstone Belt, northeastern Ontario. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3707.

Parent, M., Paradis, S.J., Doiron, A., 1996. Palimpsest glacial dispersal trains and their significance for drift prospecting. *Journal of Geochemical Exploration* 56, p. 123-140.

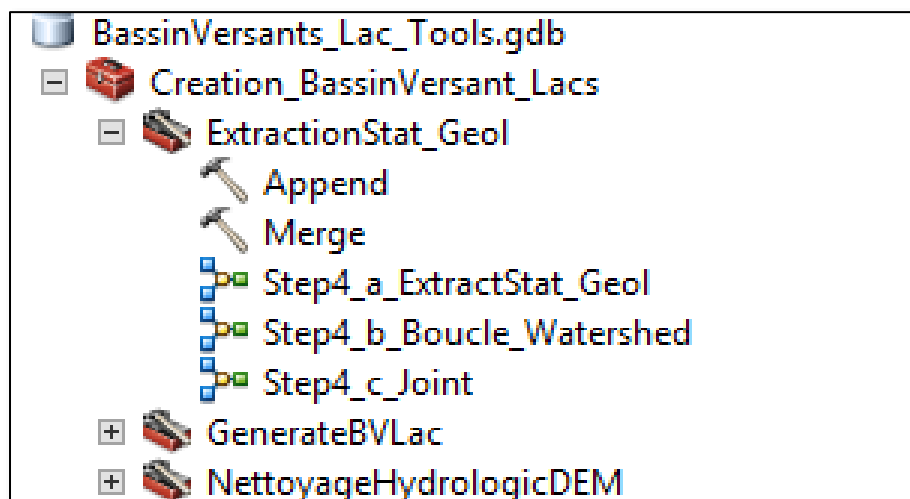
Trépanier, S. 2006. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport du projet CONSOREM 2005-03, 74 p.

Trépanier, S. 2011. Optimisation des données de till pour l'exploration. Rapport du projet CONSOREM 2010-05, 72 pages.

Veillette, J.J., Dyke, A.S., Roy, M. 1999. Ice-flow evolution of the Labrador Sector of the Laurentide Ice Sheet: a review, with new evidence from northern Quebec. *Quaternary Science Review*, 18, p. 993-1019.

## ANNEXE 1 : BOITES A OUTILS ARCGIS POUR LA MODELISATION DES BASSINS VERSANTS AUTOUR DES LACS

Procédure d'utilisation des boîtes à outils développée pour la création de bassin versant autour des lacs dont les sédiments ont été échantillonnés et extraction de la géologie dominante dans le bassin versant



Par Mélanie Lambert

CONSOREM

Automne 2020

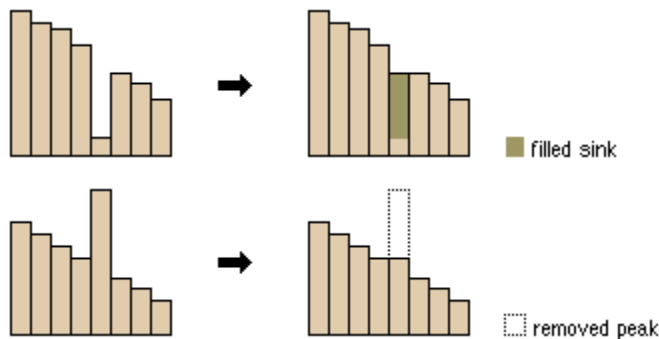
## Table des matières

Étapes #1 et #2 : Création d'un MNA Hydro Cohérent .....	155
Étape #3 : Modélisation des bassins versants pour chacun des lacs échantillonnés.....	161
Étape #4 : Extraction de la géologie dominante par bassin versant .....	168



## Étapes #1 et #2 : Création d'un MNA Hydro Cohérent

Étapes visant à éliminer les cuvettes et les pics présents dans un MNA de faible qualité (résolution supérieure à 10 mètres).



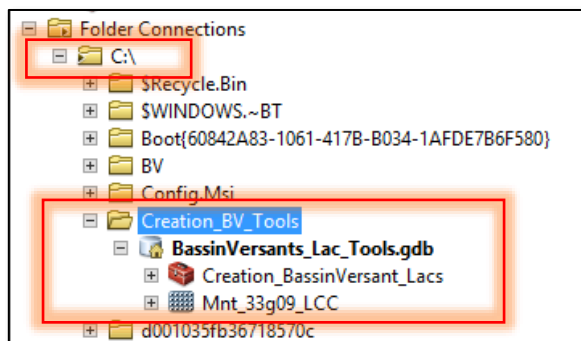
Pour y parvenir deux étapes doivent être réalisées

Étape #1 : Retrouver la profondeur maximale des cuvettes

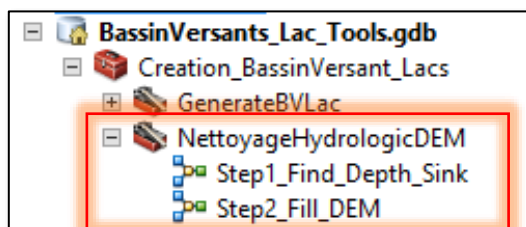
Étape #2 : Remplir les cuvettes avec l'outil **Fill**

### Boîte à outils permettant de réaliser les étapes #1 et #2

Une boîte à outils a été développée et permet de réaliser les étapes #1 et #2 en un seul processus. Cette boîte à outils se nomme **Creation\_BassinVersant\_Lacs** et se trouve dans une file geodatabase nommée *BassinVersants\_Lac\_Tools.gdb*.



Le Toolset **NettoyageHydrologicDEM** contient les deux outils pour réaliser les étapes 1. et 2 et permet de réaliser une itération pour éliminer les cuvettes et les pics du DEM.



## Modèle des outils de nettoyage du DEM

Les figures suivantes présentent le modèle constituant chacun de ces outils.

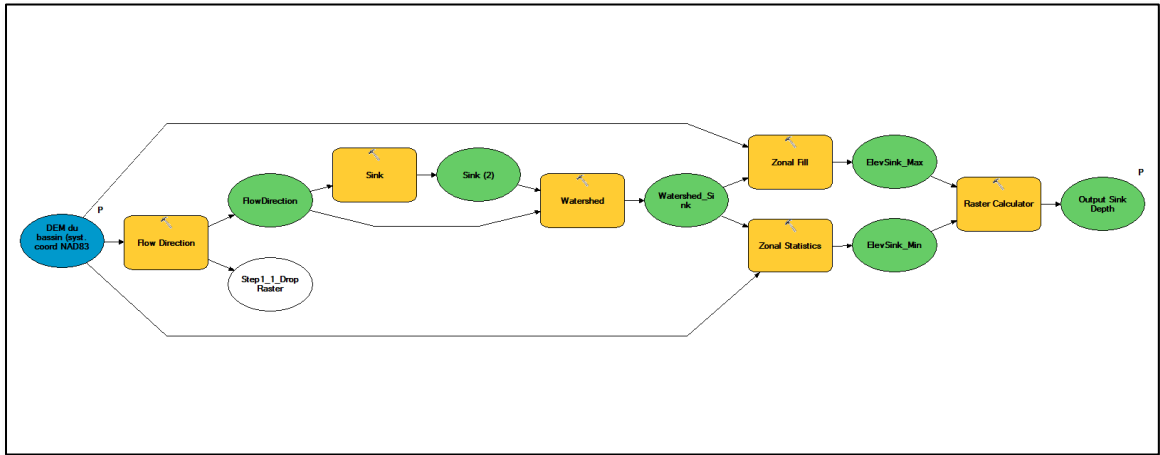


Figure 0-1 : Step1\_Find\_Depth\_Sink

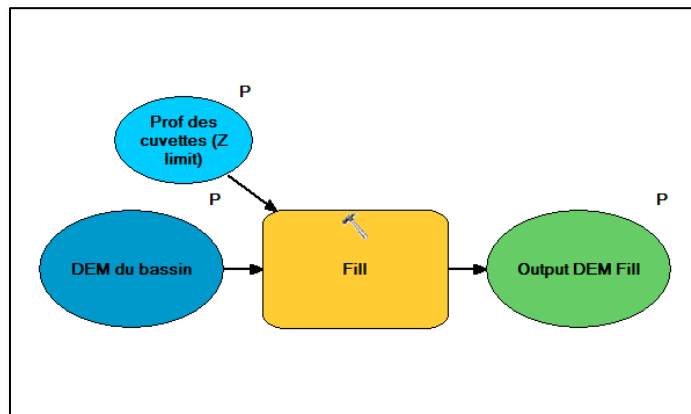
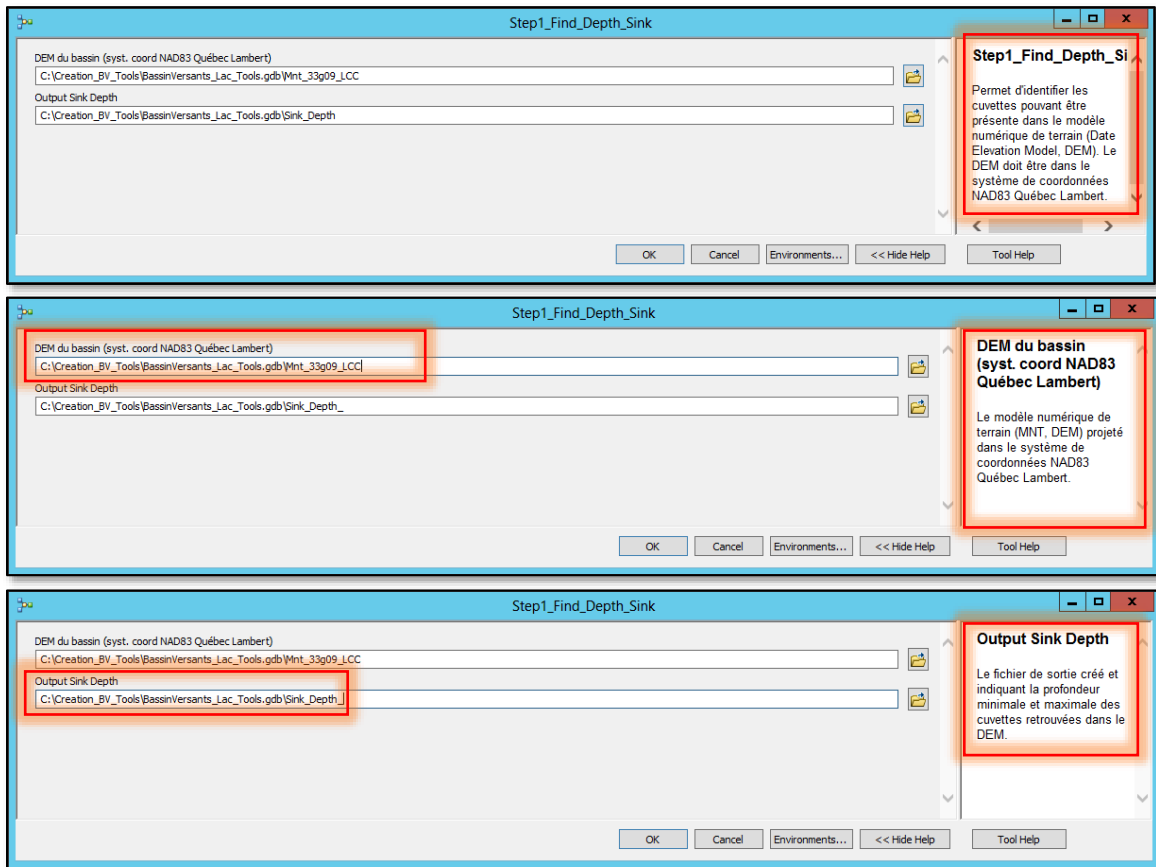


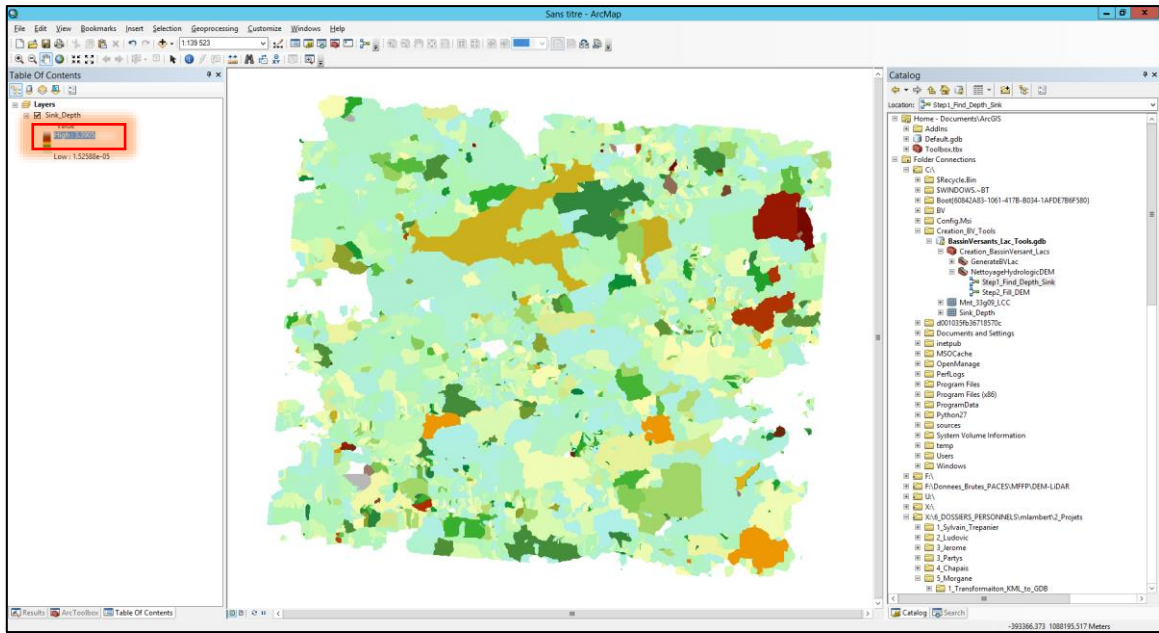
Figure 0-2 : Step2\_Fill\_DEM

## Utilisation des outils

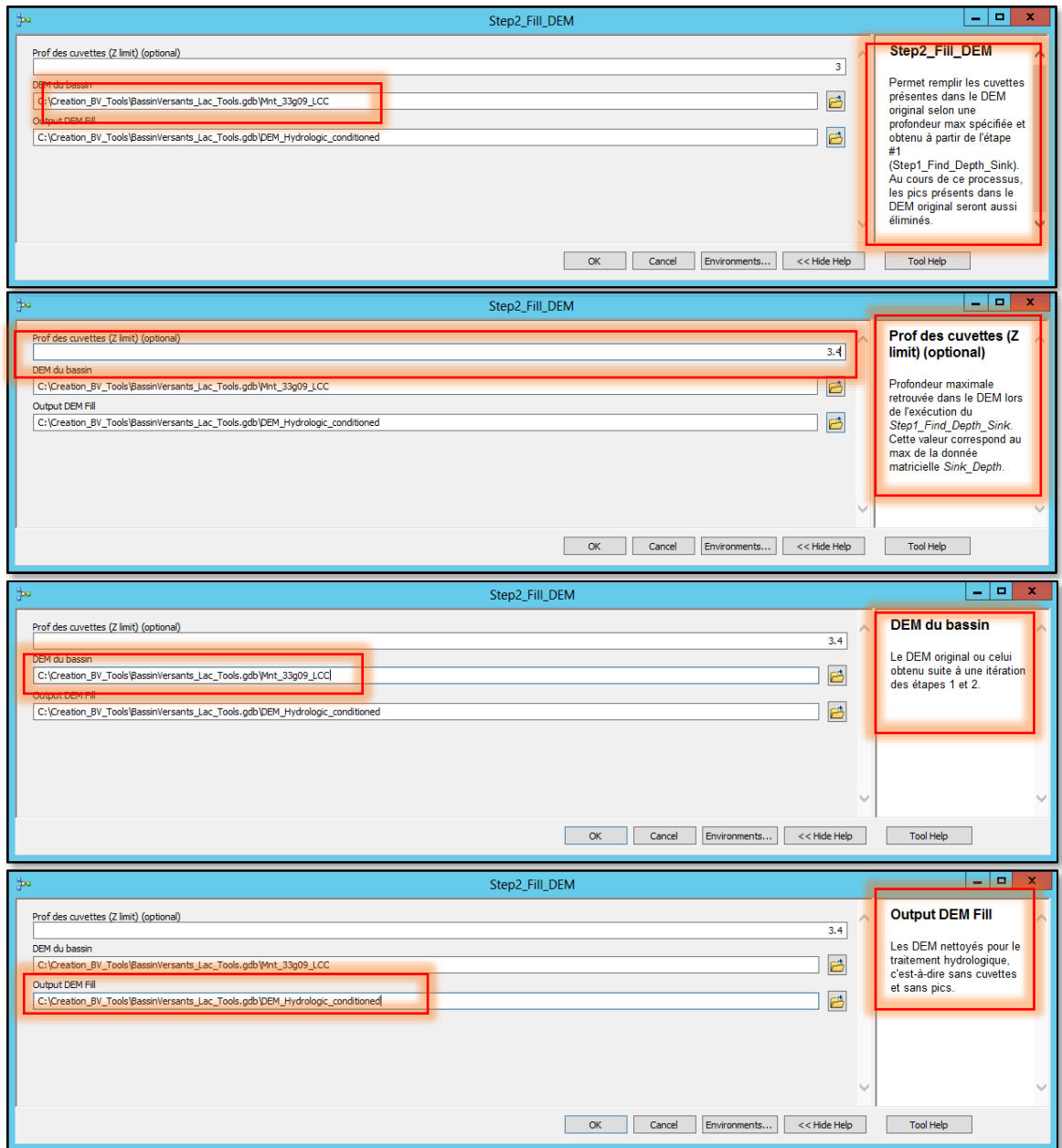
a) Lancer l'outil **Step1\_Find\_Depth\_Sink** et spécifier les paramètres demandés.



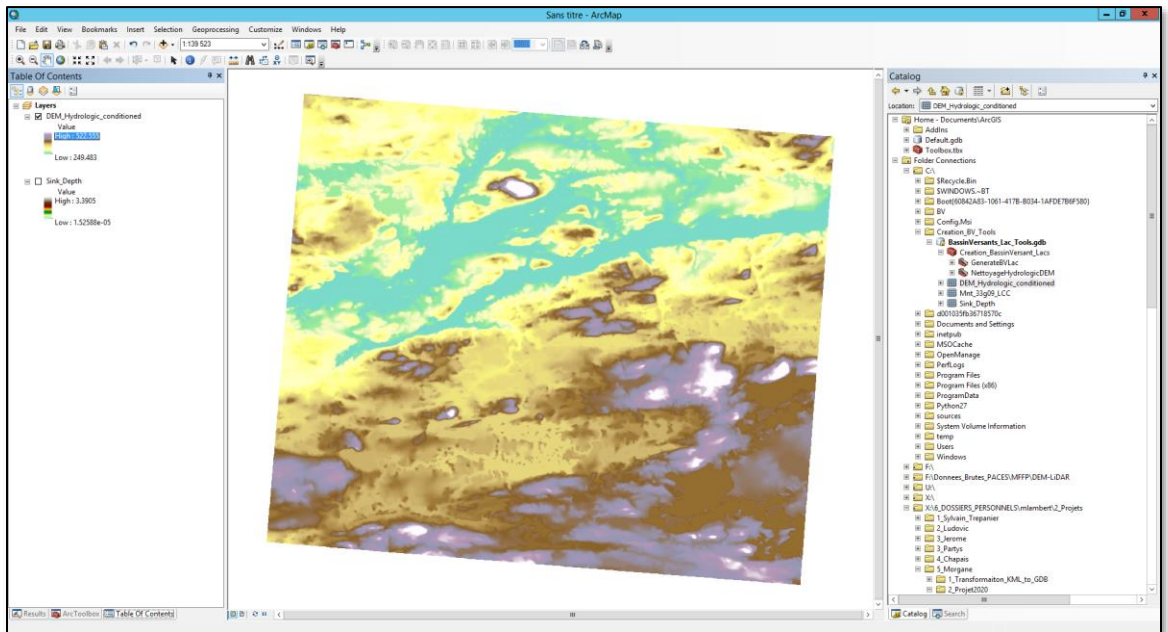
- b) Ajouter le fichier **Sink\_Depth** créé à votre projet ArcMap et noter les profondeurs maximales des cuvettes retrouvées dans le DEM. Dans cet exemple, la profondeur maximale est de 3.4 mètre.



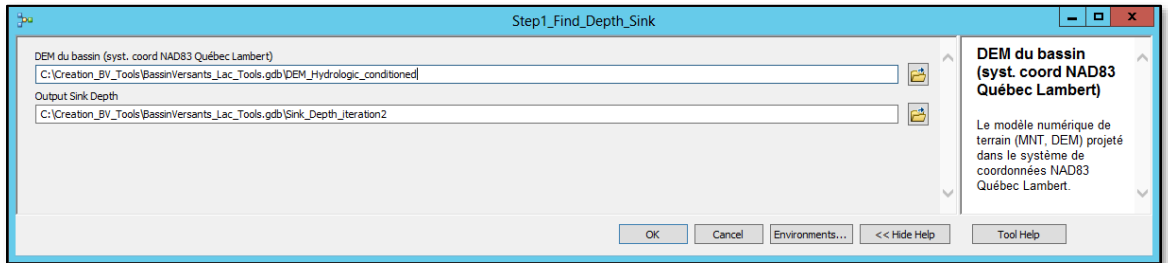
c) Lancer l'outil **Step2\_Fill\_DEM** et spécifier les paramètres demandés.



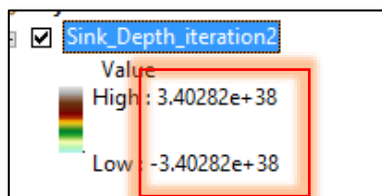
d) Ajouter le DEM à votre projet ArcMap



e) Lancer à nouveau l'outil **Step1\_Find\_Depth\_Sink**, mais cette fois en utilisant ce résultat pour le paramètre DEM.



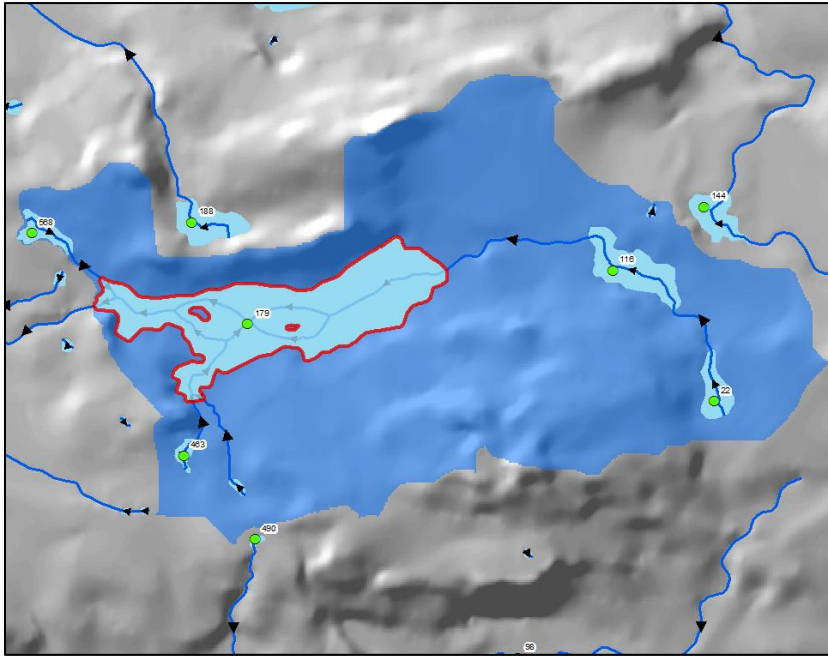
Si le DEM est prêt à être utilisé pour la modélisation hydrologique des bassins versants les valeurs min et max indiquées sur le résultat seront extrêmes. Les itérations sont alors terminées et le DEM obtenu à l'étape d) doit être utilisé pour réaliser la modélisation des bassins versants.





### Étape #3 : Modélisation des bassins versants pour chacun des lacs échantillonnés

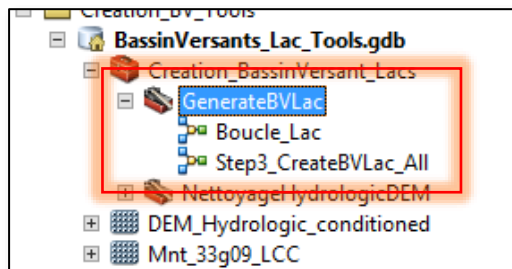
L'étape #3 vise à créer le bassin versant de chacun des lacs échantillonnés



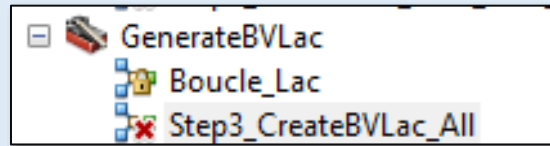
#### Boîte à outils permettant de réaliser l'étape #3

Une boîte à outils a été développée et permet de réaliser les étapes 2.1. et 2.6 en un seul processus. Cette boîte à outils se nomme **Creation\_BassinVersant\_Lacs** et se trouve dans une file geodatabase nommée *BassinVersants\_Lac\_Tools.gdb*.

Le *Toolset* **GenerateBVLac** contient l'outil pour réaliser les étapes 2.1. et 2.6.

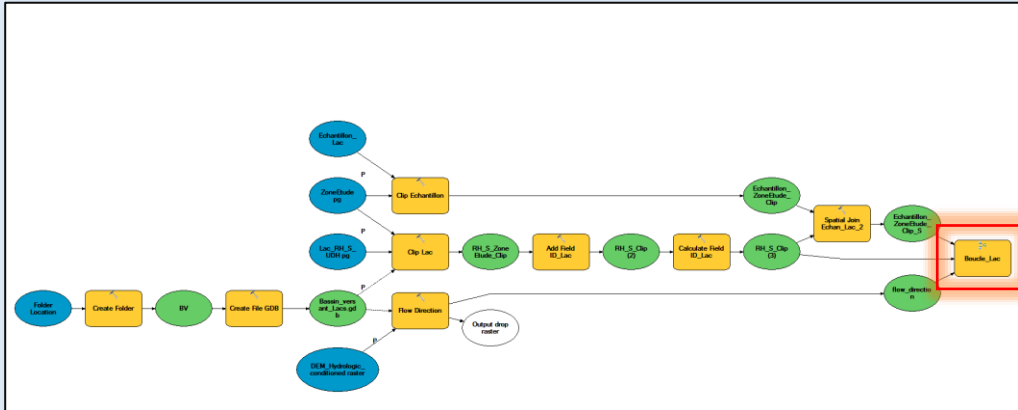


Si un **X rouge** apparaît sur le modèle **Step3\_CreateBVLac\_all**,

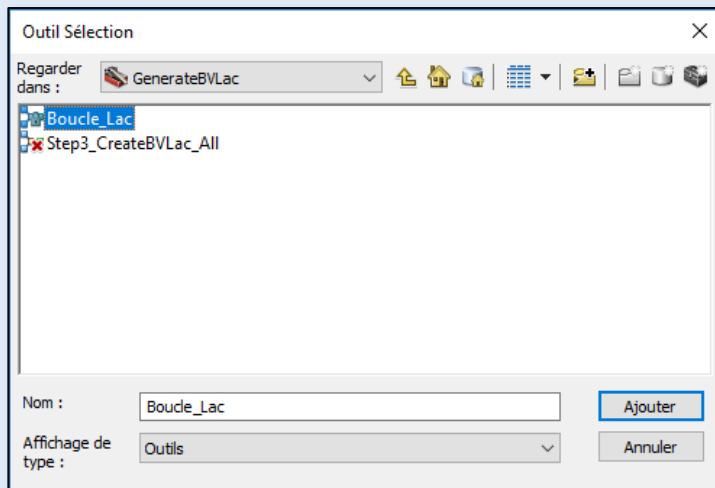


suivre les étapes suivantes :

- 1- Clic-droit sur le Modèle **Step3\_CreateBVLac\_all** et choisir **Edits...**
- 2- Double cliquer sur l'entité **Boucle\_Lac** du modèle



- 3- Sélectionner l'emplacement du modèle **Boucle\_Lac** dans la boîte à outils. Il se trouve dans le même Toolset que l'outil **Step3\_CreateBVLac\_all**.



- 4- Cliquer sur le bouton **Add**.
- 5- Fermer le modèle et enregistrer les modifications.

Le X rouge ne devrait plus être présent.

Modèle des outils modélisation des bassins versants

Les figures suivantes présentent le modèle constituant l'outil principal et le modèle décrivant la partie où une boucle est réalisée.

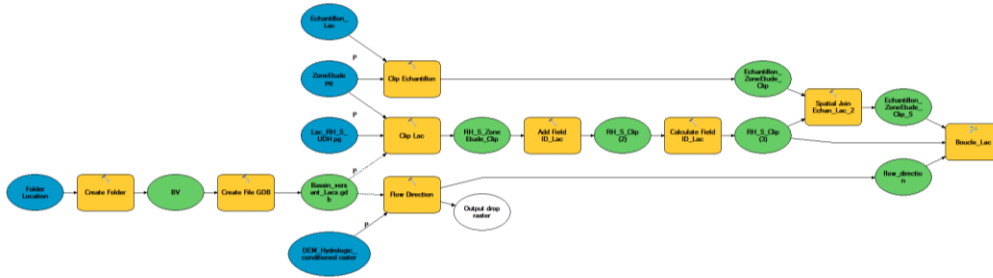


Figure 0-3 : Step3\_CreateBVLac\_All

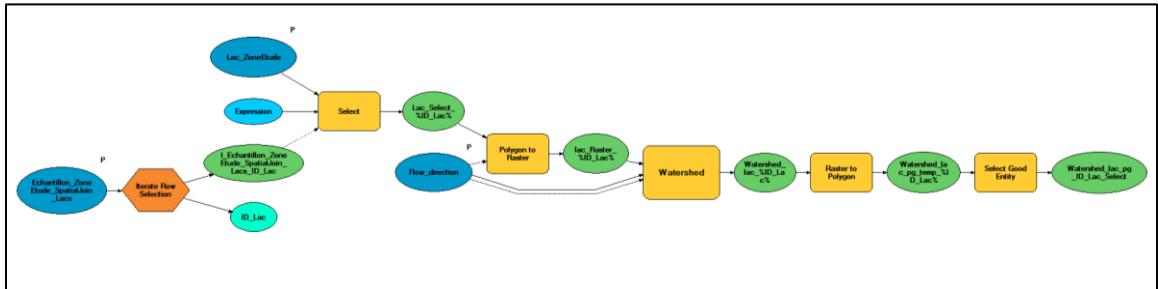
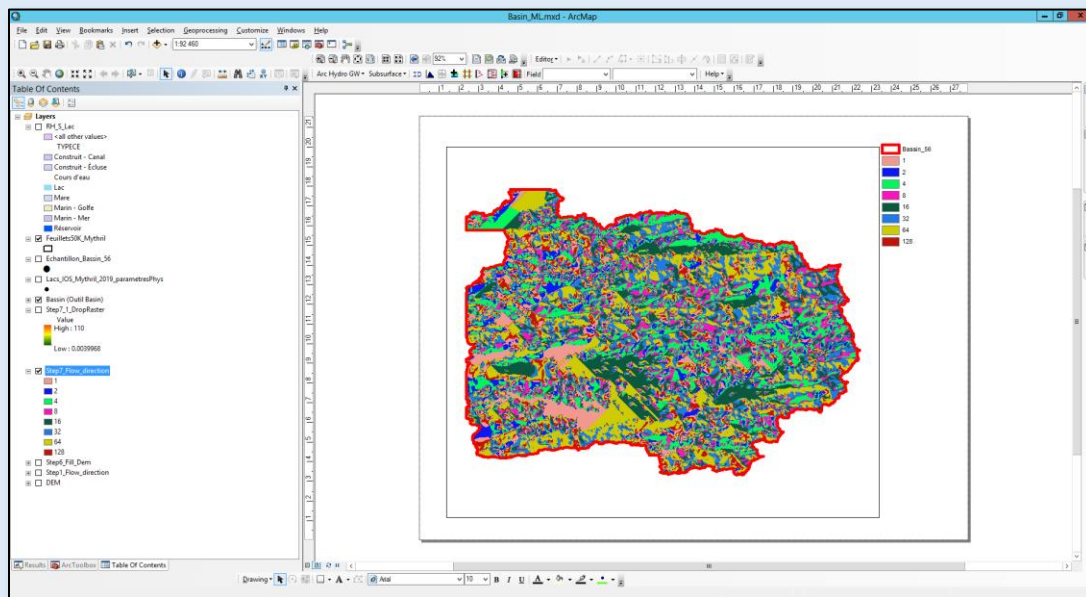
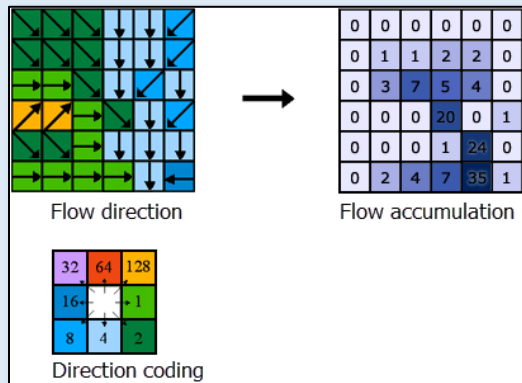


Figure 0-4 : Boucle\_Lac

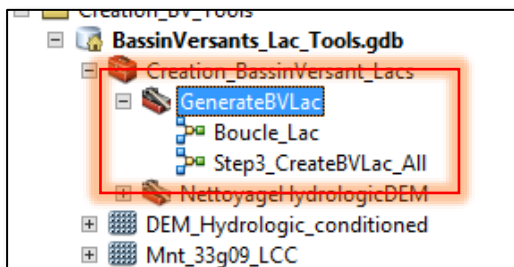
## Utilisation des outils

Avant d'exécuter l'outil, vérifiez que le DEM est bel et bien hydro cohérent en créant un *Flow direction* temporaire. Pour ce faire, exécutez l'outil *Flow Direction* avec le DEM nettoyé. La donnée matricielle résultante doit contenir que 8 valeurs soit les 8 directions possibles.

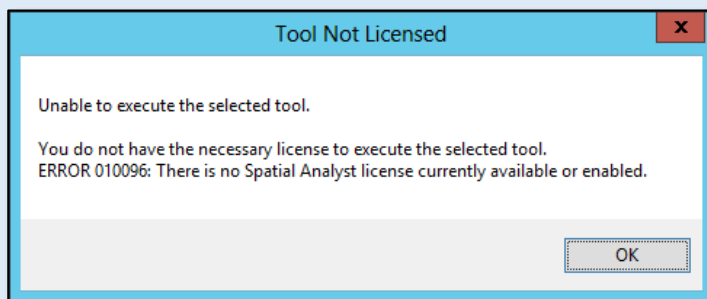


Si la donnée matricielle contient plus de 8 valeurs, vous devez nettoyer à nouveau le DEM (section 0)

1) Lancer l'outil en double cliquant sur le modèle nommé **Step3\_CreateBVLac\_All**

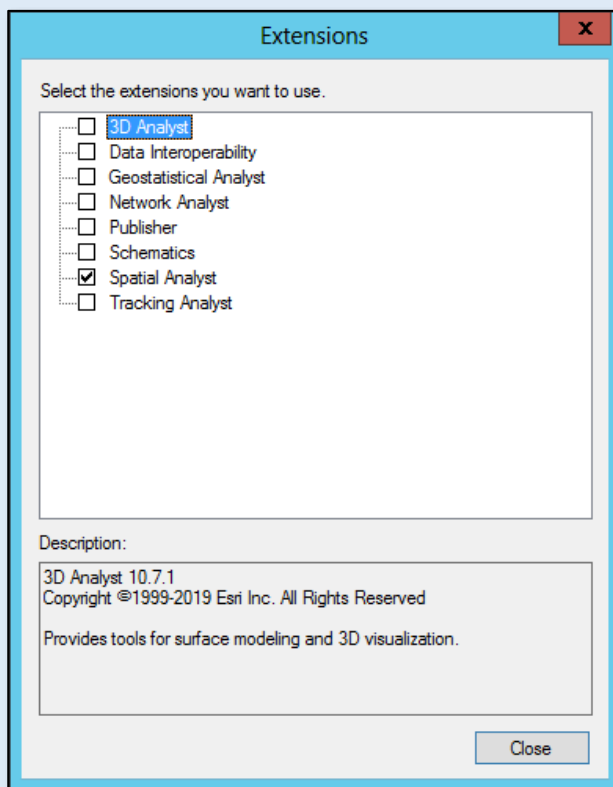


Si l'avertissement suivant apparaît :

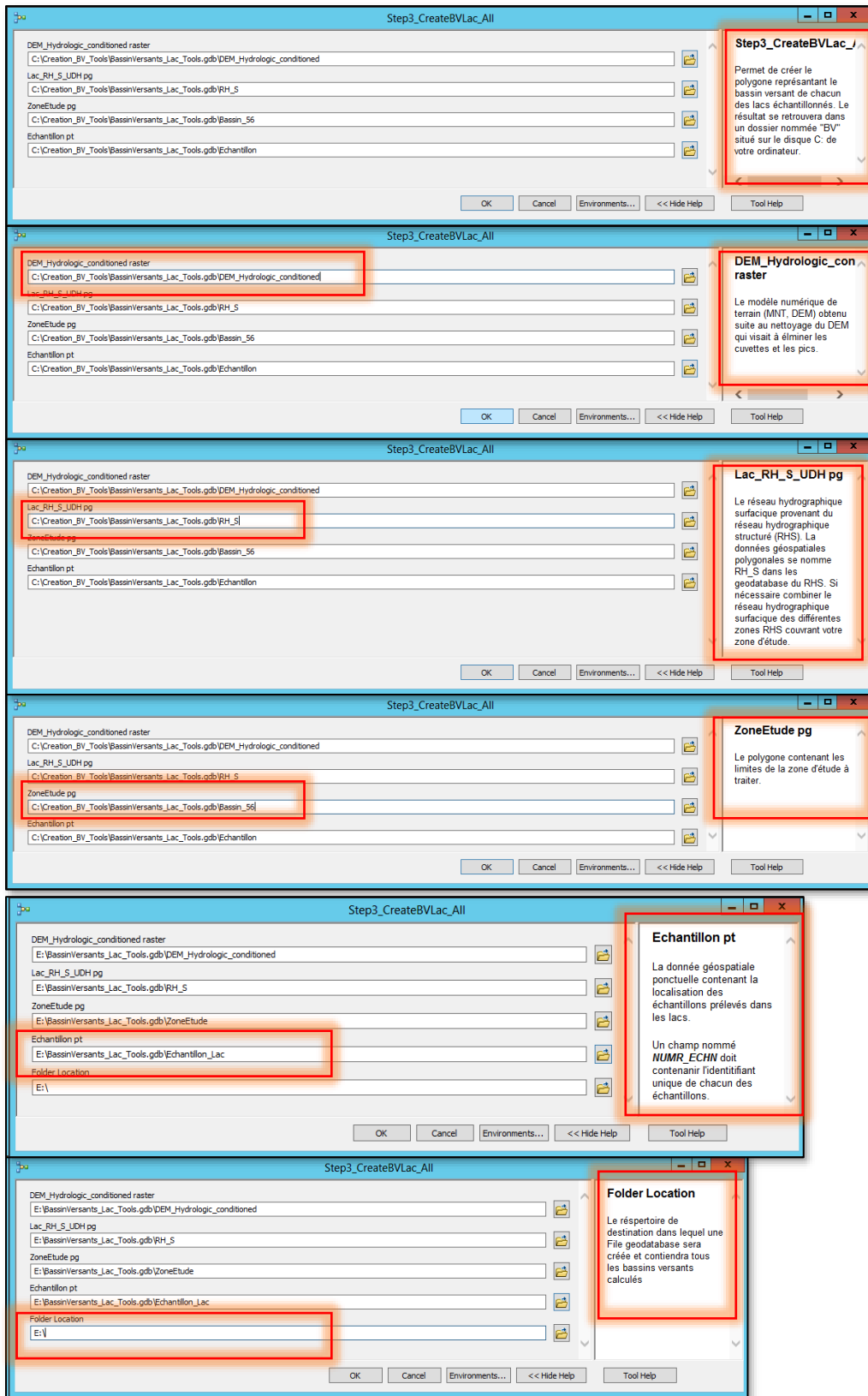


Activer l'extension **Spatial Analyst** :

- Customize | Extensions...

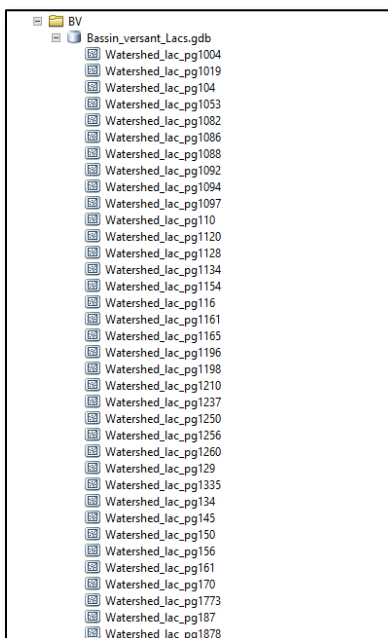


2) Spécifier les paramètres demandés et cliquer sur OK.





- 3) Récupérer dans le dossier spécifié au paramètre **Folder Location**, les bassins versants créés. Il seront dans la file geodatabase nommée **Bassin\_versant\_Lac.gdb** situé dans un sous-dossier nommé **BV**.

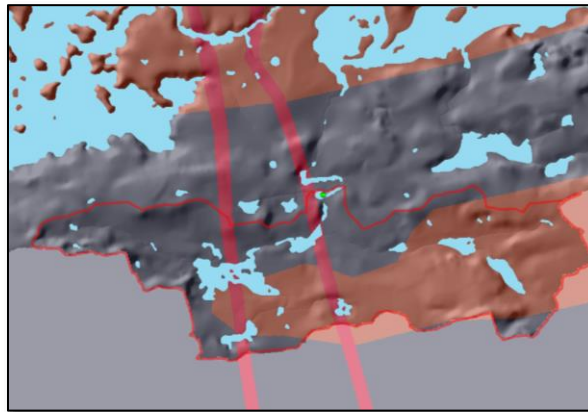


En plus des bassins versants calculés pour chacun des lacs échantillonnés les données géospatiales suivantes se retrouveront aussi dans la File geodatabase :

- **flow\_direction** : Le résultat du Flow direction obtenu à partir du DEM hydro cohérent. Vérifier qu'il a bel et bien que 8 valeurs pour s'assurer de la cohérence des bassins versant créé.
- **Echantillon\_ZoneEtude\_SpatialJoin\_Lacs** : Le résultat du joint spatial entre les échantillons et les lacs. On y retrouve le champ *ID\_Lac* qui lui se retrouve dans les bassins versants créé.

#### Étape #4 : Extraction de la géologie dominante par bassin versant

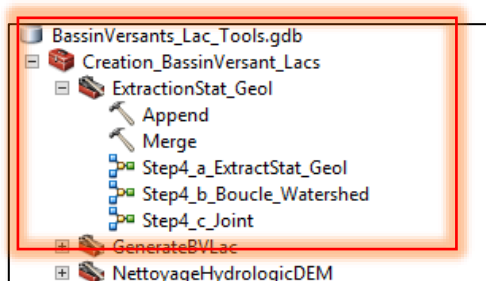
L'étape #4 vise à identifier quelle est la géologie dominante présente dans le bassin versant de tous les lacs échantillonnés.



#### Boîte à outils permettant d'extraire la géologie

Une boîte à outils a été développée et permet de réaliser l'extraction de la géologie a été développée. Cette boîte à outils se nomme **Creation\_BassinVersant\_Lacs** et se trouve dans une file geodatabase nommée *BassinVersants\_Lac\_Tools.gdb*.

Le *Toolset ExtractionStat\_Geol* contient l'outil pour réaliser l'extraction de la géologie et identifier la géologie dominante pour un bassin versant.



#### Modèle des outils modélisation de l'extraction de la géologie

Les figures suivantes présentent le modèle constituant l'outil principal et le modèle décrivant la partie où une boucle est réalisée.

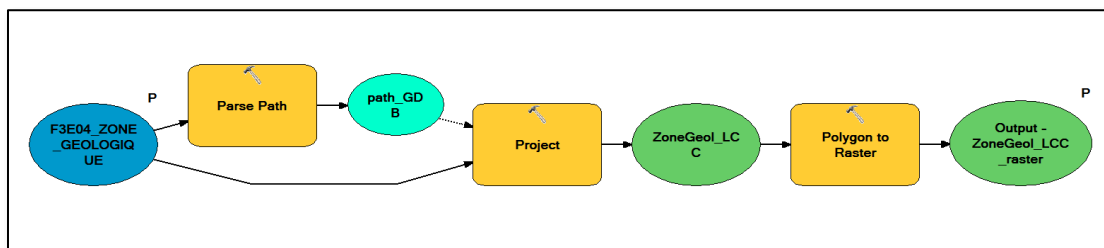


Figure 0-5 : Step4\_a\_ExtractStat\_Geol.

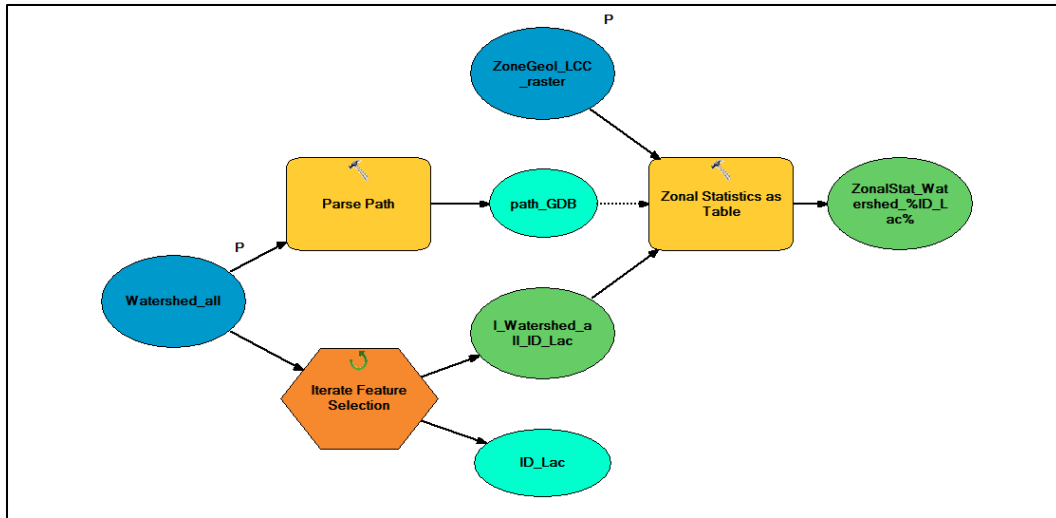


Figure 0-6 : Step4\_b\_Boucle\_Watershed

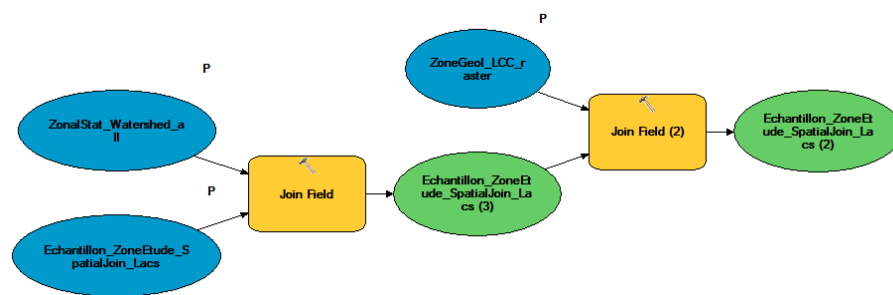
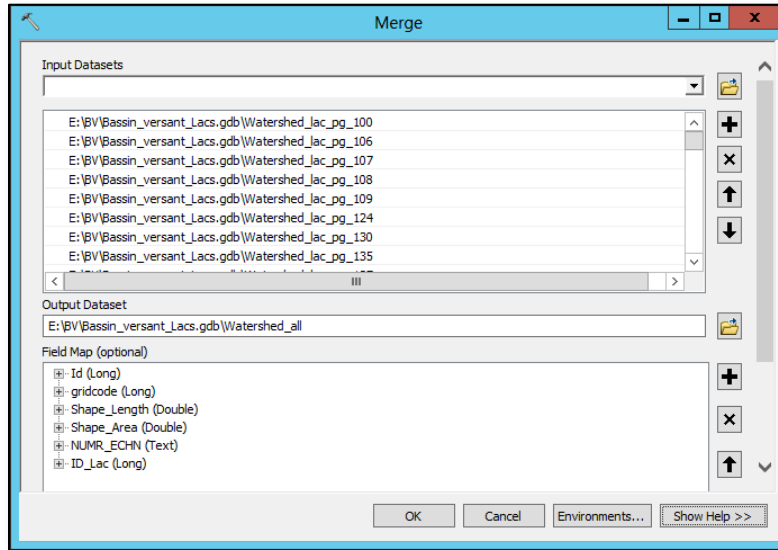


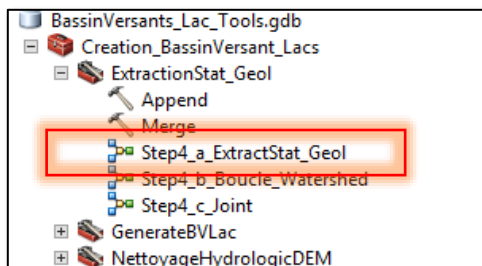
Figure 0-7 : Step4\_c\_Joint

## Utilisation de l'outil

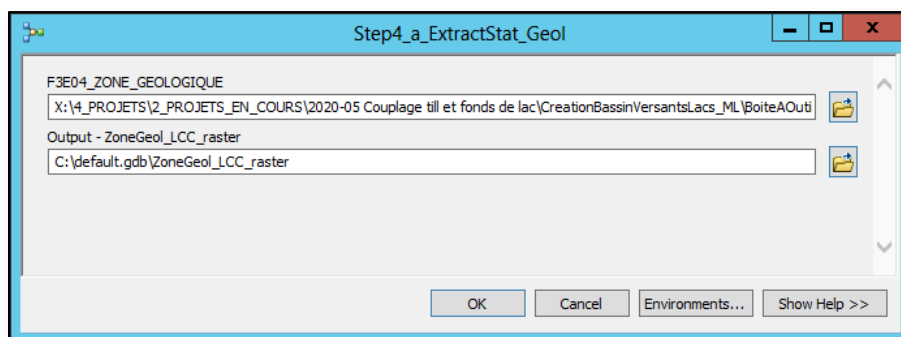
- 1) Avant d'utiliser l'outil, vous devez utiliser l'outil **Merge** pour fusionner tous les bassins versants obtenu à l'étape #2. Nommer le résultat **Watershed\_all**



- 2) Lancer l'outil **Step4\_a\_ExtractStat\_Geol** en double cliquant

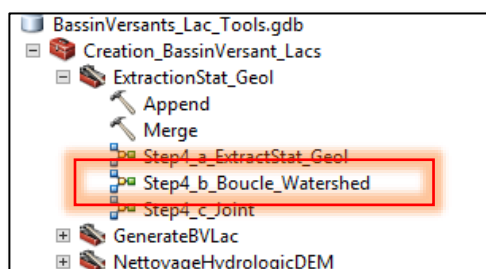


- 3) Spécifier les paramètres demandés et cliquer sur OK.

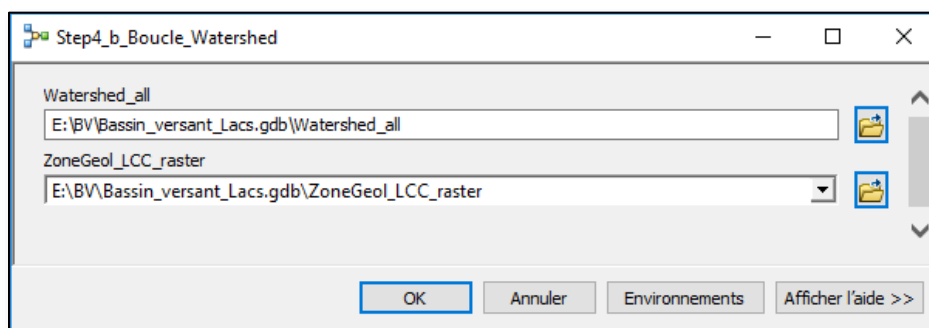


**NB.** Le deuxième paramètre est une données géospatiale de sortie (output). Vous devez spécifier l'endroit où il sera sauvegardé. Nous vous suggérons de l'enregistrer dans le GDB contenant les bassins versants (**Bassin\_versant\_Lac.gdb**)

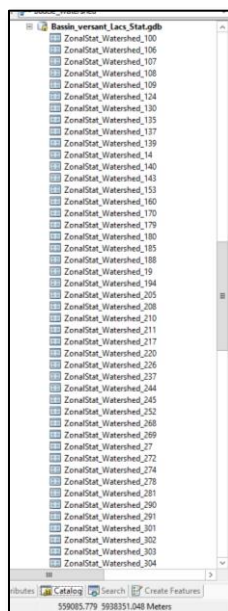
- 4) Lancer l'outil **Step4\_b\_Boucle\_Watershed** en double cliquant.



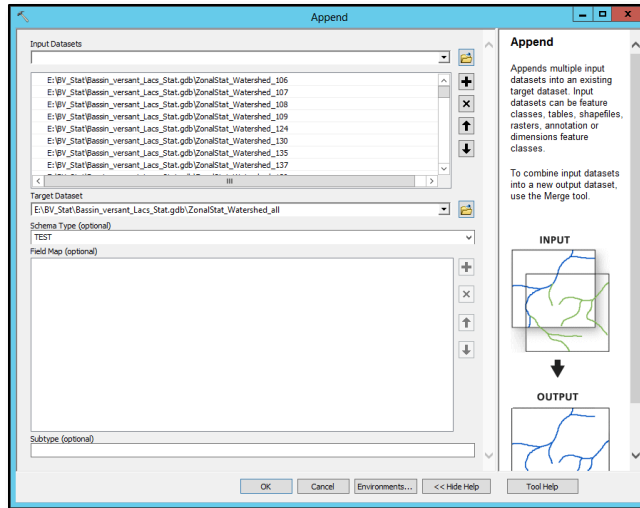
- 5) Spécifier les paramètres et cliquer sur OK



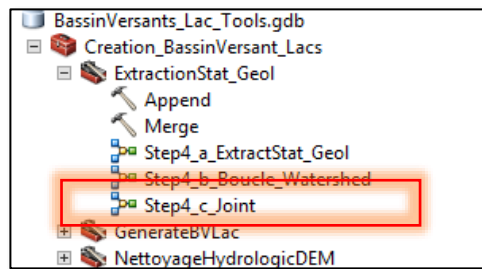
- 6) Une table statistique va être créée par bassin-versant dans la même geodatabase où se trouvait le **Watershed\_all**.



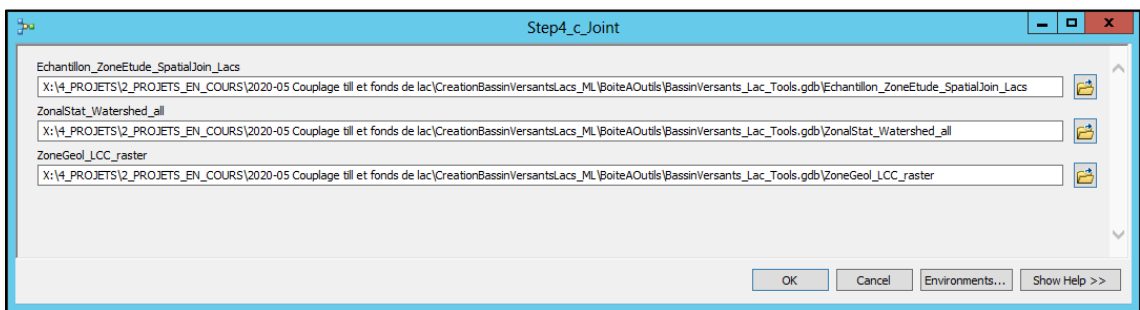
- 7) Pour fusionner toutes les tables, copier d'abord la première table et renommer cette table **ZonalStat\_Watershed\_all**. À l'aide de l'outil **Append**, ajouter toutes les autres tables à la table **ZonalStat\_Watershed\_all**. Choisir le **Schema Type TEST**.



8) Lancer l'outil **Step4\_c\_Joint** en double cliquant.



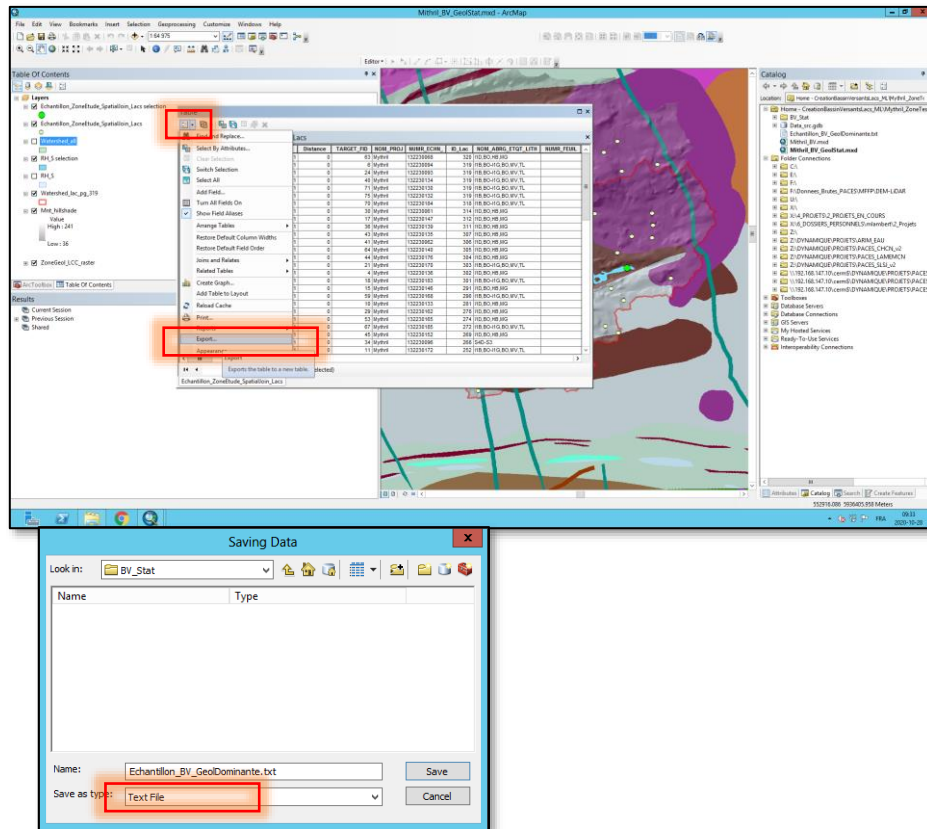
9) Spécifier les paramètres et cliquer sur OK.



10) La classe d'entités géospatiales **Echantillon\_ZoneEtude\_SpatialJoin\_Lacs** va maintenant contenir la géologie dominante du bassin versant du lac échantillonné.



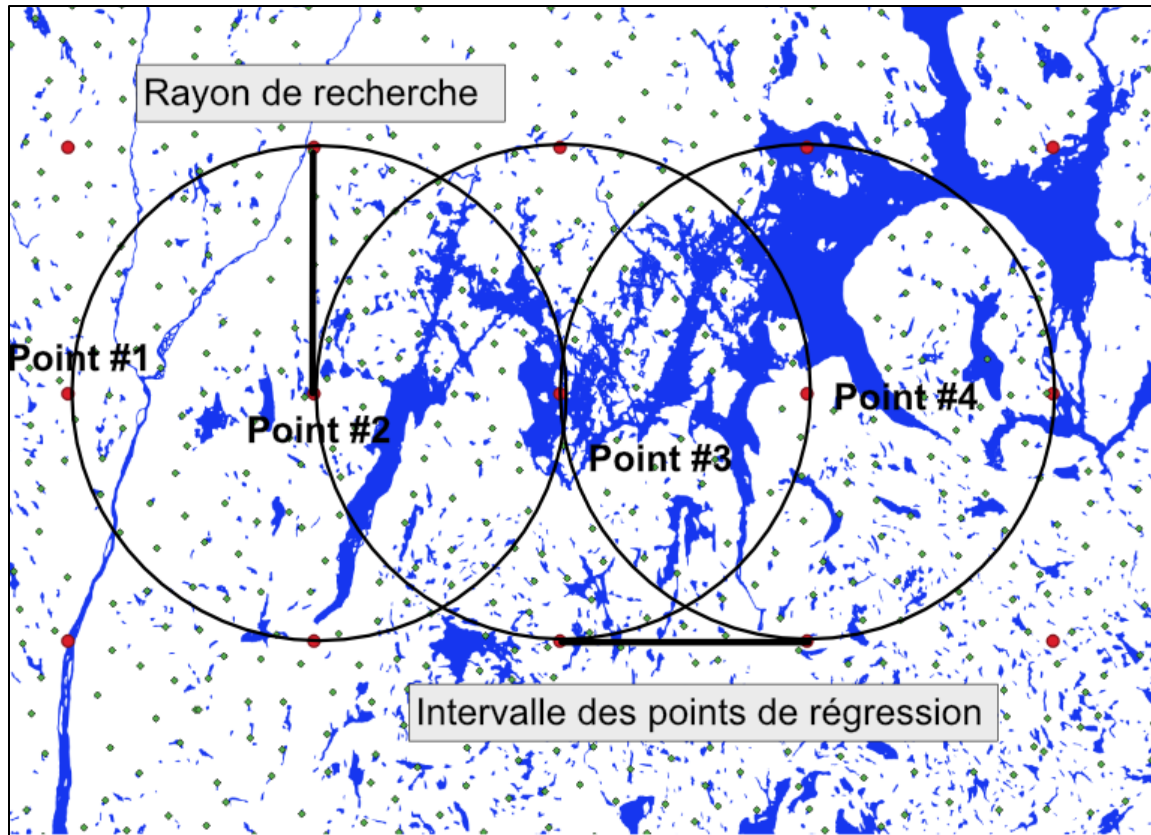
- 11) Exporter la table **Echantillon\_ZoneEtude\_SpatialJoin\_Lacs** dans un format *Texte* (.txt) à partir de l'outil **Export...**



- 12) Ouvrir ce fichier .txt créé dans Excel (*File | Open*)

## ANNEXE 2 : REHAUSSEMENT D'ANOMALIES DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC PAR REGRESSION SPATIALE

Procédure pour le traitement de la géochimie de l'environnement secondaire par régression spatiale



Par : Jérôme Lavoie, Ing., M.Sc.A.  
Scientifique de recherche, CONSOREM  
O.I.Q. #127 127  
Juillet 2020

## **Table des matières**

<u>Table des matières</u>	178
<u>1- Introduction</u>	179
<u>2- Procédure</u>	182
<u>2.1 - Étape 1 : Nivellement des éléments</u>	182
<u>2.2 - Étape 2 : Qualité analytique</u>	183
<u>2.3 – Étape 3 : Transformation des données en logarithme naturel</u>	185
<u>2.4 - Étape 4 : Paramètres de la régression spatiale et utilisation de l'outil logiciel</u>	185
<u>2.5 - Étape 5 : Calcul en centiles et sélection des anomalies</u>	187
<u>3- Conclusion et livrable</u>	187
<u>Références</u>	188

## 1- Introduction

La procédure pour effectuer le traitement statistique de la géochimie de l'environnement secondaire par régression spatiale telle que développée au CONSOREM peut être difficile à maîtriser. Plusieurs membres ont donc demandé que cette procédure soit consignée dans un document écrit qui assurerait la pérennité de son utilisation. Ce document est un résumé de la procédure à suivre qui est basée sur la méthode développée dans le cadre des projets CONSOREM 2004-09 et 2005-03 : « Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase I et II » (Trépanier, 2006; 2007). Ces deux projets ont été regroupés dans un outil de prototypage logiciel spécifiquement conçu : « *Outil de traitement de la géochimie de l'environnement secondaire* ». Il est bon de mentionner que le logiciel permet également de traiter la géochimie de l'environnement secondaire par la méthode statistique U. De plus, les méthodologies développées dans le cadre du projet CONSOREM 2008-09 : « Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration » (Trépanier, 2009) ont également été intégrées dans cet outil (déplacement d'échantillons vers les ruisseaux modélisés les plus proches et calcul des bassins de drainage d'échantillons).

Cette méthode permet de rehausser le signal provenant des anomalies géochimiques par rapport aux autres signaux présents dans l'environnement secondaire. Selon Trépanier (2006), une façon alternative de considérer la géochimie de l'environnement secondaire est de supposer que chaque teneur en métal de chaque échantillon est formée de deux types de processus distincts : 1) des signaux géochimiques d'origine lithologique ou environnementale, variables selon les endroits, mais présents régionalement, et 2) un signal dû à d'éventuelles anomalies qui s'ajoute aux signaux précédents (**Figure 1**). Toujours selon Trépanier (2007), le principe de cette méthode est de prédire, pour chaque échantillon, la valeur « normale » que devrait avoir cet échantillon en un métal recherché (variable dépendante) à partir des autres éléments analysés de ce même échantillon (variables indépendantes). Pour y arriver, on utilise une fenêtre coulissante et un rayon de recherche pour calculer de multiples équations de régression qui permettent d'obtenir des tendances qui sont spécifiques à chaque secteur. Le choix par l'utilisateur des bons paramètres pour effectuer une régression spatiale adéquate dans l'outil logiciel CONSOREM « *Outil de traitement de la géochimie de l'environnement secondaire* » (**Figure 2**), doit être un compromis entre l'obtention d'un nombre d'échantillons suffisant et une évaluation des signaux géochimiques plus spécifiques à chaque contexte (Trépanier, 2007). Donc l'objectif principal de cette méthode de rehaussement d'anomalies est de séparer la composante « anomalie » des autres signaux du bruit de fond (*background*). Le lecteur peut se référer à ces deux rapports pour plus de détail sur la méthode.

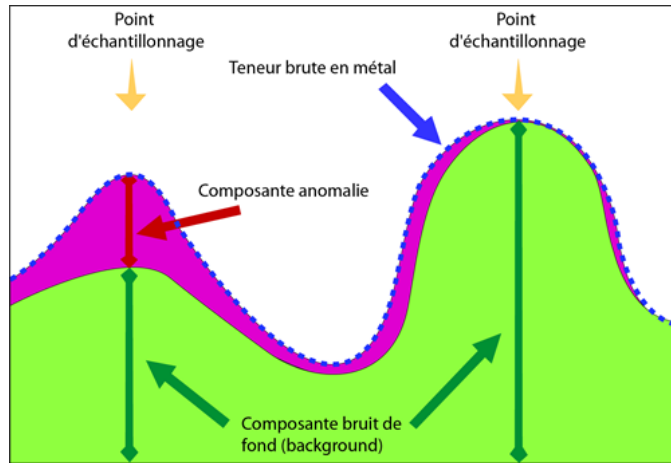


Figure 1 - Addition d'un signal anomal variable sur une composante d'origine lithologique/ environnementale variable. Tiré de Trépanier (2006). Modifié de <http://www.geochem.zip.com.au/Anomalies.htm>.

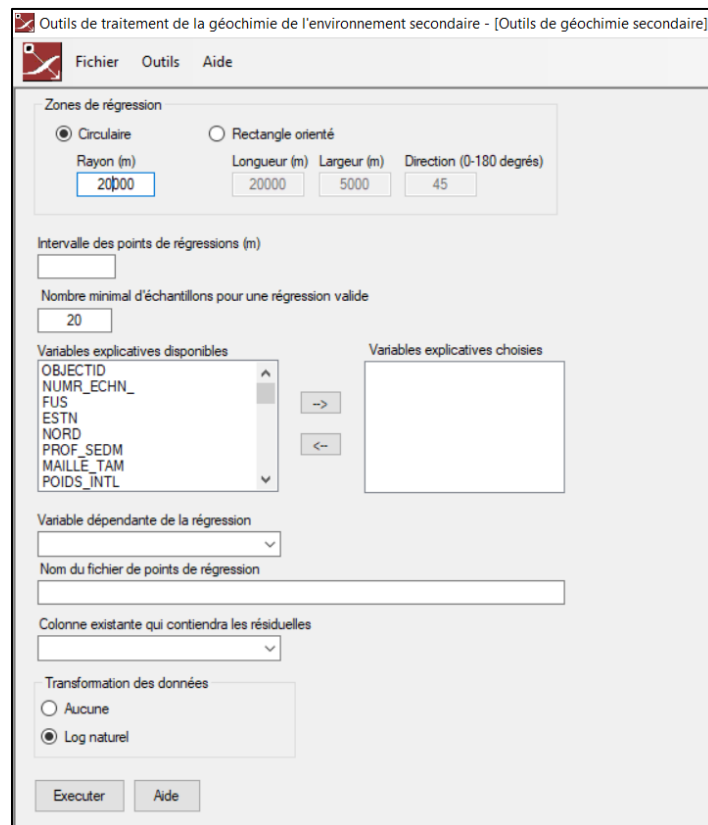


Figure 2 – Interface graphique (GUI) de l'outil logiciel CONSOREM « Outil de traitement de la géochimie de l'environnement secondaire ».

Selon Trépanier (2007), quelques conditions doivent s'appliquer pour être en mesure d'effectuer ce traitement statistique. Ces conditions sont :

- 1- Choisir des éléments suffisamment abondants dans la minéralisation par rapport à l'abondance dans la croûte pour former un signal anormal clair;
- 2- Choisir des éléments mobiles dans l'environnement secondaire pour former un signal détectable à une distance suffisante de la minéralisation;
- 3- Choisir des éléments analysés avec une bonne précision et ayant une bonne qualité analytique (c.-à-d. ayant une distribution normale ou log normal);
- 4- Choisir des éléments détectables par la méthode analytique;
- 5- Utiliser des méthodes de rehaussement, c.-à-d. un signal anormal qui est multiéléments et de combiner les résultats pour former un signal multiéléments représentatif d'un type de minéralisation précis.

La procédure décrite dans ce rapport est tirée d'un exemple de traitement effectué pour la Table régionale de Concertation minière (TRCM) du Saguenay-Lac-Saint-Jean sur les analyses et les réanalyses par ICP-MS (digestion partielle par *aqua-regia*) des sédiments de fond de lac de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (figure 3; Labbé, 2011; 2009).

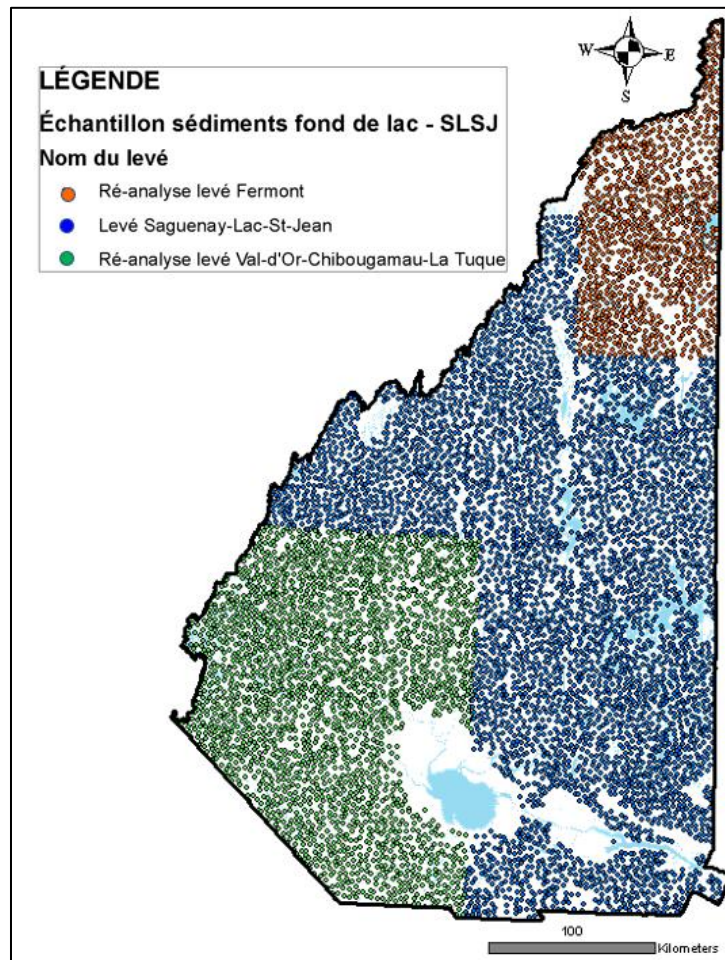


Figure 3 – Localisation des échantillons de sédiments de fond de lac par levé, région du Saguenay Lac-Saint-Jean (Labbé, 2011; 2009). N = 7 784 échantillons.



## 2- Procédure

Cette section explique en quelques étapes et en détail la procédure à suivre pour effectuer de manière optimale un traitement statistique par régression spatiale de la géochimie de l'environnement secondaire. Il est important de mentionner que pour obtenir une réponse statistique valide, la population traitée doit être assez élevée. De plus, pour que le traitement soit valide, il faut avoir un minimum d'échantillons dans la fenêtre coulissante du calcul de régression spatiale (l'outil logiciel paramètre 20 échantillons pour un rayon de cercle de 20 km par défaut). Pour savoir si le modèle de régression spatiale utilisé est correct, un graphique binaire entre la valeur prédite et observée peut être construit avec le fichier format *shapefile* généré d'un élément en particulier une fois la régression spatiale effectuée. Si le bon modèle de régression a été utilisé (rayon de la fenêtre coulissante, intervalle de points de régression et nombre minimal d'échantillons pour une régression valide), les points sur le graphique devraient former une ligne droite (figure 4).

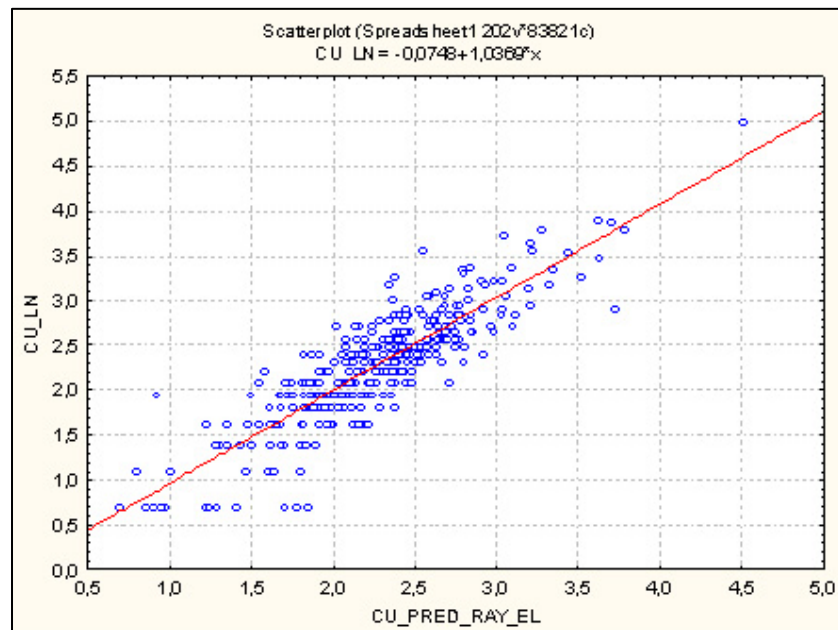


Figure 4 - Régression spatiale : exemple de relation linéaire entre la valeur prédite (x) et observée (y) pour un point de régression quelconque, indiquant un modèle de régression approprié. Tiré de Trépanier (2007).

### 2.1 - Étape 1 : Nivellement des éléments

Dans un premier temps, il est primordial de vérifier si un ou des éléments chimiques qui seront utilisés dans le traitement ont besoin d'être nivelés. Dans notre cas, puisque ces données proviennent de nouvelles analyses ou sont des réanalyses, le nivellement n'est pas nécessaire.

Pour vérifier si un ou des éléments a ou ont besoin de subir un nivellement, le lecteur peut se référer à la **section 3 et l'annexe II** du rapport CONSOREM 2004-09 (Trépanier, 2007). Ce rapport explique en détail la méthodologie de nivellement entre 2 levés ou un nivellement multiple entre plusieurs levés ainsi que le fonctionnement de l'outil logiciel CONSOREM « *Geochemical Surveys Leveling* ».

## 2.2 - Étape 2 : Qualité analytique

La qualité analytique d'un élément est définie selon les critères de Trépanier (2007) dans le cadre du projet CONSOREM 2004-09. Les données doivent rassembler les deux conditions suivantes: 1) suivre une distribution normale ou log normal (**Figure 5**); et 2) pour un élément analysé, moins de 20 % des échantillons (<20 %) doivent être sous la limite de détection (*LOD*). Le calcul de la qualité analytique des éléments dans les levés ne considère donc pas les échantillons pour lesquels les analyses n'ont pas été faites (*NULL*). Il est alors important de sélectionner seulement les analyses sans valeurs « *NULL* ». Dans notre cas, 936 réanalyses ont été conservées du levé Fermont (#1987050), 2 339 réanalyses ont été conservées du levé Val-d'Or - La Tuque - Chibougamau (#2008082) et 4 515 analyses ont été conservées du nouveau levé Saguenay - Lac-Saint-Jean (#2010511), pour un total de 7 784 analyses et réanalyses. Une fois les analyses sélectionnées, il faut remplacer les valeurs sous la limite de détection par la valeur absolue de la demie de la limite de détection (équation 1) :

$$\text{Équation 1 : } LOD = | LOD | / 2.$$

Il n'est pas nécessaire de vérifier la qualité analytique de tous les éléments analysés dans la base de données SIGEOM. Seulement les éléments qui seront utilisés comme variables dépendantes (**Tableau 1**; As-Co-Cu-La-Mo-Ni-U-Y-Zr) et les éléments qui seront utilisés comme variables indépendantes, et ce, selon le type de minéralisation recherché (**Tableau 2**; Al-Ba-Ca-K-La-Mg-Mn-P-Ti-U-V). Pour éviter de diminuer les valeurs des anomalies dans le cas de plusieurs éléments associés à un même type de minéralisation, il suffit de soustraire un groupe d'éléments du groupe de variables explicatives de la régression multiple. Par exemple, pour cibler des amas sulfurés à Ni-Cu-Co ± EGP associés à du plutonisme mafique et ultramafique, nous soustrayons les éléments Ni-Cu-Co de la liste d'éléments (**Tableau 1**). Les éléments qui ont été soustraits des régressions pour les 5 types de minéralisation recherchés dans le cadre de cette étude sont présentés au **Tableau 1**. Le lecteur peut se référer au rapport CONSOREM 2005-03 (Trépanier, 2006) pour plus d'explications sur les variables dépendantes et les variables indépendantes.

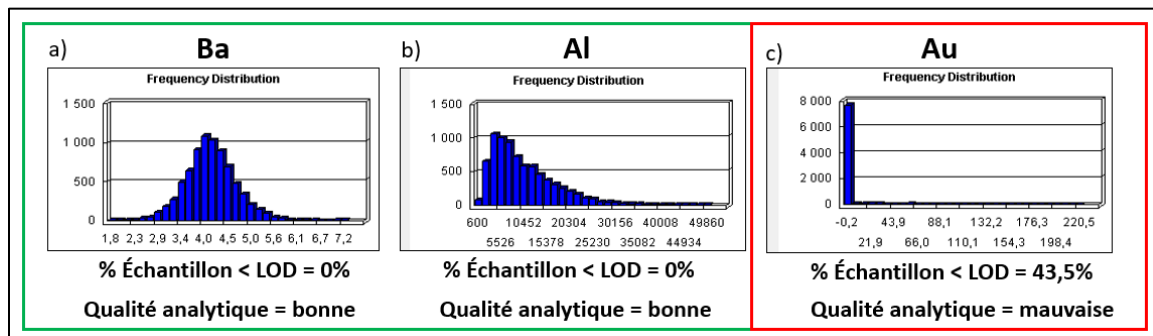


Figure 5 – Exemple de qualité analytique de 3 éléments. a) Barium, b) Aluminium et c) Or. Les deux premiers éléments (a et b) ont une bonne qualité analytique avec une distribution normale (Ba) ou log normal (Al) et aucune analyse n'est sous la limite de détection (LOD). Tandis que le troisième élément (c), l'or, a une mauvaise qualité analytique en raison de sa mauvaise distribution et ses 43,5 % d'analyses sous la limite de détection (LOD).

Tableau 1 – Type de minéralisation, critère pour les anomalies sélectionnées et éléments chimiques soustraits des variables explicatives.

ID	Type de minéralisation	Minéralisation	Critère Projet TRCM	Éléments chimiques soustraits
1	Gîtes du plutonisme mafique et ultramafique	Ni-Cu ± Co ± EGP	Ni ≥ 93e centile ET Cu ≥ 93e centile ET Co ≥ 93e centile	Ni-Cu-Co
2	Gîtes du plutonisme alcalin (métaux rares)	Y-Zr-Nb-Ta-Be-Li-REE ± Mo ± U ± Th ± Cs ± Rb	Zr ≥ 85e centile ET (Y ≥ 85e centile OU La ≥ 85e centile)	La-Mo-Nb-U-Y-Zr
3	Gîtes du plutonisme intermédiaire à felsique: Porphyre à Cu-Au-Mo	Cu-Au-Mo ± Ag	Cu ≥ 95e centile ET Mo ≥ 95e centile	Cu-Mo
4	Gîtes du plutonisme intermédiaire à felsique: Fe-oxydes Cu-Au-U (IOCG)	Cu-Au-U-REE	Cu ≥ 98e centile ET (U ≥ 98e centile OU La ≥ 98e centile)	Cu-La-Nb-U-Y-Zr
5	Gîtes d'or orogénique	Au-As	As ≥ 98e centile	As

Tableau 2 – Variables explicatives utilisées selon la variable dépendante conservée selon le type de minéralisation recherché pour effectuer le calcul de la régression spatiale avec l'outil logiciel CONSOREM « Outil de traitement de la géochimie de l'environnement secondaire ».

ID	Type de minéralisation	Variable dépendante	Variables explicatives
1	Gîtes du plutonisme mafique et ultramafique	Ni	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, P, Ti, U, V
		Cu	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, P, Ti, U, V
		Co	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, P, Ti, U, V
2	Gîtes du plutonisme alcalin (métaux rares)	Zr	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
		Y	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
		La	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
3	Gîtes du plutonisme intermédiaire à felsique: Porphyre à Cu-Au-Mo	Cu	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V
		Mo	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V
4	Gîtes du plutonisme intermédiaire à felsique: Fe-oxydes Cu-Au-U (IOCG)	Cu	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
		U	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
		La	Al, Ba, Ca, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V
5	Gîtes d'or orogénique	As	Al, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V

### 2.3 – Étape 3 : Transformation des données en logarithme naturel

Différents tests effectués *a posteriori* permettent de conclure que l'utilisation d'une régression linéaire multiple avec les valeurs brutes transformées en logarithmes naturels est appropriée (LN). L'outil logiciel donne le choix d'utiliser les valeurs brutes ou de transformer les données en logarithme naturel (figure 3) ou l'utilisateur peut lui-même transformer les valeurs brutes en logarithme naturel dans un logiciel GIS au préalable. Il est important de mentionner que selon Trépanier (2007), l'utilisation des valeurs brutes transformées en logarithmes naturels pour effectuer les régressions est fortement recommandée et elle a l'avantage très net d'obtenir une régression qui est valide au niveau statistique. Par contre, l'utilisation des valeurs transformées en logarithme naturel a un effet pervers sur certains résultats. Toujours selon Trépanier (2007), il est extrêmement important de tenir compte du fait que des valeurs brutes très faibles (p. ex. 1 ppm Cu) peuvent obtenir des valeurs résiduelles élevées sur une courbe de régression. Il est donc recommandé, lors du choix des anomalies et sauf si l'on a de bonnes raisons de ne pas le faire, **de fixer un seuil minimum sur la valeur brute de l'échantillon pour considérer qu'une valeur résiduelle élevée puisse être une anomalie**. Ceci permettra alors d'éviter de s'intéresser aux résiduelles élevées de valeurs très basses (fausse anomalie). Dans l'exemple de traitement effectué dans le cadre de l'étude, la médiane des valeurs brutes de chaque élément a été utilisée comme seuil minimum sur la valeur brute d'une analyse pour considérer qu'une valeur résiduelle soit retenue comme une anomalie potentielle (**Tableau 3**). La distribution des données pour vérifier la qualité analytique, décrite à la section 2.2, peut également se faire sur les données transformées en logarithme naturel.

**Tableau 3** –Médianes des valeurs brutes de chaque élément utilisé pour le traitement.

Élément	Médiane (ppm)
As	0,50
Co	4,10
Cu	11,19
La	26,00
Mo	1,05
Ni	9,60
U	0,80
Y	8,54
Zn	52,15
Zr	0,20

### 2.4 - Étape 4 : Paramètres de la régression spatiale et utilisation de l'outil logiciel

L'outil logiciel CONSOREM n'accepte que des fichiers de format .SHP (*Shapefile* ESRI). **Il est très important de s'assurer que la projection de la couche en entrée soit en UTM (mètre) pour que l'outil logiciel puisse fonctionner**. L'utilisateur peut effectuer le traitement statistique sur les valeurs sans transformation (valeur brute) ou transformées en logarithme naturel. Il sera alors important de sélectionner la bonne colonne dans le fichier en entrée. **Une étape importante avant d'effectuer le traitement avec l'outil logiciel, est de créer au préalable dans le logiciel GIS les colonnes qui contiendront les résultats des valeurs résiduelles**. Les prochaines définitions proviennent de l'Aide en ligne de l'outil logiciel. Le lecteur peut également se référer à la **Figure 2** pour visualiser les paramètres dans l'interface graphique.

### 1- Rayon des régressions

Rayon utilisé pour sélectionner les échantillons participant à chaque régression, centré sur les points de régression (figure 6). La régression spatiale peut également être effectuée avec un rectangle orienté. Il faut alors définir la longueur (m), la largeur (m) et la direction (0-180 degré). Dans l'exemple de l'étude, un cercle avec un rayon des régressions de 20 km a été utilisé.

### 2- Intervalle des points de régression

Intervalle entre les points de régression successifs (figure 6). Les points de régression sont construits selon une grille régulière ayant cet espacement. Dans l'exemple de l'étude, l'intervalle des points de régression a été établi à 20 km.

### 3- Nombre minimal d'échantillons pour une régression valide

Fixe le nombre minimal d'échantillons pour qu'une régression autour d'un des points de régression soit valide. Un nombre minimal est nécessaire pour assurer que les résultats soient valides statistiquement. Dans l'exemple de l'étude, un nombre minimal de 20 échantillons a été fixé pour qu'une régression valide soit valide.

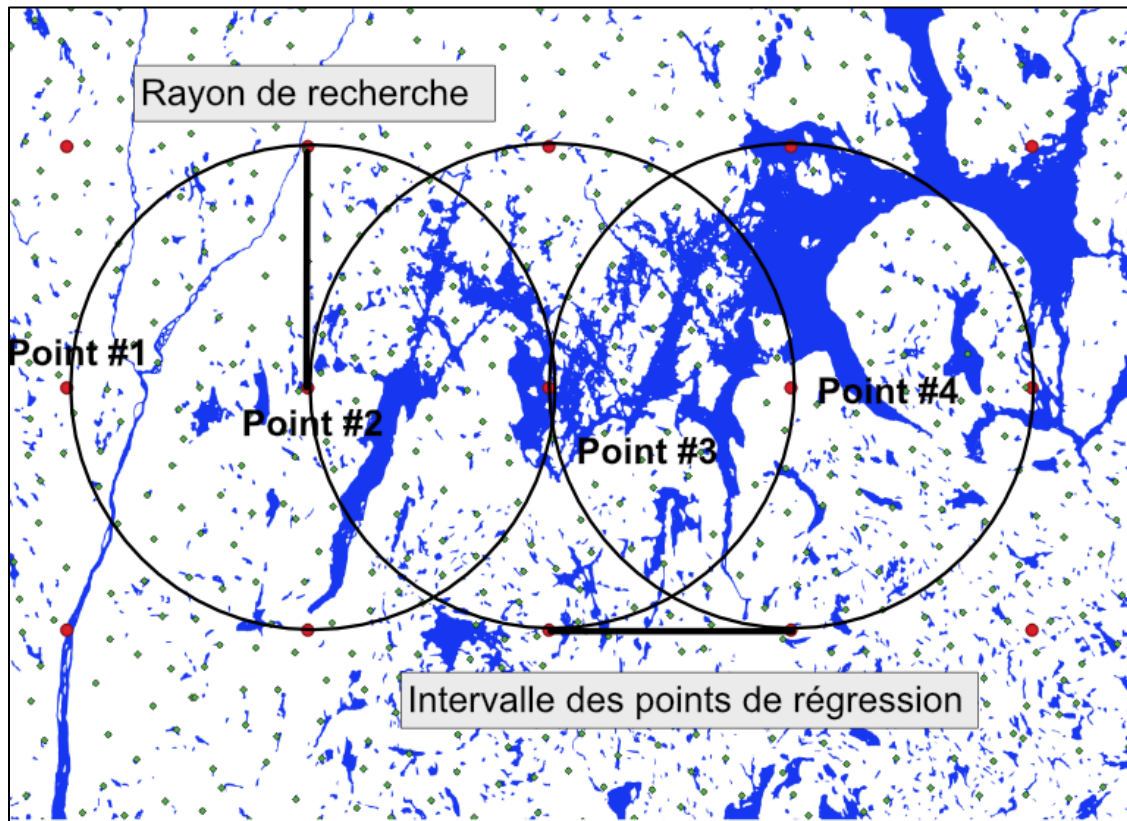


Figure 6 - Méthode de la régression spatiale : rayon de recherche et points de régression. Modifié de Trépanier (2007).

#### 4- Variables explicatives disponibles

Liste des variables numériques disponibles dans le fichier de points d'échantillons. L'utilisateur peut alors choisir les variables explicatives selon le type de minéralisation recherché.

#### 5- Variables dépendantes de la régression

La variable dépendante qui est choisie pour effectuer la régression spatiale (**Tableau 2**).

#### 6- Nom du fichier de points de régression

Le nom du fichier de points de régression qui sera produit. Ce fichier est produit dans le même répertoire que le fichier d'échantillons. Ce fichier contient les colonnes suivantes:

- 1- Une colonne numérique pour chaque variable explicative, qui correspond aux coefficients de l'équation de régression pour chaque point de régression ;
- 2- B: ordonnée à l'origine pour chaque point de régression ;
- 3- R2: coefficient de corrélation au carré de la régression pour chaque point de régression
- 4- N: nombre de points d'échantillons trouvés autour de chaque point de régression ;
- 5- Comment: commentaire sur le succès ou l'échec de la régression en ce point.

#### 7- Colonne existante qui contiendra les résiduelles

Le nom de la colonne **EXISTANTE** du fichier de points d'échantillons qui contiendra la valeur résiduelle de la régression spatiale. C'est la colonne de résultats.

#### 2.5 - Étape 5 : Calcul en centiles et sélection des anomalies

Une fois le traitement effectué pour chaque élément et pour chaque type de minéralisation recherché, les résultats peuvent être transformés en centiles. Les anomalies résiduelles peuvent alors être sélectionnées selon les critères prédéfinis par type de minéralisation recherché (**Tableau 1**).

#### 3- Conclusion et livrable

Ce rapport permet de synthétiser la procédure nécessaire afin d'effectuer rapidement un traitement statistique de la géochimie de l'environnement secondaire par régression spatiale. Cette procédure avait été demandée par les membres au cours de l'année 2018-2019 suite au traitement effectué sur les réanalyses des sédiments de fond de lac sur la zone d'étude du projet 2018-07 – « Potentiel Ni-Cu-Co  $\pm$  EGP au sein de la Province de Churchill » (Lavoie, 2019). Cette procédure constitue un livrable et pourra être distribuée aux membres du CONSOREM.



## Références

- Labbé, J.-Y. (2009). Nouvelles données géochimiques de sédiments de fond de lac dans la partie occidentale du Grenville québécois: secteurs de Val-d'Or, Chibougamau et La Tuque. MRNF. PRO 2009-03, 8 pages.
- Labbé, J.-Y. (2011). Nouvelles données géochimiques de sédiments de fond de lac au Saguenay-Lac-Saint-Jean. MRNF. PRO 2011-01, 12 pages.
- Lavoie, J. (2019). Potentiel Ni-Cu-Co ± EGP au sein de la Province de Churchill. Rapport préliminaire, Projet CONSOREM 2018-07, 76 pages.
- Trépanier, S. (2006). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport du projet CONSOREM 2005-03, 74 pages.
- Trépanier, S. (2007). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac. Rapport du projet CONSOREM 2004-09, 88 pages.
- Trépanier, S. (2009). Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration. Partie A : Modélisation des réseaux hydrographiques à partir de modèles numériques de terrain. Rapport, Projet CONSOREM 2008-09, 28 pages.