
ÉVALUATION DE L'EFFICACITE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE GEOCHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE

PROJET 2012-04

Par : Silvain Rafini
Janvier 2015



AVERTISSEMENT

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

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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

Rafini, S., 2015. Évaluation de l'efficacité des différentes techniques de géochimie de l'environnement secondaire. 2012-04, 36 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca

Site Web : www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Le CONSOREM a depuis une décennie consacré 9 projets à l'optimisation des méthodes de l'environnement secondaire pour l'exploration minière. Les principales méthodes (ou media) existantes comptent les sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux, les sols et les tills. Cet éventail ayant été traité, le projet 2012-04 se fixait comme mandat de comparer leur efficacité à travers de nouvelles analyses autant que par la synthèse des résultats des projets antérieurs. En particulier, la question de l'existence de sites de réception d'anomalies privilégiés pour chaque élément est abordée, autrement dit l'existence d'une méthode (till, sols, sédiments de ruisseaux ou de lacs) plus efficace pour une substance donnée.

Il a été établi à mi-parcours du projet que l'approche initialement envisagée ne permettrait pas d'atteindre les objectifs fixés. Cette approche privilégiait des comparaisons locales et ponctuelles de l'efficacité des différentes méthodes. Or, les observations faites durant la première partie de ce travail ont indiqué que cette efficacité (particulièrement pour les lacs et ruisseaux) est trop fortement conditionnée par les conditions hydrologiques, topographiques, météoriques et glaciaires locales pour que des observations ponctuelles puissent être généralisées. Il a par exemple été démontré que le réseau hydrographique est un facteur extrêmement critique pour l'aptitude des lacs à restituer le signal de minéralisations proximales. Plusieurs cas ont été présentés pour lesquels des lacs situés à moins de 500 m de gîtes importants ne restituaient pas d'anomalie du fait qu'ils n'étaient pas situés sur les mêmes réseaux de drainage, tandis que des lacs plus distaux mais en aval hydrographique étaient anomaux. L'inefficacité de cette méthode observée ponctuellement ne peut, pour autant, conduire à son invalidation d'une manière générale. Par ailleurs il est extrêmement difficile de trouver des levés locaux de densité comparable pour les méthodes tills et sols, qui n'ont pas de limite inférieure de maillage, et pour les méthodes ruisseaux et lacs reliées aux réseaux hydrographiques et donc tributaires de la disposition des lacs et des ruisseaux. Ceci génère un biais d'échantillonnage car l'homogénéité, même approximative, des mailles est une condition nécessaire à une comparaison statistique fiable de l'efficacité de ces quatre méthodes. L'efficacité des méthodes tills vs sols, et ruisseaux vs lacs a donc été analysée à deux échelles différentes, respectivement locale (gîte de La Grande Sud) et régionale (tout le Québec). Les résultats de l'analyse des levés régionaux sont particulièrement intéressants car établis sur un très grand nombre de données (levés nivelés) et donc statistiquement plus fiables et généralisables.

Deux types d'indicateurs statistiques de performance pour l'exploration minière ont été utilisés : le *contraste*, qui est simplement un rapport entre le pourcentage d'échantillons anomaux situés proche et loin des gîtes connus, et la *distance de doublement*, distance pour laquelle le pourcentage d'échantillons anomaux est le double de la normale, qui fournit une estimation du rayon d'influence des gîtes dans le medium considéré et pour la substance considérée.

Ces indicateurs de performance, calculés pour les sédiments de ruisseaux et de lacs, avec les données disponibles sur l'ensemble du Québec, indiquent que :

1. Les sédiments de ruisseaux sont systématiquement plus efficaces que les sédiments de lacs (métaux de base et précieux, tous traceurs confondus) ; ils sont très efficaces pour Cu, Ni, Zn, Pb ; les meilleurs traceurs aurifères dans les sédiments de ruisseaux sont As, suivi de Au et Sb (W, Se à proscrire) ;
2. Les sédiments de lacs ont de très faibles performances pour l'exploration aurifère, les meilleurs traceurs demeurent Sb et As (Au, W, Bi, Te sont à proscrire) ; ils sont efficaces pour l'exploration de Cu et Ni, moins efficaces pour Zn et inefficaces pour Pb (avant traitement) ;
3. Les minéralisations sont traçables dans les sédiments de ruisseaux et de lacs en moyenne jusqu'à 2-3 km (distance de doublement du taux d'échantillons anomaux) pour les métaux de base, et 1-2 km pour les traceurs aurifères (distance systématiquement deux fois plus grande pour As).

L'analyse de la performance des levés de tills et de sols pour l'exploration, établie par cette étude et les projets antérieurs (2010-05, 2011-05, 2011-06), permet d'affirmer que :

1. L'ordre d'efficacité pour l'exploration aurifère est le suivant : tills (grain d'or) > tills (fraction fine, As > Au et Sb) > sols (As, horizon C) ;
2. Au montre une très faible efficacité générale dans les sols (humus, horizon B et horizon C), bien que les niveaux de base observés dans l'humus soient généralement très hauts, ce qui témoigne uniquement de l'affinité de Au avec les ligands organiques ;
3. Les minéralisations en Pb et Zn sont bien restituées dans les sols (horizon C) tandis que Cu est moins efficace et Ni est totalement inefficace (noter que cet ordre d'efficacité est inverse de celui des sédiments de lacs) ;
4. Les levés de sols offrent un traçage toujours très proximal (< 1km), de même que les tills grain d'or (les tills fraction fine offrent un traçage légèrement plus distal) ;
5. Dans les sols, l'horizon C montre en toutes circonstances de meilleures performances pour l'exploration que les autres horizons.

La généralisation, le caractère universel de ces conclusions doit toutefois être jugé au regard de la répartition géographique des levés utilisés, pour chaque substance et pour chaque méthode testée. En particulier, le nombre et les caractéristiques des gîtes considérés peuvent varier, ainsi que la répartition spatiale des stations d'échantillonnage. Plus les levés et les gîtes utilisés dans le traitement statistique sont nombreux et géographiquement bien répartis, plus sont dilués les effets des facteurs « secondaires » susceptibles d'affecter l'efficacité des levés à l'échelle régionale (nature et épaisseur de la couverture glaciaire, climat et conditions de drainage, provinces géochimiques : bruit de fond régional causé par les grands ensembles géologiques), et plus les résultats sont fiables et généralisables. L'analyse critique des résultats obtenus dans cette étude nous indique que les comparatifs d'efficacité des sédiments de lacs et ruisseaux sont généralement fiables puisqu'une portion dominante des gîtes est située dans des zones couvertes par des levés des deux types, et que l'autre portion est géographiquement bien répartie. De plus, les comparaisons d'efficacité entre différentes substances, pour un même medium, sont fiables et généralisables étant donné que les gîtes de différentes substances montrent, à l'échelle du Québec, des distributions géographiques relativement proches (régions métallifères).

Enfin, les comparaisons d'efficacité des différents horizons du sol, ou encore des différents types d'échantillonnage de till (fraction fine, minéraux lourds, grains d'or) relèvent de l'analyse de compilations de plusieurs levés régionaux lors de projets antérieurs, et sont donc généralisables.

En revanche, la comparaison entre les *media sols* et *tills* relève d'observations ponctuelles (sur un secteur unique), la généralisation du résultat obtenu n'est donc pas établie. De plus, les comparaisons d'efficacité des *media lacs* et *ruisseaux* vs *sols* et *tills* n'ont pu être calculées car aucun levé ne permet de le faire en raison de l'incontournable biais d'échantillonnage décrit plus haut : une comparaison qualitative est livrée dans les tableaux récapitulatifs à titre indicatif. Quoiqu'il en soit ces deux couples de méthodes ne s'utilisent typiquement pas aux mêmes échelles, de sorte que leur comparaison n'est pas d'importance capitale.

Pour finir, le gain en efficacité offert par certaines méthodes de traitement introduites par le CONSOREM a pu être quantifié. La méthode de régression spatiale multiple (2004-09), procure une augmentation de 70% de la performance des sédiments de lacs pour Zn et 20% pour Cu (ces taux sont des minima). La méthode de rehaussement par densité d'anomalie introduite dans ce projet (comparable à la statistique U) offre des gains de performance pour les sédiments de ruisseaux variant entre 20 % et 105 % (Au).

TABLE DES MATIERES

Avertissement	ii
RÉSUMÉ	iii
Table des Matières	v
Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	ix
1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte du projet	1
1.2 Le transport des métaux dans l'environnement secondaire	3
1.2.1 Transport hydromorphique vs clastique	3
1.2.2 Ségrégation du signal métallique pendant le transport	4
1.3 Problématique	5
1.4 Discussion sur l'approche adoptée	6
2 Performances des sédiments de lacs et de ruisseaux sur l'ensemble du Québec	7
2.1 Données utilisées et traitement préalable	7
2.2 Méthode et indicateurs de performance utilisés	8
2.3 Performances globales des levés de sédiments de ruisseaux	10
2.4 Performances globales des levés de sédiments de fonds de lacs	13
2.5 Comparaison des performances des sédiments de ruisseaux et de lacs sur l'ensemble du Québec	15
3 Comparaison des performances des levés de tills et de sols pour l'exploration aurifère	16
3.1 Secteur de La Grande Sud	16
3.2 Travaux antérieurs sur les sols	18
4 Synthèse et conclusions	18
4.1 Synthèse des performances pour l'exploration aurifère	21
4.2 Synthèse des performances pour l'exploration des métaux de base	22
5 Références	24
Annexe	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Synthèse schématique des mécanismes de dispersion métallique dans l'environnement secondaire et des sites de réception classiques (modifiée de Rafini, 2012).....	1
Figure 2.	Profils schématiques de concentrations dans les sols différenciés, mis en perspective avec les mécanismes responsable de la ségrégation métallique (Rafini, 2012).....	6
Figure 3.	Localisation des sédiments de ruisseaux utilisés (bleu) et des gîtes cuprifères. Les gîtes symbolisés en rose sont ceux autour desquels des échantillons de ruisseaux sont disponibles à moins de 5 km (446 gîtes, 22 513 échantillons).....	8
Figure 4.	Illustration du diagramme de dispersion des anomalies utilisé comme évaluateur de performances. Exemple fictif.....	9
Figure 5.	Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.....	10
Figure 6.	Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes zincifères considérés.....	11
Figure 7.	Couvertures de sédiments de fonds de lacs utilisées dans cette étude (Sigéom 2012) et dans le projet 2004-09.....	13
Figure 8.	Répartition des points d'échantillonnage des différentes méthodes dans le secteur de La Grande Sud. Données du Sigéom 2012 et de Mines Virginia.....	16
Figure 9.	Sélection des échantillons situés dans les cônes de dispersion glaciaire en aval des gîtes connus.....	17
Figure 10.	Diagramme de dispersion obtenu à La Grande Sud. Comparatif des différentes méthodes. ML : levé de till, analyse des minéraux lourds ; FF : levé de till, analyse de la fraction fine ; HorB : levé de sol dans l'horizon B.....	18
Figure A-1.	Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes zincifères considérés.....	25
Figure A-2.	Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.....	26
Figure A-3.	Dispersion des anomalies de Pb dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte plombifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes plombifères considérés.....	26
Figure A-4.	Dispersion des anomalies de Ni dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélicifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes nickélicifères considérés.....	27
Figure A-5.	Dispersion des anomalies de Ni/Cr dans les sédiments de ruisseaux. <i>n</i> indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélicifère), <i>n gîtes</i> indique le nombre de gîtes nickélicifères considérés.....	27

Figure A-6.	Dispersion des anomalies de Au dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	28
Figure A-7.	Dispersion des anomalies de As dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	28
Figure A-8.	Dispersion des anomalies de W dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	29
Figure A-9.	Dispersion des anomalies de Mo dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	29
Figure A-10.	Dispersion des anomalies de Sb dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	30
Figure A-11.	Dispersion des anomalies de Bi dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	30
Figure A-12.	Dispersion des anomalies de Se dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	31
Figure A-13.	Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), n gîtes indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.....	31
Figure A-14.	Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), n gîtes indique le nombre de gîtes zincifères considérés.....	32
Figure A-15.	Dispersion des anomalies de Ni dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélifère), n gîtes indique le nombre de gîtes nickélifères considérés.....	32
Figure A-16.	Dispersion des anomalies de Pb dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte plombifère), n gîtes indique le nombre de gîtes plombifères considérés.....	33
Figure A-17.	Dispersion des anomalies de As dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	33
Figure A-18.	Dispersion des anomalies de Au dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	34

Figure A-19. Dispersion des anomalies de Bi dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	34
Figure A-20. Dispersion des anomalies de Sb dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	35
Figure A-21. Dispersion des anomalies de Se dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	35
Figure A-22. Dispersion des anomalies de Te dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	36
Figure A-23. Dispersion des anomalies de W dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Projets CONSOREM consacrés à l'environnement secondaire.....	2
Tableau 2.	Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes de métaux de base.....	11
Tableau 3.	Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes aurifères.	12
Tableau 4.	Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes aurifères-cuprifères.	13
Tableau 5.	Performances des sédiments de fonds de lacs pour l'exploration de gîtes Ni, Cu et Zn. Deux méthodes de nivellement sont comparées ici : la méthode des centiles locaux (centloc) utilisée dans cette étude, et la méthode de nivellement par bandes (_niv) de Trépanier (2007). Les résultats du traitement par régression spatiale (_res) ont été aussi analysés pour comparaison.....	14
Tableau 6.	Synthèse des performances des sédiments de fonds de lacs pour l'exploration des gîtes aurifères.	15
Tableau 7.	Comparaison des contrastes obtenus pour les deux méthodes.....	15
Tableau 8.	Synthèse Au. (1) Cette étude ; (2) Trépanier, 2007 (Projet CONSOREM 2004-09) ; (3) Rafini, 2012 (Projet CONSOREM 2011-06) ; (4) Trépanier, 2011 (Projet CONSOREM 2010-05) ; (5) Trépanier, 2012 (Projet CONSOREM 2011-05) ; DA : rehaussement par densité d'anomalie (méthode développée dans cette étude, sensiblement identique à la « statistique U »).....	22
Tableau 9.	Synthèse métaux de base. (1) Cette étude ; (2) Trépanier, 2007 (Projet CONSOREM 2004-09) ; (3) phyllo : rehaussement par normalisation sur indice de teneur en phyllosilicates (Projet CONSOREM 2011-06 ; Rafini, 2012) ; (4) RN : rehaussement par réseaux neuronaux (Projet CONSOREM 2010-05 ; Trépanier, 2011) ; Al : rehaussement par normalisation sur Al (Projet CONSOREM 2010-05 ; Trépanier, 2011).....	23

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du projet

Aux stades précoces d'exploration, c.-à-d. typiquement pour les travaux précédents le forage tels que la reconnaissance régionale ou à l'échelle de la propriété, l'exploration minière consiste essentiellement à rechercher l'expression géochimique ou géophysique superficielle, directe ou indirecte, des gîtes invisibles enfouis sous la couverture sédimentaire ou dans le socle rocheux. Les levés de géophysique et de géochimie de surface constituent donc à ce stade deux avenues essentielles qui, prises individuellement ou combinées, serviront à la définition des cibles de forage.

Si les signatures géophysiques des gîtes métallifères peuvent être considérées comme directes en ce qu'elles sont le plus souvent générées directement par l'objet convoité, leurs signatures géochimiques superficielles sont dans la plupart des cas indirectes, et forment des anomalies métalliques transportées depuis la source vers différents sites de réception de l'environnement secondaire par des processus de natures variées : glaciaire, hydrogéologique, hydrologique, érosive, pédologique, etc. Ces processus sont synthétisés à la **Figure 1**.

Notons que les gîtes affleurant constituent une configuration distincte puisque le signal géochimique y est *a priori* peu ou pas transporté, les anomalies de l'environnement secondaire se formeront sur la minéralisation ou en aval hydraulique direct.

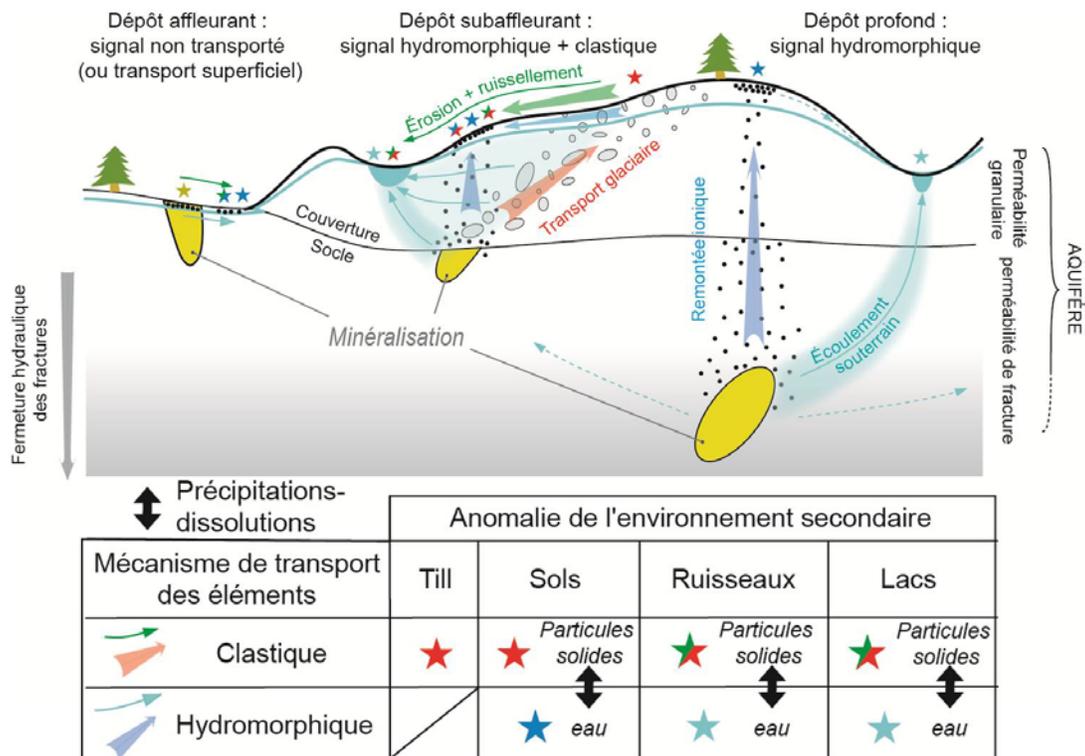


Figure 1. Synthèse schématique des mécanismes de dispersion métallique dans l'environnement secondaire et des sites de réception classiques (modifiée de Rafini, 2012).

La **Figure 1** illustre les principaux sites de réception des anomalies métalliques dans l'environnement secondaire. À chacun de ces sites est associée une méthode spécifique d'exploration de la géochimie de l'environnement secondaire, toutes ayant fait l'objet de projets de recherche ciblés au CONSOREM :

- Les sédiments de fonds de lacs, qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2004-09 et 2005-03;
- Les sédiments de ruisseaux, qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2008-09 et 2009-02;
- Les sédiments glaciaires (till), qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2001-04, 2010-05 et 2011-05;
- Les sols, qui ont fait l'objet des projets CONSOREM 2010-07 et 2011-06.

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

Le **Tableau 1** présente l'ensemble des projets du CONSOREM consacrés à la géochimie de l'environnement secondaire.

Tableau 1. Projets CONSOREM consacrés à l'environnement secondaire.

Méthode	# projet	Titre projet
Sédiments de lacs	2004-09	Identification de domaines géochimiques
	2005-03	Identification de domaines géochimiques et génération de cibles d'exploration – Phase 2
Sédiments de ruisseaux	2008-09	Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration
	2009-02	Rehaussement et interprétation des levés de sédiments de ruisseaux
Tills	2001-04	Ciblage de minéralisation par la dispersion glaciaire dans la Sous-province d'Abitibi
	2010-05	Optimisation des données de till pour l'exploration
	2011-05	Optimisation des données de till pour l'exploration, phase 2
Sols	2010-07	Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI : synthèse, études de cas, perspectives
	2011-06	Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts

Au terme d'une décennie de projets ciblés sur des méthodes spécifiques, il apparaît que les travaux réalisés ont permis de proposer plusieurs mesures concrètes et significatives visant à optimiser les usages et à améliorer l'efficacité des méthodes.

Ces mesures peuvent prendre plusieurs formes selon les projets et les thématiques abordées. Il s'agit dans certains cas de recommandations concrètes adressées aux praticiens concernant les modalités d'usage à privilégier, depuis échantillonnage jusqu'à l'interprétation des levés. Par exemple, en s'appuyant sur une comparaison de l'efficacité des différents horizons du sol pour la détection d'anomalies, le projet 2011-06 recommandait d'échantillonner les horizons profonds (B et C) plutôt que l'humus, et démontrait l'inefficacité de l'humus en dépit d'un très haut niveau de base aurifère. Ce haut

niveau de base aurifère, qui ne montre aucun lien avec la minéralisation, avait motivé dans le passé plusieurs levés régionaux dont l'efficacité était clairement ici remise en question. Un autre exemple est celui des projets 2010-05 et 2011-05 consacrés au till, qui établissent plusieurs recommandations précieuses dont l'usage devrait augmenter substantiellement l'efficacité de la méthode. Pour les métaux de base, le projet 2010-05 démontrait d'une part l'importance d'identifier la source du till par une analyse des cailloux contenus dans le till, afin de déterminer le caractère anomal ou non de sa composition métallique vis-à-vis d'un niveau de base adéquat. D'autre part, ce projet mettait en évidence le fort contrôle de la fraction argileuse du till sur les teneurs métalliques de la fraction fine et la nécessité de corriger ce facteur par une normalisation sur la teneur en aluminium. Pour l'or, le projet 2011-05 établissait que le décompte et la caractérisation des grains d'or sont nettement plus performants pour l'exploration que les mesures aurifères de la fraction fine ou des minéraux lourds, dont l'efficacité est fortement diminuée par les problèmes de reproductibilité inhérents à l'effet pépite. Pour les analyses de fraction fine et de minéraux lourds, les traceurs aurifères communs (As, Sb...) sont plus performants que l'or lui-même.

D'autres exemples de résultats remarquables obtenus dans les projets passés portent sur les méthodes de rehaussement des anomalies des levés régionaux. Plusieurs types de traitements, statistiques pour la plupart, ont été proposés, qui permettent une amélioration très significative de la détection des anomalies, notamment pour les levés de sédiments de lacs et de ruisseaux : méthode de régression spatiale (projets 2004-09 et 2005-03), méthode d'analyse des bassins versants (projets 2008-09, 2009-02), méthode « statistique U » qui peut être appliquée à tous media. Leur grande efficacité a été prouvée à plusieurs reprises dans des projets subséquents du CONSOREM.

Le travail présenté dans ce rapport a pour vocation de comparer l'efficacité des différentes méthodes qui ont été jusqu'ici abordées individuellement, de façon ciblée. Il s'agit dans une certaine mesure de synthétiser les tests de performance établis dans les projets passés individuellement sur chacune des méthodes. Toutefois, pour une comparaison convaincante, les performances devront être établies dans les mêmes secteurs, sur les mêmes gîtes/indices, ou tout du moins sur des levés de dimension semblable, formant des populations comparables en taille. Ces contraintes compliquent considérablement la méthodologie et s'avéreront extrêmement difficiles à traiter. Nous y reviendrons longuement.

1.2 Le transport des métaux dans l'environnement secondaire

1.2.1 *Transport hydromorphique vs clastique*

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

Il est important de noter que ces deux mécanismes de transport interviennent dans de nombreux cas naturels en combinaison (**Figure 1**), avec plusieurs séquences possibles incluant : anomalie primaire dans le till transportée dans un deuxième temps par ruissellement vers l'aval topographique jusqu'aux ruisseaux, possiblement par la suite fixée lors de la précipitation de minéraux secondaires (oxydes, argiles, carbonates), lesquels pourront être encore affectés par le transport clastique de fond de rivières lors d'épisodes de crues, etc. Cet exemple illustre les multiples possibilités d'interactions intervenant

dans le transport métallique en environnement secondaire, à l'origine des difficultés bien connues d'identification des dépôt-sources.

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

Enfin, on oppose en général les méthodes tills-sols et lacs-ruisseaux en rangeant les premières dans le transport clastique et les deuxièmes dans le transport hydromorphique. En pratique, il s'avère que ces catégories ne sont pas aussi tranchées : il est probablement fréquent que le transport métallique se produise en plusieurs étapes combinant des mécanismes des deux catégories, si bien que l'association d'une méthode avec un mécanisme de transport est quelque peu spéculative. On peut citer l'exemple de la fraction argileuse des sédiments de fonds de lacs – qui contient typiquement l'essentiel des métaux de base du sédiment – qui se décline souvent en 1) des argiles secondaires néo-formées, contenant des métaux transportés par hydromorphisme (notons qu'une proportion significative de ces métaux sera aussi fixée sur les oxy-hydroxydes de Fe-Mn amorphes, aussi néo-formés dans le sédiment) et 2) des argiles du till source transportées en suspension dans le réseau fluvial et contenant donc des métaux clastiques. Dans de nombreux cas, ruisseaux et lacs drainent en effet non pas la roche mais la couverture glaciaire si bien que les métaux contenus dans les sédiments de fonds de lacs ont subi d'abord un transport clastique, glaciaire, puis un transport clastique et/ou hydromorphique dans le réseau de drainage.

1.2.2 Ségrégation du signal métallique pendant le transport

Les différents mécanismes de transport évoqués ici s'accompagnent de modifications du signal primaire, en nature et intensité, qui leurs sont très spécifiques. Typiquement, le transport clastique induit une ségrégation mécanique, contrôlée par la dureté relative des minéraux, qui va significativement modifier la composition minérale des sédiments. Le broyage des minéraux de faible dureté renfermant les métaux (minéraux ferromagnésiens, sulfures...) engendre une redistribution du signal métallique vers les particules fines telle que le niveau de base métallique sera partiellement conditionné par la composante argileuse, donc par l'intensité du broyage et donc par la distance de transport. Ce phénomène a été documenté dans le till à l'occasion du projet 2011-05 (Trépanier, 2012). En revanche, le transport hydromorphique s'accompagne d'une ségrégation chimique du signal métallique dans laquelle les facteurs contrôlant sont la stabilité des minéraux métallifères et la mobilité des formes ioniques prises par les métaux lors de l'altération de ces derniers, dans les conditions Eh-pH des différents environnements traversés jusqu'au milieu de réception. Typiquement, le caractère labile de la plupart des sulfures fait que ceux-ci sont facilement déstabilisés, et le signal métallique libéré, transporté, puis fixé par adsorption ou précipitation secondaire (typiquement, oxy-hydroxydes Fe-Mn). Ceci peut se produire soit à l'échelle locale, entre les horizons d'un sol par exemple (mise en solution dans l'horizon elluvié Ae puis fixation dans l'horizon Bf sous-jacent), soit à une échelle plus régionale comme celle d'un aquifère ou d'un bassin versant. Ce phénomène vaut pour les métaux de base, il est par contre inopérant sur le signal aurifère puisque ce métal se trouve sous forme native, stable, très peu affectée par les réactions de lessivage dans les conditions superficielles de température et de pression. Ainsi, on peut avancer que le signal aurifère sera généralement de nature clastique tandis que les métaux de base ont une nette propension à se retrouver dans le signal hydromorphique (étant donné le caractère labile des sulfures), fixés sur le réseau cristallin des minéraux secondaires.

1.3 Problématique

Les différentes méthodes classiques d'exploration par la géochimie de l'environnement secondaire divergent considérablement par la nature des mécanismes de transport métallique (dispersion) impliqués, clastique et/ou hydromorphique, qui conditionne leur efficacité dans les différents contextes d'exploration.

Les contextes favorables à un usage efficace des différentes méthodes sont encore très mal définis. Par conséquent, plusieurs questions primordiales demeurent ouvertes :

- ➔ Pour une substance, un contexte géologique et une échelle d'observation donnés, quelles sont les méthodes les plus efficaces pour le traçage des minéralisations ?
- ➔ Sur quel ordre de grandeur de distance ce traçage est-il détectable, autrement dit quel est le rayon d'influence associé aux anomalies, pour chaque méthode ?

Ce qui se résume en une et une seule question névralgique :

- ➔ Quelles sont les combinaisons *élément-méthode* gagnantes pour l'exploration minière ?

Sur le plan théorique, la question peut être abordée de la façon suivante. L'efficacité des combinaisons *élément-méthode* est conditionnée par le fractionnement du signal métallique au cours du transport depuis le corps minéralisé jusqu'au site de réception qui sera échantillonné. Ce fractionnement se manifeste soit par une dilution soit par une augmentation (accumulation) de la teneur initiale dans le site de réception, et dépend essentiellement des facteurs suivants :

- la mobilité (stabilité) de l'élément dans les conditions Eh-pH au cours du transport et au site de réception,
- la stabilité et/ou la résistance à l'abrasion des phases minérales hôtes,
- les affinités de l'élément avec les phases présentes dans le site de réception (matière organique, argiles, oxydes).

Par exemple, l'humus est un site de réception dans lequel l'or a tendance à s'accumuler, probablement en raison de certaines affinités avec les composés humiques et fulviques présents. Cet aspect avait été documenté lors du projet 2011-06, dont les résultats indiquaient l'existence d'une corrélation entre la teneur aurifère et la teneur en matière organique de l'humus. Par conséquent, le niveau de base aurifère de l'humus est le plus souvent supérieur à celui des horizons pédologiques plus profonds (**Figure 2**). Ce même projet démontrait que, en dépit de cette faculté à accumuler le signal aurifère, l'humus n'est pas un site à privilégier en exploration car il ne montre pas d'augmentation substantielle de la teneur aurifère à proximité des gîtes (**Figure 2**). C'est l'horizon C, où l'or ne s'accumule pas « naturellement », qui montre la plus forte augmentation de la teneur aurifère proche des gîtes, et qui serait donc le site à privilégier pour la détection des anomalies. Bien que nettement supérieure à celle de l'humus, cette augmentation demeurait toutefois relativement faible si bien que le projet concluait sur les avantages d'utiliser As comme traceur aurifère dans l'horizon C.

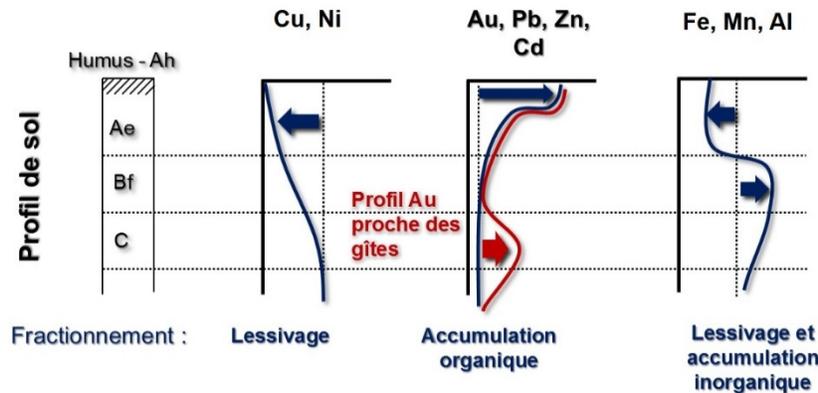


Figure 2. Profils schématiques de concentrations dans les sols différenciés, mis en perspective avec les mécanismes responsable de la ségrégation métallique (Rafini, 2012).

Cet exemple illustre le problème de la relation entre la ségrégation métallique et l'efficacité de la méthode. Quelle loi faut-il adopter : privilégier ou non les sites d'accumulation « naturelle » du signal recherché ? C'est le choix qui a été fait instinctivement lorsque l'humus a été échantillonné pour des levés régionaux d'exploration aurifère. Toutefois, une anomalie est toujours relative à un niveau de base. **Rien ne permet d'avancer que l'augmentation relative du signal, dans un contexte où une anomalie devrait se développer, sera proportionnelle à la hauteur moyenne du niveau de base généralement associée au médium.** On peut même anticiper l'inverse : plus le niveau de base est haut, plus le signal anomal devra être fort pour le « dépasser » et être détectable. Dans ce cas, il semblerait plus pertinent de privilégier les media à faible niveau de base.

1.4 Discussion sur l'approche adoptée

L'approche envisagée dans la proposition initiale du projet au terme de l'exercice de programmation de l'hiver 2012, consistait à dresser un comparatif par des observations locales et ponctuelles sur des gîtes disposant des quatre méthodes. Une telle approche se trouve inévitablement confrontée à plusieurs obstacles, de nature « logistique » tant que fondamentale. Le premier obstacle porte sur l'existence de tels sites. Un seul a été répertorié au Québec, il s'agit du secteur de La Grande Sud où se trouve le gîte « Zone 32 ». La possibilité d'acquérir des données dans le cadre d'une deuxième phase du projet avait été évoquée.

Cette perspective est bloquée toutefois par le deuxième obstacle, de nature plus fondamentale, qui va plus drastiquement à l'encontre de l'approche stipulant des observations locales et ponctuelles : pour tirer des conclusions généralisables à partir d'observations locales et ponctuelles, il serait en réalité nécessaire de disposer d'un nombre de sites expérimentaux insoutenable dans le cadre de cette étude. Aucune conclusion fiable ne peut être obtenue à partir de l'étude comparative de la performance des méthodes sur deux ou trois sites. Il faudrait cumuler au minimum une quinzaine de sites pour arriver à établir des tendances dont pourraient être dérivées un comportement général. La raison est tout simplement qu'étant données la complexité et la variété des mécanismes et des facteurs impliqués dans la formation d'anomalies de l'environnement secondaire, l'efficacité des méthodes est extrêmement variable d'un site à l'autre. Conclure sur la supériorité générale d'une méthode devant une autre à partir d'observations effectuées sur un site est difficilement possible. De telles conclusions doivent découler d'analyses *statistiques* établies sur un très grand nombre d'observations. Théoriquement, suffisamment grand pour pouvoir postuler que les biais causés par les variations locales, d'un site à l'autre, s'annulent.

Pour finir, un troisième obstacle, peut-être le plus critique, est aussi à considérer : il existe une limite à la pertinence de comparer les performances des différentes méthodes classiques car, dans la plupart des contextes, elles ne sont pas utilisées pour répondre aux mêmes problèmes et ne sont pas appliquées à

des échelles comparables. Si des levés de sol ont été réalisés dans le passé à l'échelle régionale, cette méthode est davantage utilisée pour des levés à l'échelle de la propriété voir à des échelles plus locales. Il n'y pas de limite inférieure à la maille d'échantillonnage pour cette méthode, il n'est pas rare d'échantillonner le sol à intervalles de 25 m sur des traverses ciblées. Il n'y a pas non plus de limite inférieure au maillage des échantillons de till. Cette méthode est toutefois plus flexible, utilisée tant à l'échelle régionale que locale. Enfin, les levés régionaux les plus courants au Québec sont les levés de sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux. Ceci essentiellement suite à la décision du MRN de privilégier ces méthodes devant les autres pour la reconnaissance régionale. Ces deux méthodes ont par contre une limite inférieure dans leur maillage inhérent à la disposition et à la densité des lacs et des ruisseaux. Lors d'observations locales et ponctuelles, on comparera donc des levés locaux de till et sol, dans lesquels plusieurs centaines d'échantillons pourront être accumulés, avec des levés de sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux qui, localement, ne pourront être représentés que par quelques échantillons sporadiquement distribués au gré du réseau hydrographique local. Il s'ensuit un biais d'échantillonnage statistique qui rend impossible une comparaison fiable des performances.

Pour ces raisons, il a été choisi dans ce projet de concentrer les travaux sur les levés régionaux existants au Québec. De tels levés régionaux n'existent, en distributions comparables, que pour les méthodes de sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux. Les indices de performance obtenus seront ensuite comparés à ceux des autres méthodes, obtenus précédemment dans les projets ciblés. Si la comparaison des performances des données de sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux sera quantitative et généralisable, les appréciations comparatives avec les autres méthodes ne seront donc que qualitatives, peu généralisables, et données à titre indicatif.

2 PERFORMANCES DES SÉDIMENTS DE LACS ET DE RUISSEAUX SUR L'ENSEMBLE DU QUÉBEC

2.1 Données utilisées et traitement préalable

L'objectif est ici d'établir la performance statistique des combinaisons *élément-méthode* en utilisant des grandes bases de données contenant **tous les levés existants au Québec**. De ce fait, les résultats obtenus seront fiables car établis sur un très grand nombre de données : il est plus plausible de postuler que les effets locaux seront dilués (p.ex., un gîte sur-échantillonné), et que les facteurs externes (c.-à-d., facteurs perturbant le signal exclusivement transmis par un corps minéralisé) seront nivelés. Les résultats obtenus seront généralisables sur l'ensemble de la province. Les données utilisées sont tirées du Sigéom 2012 (**Figure 3**).

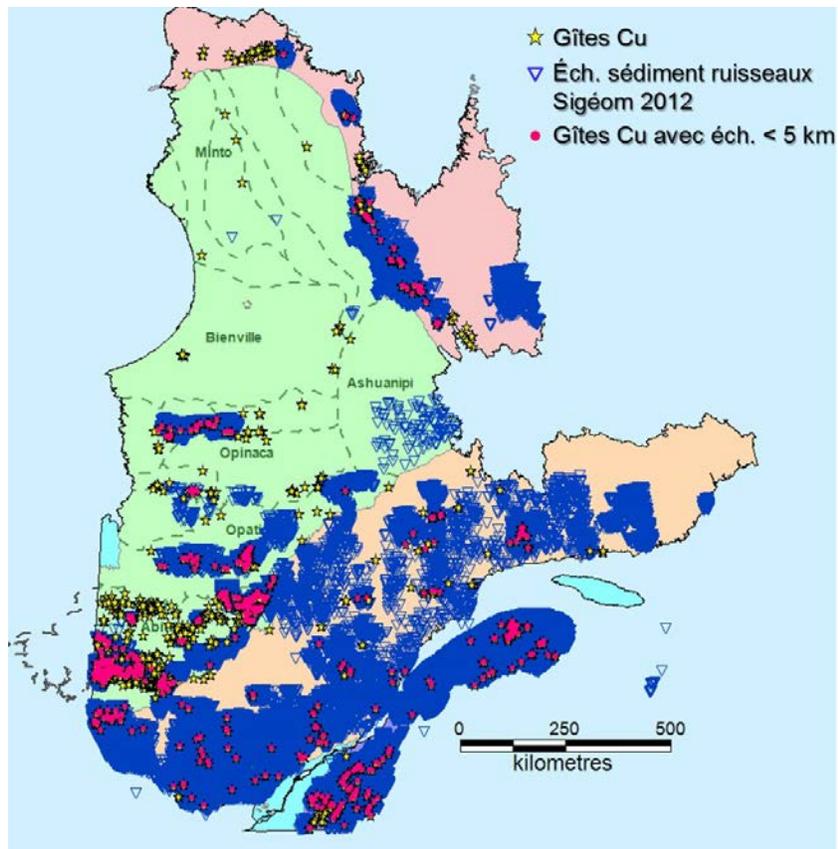


Figure 3. Localisation des sédiments de ruisseaux utilisés (bleu) et des gîtes cuprifères. Les gîtes symbolisés en rose sont ceux autour desquels des échantillons de ruisseaux sont disponibles à moins de 5 km (446 gîtes, 22 513 échantillons).

La comparaison d'un grand nombre de levés nécessite un nivellement préalable des valeurs. En effet, les protocoles d'échantillonnage et d'analyse n'étant pas rigoureusement identiques d'un levé à l'autre, les moyennes sont tout à fait inégales entre les levés. Cet aspect a été largement documenté dans le projet 2004-09 (Trépanier, 2007), qui proposait une méthode de nivellement par bandes.

Nous opterons dans cette étude pour un nivellement plus trivial, qui consiste simplement à passer les teneurs obtenues en centiles pour chaque levé, et à comparer les levés entre eux uniquement à travers ces valeurs centiles. L'efficacité de cette méthode, dite des « centiles locaux », sera comparée à celle de la méthode de nivellement par bandes. On peut d'ores-et-déjà noter une limite à la méthode des « centiles locaux » causée par une taille hétérogène des levés : dans le cas de levés très locaux, les valeurs de centile très hautes ont moins de chances d'être associées à des teneurs élevées. Pour limiter ce biais inhérent à une distribution géographique hétérogène de la taille des levés, nous ne conserverons que les levés contenant au moins 1 000 échantillons.

2.2 Méthode et indicateurs de performance utilisés

Le présent exercice vise à comparer les performances statistiques en exploration minière pour des levés de sédiments de lacs et de ruisseaux pour les substances Zn, Cu, Ni, Pb et Au et pour les traceurs aurifères communs As, Sb, W, Bi, Mo, Se, Te.

Deux indicateurs seront utilisés : le contraste, et la distance de doublement.

Le contraste est une mesure standard utilisée dans plusieurs projets antérieurs du CONSOREM, qui compare la probabilité d'anomalie (c.-à-d., > 95^{ème} centile) d'une population donnée avec la probabilité normale. En l'occurrence, on comparera la probabilité d'anomalie de populations d'échantillons située proche des gîtes connus (à différentes distances) avec la probabilité d'anomalie loin de ces gîtes. Ainsi, plus cette valeur est haute, plus la méthode s'avère performante. L'algorithme est le suivant :

Si pop1 contient tous les échantillons de sédiments de fonds de lacs situés à moins de 5 km d'un gîte, et pop2 tous les échantillons de sédiments de fonds de lacs situés à plus de 5 km d'un gîte, le contraste s'écrit :

$$\text{Contraste}_{5km} = \ln \left(\frac{nbe_ech_anomaux_POP1/nbe_ech_POP1}{nbe_ech_anomaux_POP2/nbe_ech_POP2} \right)$$

Les seuils standards associés sont les suivants :

- CONTRASTE = 0 : efficacité nulle;
- 0 < CONTRASTE < 1 : efficacité faible à moyenne;
- CONTRASTE > 1 : efficacité bonne.

Les valeurs sont mesurées, pour chaque combinaison *élément-méthode* et à différentes distances des gîtes, puis projetées sur un diagramme contraste vs distance (**Figure 4**), que l'on appellera *diagramme de dispersion*.

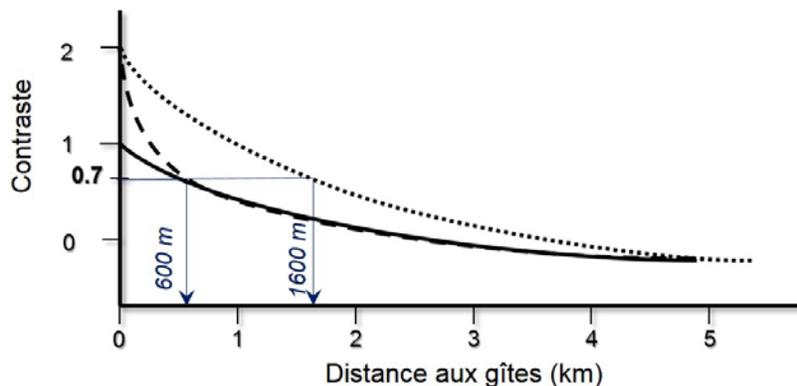


Figure 4. Illustration du diagramme de dispersion des anomalies utilisé comme évaluateur de performances. Exemple fictif.

Normalement, le contraste devrait augmenter en s'approchant des gîtes, tel qu'illustré sur le diagramme de la **Figure 4**. Cela indique que la méthode fonctionne, puisqu'il y a, proportionnellement, plus de valeurs anormales autour des minéralisations qu'ailleurs. Sur la **Figure 4**, chaque courbe correspondrait à une combinaison *élément-méthode* distincte. Celles donnant les courbes en pointillé et en tiret sont plus performantes que celle en trait plein, puisque le contraste augmente plus : on atteint un contraste de 2 très proche des gîtes, ce qui signifie un pourcentage d'échantillons anomaux 7.4 fois supérieur au *background* régional ($\ln(7.4) = 2$).

À ce paramètre très standard est ajouté un paramètre indiquant la distance au gîte au-delà de laquelle l'anomalie n'est plus visible, autrement dit le rayon d'influence des anomalies, ou encore la distance de traçage évoquée plus haut. Rigoureusement, cette distance serait celle à laquelle la probabilité d'anomalie redescend à sa valeur statistiquement normale, celle que l'on obtient très loin des gîtes, qui est ici de 5 % puisque nous avons fixé le seuil d'anomalie au 95^{ème} centile. Ce serait donc le contraste nul ($\ln(1)$). Nous fixerons toutefois l'indicateur comme étant la distance à laquelle la probabilité d'anomalie

est le double de la normale. À des taux inférieurs à une probabilité double de la normale, les anomalies ont statistiquement nettement moins de chances d'être détectées. Passé en logarithme, le facteur 2 devient un facteur 0,7 si bien que la *distance de doublement* est la distance à laquelle le contraste est égal à 0,7, tel qu'illustré sur la **Figure 4**. Si les courbes en pointillé et en tiret montrées sur cette figure ont une efficacité comparable en termes de contraste, on voit que cette efficacité diminue plus rapidement pour la courbe en tiret que pour la courbe en pointillé. On mesure les distances critiques de 600 m et 1600 m. Autrement dit, la combinaison *élément-méthode* donnant la courbe en pointillé montre ici la meilleure performance des trois : des anomalies plus fréquentes et un rayon d'influence supérieur. Il est évident que, en terme d'exploration, plus la distance de traçage est grande (c.-à-d. la diffusion des anomalies est plus large), plus les anomalies ont des chances d'être détectées.

2.3 Performances globales des levés de sédiments de ruisseaux

Les **Figures 5** et **6** montrent les résultats obtenus pour les combinaisons *élément-méthode* suivantes : Cu-ruisseaux et Zn-ruisseaux. Pour la première, les statistiques sont établies sur 22 513 échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère. On comprend ici l'intérêt d'analyser l'ensemble des levés de la province : les performances étant établies sur de très grands nombres de points, elles sont fiables, généralisables, et n'indiquent pas des phénomènes locaux mais des comportements globaux.

Dans les deux cas présentés aux **Figures 5** et **6**, le contraste augmente significativement en s'approchant des gîtes ce qui confirme l'efficacité des mesures en Cu et Zn des sédiments de ruisseaux pour détecter des minéralisations respectivement cuprifères et zincifères. Un contraste de 2 signifie que l'on retrouve dans ces sédiments de ruisseaux des valeurs anormales à un taux 7 fois plus élevé qu'ailleurs. Ici, ce taux est atteint pour les échantillons situés à moins de 100 m des gîtes, ce qui signifie sensiblement *sur* les gîtes.

Les distances de doublement obtenues pour ces deux combinaisons sont 1 900 m pour Cu et 2 150 m pour Zn, tandis que le signal anormal disparaît totalement à 4 600 m et 5 000 m environ. Cette diffusion légèrement plus large pour Zn que pour Cu n'est pas surprenante et peut être attribuée à la plus grande mobilité de cet élément.

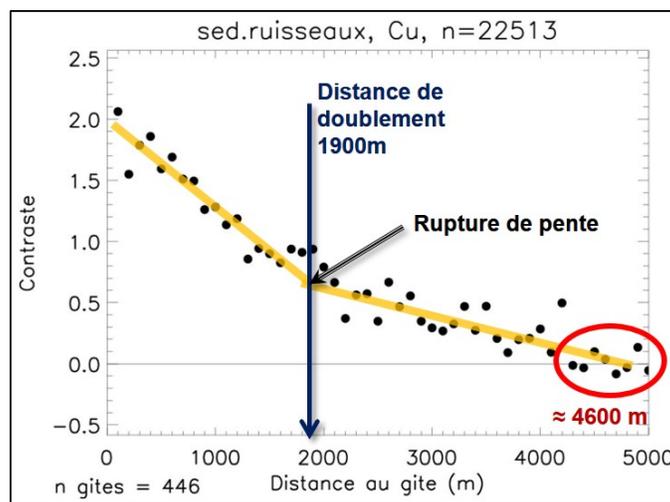


Figure 5. Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), n gîtes indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.

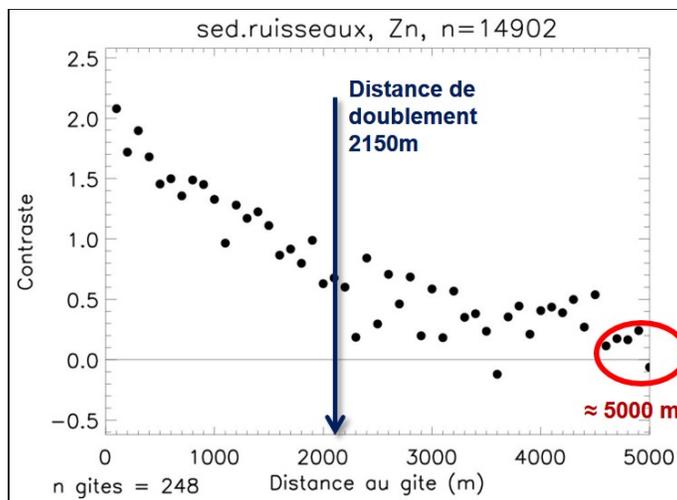


Figure 6. Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), n gîtes indique le nombre de gîtes zincifères considérés.

On devine sur la **Figure 5** que le signal semble former une rupture de pente. Celle-ci pourrait être l'expression de différents types de dispersion : les échantillons très proches et montrant de très forts contrastes qui diminuent à forte pente pourraient correspondre aux sédiments transportés par ruissellement directement depuis le gîte (transport clastique) ce qui explique que les anomalies soient peu diluées ; inversement les échantillons formant le deuxième segment de pente (à partir de 2 000) pourraient être dominés par des sédiments ayant subi un transport plus complexe, possiblement polyphasé (combinaison de transport hydromorphique et clastique), ce qui explique une plus grande dilution du signal anomal. Ces considérations sont toutefois spéculatives à ce stade.

Les diagrammes de dispersion obtenus pour les éléments Pb et Ni ainsi que pour Au et quelques traceurs communs (As, Sb, W, Bi, Mo et Se) sont présentés en annexe. Les performances obtenues sont synthétisées aux **Tableaux 2 et 3**.

Tableau 2. Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes de métaux de base.

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

*Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km.

Cette analyse démontre que, pour les métaux de base, mesurer leurs teneurs dans les sédiments de ruisseaux est un moyen efficace de rechercher des gîtes. L'efficacité de la méthode est ici

statistiquement et rigoureusement confirmée. Les anomalies sont tracées en moyenne jusqu'à environ 2 000 m, tandis que la disparition totale du signal anomal se situe entre 4 500 et 5 000 m (**Figures 5 et 6, Annexe**).

Le cas de Ni est un peu particulier car la distance de dispersion et le contraste des anomalies sont élevés en raison des hauts niveaux de base des volcanites ultramafiques encaissantes : le contraste dans ces formations ne correspond pas au contraste normal, de fond, qui devrait être approximativement égal à 0. La probabilité d'anomalie (>95^{ème} centile) y est en effet déjà supérieure au double de la probabilité normale de 0,05. Par conséquent la distance de doublement moyenne obtenue est très grande, 4 700 m, mais ne correspond pas tant à la dispersion des anomalies produites par les gîtes nickélifères qu'à la dispersion des hauts niveaux de base associés aux volcanites ultramafiques encaissantes. Le rapport Ni/Cr est plus rigoureux pour la détection des gîtes. Même en utilisant cette normalisation, les valeurs obtenues pour le contraste et la distance de dispersion des anomalies sont hautes.

Tableau 3. Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes aurifères.

Medium / élément	Subst.	Contraste (<1km d'un gîte)	Statistique établie sur (nombre échantillons ; nombre de gîtes) *	Distance de doublement *
Ruisseaux As	Au	1.23	903 ; 246	1600 m
Ruiss As+Sb	Au	1.23	569 ; 105	
Ruisseaux Au	Au	1.09	495 ; 121	950 m
Ruisseaux Sb	Au	1.05	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.

Les performances de Au et des traceurs pour la détection des gîtes aurifères, synthétisées au **Tableau 3**, sont relativement bonnes pour As, faibles pour Sb, Au et Bi, très faibles pour W, Mo, Se. Ces résultats démontrent donc la supériorité des mesures de As, Sb, Bi et Au dans les sédiments de ruisseaux pour le traçage des gîtes aurifères, devant Mo, W et Se. Les distances d'influence de ces traceurs dans les sédiments de ruisseaux sont variables. As permet de tracer les anomalies sur des distances presque deux fois plus grandes que Au, Sb et Bi : distance de doublement égale à 1 600 m contre environ 950 m, 900 m et 1 000 m.

On obtient donc l'ordre d'efficacité suivant :

- Performance As >> Au > Sb > Bi;
- As : traceur distal et proximal (jusqu' à ~ 2 km);
- Au, Sb et Bi : traceurs proximaux (jusqu'à ~ 1 km);
- Mo, W, Se inefficaces.

Afin d'évaluer l'influence du contexte métallogénique sur l'efficacité de la méthode, l'exercice a été appliqué sur une sélection de gîtes contenant exclusivement Au et Cu, ce qui retient essentiellement des gîtes volcanogènes (SMV) et hydrothermaux magmatiques. Les performances de As, Sb et Mo sont

légèrement meilleures, mais celle de Bi est très significativement augmentée, son contraste passe de 0,94 à 1,22.

Tableau 4. Synthèse des performances des sédiments de ruisseaux pour l'exploration des gîtes aurifères-cuprifères.

Medium / élément	Subst.	Contraste (<1km d'un gîte)	Statistique établie sur (nombre échantillons ; nombre de gîtes) *	Distance de doublement *
Ruisseaux As	Au-Cu	1.38	618 ; 161	1800 m
Ruisseaux Bi	Au-Cu	1.22	166 ; 36	1200 m
Ruisseaux Sb	Au-Cu	1.14	383 ; 77	1350 m
Ruisseaux Mo	Au-Cu	0.79	1103 ; 202	600 m

*Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km.

2.4 Performances globales des levés de sédiments de fonds de lacs

Les données utilisées sont réparties sur l'ensemble de la province (**Figure 7**). Afin de consolider la méthode, l'efficacité du nivellement par « centiles locaux » utilisé ici pourra être comparée à celle « par bandes », plus standard. On utilisera pour cette comparaison les valeurs nivelées par la méthode des bandes à l'occasion du projet 2004-09 (Trépanier, 2007).

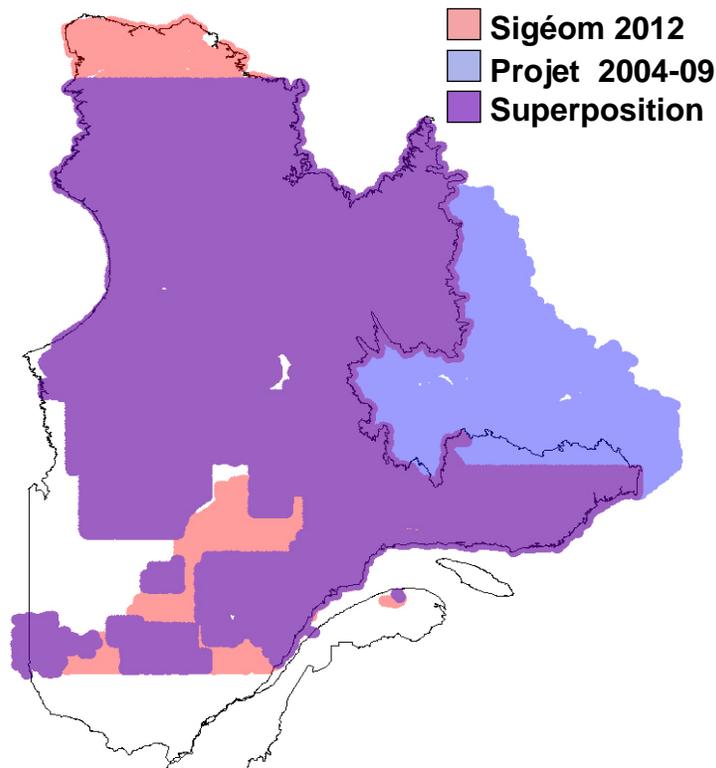


Figure 7. Couvertures de sédiments de fonds de lacs utilisées dans cette étude (Sigéom 2012) et dans le projet 2004-09.

On pourra aussi intégrer dans les tests de performance les données traitées par régression spatiale évoquée plus haut. Il s'agit d'une méthode statistique de rehaussement d'anomalies, dont l'application aux levés de sédiments de fonds de lacs du Québec a été introduite par S. Trépanier dans les projets CONSOREM 2004-09 et 2005-03. La régression spatiale a été réalisée ici avec neuf variables explicatives : Al, K, Fe, Mn, Mg, Cr, V, Ti, La. Ceci permet de corriger plusieurs facteurs externes, c.-à-d., facteurs affectant la teneur mesurée mais n'ayant aucun lien avec la minéralisation, tels que la composition du sédiment (rapport matière organique / matière détritique), qui affecte les conditions Eh/pH et la stabilité de l'élément mesuré et par conséquent conditionne le niveau de base (voir projet 2004-09). Un autre facteur corrigé par cette régression spatiale est la lithologie de la roche mère. Les anomalies sont rehaussées en les considérant relativement à un niveau de base variable suivant la lithologie. Les données utilisées ici pour la régression spatiale ont été préalablement nivelées par la méthode des bandes.

Les diagrammes de dispersion sont présentés en annexe. Les résultats sont présentés aux **Tableaux 5** et **6**.

On voit sur le **Tableau 5** que le nivellement par centiles locaux fournit des résultats comparables en qualité à la méthode de nivellement par bandes. Les performances établies pour les sédiments de fonds de lacs sont très bonnes pour Ni et Cu et considérablement plus faibles pour Zn et Pb. Les distances de traçage sont en revanche sensiblement égales, soit autour de 2 000 m pour Zn et Cu, et très élevées pour Ni ce qui dénote encore une fois un effet lié aux hauts niveaux de base de Ni dans les formations ultramafiques encaissant les gîtes de sorte que cette distance ne trace pas un contraste entre les gîtes et leur encaissant mais entre les roches ultramafiques et leur encaissant.

Par ailleurs, l'augmentation des performances de Zn et Cu par la régression spatiale est matérialisée ici par l'augmentation des contrastes.

Tableau 5. Performances des sédiments de fonds de lacs pour l'exploration de gîtes Ni, Cu et Zn. Deux méthodes de nivellement sont comparées ici : la méthode des centiles locaux (centloc) utilisée dans cette étude, et la méthode de nivellement par bandes (_niv) de Trépanier (2007). Les résultats du traitement par régression spatiale (_res) ont été aussi analysés pour comparaison.

Medium / élément	Subst.	Contraste	Statistique établie sur (n éch. ; nombre de gîtes) *	Distance de doublement
Lacs Ni_centloc	Ni	1.66	84 ; 70	2000 – 5000 m
Lacs Ni_niv	Ni	1.77	72 ; 60	
Lacs Ni_res	Ni	1.63	39 ; 35	
Lacs Cu_centloc	Cu	1.29	289 ; 232	~ 1800 m
Lacs Cu_niv	Cu	1.29	287 ; 232	
Lacs Cu_res	Cu	1.45	123 ; 111	
Lacs Zn_centloc	Zn	1.06	125 ; 100	~ 2000 m
Lacs Zn_niv	Zn	0.78	120 ; 98	
Lacs Zn_res	Zn	1.31	51 ; 48	
Lacs Pb	Pb	0.72	58 ; 44	1000 – 5000 m

*Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km

Le **Tableau 6** présente les résultats de l'analyse des performances des sédiments de fonds de lacs pour l'exploration aurifère. Ces performances sont globalement médiocres. Sb et As demeurent les traceurs les moins inefficaces, suivis de Se. En revanche, ces résultats suggèrent que les mesures de Au, Te, Bi et W dans les sédiments de fonds de lacs sont définitivement à proscrire en exploration aurifère.

Enfin, on note que, ici encore, As permet un traçage deux fois plus distal que les autres éléments. La distance de doublement obtenue pour cet élément s'élève à 3 400 m, ce qui dénote une influence nettement plus distale que toutes les autres combinaisons *élément-méthode*. Globalement, le rayon d'influence des anomalies de sédiments de fonds de lacs est de 1,5 à 2 fois plus grand que celui des anomalies de sédiments de ruisseaux, toutes substances confondues.

Tableau 6. Synthèse des performances des sédiments de fonds de lacs pour l'exploration des gîtes aurifères.

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

*Échantillons et gîtes distants de moins de 1 km.

2.5 Comparaison des performances des sédiments de ruisseaux et de lacs sur l'ensemble du Québec

Les résultats présentés dans les sections précédentes sont synthétisés sur le **Tableau 7**. Il en ressort que les sédiments de ruisseaux montrent des performances systématiquement meilleures que les sédiments de fonds de lacs, à l'exception du Se. Les résultats montrés correspondent aux valeurs non-rehaussées, or nous avons vu que la régression spatiale augmentait le contraste du Zn par exemple de 1,06 à 1,31.

Tableau 7. Comparaison des contrastes obtenus pour les deux méthodes.

Élément	Substance	Contraste séd. ruisseaux	Contraste séd. lacs
Cu	Cu	1.54	1.29
Zn	Zn	1.51	1.06
Pb	Pb	1.51	0.72
Ni	Ni	1.97	1.66
Au	Au	1.09	<i>Inefficace</i>
As	Au	1.23	0.98
Sb	Au	1.05	1
Bi	Au	0.94	<i>Inefficace</i>
W	Au	<i>Inefficace</i>	<i>Inefficace</i>
Se	Au	<i>Inefficace</i>	0.6
Te	Au	–	<i>Inefficace</i>
Mo	Au	0.69	–

D'autres méthodes de rehaussement introduites lors des précédents projets du CONSOREM évoqués en introduction, devraient augmenter considérablement les performances de ces outils d'exploration, telles que la « statistique U », disponible dans le logiciel « Outils de traitement de la géochimie secondaire ». Cette méthode vise à augmenter le signal des anomalies regroupées dans l'espace et diminuer celui des anomalies produites par des hautes valeurs isolées.

3 COMPARAISON DES PERFORMANCES DES LEVES DE TILLS ET DE SOLS POUR L'EXPLORATION AURIFERE

3.1 Secteur de La Grande Sud

Les performances des levés de différentes méthodes d'analyse du till, et de levés de sol (horizon B) ont pu être comparées statistiquement sur le site de La Grande Sud (Baie-James). À défaut d'être vraiment généralisables puisqu'ils ont été établis sur l'observation d'un seul site, les résultats ont la qualité de comparer des levés de densités semblables (**Figure 8**). Les observations sont concentrées dans le secteur central où se superposent des levés de sols et de tills. C'est dans ce secteur que sont localisés les gîtes et indices aurifères (**Figure 8**). Le gîte dominant, dit « Zone 32 » est encaissé dans la tonalite indiquée sur la figure, et contient 4,2 Mt @ 2,1 g/t Au et 0,2 % Cu. Le style gîtologique est porphyrique (Mercier-Langevin, 2000). On voit sur la figure le problème inhérent aux différences de maillage des méthodes : il est clair que l'on ne pourrait comparer ici la performance des ruisseaux et des lacs avec celle du sol et du till sans être faussé dans les résultats par un biais statistique majeur, lié aux très grands écarts dans le nombre d'échantillons disponibles à proximité de gîtes entre les différentes méthodes.

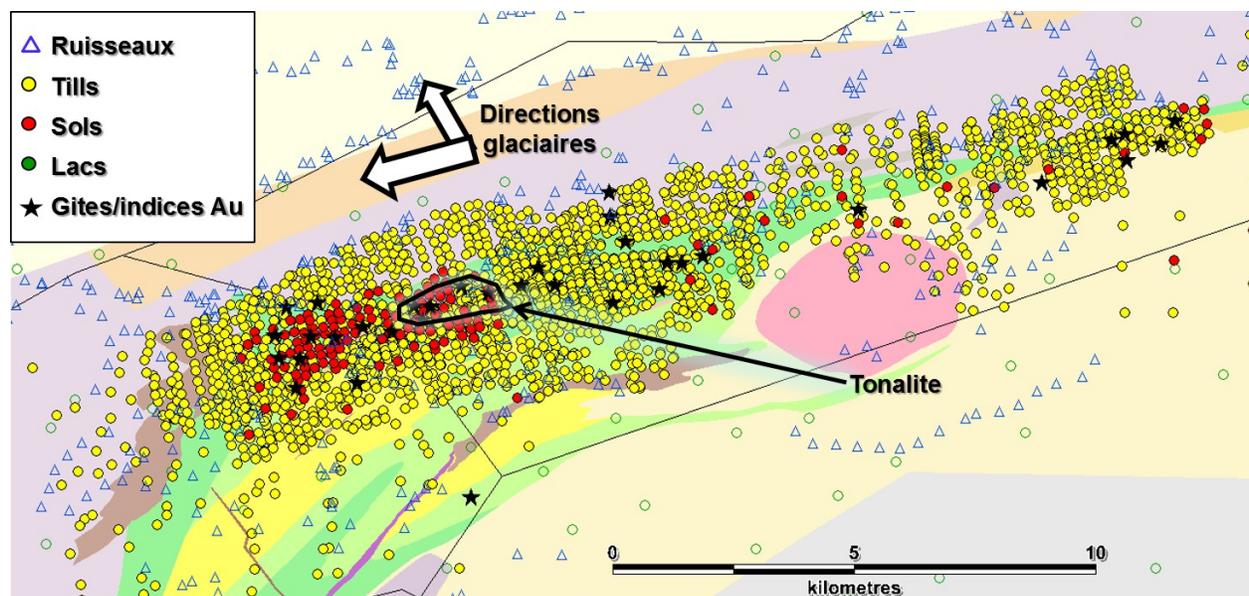


Figure 8. Répartition des points d'échantillonnage des différentes méthodes dans le secteur de La Grande Sud. Données du Sigéom 2012 et de Mines Virginia.

De manière sensiblement identique à la section précédente, les contrastes obtenus à différentes distances des gîtes aurifères sont comparés sur un diagramme de dispersion. La différence étant que, pour les tills, les échantillons sont sélectionnés en aval glaciaire de chaque gîte, donc dans un cône et non dans un cercle. Ceci est illustré par la **Figure 9**.

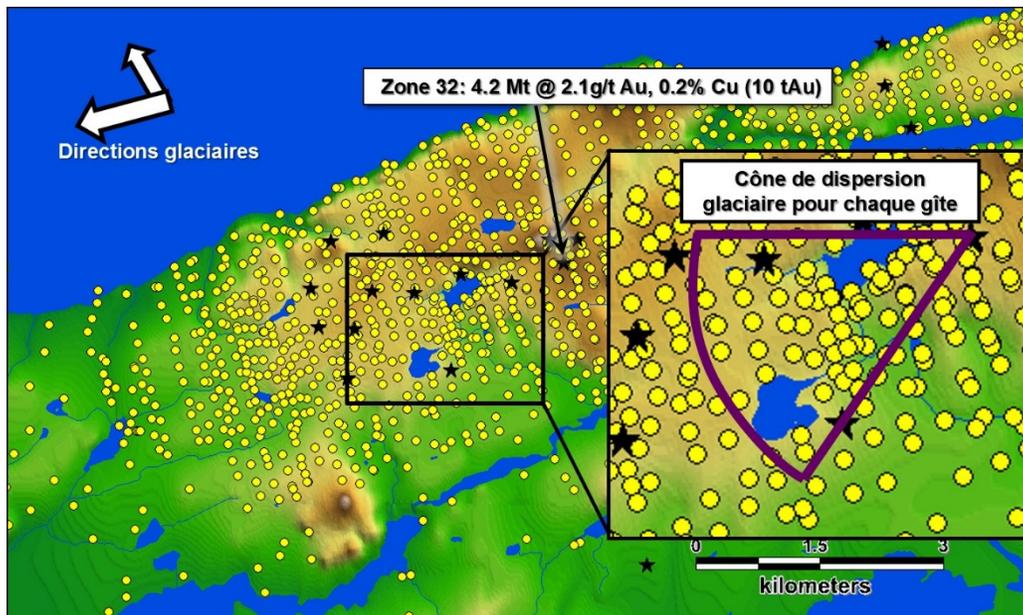


Figure 9. Sélection des échantillons situés dans les cônes de dispersion glaciaire en aval des gîtes connus.

Les courbes de dispersion obtenues sont présentées sur la **Figure 10**. On voit que la meilleure performance est obtenue pour les mesures de Au et As dans la fraction fine du till, à des distances moyennes (500 – 1 000 m). Le fait que le pic de contraste de cette méthode soit dans cette tranche et non directement sur le gîte (tranche 0 – 500 m) est lié à la dispersion glaciaire des particules fines. Le pic de Au et As dans les minéraux lourds, en revanche, est dans la tranche proximale, ce qui correspond à une dispersion plus faible. Les tranches dans lesquelles les pics de contraste sont observés traduisent ici très bien la plus grande dispersion glaciaire des particules fines que des minéraux lourds.

Par ailleurs, la performance des mesures aurifères dans le sol horizon B est comparable à celle des minéraux lourds.

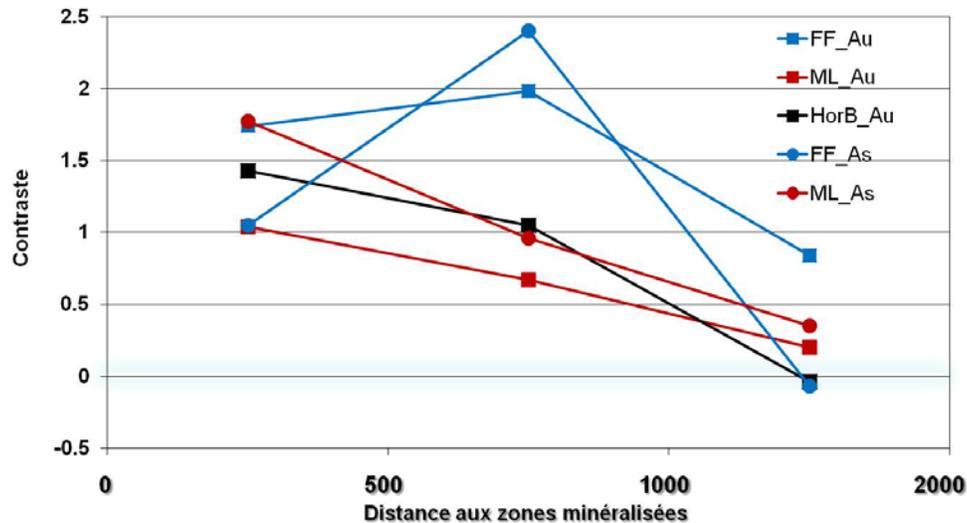


Figure 10. Diagramme de dispersion obtenu à La Grande Sud. Comparatif des différentes méthodes. ML : levé de till, analyse des minéraux lourds ; FF : levé de till, analyse de la fraction fine ; HorB : levé de sol dans l'horizon B.

3.2 Travaux antérieurs sur les sols

Le projet 2011-06 (Rafini, 2012) établissait des courbes de dispersion des anomalies mesurées dans les différents horizons des sols, à partir de données de stations d'échantillonnage multi-horizon compilées dans plusieurs études de l'OGS.

Outre le fait que ce travail permettait de conclure sur la meilleure performance systématique de l'horizon C devant les horizons supérieurs, il comparait aussi, pour chaque horizon, les performances des différents éléments classiquement utilisés pour le traçage des minéralisations. La méthode utilisée est une méthode de contrastes analogue à celle utilisée plus haut.

Les résultats pour les horizons B et C sont, pour les métaux de base : $Pb > Zn > Cu \gg Ni$. Autrement dit, Pb et Zn sont, utilisés comme traceurs de leur propre substance, plus efficaces que Cu et Ni.

Pour l'exploration aurifère, l'ordre d'efficacité des traceurs dans les horizons B et C est :

- $As = Cd > Co \gg Mo, Sb, Ba$

Les rayons d'influence sont proximaux : tranche 0 – 1 000 m.

4 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'analyser et de comparer les performances des levés de sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux pour l'exploration minière. Les critères de performance utilisés considèrent l'augmentation statistique des teneurs métalliques lorsque les échantillons sont situés à proximité des gîtes connus, et la distance aux gîtes à partir de laquelle cette augmentation est détectable. Autrement dit, l'intensité et le rayon d'influence des anomalies rendues par chaque méthode. Ces performances sont des résultats statistiques établis sur l'ensemble des levés de la province, soit, dans la plupart des cas, sur plusieurs centaines de milliers d'échantillons et plusieurs centaines de gîtes. De ce fait, les performances obtenues peuvent être vues comme les performances générales des combinaisons *élément-méthode*, tous contextes confondus, et tendent à être généralisables à l'ensemble du Québec. Par « combinaisons

élément-méthode » on entend *un certain élément* mesuré dans *un certain medium* pour la recherche d'*une certaine substance* : Cu dans les sédiments de fonds de lacs pour la recherche de dépôts cuprifères, ou As dans les sédiments de ruisseaux pour la recherche de dépôts aurifères, etc. Chaque combinaison est indépendamment évaluée.

Un regard critique doit toutefois être porté sur le caractère universel des conclusions tirées ici, afférant aux variations dans le nombre et la répartition des levés régionaux disponibles pour l'évaluation statistique de chaque méthode, ainsi que le nombre et la répartition des gîtes considérés pour chaque substance. En prenant un très grand nombre de stations réparties dans des levés régionaux distribués sur l'ensemble du Québec, nous cherchons à diluer dans la masse les effets des facteurs « secondaires » susceptibles de perturber l'efficacité des levés (nature et épaisseur de la couverture glaciaire, climat et conditions de drainage, provinces géochimiques : bruit de fond régional causé par les grands ensembles géologiques). De la même manière, le fait de prendre l'ensemble des gîtes de la province couverts par les levés, nous cherchons aussi à diluer ce type d'effets. Les conditions ne sont malgré tout pas parfaites et le traitement statistique peut être partiellement altéré par l'hétérogénéité des levés (**Figure 11**) : les levés de sédiments de ruisseaux couvrent essentiellement le sud du Québec incluant la Gaspésie, le sud de l'Abitibi et le sud de la Province du Grenville et de manière plus disparate le nord-est. Les levés de sédiments de fond de lacs couvrent l'ensemble du Québec excepté la Gaspésie, l'Abitibi, et le sud du Grenville (levé en cours). Il en résulte que les statistiques ne sont pas établies sur tous les mêmes gîtes pour ces deux média, ce qui peut avoir une influence sur la comparaison des résultats, notamment si le postulat de dilution des facteurs « secondaires » décrit plus haut s'avérait ne pas être parfaitement vérifié. Toutefois, on voit sur la **Figure 11** que, pour Au, Cu, Zn et Pb, une proportion considérable des gîtes est couverte par des levés des deux types. Les gîtes couverts par des levés d'un seul des deux media sont restreints essentiellement à la Gaspésie et au sud de la Province du Grenville. Par conséquent, **la comparaison, pour une même substance, entre l'efficacité des deux media demeure statistiquement valable**. Par ailleurs, on voit sur la **Figure 11** que la répartition spatiale des gîtes de différentes substances est de toute évidence suffisamment homogène pour que **les comparaisons entre substances, pour un même medium, soient significatives**. Ceci découle du fait que les régions métallifères sont, à l'échelle régionale, généralement polymétalliques. Il existe peu de provinces métallifères exclusives à une substance, à l'exception peut-être de Ni-Cu dans la ceinture de Cape Smith.

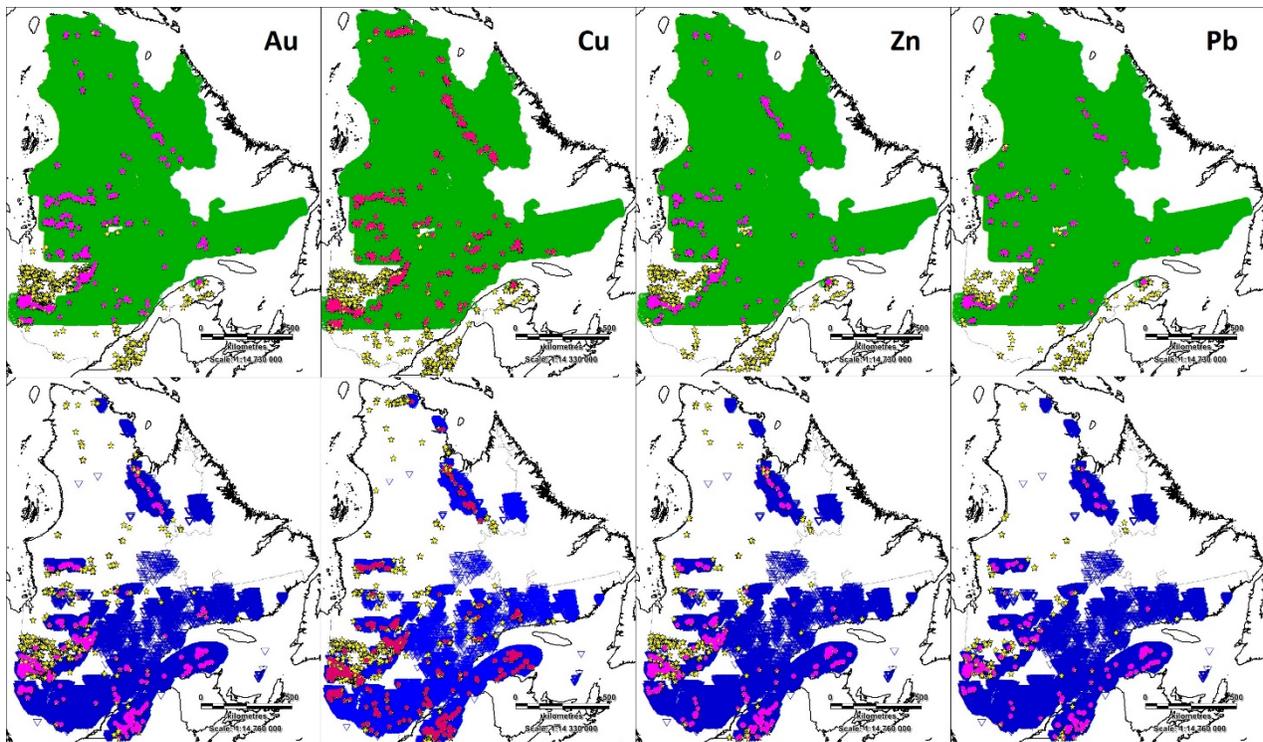


Figure 11. Répartition régionale des stations de sédiments de fonds de lacs (en vert) et de ruisseaux (en bleu) utilisés pour l'analyse statistique de performance pour les substances Au, Zn et Pb. Pour chaque cas, les gîtes utilisés dans le calcul sont surlignés en rose. Données Sigéom 2012.

De plus, notons qu'une grande partie des analyses de sédiments de fonds de lacs utilisées ici sont des ré-analyses, faites sur des échantillons conservés par le MRN depuis les levés effectués parfois plusieurs décennies auparavant. La faible quantité de matériel disponible pour ces ré-analyses (0,5 gramme) a un impact direct sur l'inefficacité des mesures de Au pour les traçages des gîtes aurifères, que nous obtenons statistiquement. Ces aspects ont été documentés par Maurice et Lamothe (2012).

Les comparaisons de performance de tills et sols synthétisées ci-dessous résultent des observations locales et ponctuelles effectuées sur le secteur de La Grande Sud. Rien ne permet d'avancer que ces résultats sont généralisables, mais il n'en demeure pas moins qu'ils méritent d'être rapportés ici. Ces comparatifs résultant d'observations ponctuelles sont notés d'un astérisque dans la section suivante.

Les comparatifs concernant l'efficacité des différentes méthodes d'analyse du till sont rapportés des projets 2010-05 et 2011-05 (Trépanier, 2011, 2012). Ils ont été établis sur plusieurs levés régionaux, de sorte que leur généralisation devrait être très valable.

Pour finir, les résultats concernant la comparaison des performances des différents éléments et traceurs dans les levés de sols sont rapportés du projet 2011-06 (Rafini, 2012). Ils sont établis à travers une compilation de plusieurs levés régionaux, et devraient par conséquent être généralisables.

Au cas par cas, ces performances sont affectées par les contextes locaux. La manière dont ces changements de contexte influencent spécifiquement les différentes méthodes est une thématique extrêmement large. Celle-ci n'a pas été approfondie dans le présent projet, qui s'est concentré sur une approche empirique à grande échelle, seul moyen de répondre au mandat de **comparer l'efficacité des différentes méthodes**. En revanche, une approche plus déterministe, axée sur la compréhension des mécanismes contrôlant ces efficacités variables, relève d'un travail de plus longue haleine. Plusieurs éléments de réponse à ces questions ont été apportés dans les neuf projets de recherche, ciblés sur chaque méthode, réalisés par le CONSOREM durant la dernière décennie.

Des conclusions d'ordre général doivent être notées avant de passer aux conclusions ciblées :

- 1) le rayon de diffusion des anomalies (distance de doublement) dans les sédiments de ruisseaux et dans les sédiments de fonds de lacs est, en moyenne sur l'ensemble de la province, de l'ordre de 1 à 2 kilomètres, des variations importantes sont observées selon les combinaisons *élément-méthode* ;
- 2) toutes substances confondues, les sédiments de ruisseaux donnent systématiquement de meilleures performances que les sédiments de fonds de lacs.

Par ailleurs, les performances synthétisées ici sont celles de valeurs brutes. Le gain en efficacité apporté par des méthodes de rehaussement d'anomalies telles que la régression spatiale (projet 2004-09, Trépanier, 2007) a été démontré. D'autres méthodes telles que la « statistique U » basée non pas sur une correction des facteurs parasitant le signal recherché mais sur le rehaussement des anomalies regroupées vs isolées, ont prouvé leur efficacité.

4.1 Synthèse des performances pour l'exploration aurifère

Les meilleures combinaisons *élément-méthode* sont :

- 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 ;
- Till fraction fine : As suivi de Au et Sb ;
- Sols : As horizon C.

Ordre de préférence :

- **Till (grain d'or) > Till (As, Sb fraction fine) > * Sols (As horizon C);**
- **Ruisseaux (As, Sb, Au) > Lacs (Sb, As).**

* Observations ponctuelles

Les résultats obtenus indiquent que les sédiments de ruisseaux sont systématiquement plus efficaces que les sédiments de lacs pour le traçage des minéralisations aurifères.

Traceurs aurifères à proscrire (efficacité très faible) :

- Sédiments de ruisseaux : W, Se ;
- Sédiments de lacs : Au, W, Bi, Te ;
- Sols : Au (humus, horizon B, horizon C).

Distances de traçage des anomalies aurifères

- La distance de traçage des anomalies en As est entre 1,5 et 2 fois supérieure à celle des autres traceurs aurifères, dans les sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux.
- *Ruisseaux* :
 - La distance de traçage est d'ordre kilométrique : la proportion d'anomalies en As double à 1,6 km des gîtes aurifères, tandis qu'elle double à 0,9 km pour Au, Sb, Bi;
 - Le signal anomal disparaît totalement à environ 5 km des gîtes aurifères.

- **Lacs :**
 - La diffusion des anomalies semble être approximativement deux fois plus distale dans les lacs que dans les ruisseaux (distances de traçage deux fois plus grandes);
 - Les distances de doublement sont très variables d'un traceur à l'autre : le plus mauvais étant Au (800 m) et le meilleur As (3 400 m). La diffusion de Sb et Se se situe entre ces deux extrêmes, avec des distances de doublement égales à 2 100 m et 1 600 m.
- **Sol :** traçage toujours proximal (< 1 km).
- **Till :** la diffusion de la fraction fine est plus distale que celle des minéraux lourds. Ceci résulte d'une plus grande dispersion glaciaire des particules fines. Par conséquent, les anomalies de la fraction fine sont plus larges et donc plus faciles à détecter que les anomalies des concentrés de minéraux lourds.

Ces informations sont récapitulées au **Tableau 8**.

Tableau 8. Synthèse Au. (1) Cette étude ; (2) Trépanier, 2007 (Projet CONSOREM 2004-09) ; (3) Rafini, 2012 (Projet CONSOREM 2011-06) ; (4) Trépanier, 2011 (Projet CONSOREM 2010-05) ; (5) Trépanier, 2012 (Projet CONSOREM 2011-05) ; DA : rehaussement par densité d'anomalie (méthode développée dans cette étude, sensiblement identique à la « statistique U »).

Élé ment	Subst.	Ruisseaux ⁽¹⁾		Lacs ⁽¹⁾⁽²⁾		Sols ⁽³⁾		Till ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	
		Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque
Au	Au	★	Rehaus ^t DA efficace	<i>Ineff.</i>	-	-	Horizon C	★★	Fraction fine
					-			★★★★★	Grains d'or
As	Au	★★	Rehaus ^t DA efficace	★	-	★★★★	Horizon C	★★★	Fraction fine
Sb	Au	★	Rehaus ^t DA efficace	★	-	<i>Ineff.</i>	-	★★★	Fraction fine
Bi	Au	★	Rehaus ^t DA efficace	<i>Ineff.</i>	-	-	-	-	-
W	Au	<i>Ineff.</i>	-	<i>Ineff.</i>	-	-	-	★	Fraction fine

4.2 Synthèse des performances pour l'exploration des métaux de base

L'analyse des performances statistiques de l'ensemble des données de sédiments de ruisseaux pour la détection des gîtes de métaux de base confirme que l'usage du Cu, Ni, Zn et Pb comme traceurs de gîtes de leur propre substance est très efficace.

En revanche, l'analyse des performances des sédiments de lacs démontre que Cu et Ni sont statistiquement beaucoup plus efficaces, pour la détection de gîtes de leur propre substance, que Zn et Pb.

La relation inverse est observée en ce qui concerne les levés de sols (horizon C) : Zn et Pb montrent de bonnes performances tandis que Cu et Ni sont inefficaces. Par ailleurs, l'horizon C montre systématiquement une plus grande efficacité que les horizons supérieurs humus (Ah) et B.

Pour revenir sur une question fondamentale introduite au début de ce rapport, ces résultats devraient être mis en parallèle avec le niveau de base « normal » de chacun de ces média, afin de documenter la

question de l'incidence du caractère « accumulatif » ou « diluant » des média sur l'efficacité des méthodes associées.

Les anomalies en métaux de base dans les sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux ont une diffusion de l'ordre de 2 km.

Ces performances sont récapitulées au **Tableau 9**.

Tableau 9. Synthèse métaux de base. (1) Cette étude ; (2) Trépanier, 2007 (Projet CONSOREM 2004-09) ; (3) phyllo : rehaussement par normalisation sur indice de teneur en phyllosilicates (Projet CONSOREM 2011-06 ; Rafini, 2012) ; (4) RN : rehaussement par réseaux neuronaux (Projet CONSOREM 2010-05 ; Trépanier, 2011) ; Al : rehaussement par normalisation sur Al (Projet CONSOREM 2010-05 ; Trépanier, 2011).

Élément	Substance	Ruisseaux ⁽¹⁾		Lacs ⁽¹⁾⁽²⁾		Sols ⁽³⁾		Till ⁽⁴⁾	
		Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque	Efficacité	Remarque
Cu	Cu	★★★★★	-	★★★★	-	★★★★	Hor C ; rehaus ^t phyllo ⁽³⁾	★★★★	Fraction fine ; rehaus ^t Al ou RN ⁽⁴⁾
Zn	Zn	★★★★★	-	★	-	★★★★★	Hor C ; rehaus ^t phyllo ⁽³⁾	★★★★	Fine (rehaus ^t Al) ; mx lourds (val brutes) ⁽⁴⁾
Pb	Pb	★★★★★	-	<i>Ineff.</i>	-	★★★★★	Hor C ; rehaus ^t phyllo ⁽³⁾	-	Fine (rehaus ^t Al) ; mx lourds (val brutes) ⁽⁴⁾
Ni	Ni	★★★★★	Correction /Cr	★★★★★	-	<i>Ineff.</i>	-	-	-

5 REFERENCES

- Faure, S., 2004. Dispersion glaciaire et cibles d'exploration dans la Sous-province d'Abitibi. Présentation du projet 2001-04, 58 p.
- Maurice et Lamothe (2012). Résultats et interprétation d'un nouveau levé géochimique de sédiments de lacs dans la Péninsule d'Ungava, Forum technologique CONSOREM-DIVEX, Rouyn-Noranda.
- Mercier-Langevin, P., 2000. Les minéralisations aurifères au sein de la tonalite de La Grande-Sud, Baie-James, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 258 p.
- Rafini, S., 2011. Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI : synthèse, étude de cas, perspectives. Rapport du projet CONSOREM 2010-07, 46 p.
- Rafini, S., 2012. Optimisation des données de géochimie des sols par acides forts. Rapport du projet CONSOREM 2011-06, 45 p.
- 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., 2007. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lacs. Rapport du projet CONSOREM 2004-09, 88 p.
- 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 du projet CONSOREM 2008-09, 28 p.
- Trépanier, S., 2009. Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration. Partie B : Géochimie des sédiments de ruisseaux : étude des données du sud-ouest du Grenville. Rapport du projet CONSOREM 2008-09, 84 p.
- Trépanier, S., 2011. Optimisation des données de till pour l'exploration. Rapport du projet CONSOREM 2010-05, 72 p.
- Trépanier, S., 2012. Optimisation des données de till pour l'exploration. Phase II : Évaluation quantitative de l'efficacité des méthodes d'analyse du till pour l'exploration de l'or. Rapport du projet CONSOREM 2011-05, 71 p.

ANNEXE

- Diagrammes de dispersion des anomalies dans les sédiments de ruisseaux pour :
 - 1) Zn, Cu, Pb, Ni, Ni/Cr, sont sélectionnés les gîtes dont la substance correspond à la substance utilisée pour le traçage (sauf, Ni/Cr : gîte Ni)
 - 2) Au, et plusieurs traceurs aurifères communs : As, Sb, W, Se, Bi, Mo. Dans ces cas les gîtes sélectionnés pour l'analyse sont aurifères.
- Diagrammes de dispersion des anomalies dans les sédiments de fonds de lacs pour As, Au, Bi, Se, W, Te et Mo (exploration aurifère), et pour Cu, Ni, Zn et Pb (exploration métaux de base).

Les valeurs sont laissées en proportion d'anomalies, une mesure équivalente au contraste :
 $\text{contraste} \approx \ln (\text{proportion d'anomalie} / 0,05)$.

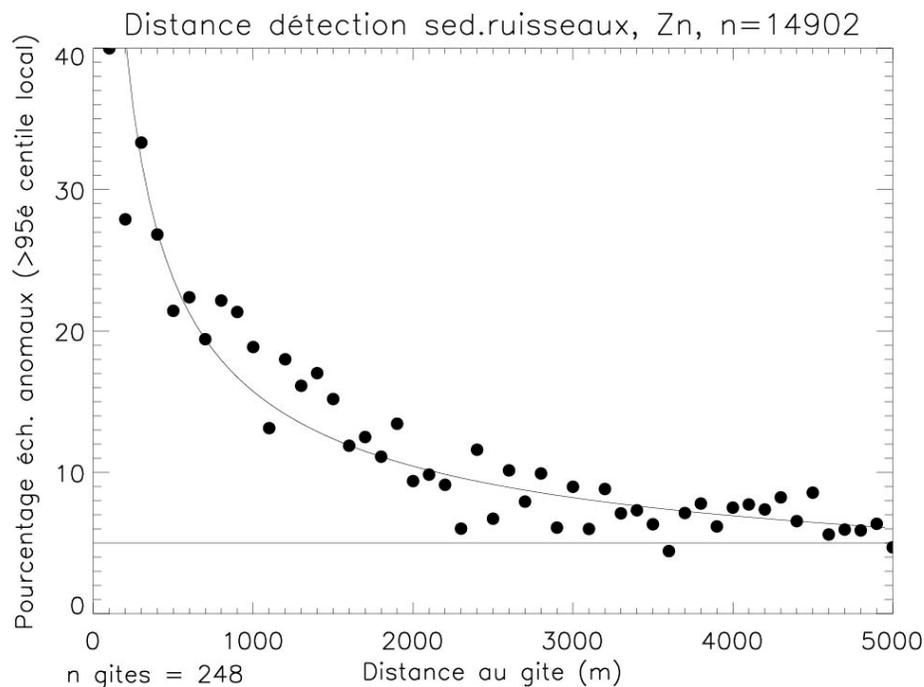


Figure A-1. Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), n gîtes indique le nombre de gîtes zincifères.

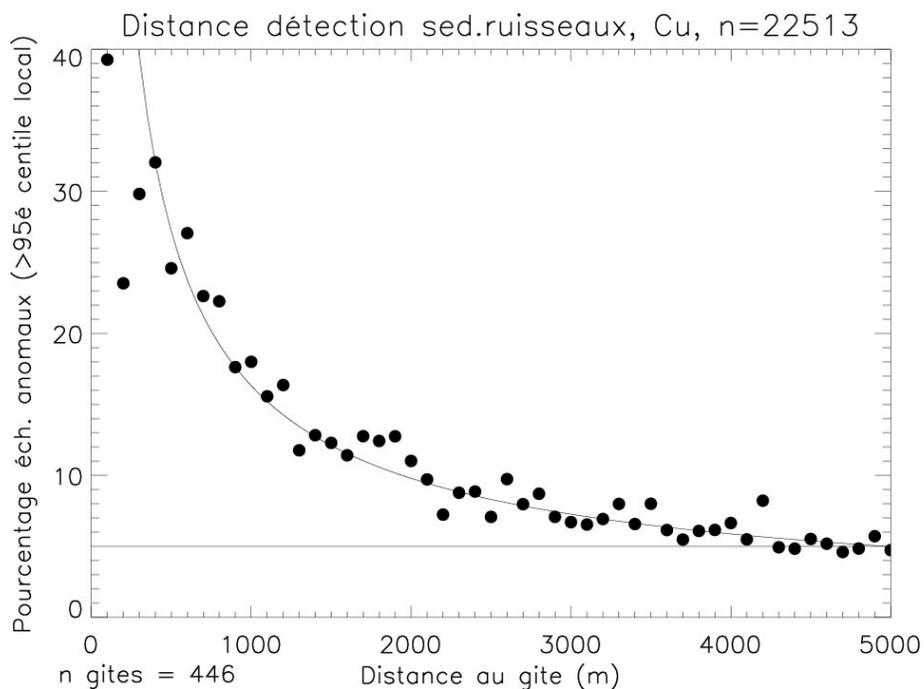


Figure A-2. Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), n gîtes indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.

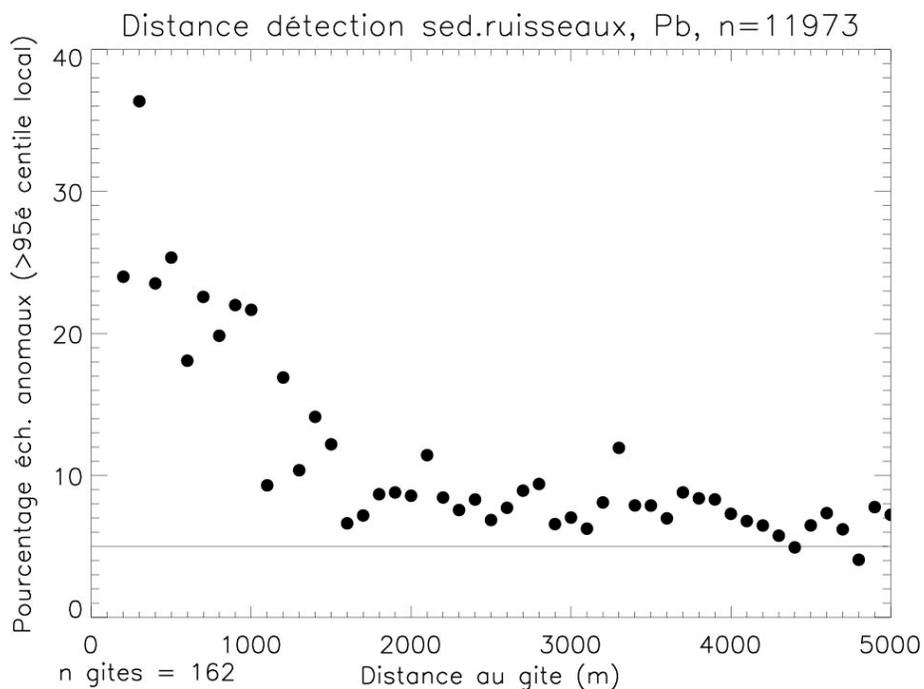


Figure A-3. Dispersion des anomalies de Pb dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte plombifère), n gîtes indique le nombre de gîtes plombifères considérés.

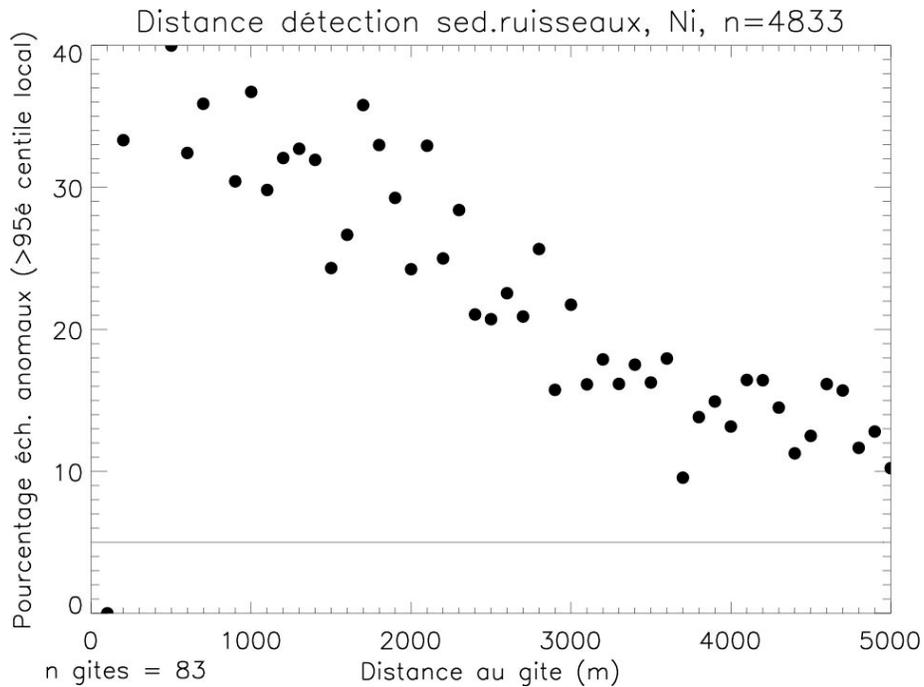


Figure A-4. Dispersion des anomalies de Ni dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélique), n gîtes indique le nombre de gîtes nickélique considérés.

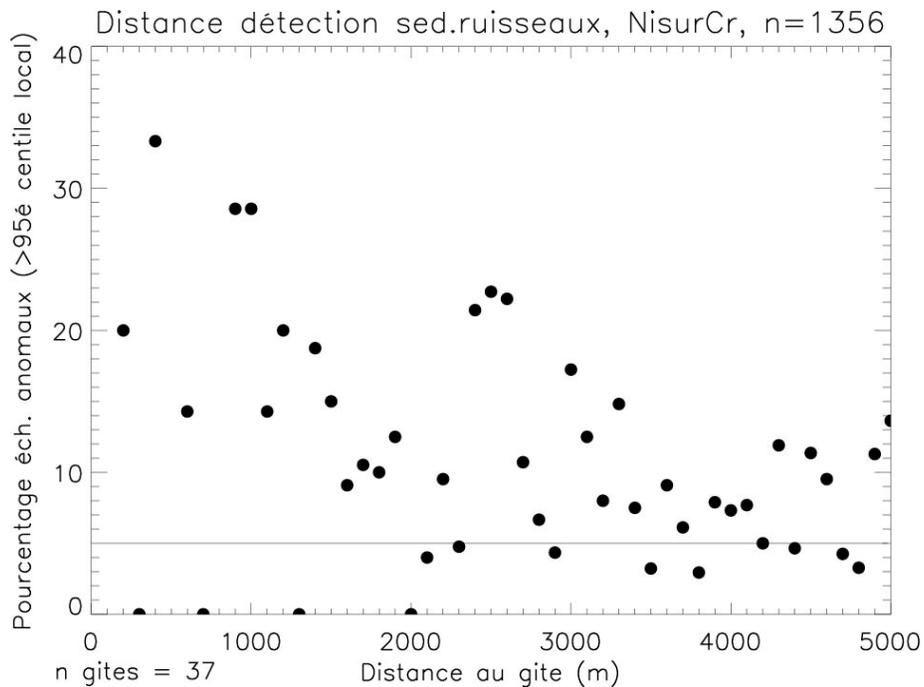


Figure A-5. Dispersion des anomalies de Ni/Cr dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélique), n gîtes indique le nombre de gîtes nickélique considérés.

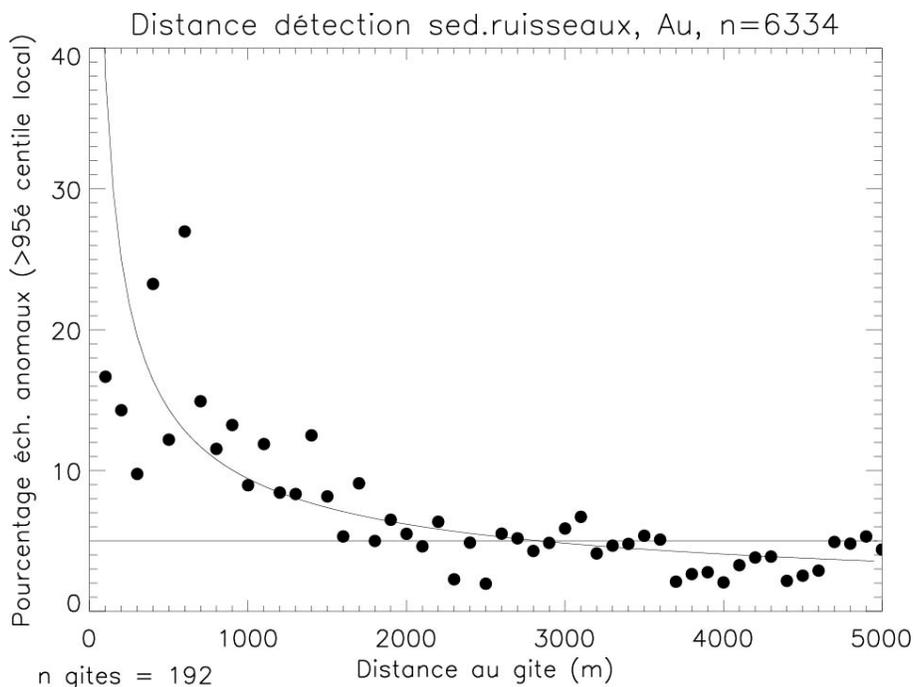


Figure A-6. Dispersion des anomalies de Au dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

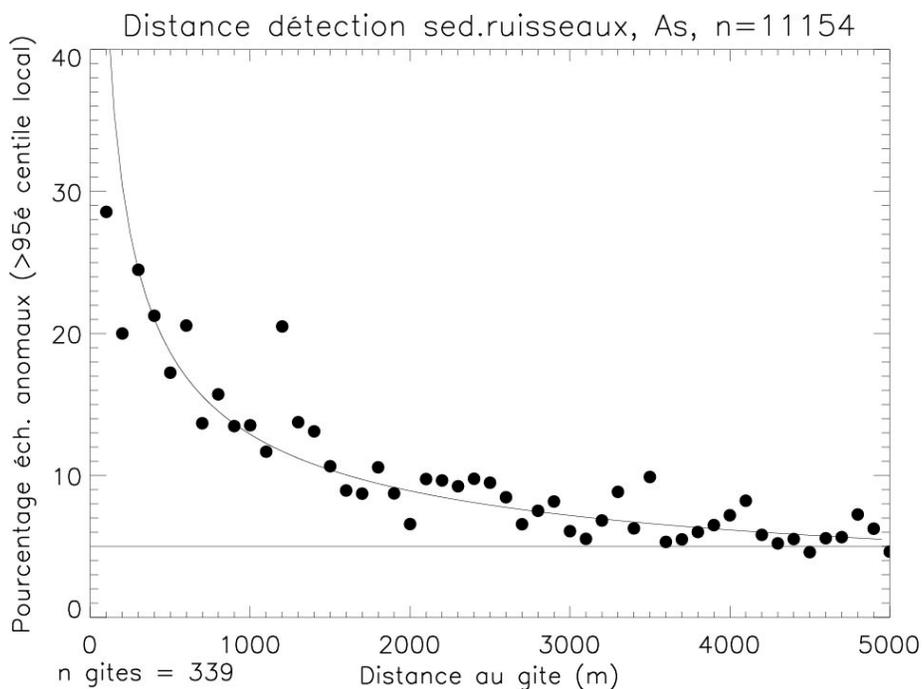


Figure A-7. Dispersion des anomalies de As dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

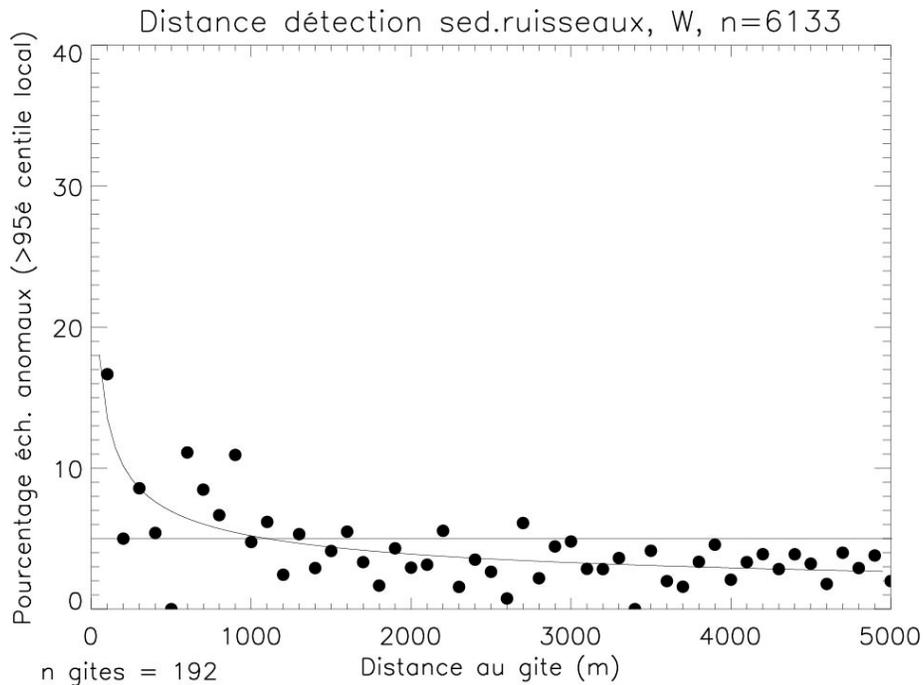


Figure A-8. Dispersion des anomalies de W dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

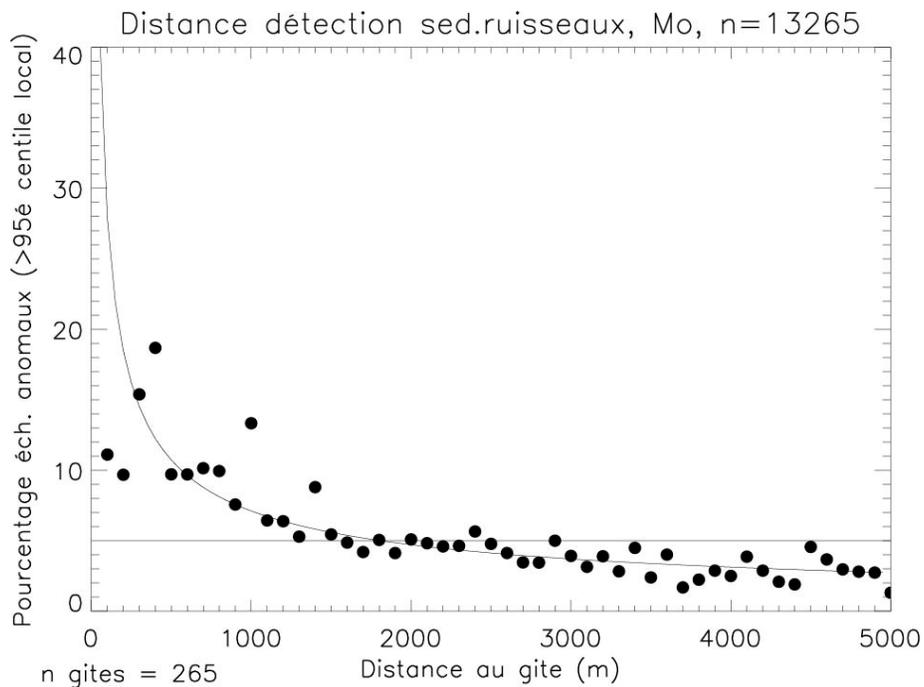


Figure A-9. Dispersion des anomalies de Mo dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

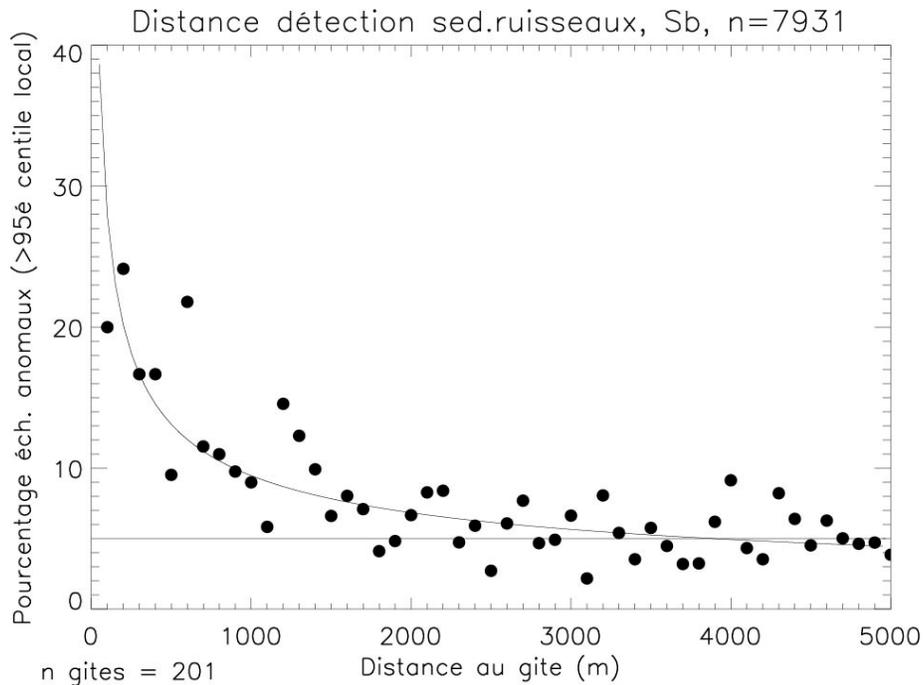


Figure A-10. Dispersion des anomalies de Sb dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

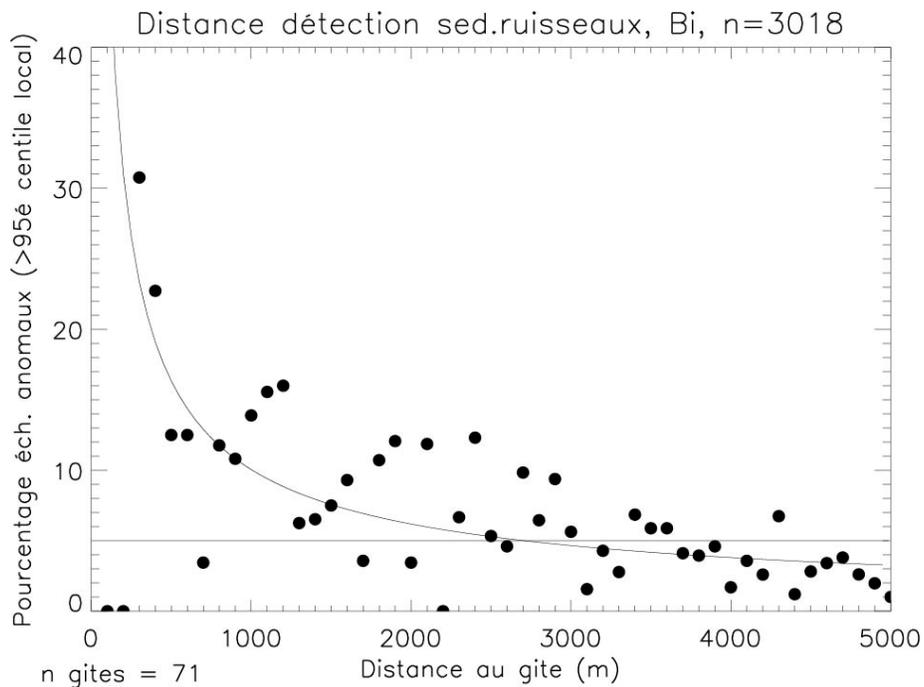


Figure A-11. Dispersion des anomalies de Bi dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

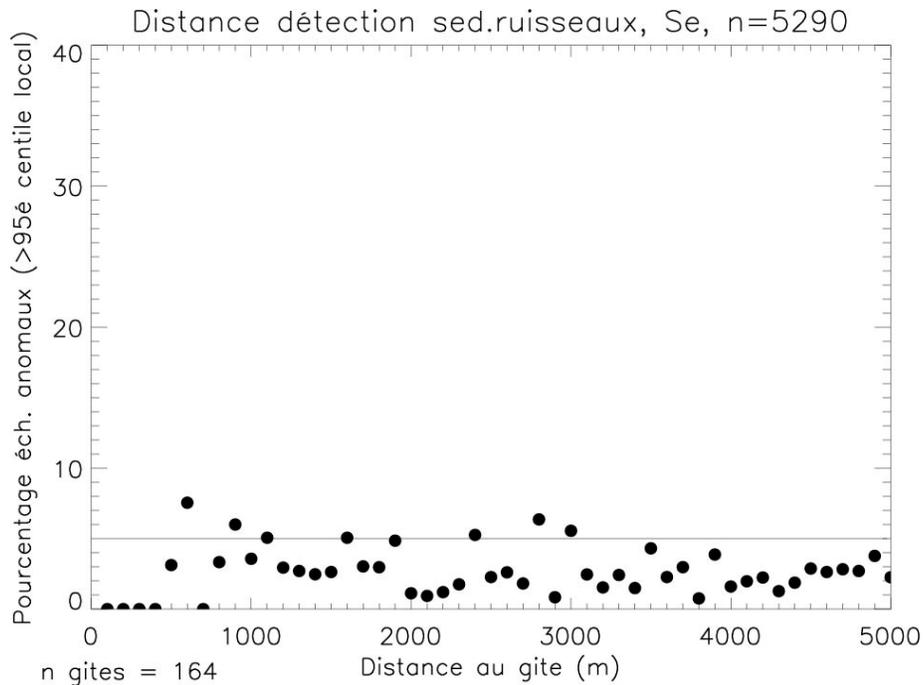


Figure A-12. Dispersion des anomalies de Se dans les sédiments de ruisseaux. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

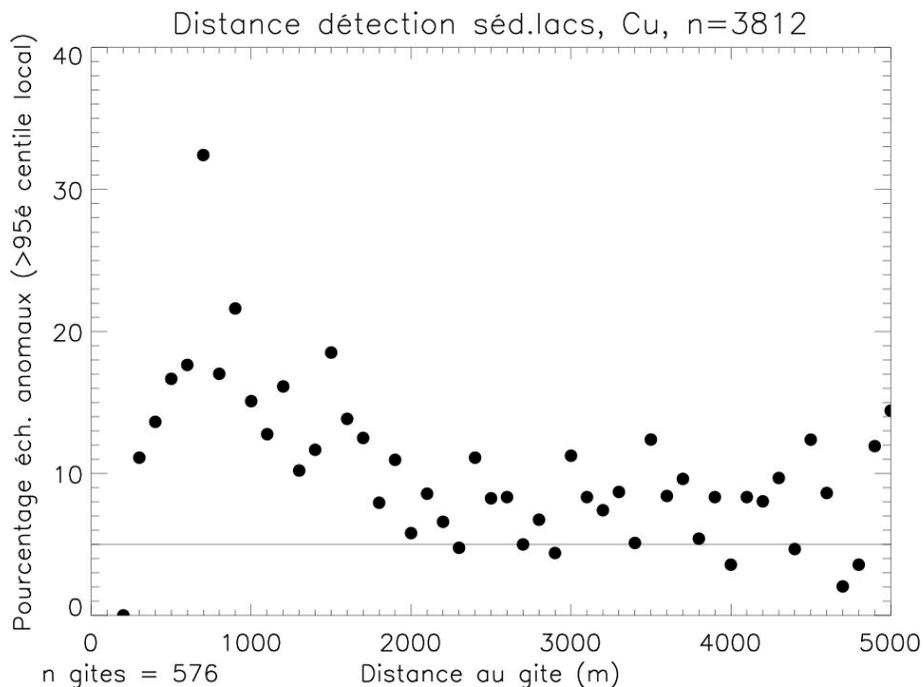


Figure A-13. Dispersion des anomalies de Cu dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte cuprifère), n gîtes indique le nombre de gîtes cuprifères considérés.

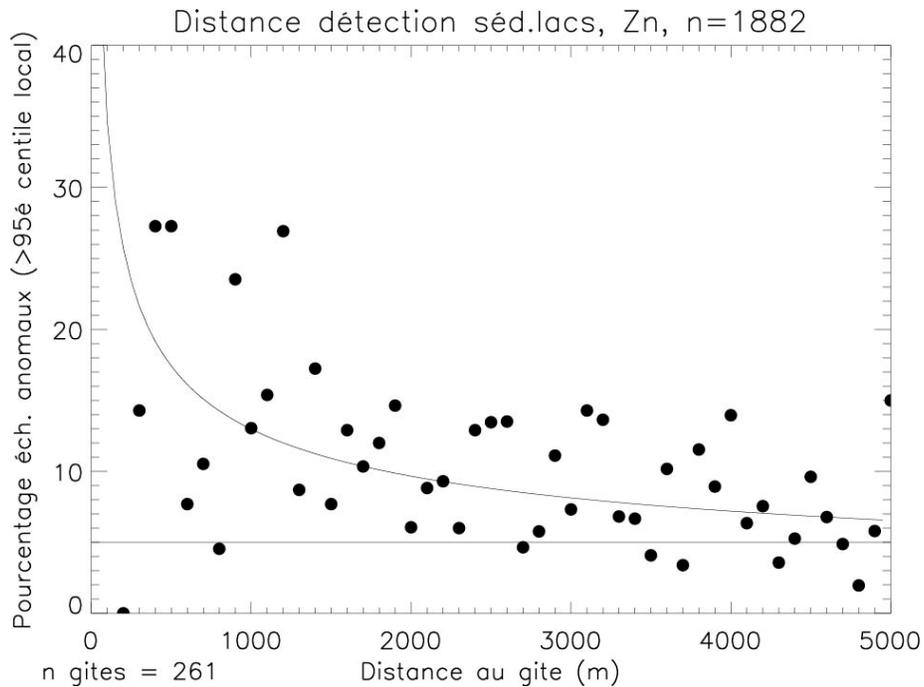


Figure A-14. Dispersion des anomalies de Zn dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte zincifère), n gîtes indique le nombre de gîtes zincifères considérés.

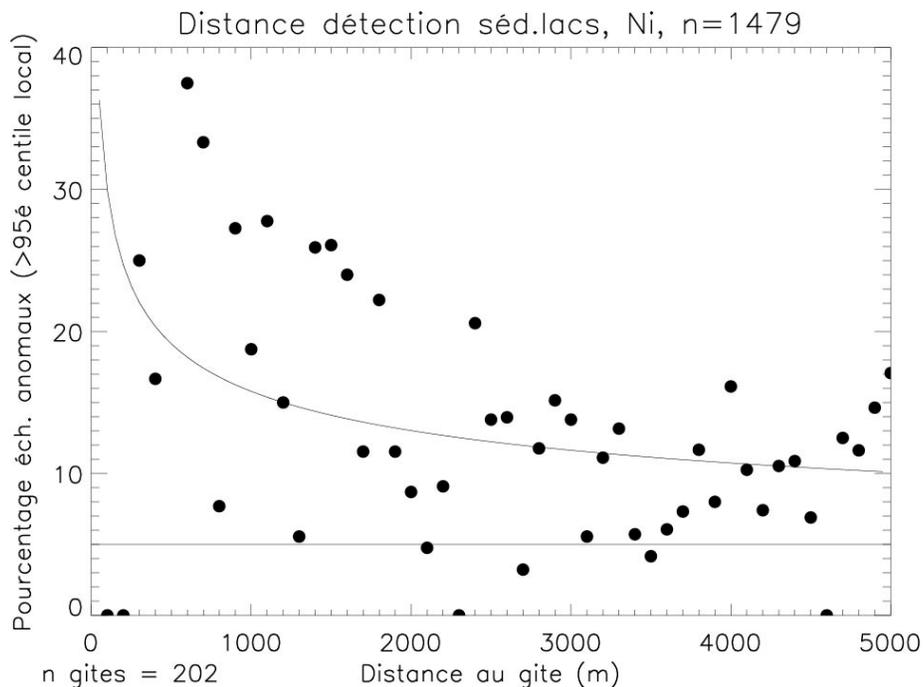


Figure A-15. Dispersion des anomalies de Ni dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte nickélifère), n gîtes indique le nombre de gîtes nickélifères considérés.

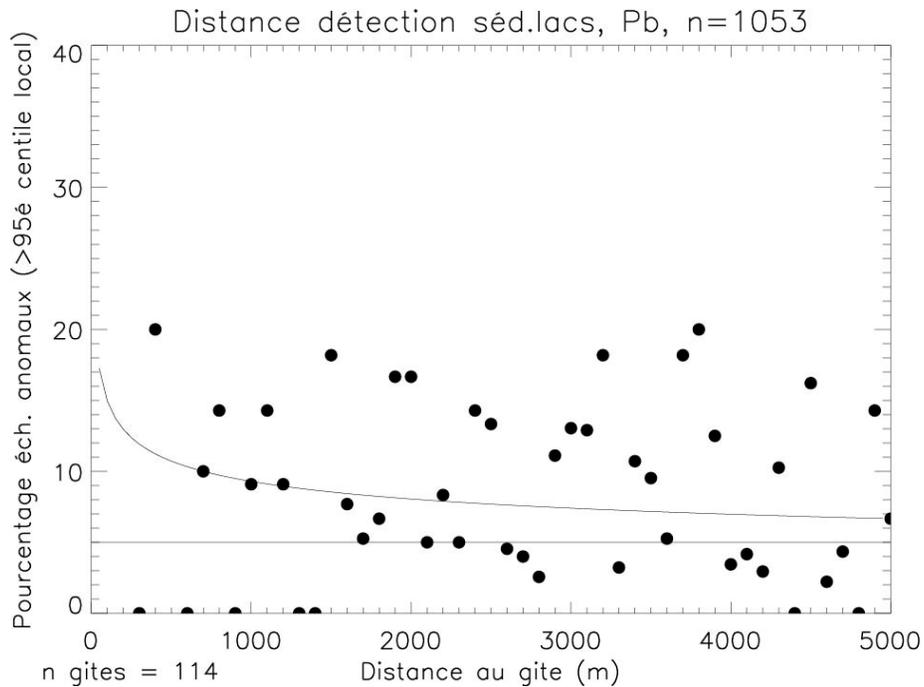


Figure A-16. Dispersion des anomalies de Pb dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte plombifère), n gîtes indique le nombre de gîtes plombifères considérés.

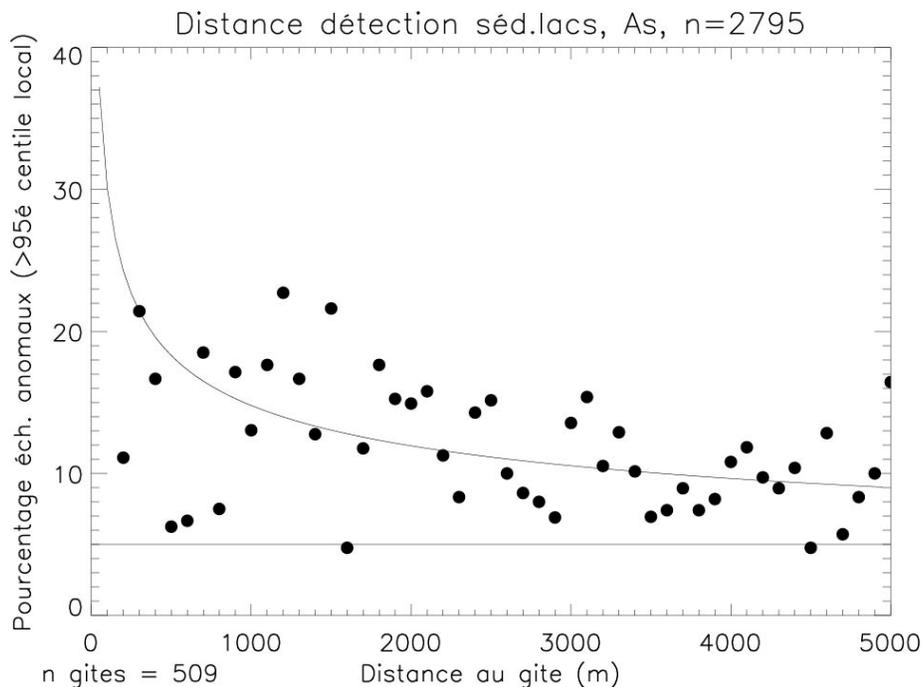


Figure A-17. Dispersion des anomalies de As dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

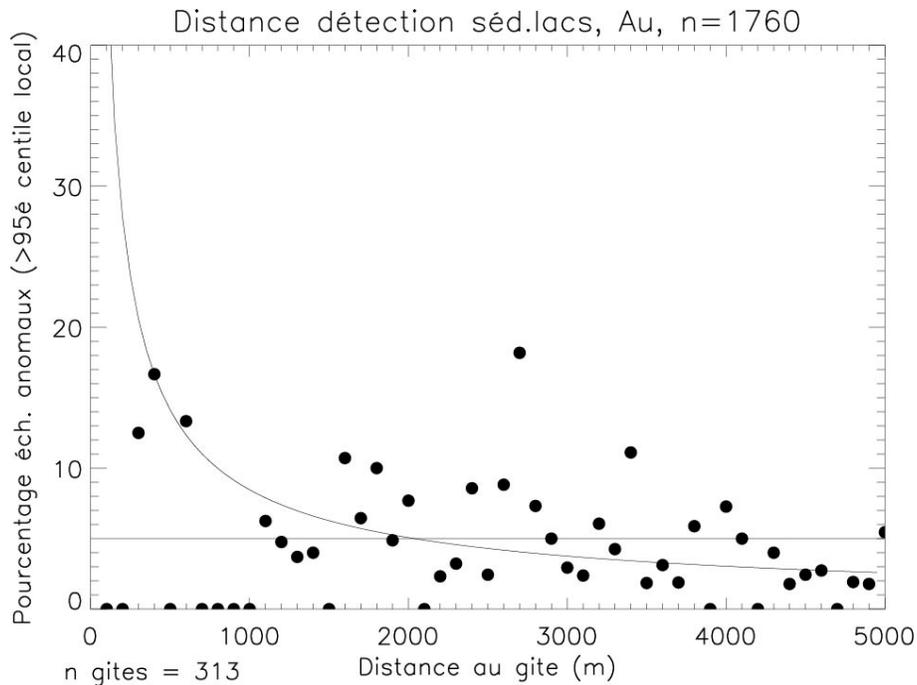


Figure A-18. Dispersion des anomalies de Au dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

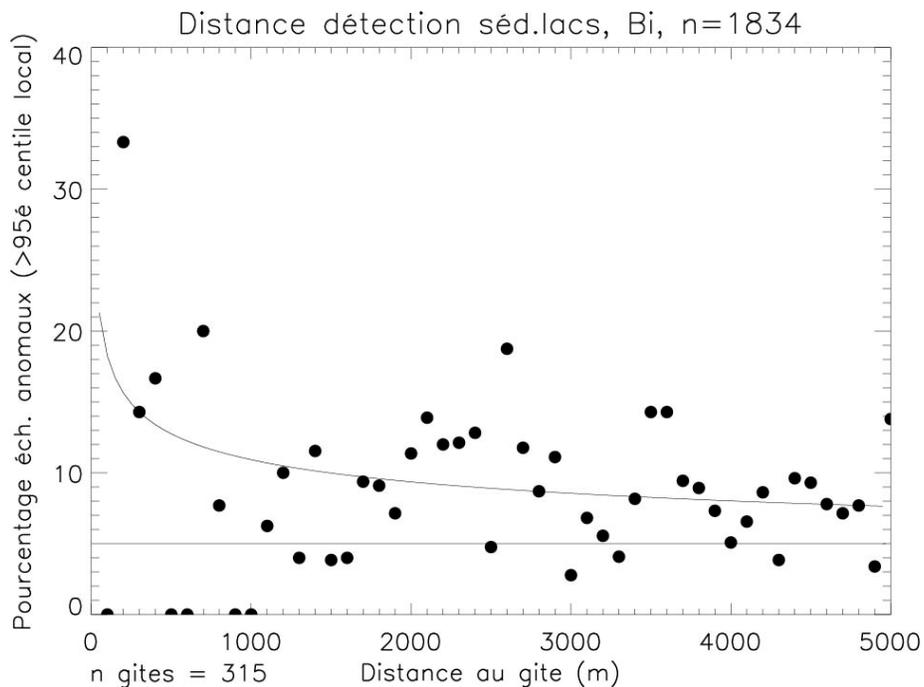


Figure A-19. Dispersion des anomalies de Bi dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

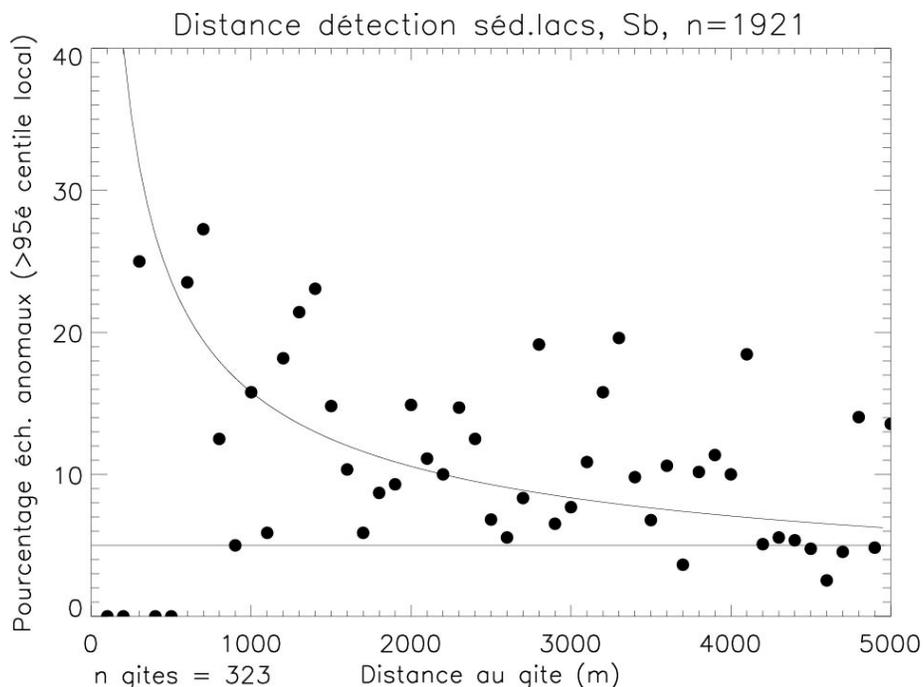


Figure A-20. Dispersion des anomalies de Sb dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

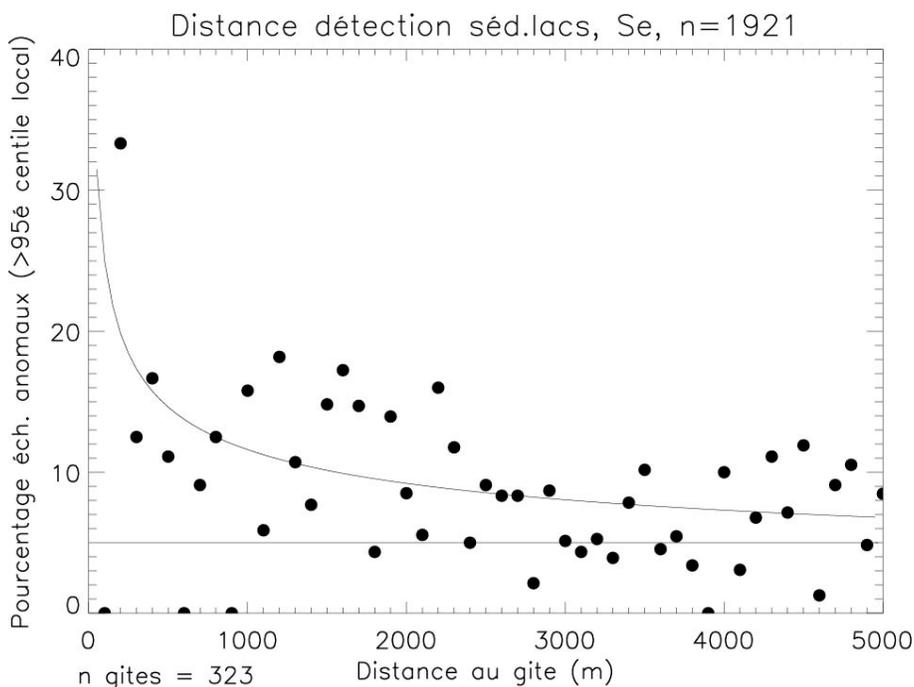


Figure A-21. Dispersion des anomalies de Se dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

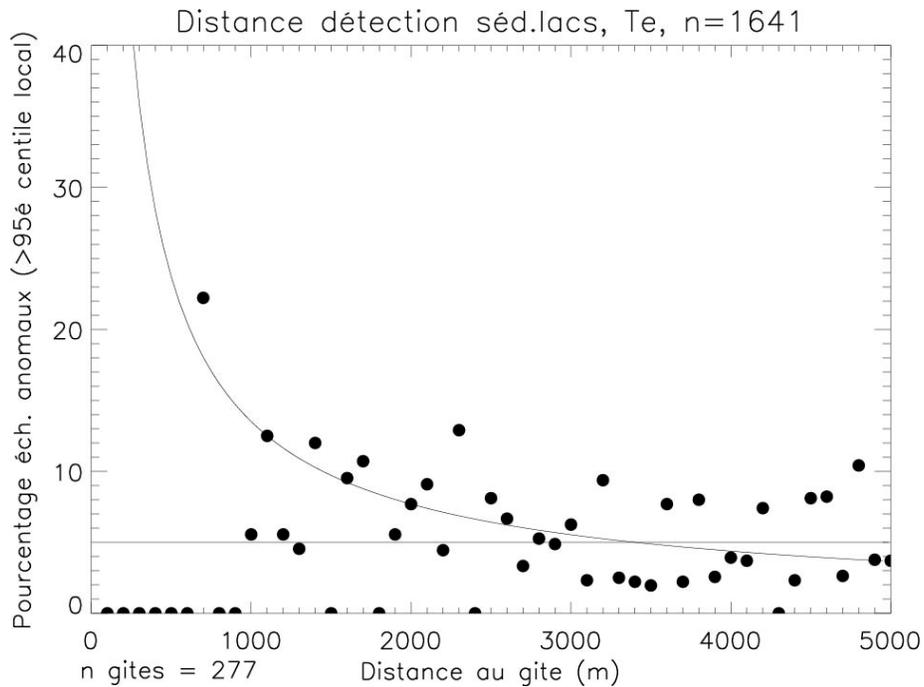


Figure A-22. Dispersion des anomalies de Te dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.

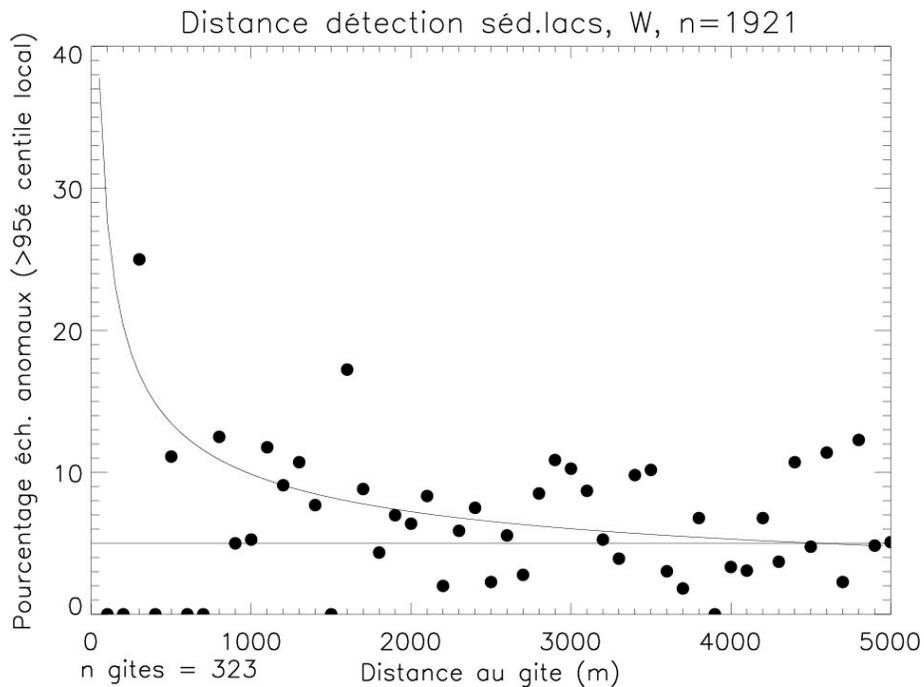


Figure A-23. Dispersion des anomalies de W dans les sédiments de lacs. n indique le nombre d'échantillons considérés pour l'analyse (nombre d'échantillons situés à moins de 5 km d'un gîte aurifère), n gîtes indique le nombre de gîtes aurifères considérés.