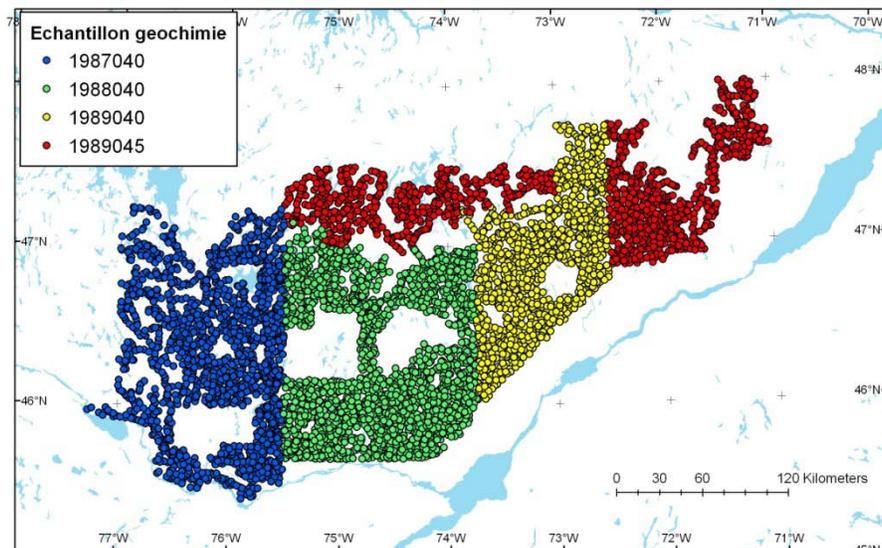

Optimisation des levés de sédiments de ruisseaux pour l'exploration

Partie B : Géochimie des sédiments de ruisseaux : étude des données du Sud-Ouest du Grenville

PROJET 2008-09



PAR : SYLVAIN TRÉPANIÉ

AVRIL 2009

AVERTISSEMENT

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

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

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

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.

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@uqac.ca

Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

La géochimie des sédiments de ruisseaux est un outil important pour l'exploration minérale. L'utilisation des sédiments de ruisseaux en exploration soulève toutefois plusieurs questions. L'utilité des sédiments de ruisseaux en différents contextes, le choix des éléments et du médium à échantillonner ainsi que la détermination des seuils constituent des exemples de sujets à considérer en exploration.

Ces différentes questions sont abordées dans le cadre de ce projet, d'abord par une revue de la littérature puis par une étude détaillée de la banque de données la plus complète disponible au Québec, c.-à-d. celle du Sud-Ouest du Grenville.

L'étude statistique et spatiale de la banque de données du Grenville (levés 1987 à 1989) indique que les teneurs dans les fractions fines des sédiments de ruisseaux sont fortement influencées par les variations des proportions de matière organique, d'argiles et d'oxydes secondaires dans les sédiments. Ces proportions sont principalement tributaires des variations des conditions de l'environnement de surface et dans une moindre mesure des variations des lithologies du socle. Les teneurs dans les minéraux lourds sont par opposition beaucoup moins influencées par l'environnement secondaire en raison de l'absence de matière organique et d'argiles dans ce type d'échantillon. Elles se corrèlent beaucoup mieux aux variations des lithologies du socle.

Deux méthodes sont proposées pour obtenir des anomalies qui sont indépendantes des variations du bruit de fond géochimique. La première méthode se base sur les valeurs résiduelles de régressions multiples ayant comme valeurs explicatives les facteurs d'analyses factorielles. La seconde méthode, plus simple, consiste à calculer des statistiques de base sur les groupes identifiés par des analyses par grappes. Ces deux approches, ainsi que le calcul de centiles simples sur l'ensemble de la base de données, sont appliquées à la base de données du Sud du Grenville (fractions fines et minéraux lourds de façon indépendante).

Les différentes minéralisations du Sud-Ouest du Grenville ont été séparées selon les principaux types de gîtes et étudiées à la lumière des méthodes de traitement proposées précédemment. Pour les minéralisations en Ni-Cu dans les intrusions mafiques, l'étude montre que toutes les minéralisations à moins de 2 km en aval de l'échantillon le plus proche et dans des ruisseaux drainant moins de 5 à 10 km² montrent des anomalies claires en Ni±Co±Cu. Dans le cas des gîtes de Zn dans les marbres, toutes les minéralisations à moins de 500 m sont positivement identifiées. Les minéralisations U-Th associées à des pegmatites ne montrent pas de telles relations systématiques entre la distance et la détection, mais la majorité des minéralisations montrent des anomalies clairement identifiables. Ces études de cas démontrent l'efficacité de la géochimie des sédiments de ruisseaux pour détecter les minéralisations considérées dans le contexte du Sud du Grenville. Cela, en autant que l'échantillonnage soit suffisamment dense, que des ruisseaux drainant des régions relativement petites sont échantillonnés et que des méthodes appropriées d'identification des anomalies soient utilisées.

L'étude de la signature des minéralisations dans les ruisseaux confirme effectivement que la détection d'anomalies associées aux gîtes dans les fractions fines requiert la plupart du temps un rehaussement des valeurs par des méthodes statistiques de régression. C'est le cas entre autres pour le nickel et le zinc dans les fractions fines. Dans le cas des minéraux lourds, l'utilisation d'une méthode plus simple, comme celle des centiles calculés sur les valeurs brutes sur les groupes de l'analyse par grappe, est jugée satisfaisante.

L'étude de la signature des gîtes et des bassins de drainage calculés pour les échantillons des levés a également permis de constater que la couverture géochimique de la région est partielle, et varie entre 15 % et 50 % selon la méthode de calcul et la distance maximale de détection des gîtes considérés.

Les meilleures combinaisons d'éléments, de types d'échantillons et de méthodes de traitement sont identifiées pour chacun des grands types de minéralisations (Ni-Cu dans les intrusions mafiques, Zn dans les marbres, U-Th dans les pegmatites). Des indices composés d'anomalies ont été construits à partir des cas étudiés et fournissent une série de cibles pour l'exploration Ni-Cu, Zn dans les marbres et U-Th dans les pegmatites. De nombreuses cibles montrent des contextes lithologiques très favorables pour le Ni-Cu dans les intrusions mafiques ou le Zn dans les marbres.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Table des matières.....	iv
Liste des figures	v
1. Introduction	vii
2. Caractéristiques des fractions fines et des minéraux lourds des sédiments de ruisseaux	1
2.1 Typologie des sédiments de ruisseaux	1
2.2 Principales composantes des fractions fines des sédiments de ruisseaux.....	2
2.3 Principales composantes des minéraux lourds.....	3
2.4 Comparaison fractions fines et minéraux lourds : implications.....	4
3. Dispersion des métaux des minéralisations vers les ruisseaux	4
3.1 Dispersion clastique vs. hydromorphique	4
3.2 Dispersion et choix du médium d'échantillonnage selon les éléments.....	4
3.3 Modes de dispersion et utilité des sédiments de ruisseaux en terrain plat.....	5
3.4 Modes de dispersion et détection des minéralisations enfouies	5
4. Analyse des données de sédiments de ruisseaux du sud du Grenville	5
4.1 Méthodes d'échantillonnage, méthodes analytiques et implications pour l'analyse	6
4.2 Travaux antérieurs	8
4.3 Nivellement des données géochimiques.....	8
4.4 Méthodologie d'analyse statistique et spatiale des données géochimiques	9
4.4.1 Analyse factorielle	9
4.4.2 Analyse par grappes.....	12
4.5 Analyse statistique et spatiale de la géochimie des fractions fines.....	12
4.5.1 Relation entre la couleur des échantillons, la perte au feu et les teneurs des fractions fines	12
4.5.2 Analyse factorielle	14
4.5.3 Analyse par grappes.....	29
4.6 Analyse statistique et spatiale de la géochimie des minéraux lourds	37
4.6.1 Relation entre la couleur des échantillons, la perte au feu et les teneurs des minéraux lourds	37
4.6.2 Analyse factorielle	39
4.6.2 Analyse par grappes.....	48
4.7 Comparaison des signaux géochimiques des minéraux lourds et des fractions fines	49
4.8 Conclusion et implications pour l'exploration.....	51
5. Méthodes proposées d'identification des anomalies dans les sédiments de ruisseaux	52
5.1 Calcul de centiles séparés sur les groupes de l'analyse par grappe	52
5.2 Valeurs résiduelles de la régression sur les facteurs principaux de l'analyse factorielle	53
6. Études de cas de dispersion géochimique dans les sédiments de ruisseaux en milieu nordique	55
6.1 Études de cas de la littérature	55
6.1.1 Synthèse d'étude de cas de dispersion dans les sédiments de ruisseaux en Scandinavie	55
6.1.2 Dispersion hydromorphique à partir d'un VMS en terrain de bouclier plat : Agricola Lake, Nunavut.....	56
6.1.3 Dispersion hydromorphique à partir d'un VMS en relief plat : Koke, Québec	59
6.2 Signatures géochimiques des minéralisations du sud du Grenville dans les sédiments de ruisseaux et cibles d'exploration.....	63
6.2.1 Méthodologie.....	63
6.2.2 Ni-Cu magmatique.....	65
6.2.3 Zinc dans les marbres	68
6.2.4 Pegmatites à U-Th.....	72

6.2.5 Couverture géochimique de la région.....	76
6.3 Conclusions sur les études de cas	77
7. Conclusions.....	80
8. Références	82
Annexe 1	84

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Levés du Sud du Grenville compilés pour l'étude.....	6
Figure 2.	Zones servant à établir les relations de nivellement entre les levés.	9
Figure 3.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en potassium dans les fractions fines (ppm).....	13
Figure 4.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en arsenic dans les fractions fines (ppm).....	13
Figure 5.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en nickel dans les fractions fines (ppm).....	14
Figure 6.	Diagramme de Scree pour les fractions fines. L'amplitude de la valeur propre indique l'importance du facteur.	15
Figure 7.	Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 1 et 2 des fractions fines.	16
Figure 8.	Corrélations entre variables qualitatives, radiométrie, lithologies et facteurs 1 et 2 des fractions fines.	17
Figure 9.	Carte du facteur 1 des fractions fines.	18
Figure 10.	Carte du facteur 1 des fractions fines et zones de till épais dans les dépôts de surface.....	18
Figure 11.	Carte du facteur 1 des fractions fines et intrusions/orthogneiss felsiques.....	19
Figure 12.	Carte du facteur 1 des fractions fines et sédiments glacio-marins et glacio-lacustres.	19
Figure 13.	Carte du facteur 1 des fractions fines et marbres et paragneiss.	20
Figure 14.	Carte du facteur 1 et échantillons situés dans les champs vs en forêt selon les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000.....	20
Figure 15.	Carte du facteur 2 des fractions fines.	22
Figure 16.	Carte du facteur 2 des fractions fines et intrusions mafiques.....	23
Figure 17.	Carte du facteur 2 et échantillons situés dans les champs vs en forêt selon les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000.....	23
Figure 18.	Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 3 et 4 des fractions fines.	24
Figure 19.	Corrélations entre variables qualitatives, lithologies et facteurs 3 et 4 des fractions fines.	25
Figure 20.	Carte du facteur 3 et roches archéennes.....	26
Figure 21.	Carte du facteur 4.	27
Figure 22.	Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 4 et 5.	27
Figure 23.	Carte du facteur 5 des fractions fines et intrusions felsiques.	28
Figure 24.	Relation entre les groupes de l'analyse par grappe et les facteurs 1 et 2 de l'analyse factorielle. Les étiquettes représentent l'interprétation de l'analyse factorielle.....	29
Figure 25.	Teneurs en nickel dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	30
Figure 26.	Teneurs en lanthane dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	30
Figure 27.	Teneurs en cuivre dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	31
Figure 28.	Valeurs en perte au feu dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	31

Figure 29.	Teneurs en zinc dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	32
Figure 30.	Teneurs en manganèse dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	32
Figure 31.	Teneurs en potassium dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.	33
Figure 32.	Total des éléments analysés selon les groupes de l'analyse par grappes.	34
Figure 33.	Groupe 9 de l'analyse par grappe vs sédiments glacio-marins et glacio-lacustres.	36
Figure 34.	Groupe 9 vs zones de forêt (vert) sur les cartes topographiques. Secteur de la rivière Gatineau et de la Petite-Nation, Outaouais.	36
Figure 35.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en calcium dans les fractions minéraux lourds (ppm).	37
Figure 36.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en manganèse dans les minéraux lourds (ppm).	38
Figure 37.	Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en uranium dans les minéraux lourds (ppm).	38
Figure 38.	Diagramme de Scree pour les minéraux lourds.	39
Figure 39.	Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 1 et 2 des minéraux lourds.	40
Figure 40.	Corrélations entre lithologies, variables qualitatives additionnelles, et facteurs 1 et 2 des minéraux lourds.	41
Figure 41.	Carte du facteur 1 des minéraux lourds.	42
Figure 42.	Carte du facteur 1 des minéraux lourds vs lithologies de la carte générale du Grenville.	43
Figure 43.	Carte du facteur 1 des minéraux lourds vs zones d'altitudes supérieures à 400 m.	43
Figure 44.	Carte du facteur 1 dans les minéraux lourds vs thorium dans la radiométrie (CGC, 2005). Note : la ligne grise montre la limite nord de la couverture radiométrique.	44
Figure 45.	Carte du facteur 2 dans les minéraux lourds.	45
Figure 46.	Carte du facteur 2 et lithologies.	45
Figure 47.	Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 3 et 4 des minéraux lourds.	46
Figure 48.	Corrélation entre lithologies, variables qualitatives additionnelles et facteur 3 et 4 des minéraux lourds.	47
Figure 49.	Carte du facteur 3 dans les minéraux lourds.	47
Figure 50.	Carte du facteur 3 dans les minéraux lourds et charnockites.	48
Figure 51.	Valeurs résiduelles en zinc vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).	54
Figure 52.	Valeurs résiduelles en cuivre vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).	54
Figure 53.	Valeurs résiduelles en nickel vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).	55
Figure 54.	(A) Localisation du gîte Agricola (Yava), T-N-O et, (B) Profils du cuivre et du zinc dans l'environnement secondaire entre les points A et B. Tiré de Cameron, 1977.	57
Figure 55.	Relief du secteur de Agricola Lake.	57
Figure 56.	Profil des teneurs en plomb dans l'environnement secondaire entre les points A et B. Tiré de Cameron, 1977.	58
Figure 57.	Localisation du gîte Koke, Fosse du Labrador, Québec.	59
Figure 58.	Vue aérienne du chapeau de fer associé aux sulfures massifs, gîte Koke. Photo de T. Clark, MRNF.	60
Figure 59.	Zinc dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke. Le cercle rouge indique la localisation du gîte.	61
Figure 60.	Cuivre dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke.	61

Figure 61.	Cuivre dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke.	62
Figure 62.	Profil géochimique des silts du ruisseau drainant la minéralisation du gîte Koke.	62
Figure 63.	Couverture géochimique des gîtes du Sud du Grenville.	63
Figure 64.	Détection des minéralisations de Ni-Cu dans les intrusions mafiques.	65
Figure 65.	Anomalies définies par l'index Nickel.	68
Figure 66.	Détection des minéralisations de zinc dans les marbres.	69
Figure 67.	Anomalies définies par l'index Zn Marbres.	72
Figure 68.	Détection des minéralisations d'uranium-thorium associé à des pegmatites.	73
Figure 69.	Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et granites (I1B).	74
Figure 70.	Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et radiométrie (eU ppm) (CGC, 2005).	75
Figure 71.	Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et ratio eU / eTh (radiométrie) (CGC, 2005).	75
Figure 72.	Région couverte par les levés 1987-1989.	77
Figure 73.	Bassins de drainage des levés 1987-1989, fusionnés.	78
Figure 74.	Bassins de drainage coupés à moins de 5 km et 2 km des échantillons correspondants.	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Minéraux observés dans sept échantillons des levés du sud du Grenville, selon différentes catégories de densité (en %). Tiré de Bellehumeur et al, (1994).	7
Tableau 2.	Taux de dissolution de certains minéraux dans l'acide nitrique. Données de Snall et Liljefors (2000) pour minéraux broyés à moins 64 microns dans HNO ₃ 7m, sauf le grenat (Karimzadeh Somarin, (2003)) et le diopside (Church et Al, 1987).	8
Tableau 3.	Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle des fractions fines.	15
Tableau 4.	Caractéristiques des groupes issus de l'analyse par grappes des fractions fines.	35
Tableau 5.	Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle des minéraux lourds.	39
Tableau 6.	Caractéristiques des groupes de l'analyse par grappes des minéraux lourds.	48
Tableau 7.	Comparaison entre teneurs médianes des minéraux lourds et fractions fines.	49
Tableau 8.	Corrélations entre minéraux lourds et fractions fines.	50
Tableau 9.	Contrastes entre les anomalies et les variations du bruit de fond pour différents métaux, dans les fractions fines et les minéraux lourds.	51
Tableau 10.	Signatures des minéralisations de Ni-Cu détectées par les sédiments de ruisseaux.	66
Tableau 11.	Nombres de gîtes montrant des anomalies selon la combinaison méthode de traitement/type d'échantillon pour les minéralisations Ni-Cu.	66
Tableau 12.	Signatures des indices de minéralisation en zinc dans les marbres.	69
Tableau 13.	Signatures des gîtes U-Th dans des pegmatites.	73
Tableau 14.	Nombres de gîtes montrant des anomalies selon la combinaison méthode de traitement / type d'échantillon pour la détection des minéralisations U-Th dans des pegmatites.	73
Tableau 15.	Couverture géochimique de la région calculée à partir des bassins de drainage des échantillons.	77

1 INTRODUCTION

La géochimie des sédiments de ruisseaux est un outil d'exploration minérale communément utilisé. Au Québec, les sédiments de ruisseaux représentent l'essentiel de la couverture de géochimie de l'environnement secondaire des Appalaches et de la moitié Sud-Ouest du Grenville.

L'utilisation des sédiments de ruisseaux en exploration soulève toutefois plusieurs questions, tant au niveau de la planification des levés que de la planification des campagnes de suivi des anomalies. Ces questions touchent entre autres:

- les méthodes de détermination de seuils d'anomalies appropriés;
- la détermination du médium approprié (p. ex. : fractions fines vs minéraux lourds);
- le choix des éléments appropriés;
- la densité d'échantillons nécessaire pour obtenir une bonne couverture géochimique;
- l'utilité en secteurs de faible relief et/ou de dépôts glaciomarins/lacustres extensifs.

Ce projet aborde ces sujets principalement par une revue de la littérature et par une étude de la banque de données la plus complète disponible au Québec, c'est-à-dire celle du Sud-Ouest du Grenville. Il s'inscrit dans un projet plus vaste du CONSOREM qui traite également les données de la Gaspésie et de la Baie-James.

La première partie de ce rapport présente certaines caractéristiques générales des sédiments de ruisseaux, synthétisées à partir d'une revue de la littérature. La seconde partie traite des modes de dispersion géochimique des minéralisations vers les sédiments de ruisseaux. L'étude statistique de la base de données du Sud-Ouest du Grenville est l'objet d'une troisième partie. Finalement, la dernière partie porte sur des études de cas de dispersion géochimique dans les sédiments de ruisseaux provenant de la littérature et des levés du Sud-Ouest du Grenville.

2 CARACTÉRISTIQUES DES FRACTIONS FINES ET DES MINÉRAUX LOURDS DES SÉDIMENTS DE RUISSEAUX

2.1 Typologie des sédiments de ruisseaux

En général, dans les systèmes alluviaux, les sédiments s'accumulent à différents endroits. Si on prend pour exemple une vallée alluviale dans un climat tempéré (selon Ottesen et Theobald, 1994), on retrouvera des sédiments dans :

- la partie active du système alluvial, là où des sédiments sont constamment déposés (talweg);
- les levées adjacentes au talweg (qui peuvent être reprise périodiquement en période de crue);
- la zone d'inondation périodique plus large qui entoure le cours d'eau.

Il faut retenir que les campagnes d'échantillonnage ciblent normalement le sédiment actif du talweg, bien que ce ne soit généralement pas spécifié dans les rapports des campagnes d'échantillonnage. Il est toutefois possible également d'échantillonner les autres composantes du système alluvial pour l'exploration. Il faut noter que la granulométrie et la composition du

sédiment varie considérablement selon l'endroit échantillonné. En général, les sédiments des plaines d'inondation sont de granulométrie relative fine, alors que ceux du talweg et des levées varient en granulométrie selon le débit.

Les fractions fines et les minéraux lourds sont normalement les deux fractions qui sont le plus couramment extraites et analysées des sédiments de ruisseaux du talweg. En conséquence, les discussions des sections suivantes se concentrent sur ces deux fractions. On trouve toutefois dans la littérature la mention de campagnes basées sur la séparation d'autres fractions qui ont des applications intéressantes en exploration, notamment les oxydes de fer et manganèse ou la tourbe (Hale, 1994).

2.2 Principales composantes des fractions fines des sédiments de ruisseaux

Les fractions fines des sédiments actifs contiennent principalement de la matière inorganique d'origine détritique (minéraux), avec des proportions variables de matière organique et de précipités chimiques. Les descriptions suivantes sont tirées des travaux de Ottesen et Theobald, (1994) qui synthétisent eux-mêmes des travaux antérieurs.

Composante détritique primaire

La composante détritique primaire des fractions fines est formée de minéraux primaires résistants provenant de l'érosion des roches sources (quartz, feldspath, micas...).

Argiles minéralogiques

L'hydrolyse des minéraux primaires forme des minéraux du groupe des argiles. Ces minéraux secondaires peuvent ensuite être transportés des sols où ils sont formés, vers les ruisseaux. En général, il semble que la majorité des sédiments de ruisseaux de la zone active contiennent peu d'argiles. Seuls les endroits les plus calmes et isolés en contiennent; par exemple, les sédiments provenant d'une plaine d'inondation ou de ruisseaux marécageux.

Composante chimique

La composante chimique est définie ici comme des minéraux qui précipitent à partir de l'eau de surface ou souterraine aux conditions de surface oxygénées. Il s'agit principalement d'oxydes ou d'hydroxydes secondaires de fer et de manganèse plus ou moins cristallins, ainsi que des quantités variables d'oxydes secondaires d'autres éléments, de carbonates et de phosphates. Ce processus de précipitation peut survenir directement dans le ruisseau au site de sédimentation (in situ) ou dans un autre endroit en amont (par exemple dans les sols ou dans une autre partie du ruisseau). Dans ce dernier cas, la composante chimique est alors transportée. Ils peuvent se trouver sous formes diverses tels que de grains, de concrétions, de couches minces sur les cailloux, de ciment, etc.

Les oxydes secondaires sont considérés comme étant omniprésents dans les sédiments de ruisseaux. Leur abondance varie toutefois considérablement. Ils sont particulièrement abondants aux endroits où les eaux subissent des changements drastiques de Eh et/ou de pH. Par exemple, dans les secteurs marécageux, des accumulations importantes d'oxydes secondaires se produisent lorsque l'eau à Eh faible causée par la décomposition de la matière organique abondante se retrouve en condition plus oxydante (les oxydes secondaires sont solubles à Eh faible et précipitent à Eh élevé).

Composante organique

La composante organique est particulièrement importante dans les zones forestières et dans les secteurs de toundra. Dans les zones de faible relief de ces régions, la composante organique peut devenir la composante la plus importante du sédiment.

La composante organique s'accumule de trois façons dans le sédiment de ruisseaux :

- par le transport puis la sédimentation de fragments organiques produits en amont du bassin de drainage;
- par le transport en solution puis par l'adsorption sur les surfaces minérales de composés organiques (p. ex : acides fulviques ou humiques);
- ou par l'activité organique in situ.

Contenu en métaux des fractions fines

Les proportions des composantes chimiques (oxydes secondaires), argileuses et organiques sont directement reliées aux conditions physico-chimiques et biologiques de l'environnement secondaire. En général, les composantes organiques et chimiques sont plus riches en métaux que la composante détritique inorganique (Ottesen et Theobald, 1994). Les minéraux des argiles sont de même enrichis en plusieurs métaux par des processus d'adsorption et de substitution (Plant et Raiswell, 1994). L'abondance de ces composantes à l'échelle locale ou régionale fera donc varier de façon significative les teneurs en métaux mesurées des fractions fines.

Chaque métal a une affinité qui lui est spécifique aux phases d'oxydes de fer, de manganèse, à la matière organique et aux minéraux des argiles. Cette affinité varie selon les conditions physico-chimiques (Eh-pH, etc.) et biologiques (type de matière organique) de l'environnement secondaire. L'examen détaillé de l'affinité des métaux individuels avec les différentes composantes est un sujet complexe qui dépasse le cadre de cette étude. Toutefois, certaines références y seront faites lors de l'interprétation des signaux géochimiques de la base de données du Grenville.

2.3 Principales composantes des minéraux lourds

Composante détritique primaire

La composante détritique primaire des minéraux lourds comprend des minéraux de densité supérieure. La liste des minéraux exacte qui s'y retrouve dépend de la méthode de séparation des minéraux lourds utilisée, mais en général il s'agit de minéraux mafiques tels que le grenat, les pyroxènes, les amphiboles, etc. Les minéraux communs tels que le quartz, le feldspath et la muscovite sont absents.

Argiles minéralogiques

Les argiles, de par leur faible densité, sont absentes des concentrés de minéraux lourds.

Composante chimique

Les oxydes de fer et de manganèse secondaire décrits dans la section sur les fractions fines sont des phases relativement denses qui peuvent se retrouver dans les concentrés de minéraux lourds. Comme ce sont des minéraux paramagnétiques (Ottesen et Theobald, 1994), ils restent après une séparation magnétique simple.

Composante organique

Dans les minéraux lourds, la composante organique est absente. En effet, les composés organiques sont des phases relativement peu denses qui sont évacuées du sédiment lors de la séparation des minéraux lourds.

2.4 Comparaison fractions fines et minéraux lourds : implications

Les descriptions précédentes permettent de constater que les minéraux lourds, de par l'absence de certaines composantes (matière organique et argiles), constituent un médium qui est moins complexe que les fractions fines. En conséquence, il est probable que les variations du bruit de fond géochimique des minéraux lourds soient moins complexes et plus faciles à interpréter.

On pourrait conclure que l'échantillonnage des minéraux lourds est préférable aux fractions fines en contexte d'exploration en raison de leur simplicité. Cependant, dans le cas de dispersions hydromorphiques de métaux à partir d'une minéralisation, les phases organiques et les argiles peuvent contenir une bonne partie des métaux.

3 DISPERSION DES MÉTAUX DES MINÉRALISATIONS VERS LES RUISSEAUX

3.1 Dispersion clastique vs hydromorphique

Il existe deux modes de dispersion des métaux des minéralisations dans les ruisseaux (Hale, 1994) : la dispersion mécanique (clastique) et la dispersion hydromorphique (chimique aqueuse). On parle de dispersion hydromorphique lorsque les métaux sont transportés en solution dans l'eau; la dispersion peut être effectuée autant par les eaux de surface que par les eaux souterraines. Le transport des métaux sous forme solide est une dispersion plutôt clastique. Dans le cas de la dispersion clastique, les minéraux porteurs peuvent être des minéraux primaires résistants, des minéraux secondaires insolubles. Bien entendu, il est commun que les deux types de dispersion opèrent de façon parallèle ou séquentielle. Par exemple, des métaux mis en solution à partir d'une minéralisation peuvent être transportés de façon hydromorphique pour la première partie du parcours, s'adsorber sur des oxydes de manganèse, et poursuivre le parcours de cette façon.

3.2 Dispersion et choix du médium d'échantillonnage selon les éléments

Le type de dispersion de chaque élément dépend de la phase minérale primaire dans laquelle il se retrouve et la mobilité aqueuse de l'élément dans l'environnement secondaire. Le type de dispersion influence le choix du médium échantillonné pour détecter la dispersion.

En général, les éléments tels qu'U, Mo, F et Zn au sein des minéralisations, sont fortement mobiles et sont dispersés de façon principalement hydromorphique (Hale, 1994). En conséquence, l'eau est le médium parfait pour ces éléments. Les sédiments fins peuvent également être intéressants, car les phases argileuses, organiques et d'oxydes secondaires qu'ils contiennent sont fortement susceptibles de fixer ces éléments à partir des solutions aqueuses par adsorption et coprécipitation (Hale, 1994).

Certains éléments sont relativement immobiles et se retrouvent à l'intérieur de minéraux résistants à l'altération. On trouve par exemple le Cr dans la chromite, Sn dans cassitérite, W dans scheelite, Nb dans pyrochlore, et Au natif (Hale, 1994). Pour ces éléments, les minéraux lourds sont le médium parfait, puisqu'ils sont également des minéraux denses.

Plusieurs autres éléments sont de mobilités intermédiaires (Cu, Ni, Co, Ag, As). Ces éléments sont typiquement fortement solubles à proximité de minéralisations sulfurées qui s'oxydent, mais leur solubilité est très sensible aux changements de Eh et de pH (Hale, 1994). Ces éléments précipiteront alors à la faveur de processus de coprécipitation sur les argiles, les oxydes secondaires ou la matière organique. Les fractions fines ou les minéraux lourds peuvent être d'un intérêt égal dans ces deux cas.

3.3 Modes de dispersion et utilité des sédiments de ruisseaux en terrain plat

En général, l'écoulement de l'eau peut s'effectuer naturellement même en terrain relativement plat. En conséquence, on peut penser que la dispersion hydromorphique peut s'effectuer en contexte de relief plat. Il semble que dans des terrains nordiques de faible relief sur les boucliers précambriens, la dispersion clastique des métaux à partir de minéralisations est moins importante que la dispersion hydromorphique (Cameron, 1994).

Comme cela a été mentionné précédemment, plusieurs métaux moyennement et fortement mobiles sont transportés dans les composantes organiques et argileuses. Or, ces phases sont très peu denses et très finement grenues, et peuvent donc transporter les métaux sur une certaine distance même en terrain plat. Les oxydes secondaires, même s'ils sont plus denses, sont également très communément des phases à granulométrie très fine qui peuvent également être transportées sur de bonnes distances.

3.4 Modes de dispersion et détection des minéralisations enfouies

La dispersion hydromorphique peut également s'effectuer à partir d'une minéralisation qui est *couverte par des dépôts quaternaires*. Dans ce cas, ce sont les eaux souterraines qui transportent les métaux au début du parcours de l'eau. Il suffit par la suite que l'eau souterraine émerge et rejoigne le réseau de surface et précipite les métaux pour que des anomalies soient créées dans les sédiments de ruisseaux.

4 ANALYSE DES DONNÉES DE SÉDIMENTS DE RUISSEAUX DU SUD DU GRENVILLE

Une base de données de sédiments de ruisseaux du Sud du Grenville a été sélectionnée pour cette étude. Elle est composée de quatre levés réalisés durant les années 80 : 1987040, 1988040, 1989040 et 1989045 (MRN¹, 2004; **Figure 1**). Ce groupe de quatre levés a été choisi pour les raisons suivantes :

1. Les fractions fines et les minéraux lourds y ont été prélevés sur les mêmes sites. Ceci permettra de comparer les signaux géochimiques identifiables dans ces deux méthodes.
2. Un nombre important de minéralisations de différents types est présent à l'intérieur des limites de ces levés : Cu-Ni dans des intrusions mafiques, U dans des pegmatites et des skarns, Zn dans les marbres, Mo, etc. Ceci permettra d'évaluer et de contraster la signature de ces différents types dans les fractions fines et les minéraux lourds.

¹ MRN : Ministère des Ressources naturelles (Québec).

3. Ils ont été réalisés en utilisant essentiellement les mêmes méthodes d'analyse et d'échantillonnage. Malgré cela, certains problèmes d'uniformité des données sont notés pour certains éléments.

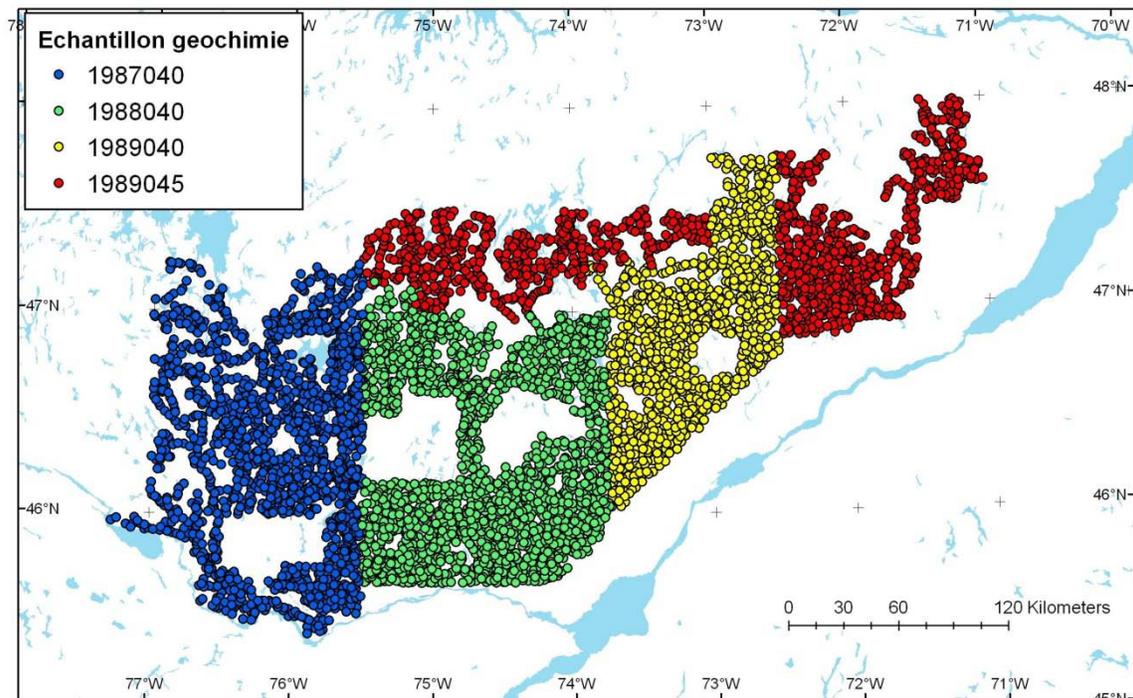


Figure 1. Levés du Sud du Grenville compilés pour l'étude.

4.1 Méthodes d'échantillonnage, méthodes analytiques et implications pour l'analyse

Méthode d'échantillonnage des fractions fines

Les échantillons de fractions fines ont été tamisés à moins de 177 microns. Ils incluent donc des sables fins, des silts et des argiles.

Méthode d'échantillonnage des minéraux lourds

Les minéraux lourds ont quant à eux été tamisés à moins de 850 microns. Il s'agit donc de matériel de taille inférieure ou égale aux sables grossiers. Une séparation magnétique a été effectuée pour enlever la magnétite et probablement une partie de l'ilménite. Il faut noter que cette séparation magnétique a pu enlever certains minéraux d'intérêt pour l'exploration, notamment la willémite (oxyde de zinc similaire à la magnétique). Finalement, la séparation des minéraux lourds a été effectuée à l'aide d'une table à secousses pour obtenir un concentré des minéraux de densité supérieure à 2,8. Le **Tableau 1** montre les proportions moyennes des minéraux retrouvés dans les différentes fractions de sept échantillons (tiré de Bellehumeur et al., 1994).

Tableau 1. Minéraux observés dans sept échantillons des levés du sud du Grenville, selon différentes catégories de densité (en %). Tiré de Bellehumeur et al, (1994).

Minéraux ayant la plage de densité la plus commune	Fractions Lourdes (généralement sg > 3,3)	Fractions intermédiaires (généralement sg 2,8 à 3,3)	Fractions fines (généralement sg < 2,8)
Grenat (3,3–4,3)	46,6	3,2	-
Oxydes métalliques (3,2–4,5)	15,5	2,1	1,4
Amphibole (2,9–3,4)	13,9	38,6	2,3
Pyroxène (3,1–3,5)	12,0	22,3	1,1
Titanite (3,4–3,6)	4,9	-	-
Apatite (3,1–3,3)	3,1	Tr.	-
Épidote (3,2–3,4)	2,5	1,2	-
Zircon (4,2–4,7)	1,0	-	-
Spinelle (3,5–4,1)	0,5	-	-
Sillimanite (3,23)	Tr.	-	-
Quartz (2,65)	-	16,9	63,6
Feldspath (2,5–2,8)	-	11,6	24,4
Mica (2,7–3,1)	-	3,4	7,2
Wollastonite (2,8–2,9)	-	0,7	Tr.

Méthode analytique

Les échantillons de fractions fines et de minéraux lourds ont été analysés par une méthode ICP utilisant une extraction par acide nitrique chaud pour les éléments suivants : Ag, Al, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sc, Sm, Sr, Th, Ti, V, Y et Zn. Il est connu que plusieurs minéraux, notamment les silicates et les oxydes, ne sont dissous que partiellement dans l'acide nitrique ou chlorhydrique. Le **Tableau 2** compile les taux de dissolution de différents minéraux dans l'acide nitrique d'après différentes sources de la littérature (Snäll et Liljefors, 2000; Karimzadeh Somarin, 2004; Church et al., 1987). On peut y noter particulièrement les faibles taux de dissolution du grenat, des feldspaths et des amphiboles, alors que des minéraux comme la biotite ou la chlorite sont presque totalement dissous. Ces taux de dissolution variables ont bien entendu une conséquence importante sur l'interprétation des tendances géochimiques; on peut difficilement attribuer une tendance à un minéral dont la dissolution est faible. A l'inverse, une influence significative peut être attribuée à des minéraux fortement dissous présents en quantités mêmes mineures.

D'autres éléments, As, Au, Br, Cs, Sb, Se, Tm, U et W, ont plutôt été analysés par activation neutronique. Dans ces cas, il s'agit d'analyses qui retournent la concentration totale et réelle de ces éléments dans les échantillons.

Tableau 2. Taux de dissolution de certains minéraux dans l'acide nitrique. Données de Snall et Liljefors (2000) pour minéraux broyés à moins 64 microns dans HNO₃ 7m, sauf le grenat (Karimzadeh Somarin, (2003)) et le diopside (Church et Al, 1987).

Minéral	% Extraction des éléments dans HNO ₃
Grenat*	Aucune dissolution après 24h
Feldspaths plagioclases (Ca, Na, Al)	0,1 – 1,8 %
Rutile	0,5 %
Feldspaths potassiques (K, Al)	0,8 – 0,9 %
Hornblende (K, Na, Al, Fe, Mg)	4,0 – 5,9 %
Épidote (Ca, Al, Fe)	4,1 – 4,7 %
Muscovite (K, Al)	9 %
Diopside – Aqua regia (Ca, Fe, Mg)	15 %
Ilménite (Fe, Ti)	15 – 17 %
Sphène (Ca, Ti)	33 %
Biotite (K, Al, Mg, Fe, Ti)	53 – 60 %
Chlorite (Fe, Mg, Al)	85 – 100 %

4.2 Travaux antérieurs

Le levé le plus à l'ouest (1987040) a fait l'objet de travaux scientifiques à la fin des années 80 et au début des années 90 (Bellehumeur et Jébrak, 1992, 1993; Bellehumeur et al., 1994; Jébrak, 1989). Ces travaux comprenaient notamment les aspects suivants :

- Comparaison des signaux géochimiques des fractions fines et des minéraux lourds.
- Analyse en composantes principales des données géochimiques fractions fines et des minéraux lourds de ce levé.
- Analyse des variogrammes des composantes principales pour en déterminer l'autocorrélation spatiale c.-à-d. la taille des phénomènes.
- Développement d'une méthode de filtre des composantes principales les plus importantes pour en enlever l'effet des variations indésirables du bruit de fond géochimique sur les teneurs et obtenir de meilleurs signaux d'anomalies géochimiques.
- Analyse de la signature géochimique de certains gîtes dans les sédiments de ruisseaux du levé, avec les valeurs brutes et le filtre.

L'étude actuelle reprend une analyse en composantes principales des données géochimiques, mais étend l'application à quatre levés plutôt qu'un seul. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats des auteurs précédents. Une analyse par grappes est ajoutée à l'étude actuelle. De façon plus importante, l'étude présente ajoute des variables auxiliaires (couleur des échantillons, contamination, géologie au 1/50 000, etc.) à l'analyse pour faciliter l'interprétation des signaux géochimiques. Finalement, l'étude de la signature géochimique des gîtes est étendue aux gîtes couverts par les autres levés. L'étude de la signature des gîtes de la présente étude ajoute l'étude des caractéristiques hydrologiques du drainage (distance du gîte et accumulation d'eau) à l'analyse.

4.3 Nivellement des données géochimiques

Certains problèmes de nivellement sont observés sur les cartes de compilation géochimiques formées par l'assemblage des quatre levés. Certains de ces problèmes de nivellement avaient déjà été identifiés par Choinière (1992). Pour obtenir une banque de données uniforme, une méthode de nivellement des données géochimiques a été appliquée. La méthode appliquée est

celle de Trépanier (2007), elle-même inspirée de Daneshfar et Cameron (1998). Les zones utilisées pour établir les relations de nivellement entre les levés sont présentées à la **Figure 2**.

Les fractions fines ont été nivelées pour Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, Hg, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sm, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn. Les autres éléments se sont avérés impossibles à niveler (qualité insuffisante des analyses). Certains des éléments non nivelés (As, Mo, Sb, Li) seront tout de même considérés dans les analyses statistiques subséquentes comme variables additionnelles, étant donné leur importance pour l'exploration.

Les minéraux lourds ont été nivelés pour Al, Ba, Ca, Ce, Eu, Fe, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sm, Sr, Th, Ti, U, V, W, Zn. Les autres éléments n'ont pas été nivelés en raison de la faible qualité des analyses. Certains ont également été conservés comme variables additionnelles dans les statistiques en raison de leur importance (Co, Li, As, K, Sb, Cu, Mo, Hg).

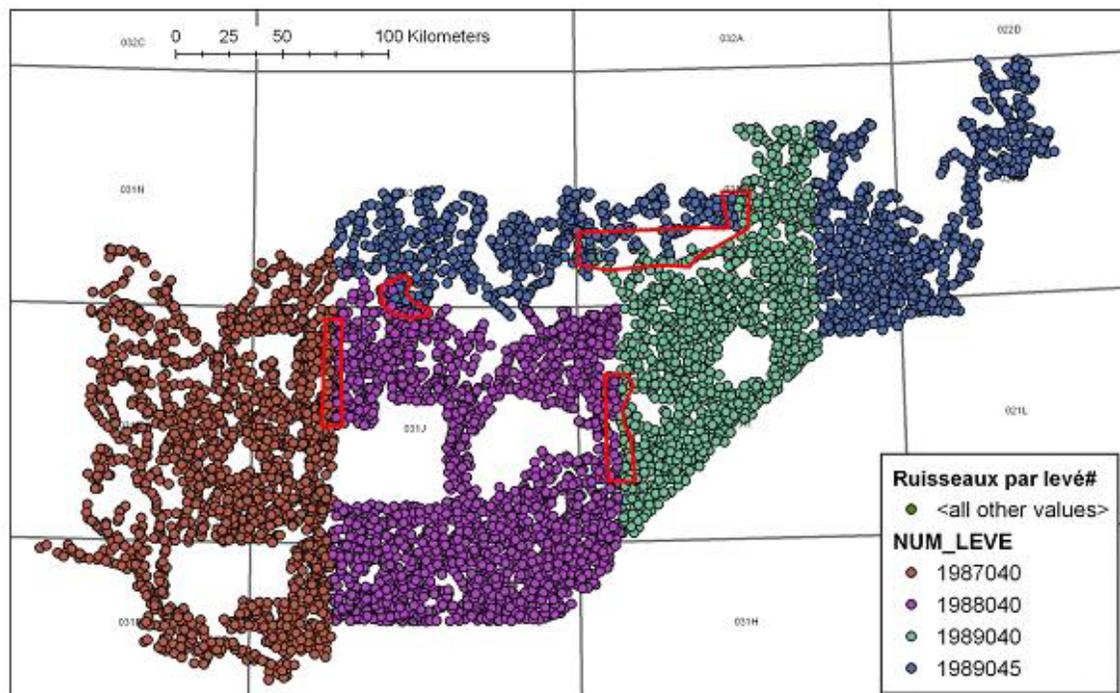


Figure 2. Zones servant à établir les relations de nivellement entre les levés.

4.4 Méthodologie d'analyse statistique et spatiale des données géochimiques

Différentes méthodes statistiques ont été utilisées pour évaluer les relations géochimiques. Ces méthodes ont généralement été appliquées de façon indépendante aux données de minéraux lourds et des fractions fines.

4.4.1 Analyse factorielle

L'analyse multivariable factorielle des données géochimiques a comme objectif d'identifier les principales tendances dans les données et de les interpréter. L'objectif ultime est de déterminer les meilleures méthodes de délimitation d'anomalies. Des analyses séparées ont été effectuées pour les données de minéraux lourds et des fractions fines.

Éléments inclus dans le calcul des facteurs

Seuls les éléments ayant une qualité analytique acceptable ont été utilisés dans l'analyse factorielle. Une qualité acceptable, dans le cadre de ce rapport, est définie par une proportion d'analyses au-dessus de la limite de détection analytique qui dépasse 70 %. Les éléments de qualité acceptable dans les fractions fines sont les suivants : Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, Hg, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sm, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn. Dans les minéraux lourds, ce sont Al, Ba, Ca, Ce, Eu, Fe, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sm, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y et Zn.

Élimination de l'effet de fermeture des analyses par la méthode « log-centrée »

Une analyse géochimique ferme par définition à 100 %. Ceci est vrai pour le cas des éléments majeurs en lithogéochimie, qui sont calculés en %, mais aussi pour les éléments traces. La fermeture à 100 % induit des corrélations qui sont causées uniquement par des processus de dilution (Aitchison, 1984). Or, ces dilutions ne sont pas réellement des processus naturels et compliquent sensiblement la recherche des véritables processus à partir des corrélations entre éléments. Ceci est vrai également pour l'analyse factorielle, qui est basée sur les coefficients de corrélation ou sur la covariance.

Aitchison (1984) donne une solution simple au problème de la fermeture des analyses. Dans le cas de l'analyse factorielle, il suggère de calculer de nouvelles variables « log-centrées » (LC) qui sont définies de la façon suivante :

Pour un certain élément X, la valeur « log-centrée » X_{LC} est :

$$X_{LC} = \text{Log} (X / \text{Moyenne Géométrique de l'échantillon})$$

où X est la valeur nivelée de l'élément et la moyenne géométrique de l'échantillon est calculée à partir de tous les éléments utilisés dans le calcul des facteurs.

Les variables « log-centrées » sont identifiées par le suffixe « LC ».

Méthode de calcul des facteurs

Les facteurs ont été calculés par le calcul de la matrice de covariance, tel que recommandé pour les variables log-centrées. La méthode des composantes principales a été utilisée pour l'extraction des facteurs. Les coefficients de corrélations entre les valeurs « log-centrées » et les facteurs ont été calculés sur les « scores » des échantillons dans chacun des facteurs. Ce sont ces coefficients qui apparaissent dans les graphiques des contributions. Ceci permet une comparaison directe avec les variables additionnelles, calculées de la même façon.

Variables géochimiques additionnelles

Certains éléments des fractions fines ne montrent pas une qualité analytique suffisante pour le calcul des facteurs, mais montrent tout de même une proportion intéressante d'analyses au-dessus de la limite de détection (entre 15 et 30 %). Certains de ces éléments ont un intérêt pour l'exploration et l'interprétation. Ils n'ont pas été inclus dans le calcul des facteurs, mais sont utilisés comme variables additionnelles (suffixe « SUP »). Les coefficients de corrélation entre ces éléments et les facteurs ont été rapportés sur les graphiques.

Variables issues des cartes géologiques

La proportion de différentes lithologies a été calculée dans les différents bassins de drainage calculés. Les bassins de drainage des échantillons ont été calculés tels que montrés dans la partie A du rapport du projet actuel. La carte géologique de base utilisée est une compilation de cartes au 1/50 000 du SIGÉOM (MRN, 2008). Pour les secteurs non disponibles en format polygone, la carte géologique du Grenville (Davidson, 1998) a été utilisée en complément. Pour les cartes au 1/50 000, une lithologie simplifiée a été construite pour uniformiser les données.

Quatre lithologies ont été considérées. La proportion (%) de chaque lithologie dans chaque bassin de drainage a été calculée. Ces proportions ont été par la suite ramenées aux échantillons eux-mêmes. Ces proportions deviennent alors des variables quantitatives qui peuvent être corrélées par des coefficients de Pearson avec les variables géochimiques.

- Marbres
 - Lithologie simplifiée « M13 » (SIGÉOM : MRN, 2008);
 - « Marbres » (Davidson, 1998);
- Intrusions mafiques
 - Lithologie simplifiée « I3 » (SIGÉOM : MRN, 2008);
 - « Anorthosites... OU Intrusions mafiques.... OU Gneiss mafique... » (Davidson, 1998);
- Intrusions/gneiss felsiques
 - Lithologie simplifiée « I1 » OU lithologie simplifiée « M3 » (SIGÉOM : MRN, 2008);
 - « Granites... OU Granitoides... OU Charnockites... » (Davidson, 1998);
- Paragneiss
 - Lithologie simplifiée « M4 » (SIGÉOM : MRN, 2008);
 - « Paragneiss » (Davidson, 1998).

Autres variables additionnelles non-géochimiques

Pour faciliter l'interprétation des facteurs, des données additionnelles, autant qualitatives que quantitatives, ont été compilées. Certaines sont des attributs non-géochimiques des échantillons (couleur et contamination) alors que d'autres proviennent des cartes topographiques (cartes de polygones). Dans le cas des cartes topographiques, c'est la valeur du polygone se trouvant directement au point d'échantillon. Dans le cas des variables qualitatives, un coefficient d'information mixte (Pan et Harris, 2000) a été calculé avec les « scores » des facteurs. Pour les autres variables quantitatives, ce sont les coefficients de corrélation de Pearson avec les « scores » qui sont rapportés.

- Variables qualitatives :
 - Dépôts quaternaires (Fulton, 1995)
 - Variable TILL ÉPAIS : zones de « Till épais et continu » - code Tb;
 - Variable MARINS-LACUSTRES : combinaisons des zones de sédiments glaciomarins fins et grossiers, et glaciolacustres fins et grossiers; codes fM, cM, cL et fL;
 - Variable CHAMPS : observation de champs agricoles dans la colonne « Contamination » des données de géochimie;
 - Variable FORET : zones de forêt telles qu'identifiées sur les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000 (RNCAN², 2008).
 - Couleur des échantillons
 - Variable GRIS : échantillons de couleur grise (valeur de 1 assignée) vs les autres (0 assigné);

² RNCAN : Ressources naturelles Canada.

- Variable BRUN_FONCÉ-NOIR : échantillons de couleur brun foncé ou noire (1), vs les autres (0).
- Autres variables quantitatives :
 - Variable ALTITUDE : Altitude du modèle numérique de terrain (Trépanier, 2009);
 - Variable PENTE : Pente du modèle numérique de terrain (Trépanier, 2009);
 - Variable INDEX_COULEUR : couleur de l'échantillon codée de façon numérique, selon la teinte : 1 : gris, 2 : beige, 3 : brun, 4 : brun foncé, 5 : noir;
 - Variable EU : uranium dans la radiométrie (CGC³, 2005);
 - Variable ETH : thorium dans la radiométrie (CGC, 2005);
 - Variable EK : potassium dans la radiométrie (CGC, 2005);
 - Variable EU/ETH : ratio uranium/thorium de la radiométrie (CGC, 2005);
 - Variable EK/ETH : ratio potassium/thorium de la radiométrie (CGC, 2005);
 - Variable EU/EK : ratio uranium/potassium de la radiométrie (CGC, 2005).

4.4.2 Analyse par grappes

L'analyse par grappe permet de séparer les échantillons d'une base de données en différents groupes. Le groupement est basé sur la structure multivariable des données. Deux analyses par grappes distinctes ont été effectuées ici, une pour les fractions fines et l'autre pour les minéraux lourds, par la méthode des « K-moyennes ». Seules les variables géochimiques de bonne qualité analytique ont été utilisées. Le nombre de groupes formé par une telle analyse n'est pas fixe. Il s'agit d'expérimenter pour obtenir des groupes qui sont assez distincts et qui contiennent un nombre suffisant d'échantillons.

4.5 Analyse statistique et spatiale de la géochimie des fractions fines

4.5.1 Relation entre la couleur des échantillons, la perte au feu et les teneurs des fractions fines

Il existe des relations très nettes entre la couleur des échantillons et leur contenu en différents éléments chimiques. La couleur est un attribut qualitatif qui est compilé avec les données géochimiques.

Quelques exemples illustrent ces relations. Pour le potassium (**Figure 3**), on constate un enrichissement très prononcé dans les sédiments de couleur grise et des teneurs à peu près constantes pour les autres couleurs. L'arsenic (**Figure 4**) est un exemple du comportement inverse; les sédiments gris et beige sont les plus appauvris, les bruns et bruns foncés sont intermédiaires alors que les noirs sont enrichis. Certains éléments, tels que le nickel, montrent des comportements plus complexes (**Figure 5**); cet élément est plus concentré dans les sédiments gris, mais on note aussi une augmentation graduelle en passant graduellement du beige au noir.

³ CGC : Commission géologique du Canada.

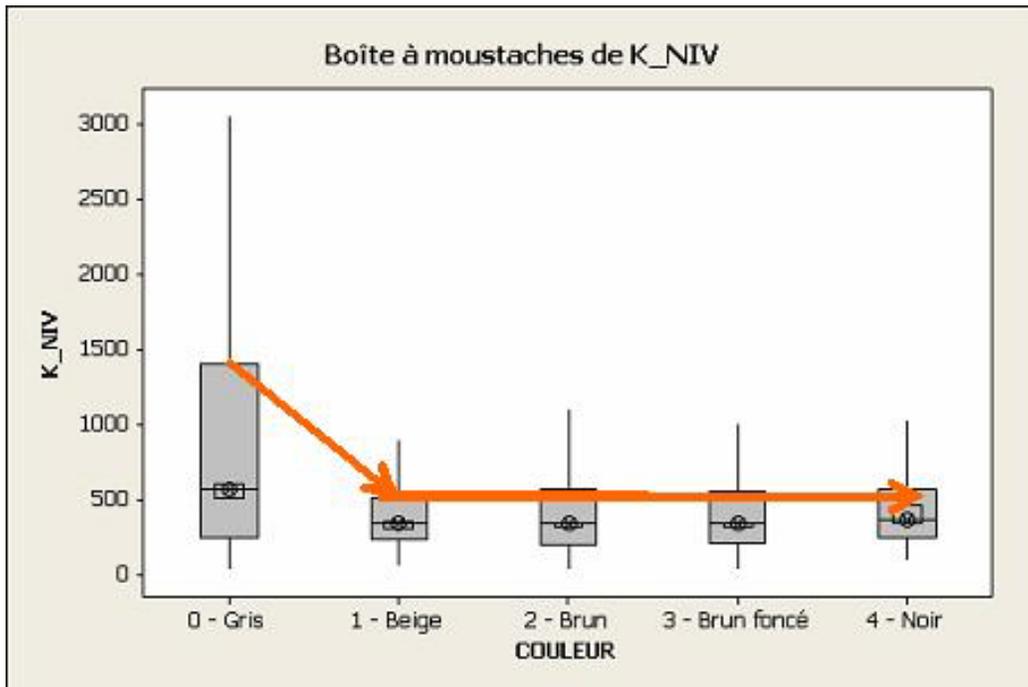


Figure 3. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en potassium dans les fractions fines (ppm).

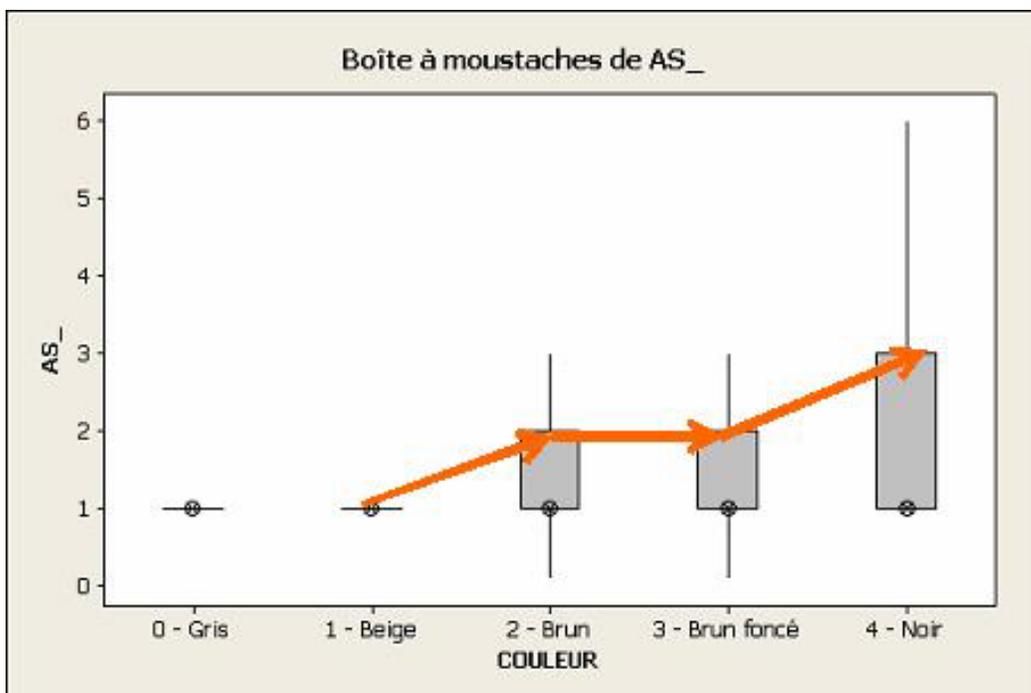


Figure 4. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en arsenic dans les fractions fines (ppm).

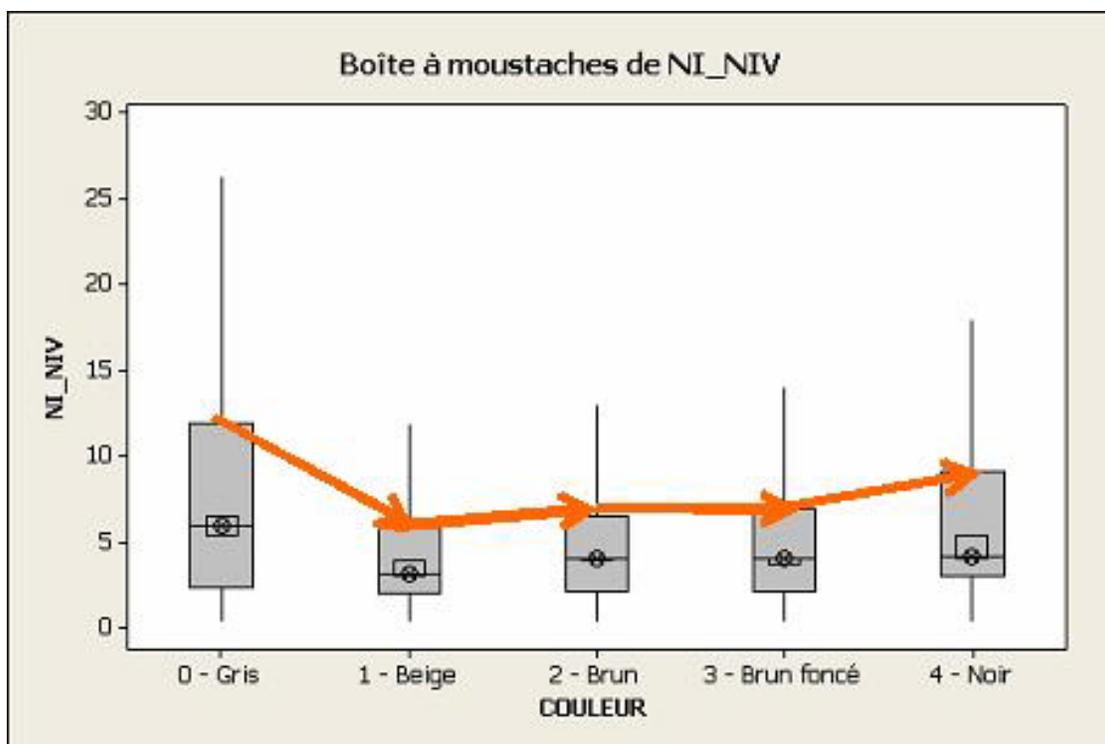


Figure 5. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en nickel dans les fractions fines (ppm).

Relation entre couleur et perte au feu

Il est important d'identifier la cause des variations des valeurs de perte au feu dans les analyses pour les interprétations subséquentes. La relation entre la perte au feu et la couleur est très nette; une augmentation rapide de la perte au feu se produit pour les sédiments beige-gris jusqu'aux noirs. Cette relation est similaire à celle observée pour l'arsenic précédemment, ainsi que pour le mercure et le brome. Ces relations suggèrent fortement que la perte au feu dans les fractions fines est corrélée très étroitement à la proportion de matière organique dans les sédiments, qui tend à donner des sédiments plus foncés et plus riches en métaux d'affinité organique.

Finalement, on remarque que la perte au feu des sédiments gris est légèrement plus élevée que celle des beiges; ceci pourrait être dû à la présence d'argiles dans les sédiments gris. Cette association entre les sédiments gris et les argiles sera développée dans la section suivante.

Ces relations très nettes entre les couleurs et les teneurs en métaux suggèrent que les processus de l'environnement secondaire ont une influence très importante sur les teneurs en métaux dans les fractions fines. Ces relations seront confirmées par l'analyse factorielle de la section suivante.

4.5.2 Analyse factorielle

Nombre de facteurs extraits et signification

L'ensemble des facteurs a été calculé à partir des données géochimiques des fractions fines (28). L'examen du diagramme de Scree (**Figure 6**) montre toutefois que les 5 premiers sont les plus significatifs, avec un seuil de 0,5; seuls ces derniers seront interprétés. Le **Tableau 3** donne un résumé de ces facteurs et de leur interprétation. Les bases de l'interprétation sont détaillées dans les pages suivantes.

Tableau 3. Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle des fractions fines

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5
Éléments pôle +	Sm, Eu, Mo, Y, U, Sb, Th, PAF, La, As, Ce, Pb	Br, Hg, Mn, Pb, PAF	Cr, PAF, Hg, K, Cu	Sr, Ca, P	V, Al, Fe, Ce, U, Ti, La
Éléments pôle -	Ti, Cr, V, Fe, Mg, Ni, Al, Cu	K, Th, Ce, Eu, La, Ca, Mg	Mn, Fe, P, Y, Ce	Na, K, Sc, Sm	Ba, Co, Zn, Mn, Na, K
Lithologies pôle +	Granite orthogneiss	Intrusion mafique	Marbre, Paragneiss		
Lithologies pôle -		Marbre			
Var. add. pôle +	Altitude, Anti-Champs, Till épais, Forêt	Index-couleur, Noir-Brun foncé, Forêt, Anti-Champs	Gris, eK/eTh	Anti-altitude	Gris
Var. add. pôle -	Anti-Altitude, Champs, Séd. Glacio-marins/lacustres	Anti-Index couleur, Gris, Champs, Anti-Forêt, eTh, eK	Orange-rouge	Altitude	
Interprétation pôle +	Intrusions felsiques ou sédiments sableux	Sédiments de ruisseaux organiques, eK/eTh	?	Carbonates sédimentaires	Précipitation d'oxydes de Fe second.
Interprétation pôle -	Marbres, paragneiss ou sédiments argileux	Sédiments de ruisseaux inorganiques/argileux	Précipitation d'oxydes de Fe-Mn secondaires	?	Précipitation d'oxydes de Mn second.

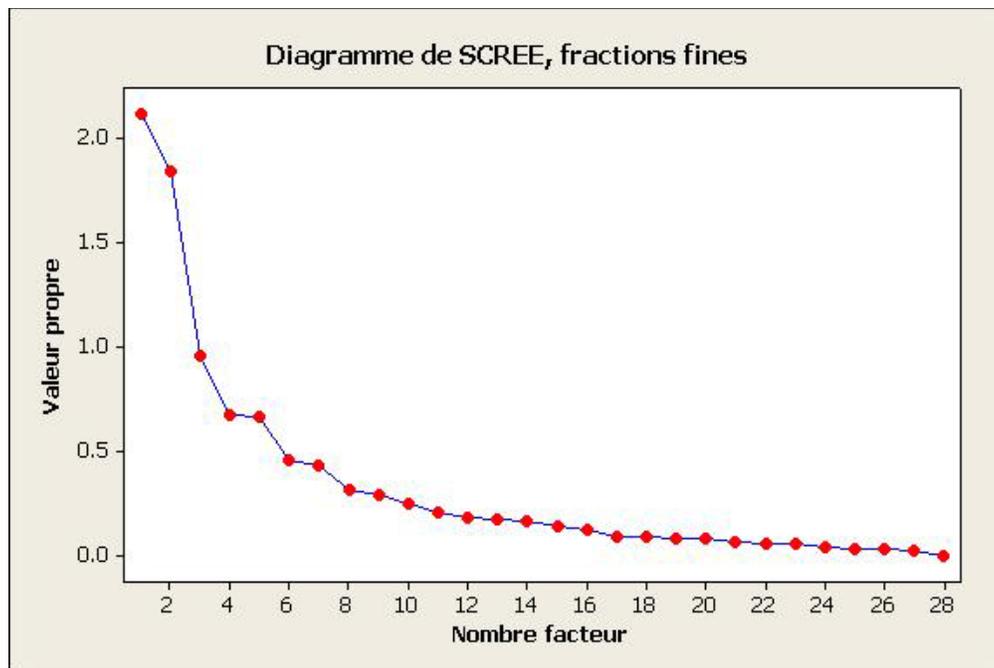


Figure 6. Diagramme de Scree pour les fractions fines. L'amplitude de la valeur propre indique l'importance du facteur.

Facteur 1 (22 % de la variance)

Les éléments positivement corrélés à ce facteur montrent une affinité lithologique plutôt felsique (Sm, Eu, Mo, Y, U, Sb, Th, PAF, La, As, Ce, Pb; (**Figure 7**). Les éléments corrélés négativement semblent plutôt, au premier coup d'œil, d'affinité mafique. Toutefois, ces éléments sont aussi, en général, préférentiellement enrichis dans les minéraux argileux; il est bien connu que les sédiments argileux sont relativement enrichis en ces éléments par rapport aux sédiments plus grossiers (De Vos et al., 2006). On trouve une association positive avec les intrusions felsiques, ce qui supporte l'interprétation de l'association felsique; à l'inverse, l'absence d'association négative avec les intrusions mafiques va à l'encontre de l'association mafique des valeurs négatives du facteur. L'association négative la plus forte avec les lithologies se fait plutôt avec les marbres et les paragneiss.

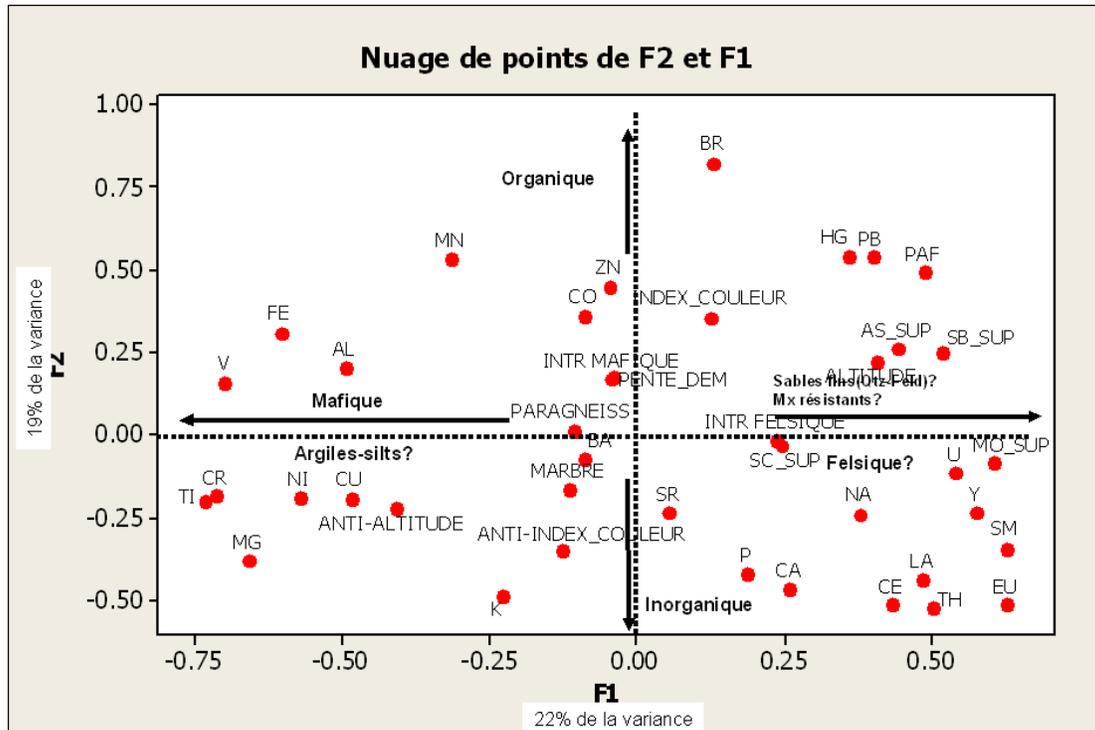


Figure 7. Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 1 et 2 des fractions fines.

Ce facteur montre en général une association évidente à des indicateurs secondaires; les valeurs positives sont associées aux zones forestières de haute altitude (variable FORÊT, ANTI-CHAMPS ET ALTITUDE; **Figure 8**) alors que ses valeurs négatives sont plutôt associées aux vallées agricoles (variables ANTI-FORÊT, CHAMPS, SED GLACIO-MARINS-LACUSTRES).

Les valeurs positives les plus marquées de ce facteur sont concentrées dans deux différentes zones. La première est située dans la partie Centre-Nord de la région d'intérêt (**Figure 9**). Ce secteur est caractérisé par des dépôts de till épais (**Figure 10**) et par de grandes unités de charnockites (intrusions felsiques; **Figure 11**). La seconde zone se trouve à l'extrémité Nord-Est et est caractérisée également par des charnockites. En général, on observe une correspondance assez bonne en carte entre les valeurs élevées du facteur et les zones de charnockites et de granitoïdes.

Les valeurs les plus négatives montrent une association très nette avec les zones de sédiments glaciolacustres et glaciomarins (**Figure 12**). La relation est particulièrement évidente à proximité du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais et de la rivière Gatineau. Une certaine

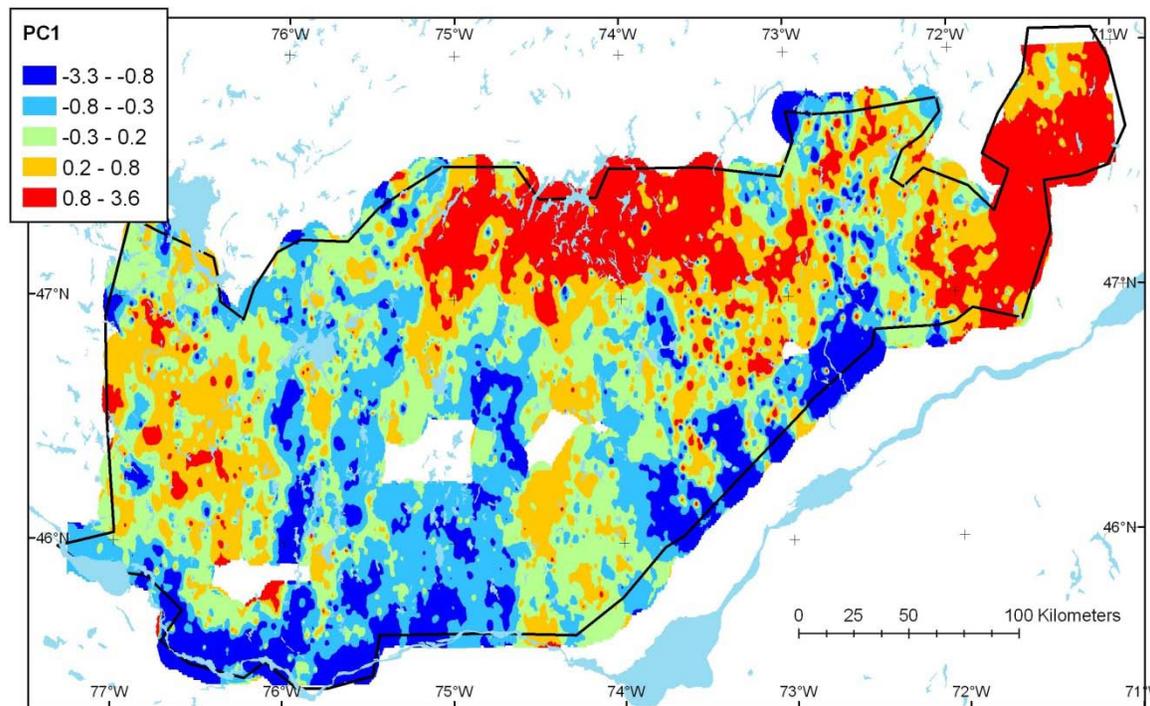


Figure 9. Carte du facteur 1 des fractions fines.

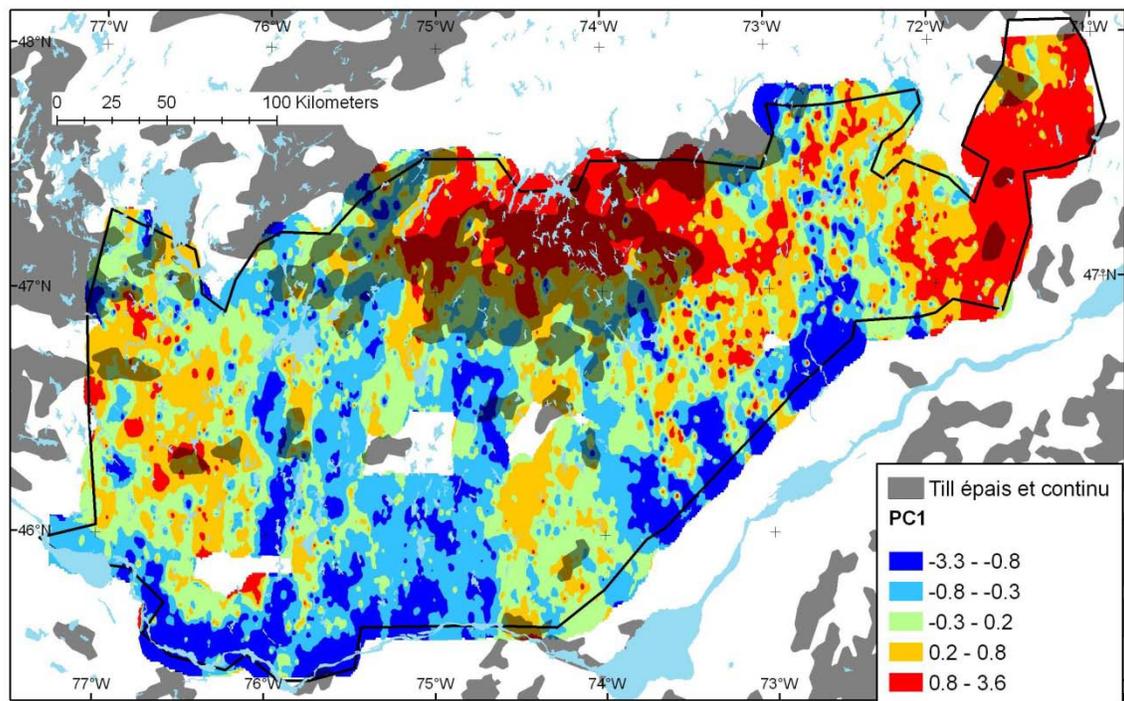


Figure 10. Carte du facteur 1 des fractions fines et zones de till épais dans les dépôts de surface.

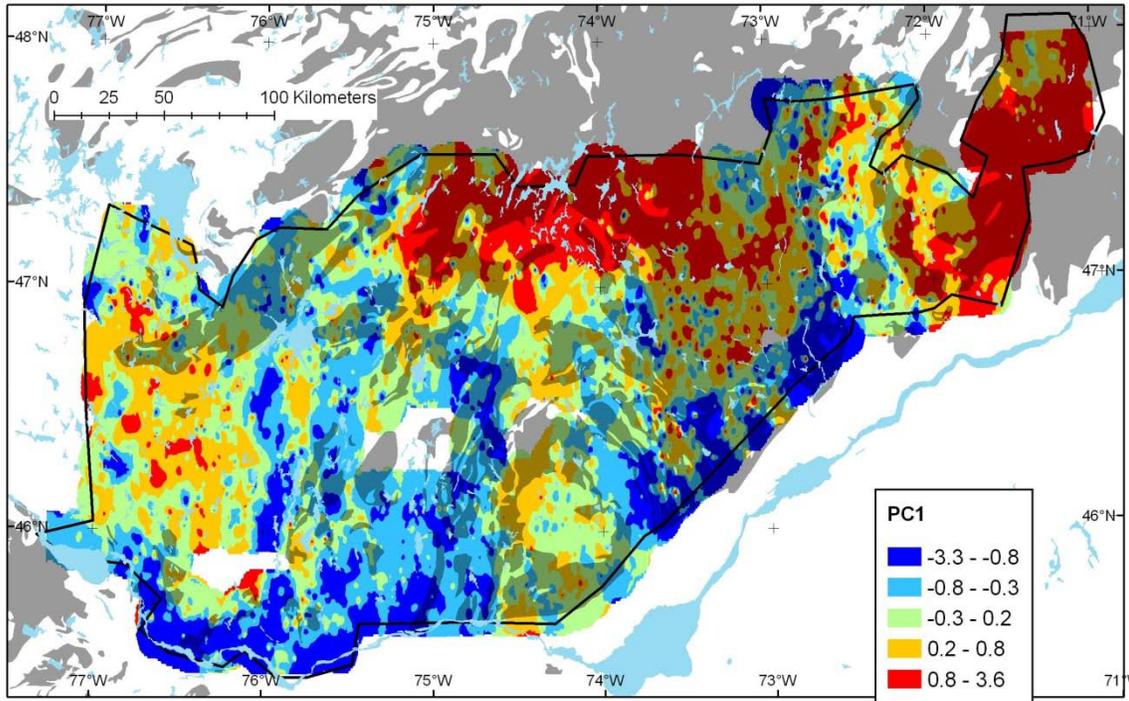


Figure 11. Carte du facteur 1 des fractions fines et intrusions/orthogneiss felsiques (gris ombragé).

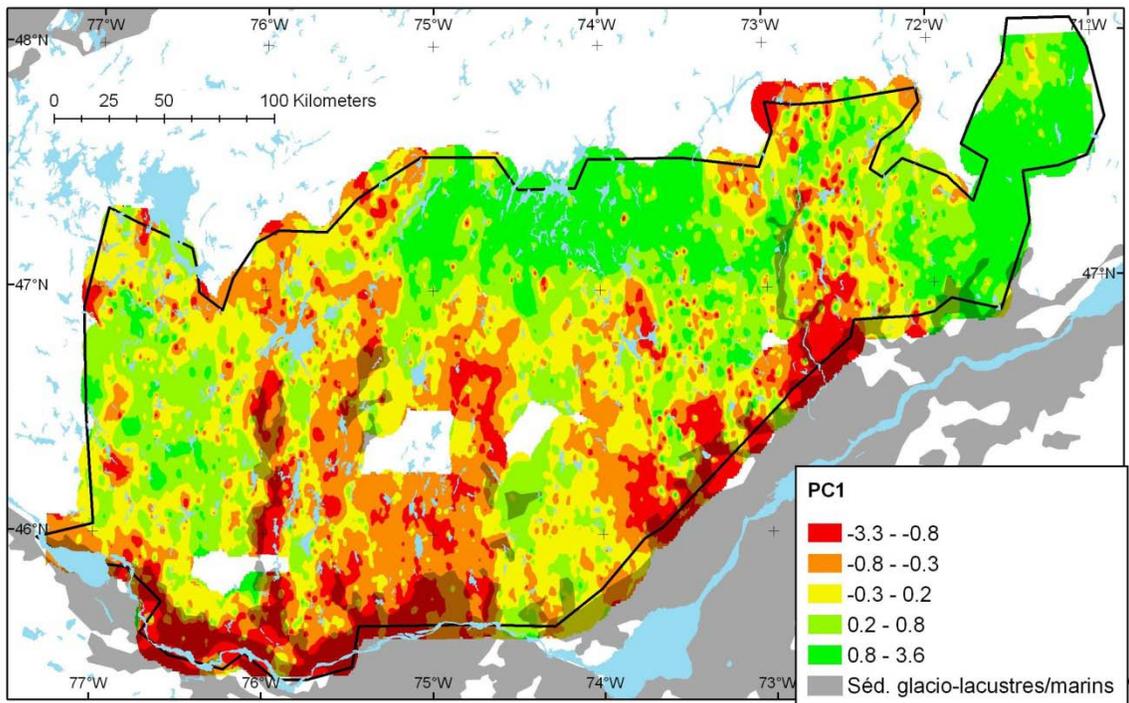


Figure 12. Carte du facteur 1 des fractions fines et sédiments glacio-marins et glacio-lacustres.

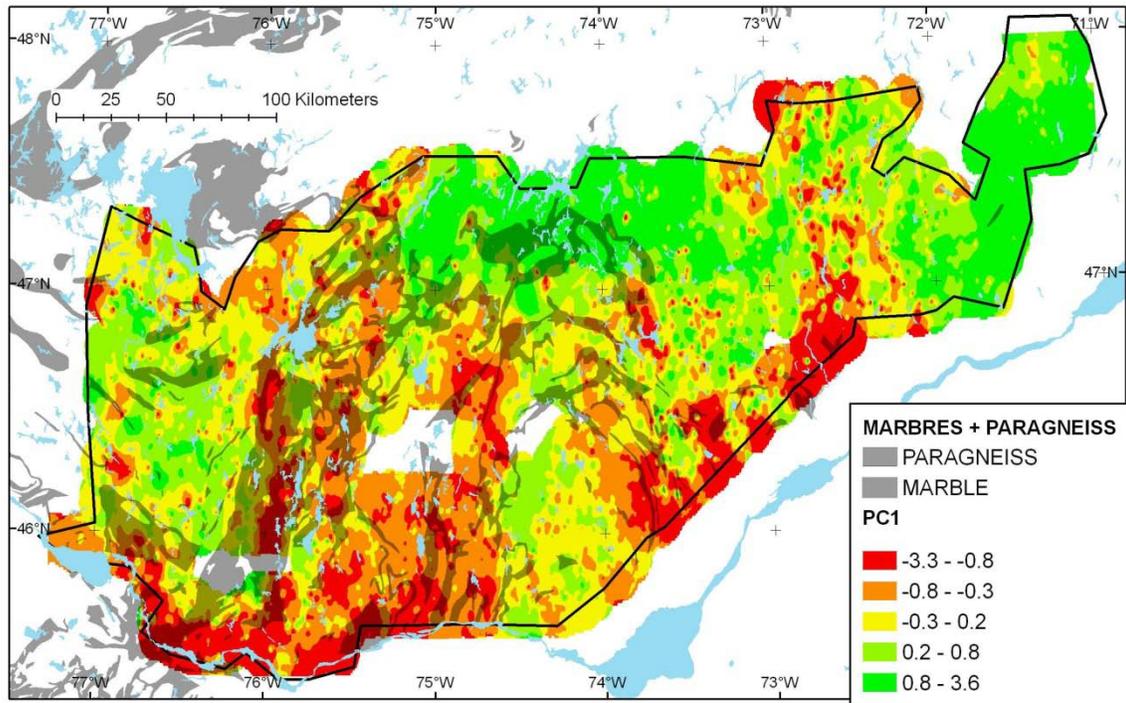


Figure 13. Carte du facteur 1 des fractions fines et marbres et paragneiss (en ombragé).

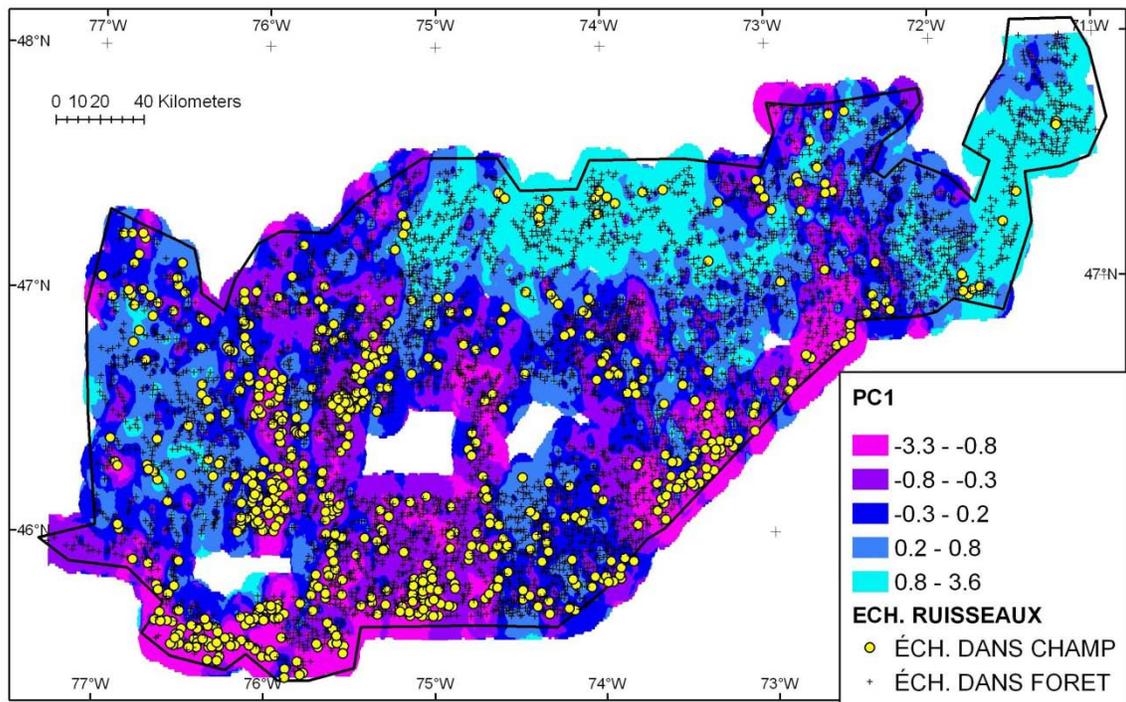


Figure 14. Carte du facteur 1 et échantillons situés dans les champs vs en forêt selon les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000.

Interprétation lithologique :

Selon cette interprétation, le facteur serait dû à l'opposition entre les zones dominées par les granites, qui se trouvent dans le Grenville à de plus hautes altitudes, et les zones de métasédiments (paragneiss et marbres) qui se trouvent typiquement dans les vallées. La suite d'éléments associée au facteur serait alors une conséquence directe du contenu géochimique des lithologies sources.

Interprétation granulométrique :

La partie négative de ce facteur pourrait être causée par des sédiments de ruisseaux de granulométrie fine, qui comprennent des argiles. Ces sédiments de ruisseaux se retrouvent préférentiellement dans les environnements de plus faible énergie, c'est-à-dire dans les vallées agricoles. Les sédiments glaciaires des vallées pourraient également contribuer au contenu en argiles et en métaux.

À l'inverse, la partie positive de ce facteur serait reliée à des sédiments de ruisseaux plus grossiers (sables) et composés de minéraux denses et résistants, qui se retrouvent préférentiellement dans les zones de plus haute énergie (plus haute altitude et en forêt). La suite d'éléments associés au facteur serait donc plutôt due à un fractionnement géochimique causé par les variations granulométriques des sédiments. L'association avec les lithologies serait alors plutôt indirecte et conséquence de la localisation des granites en haute altitude et des roches métasédimentaires en basse altitude.

Facteur 2 (19 % de la variance)

La suite d'éléments associée positivement au facteur est clairement une suite d'affinité organique (**Figure 7**). La présence du brome, du mercure et de la perte au feu est particulièrement diagnostique. La suite d'éléments corrélée négativement contient autant d'éléments typiques des lithologies mafiques (p. ex : Mg) comme felsiques (K, Th...). Ces éléments ont en commun une affinité faible avec la matière organique.

Ce facteur montre une association positive avec les sédiments foncés (par l'index de couleur ou par la présence de sédiments bruns/noirs), et avec les zones forestières (**Figure 8**). À l'inverse, les valeurs négatives sont associées à des sédiments plus pâles, gris, et se trouvant dans les zones de champs. La seule association lithologique notoire est avec les intrusions mafiques. On trouve que le pôle négatif du facteur est associé de façon moyenne avec des valeurs élevées de eTh et eK alors que le pôle négatif montre un ratio eK/eTh plus élevé.

Deux zones montrent des valeurs élevées de ce facteur (**Figure 15**). La première zone est clairement identifiable au complexe anorthositique de Morin (**Figure 16**); toutefois, aucune lithologie particulière ne semble définir la seconde. Les valeurs négatives démontrent une très bonne correspondance avec les zones de champs ou prairies sur les cartes topographiques au 1/50 000 (**Figure 17**).

Les observations précédentes suggèrent fortement que ce facteur soit corrélé positivement à l'abondance de matière organique dans les sédiments de ruisseaux. La matière organique produit des sédiments plus foncés et enrichis en éléments d'affinité organique. Les zones forestières amènent naturellement des quantités de matière organique plus importantes dans les sédiments. À l'inverse, les valeurs négatives du facteur s'expliquent par l'absence de matière organique dans les sédiments associés aux zones non forestières, c'est-à-dire dans les zones agricoles. Ces zones sont également susceptibles de contenir des quantités plus grandes de minéraux argileux, ce qui expliquerait l'association avec les sédiments gris, pâles, et riches en K et Mg.

Par contre, selon l'interprétation proposée, la corrélation positive du facteur avec l'anorthosite de Morin s'explique plus difficilement. Elle pourrait être due simplement au fait que cette zone est essentiellement forestière, car assez accidentée.

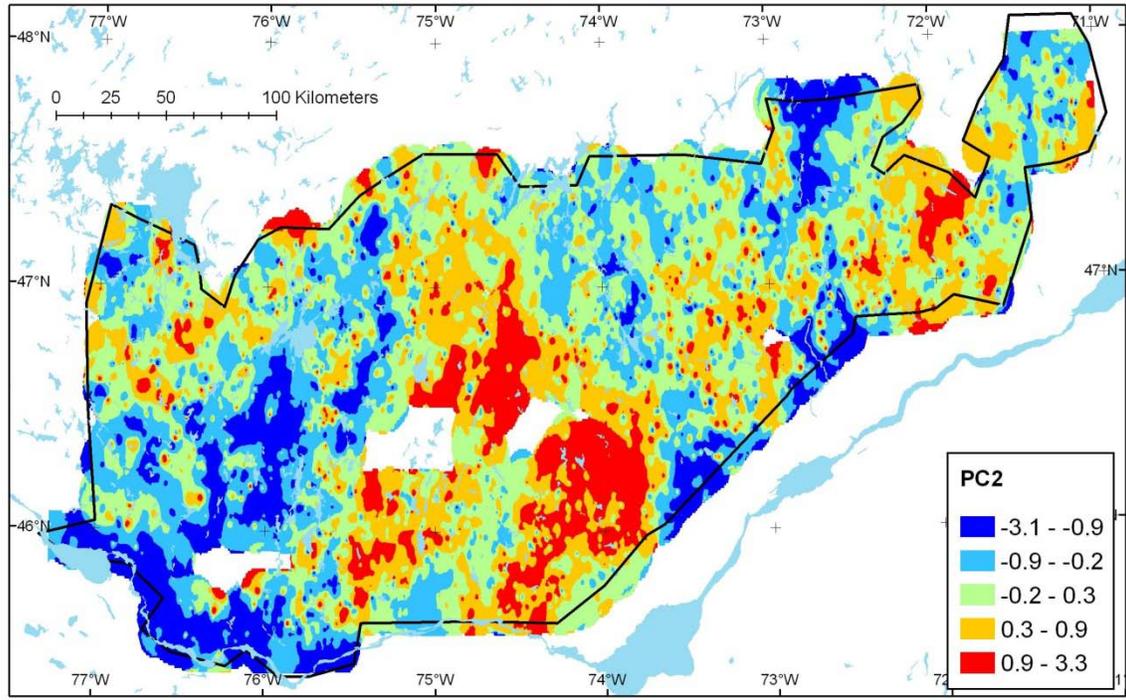


Figure 15. Carte du facteur 2 des fractions fines.

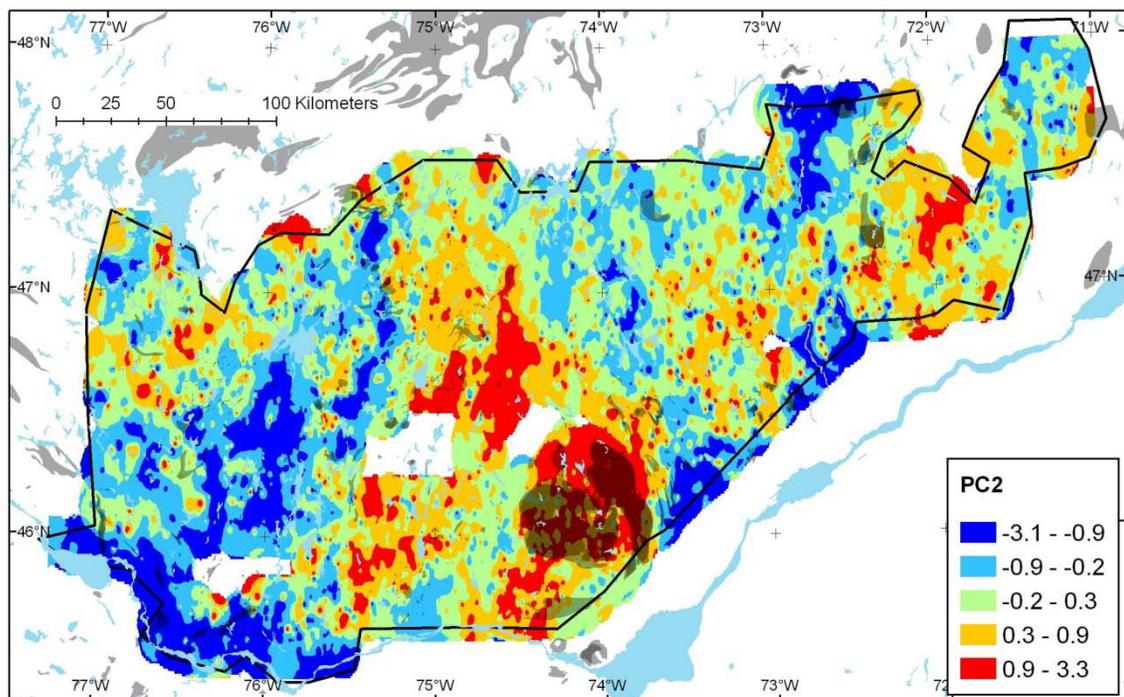


Figure 16. Carte du facteur 2 des fractions fines et intrusions mafiques (en ombragé).

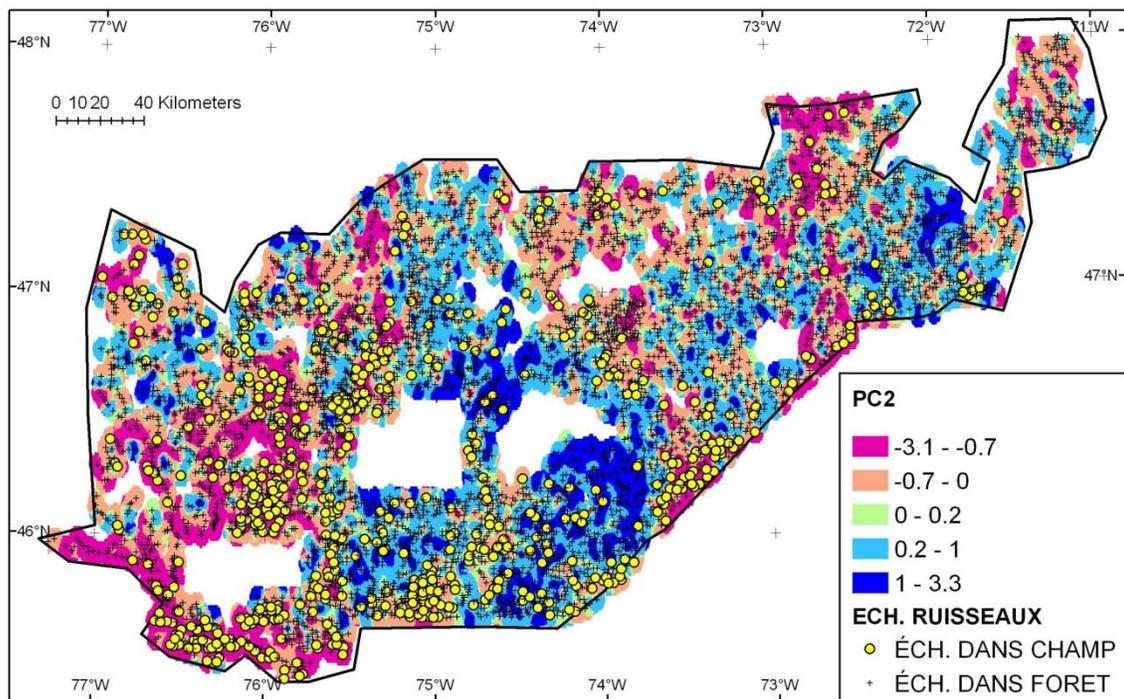


Figure 17. Carte du facteur 2 et échantillons situés dans les champs vs. en forêt selon les cartes topographiques vectorielles au 1/50 000.

Facteur 3 (10 % de la variance)

Ce facteur est caractérisé tout d'abord par une corrélation très forte des valeurs négatives avec le fer et le manganèse (**Figure 18**), ce qui suggère l'association avec oxydes de fer et de manganèse d'origine secondaire (sédimentaire) pour les valeurs négatives. La présence de l'yttrium, du phosphore et du cérium associés peut sembler problématique au premier abord. Toutefois, il est connu que l'yttrium en solution s'adsorbe aux oxydes de Fe-Mn et montre en particulier des enrichissements à l'intérieur des formations de fer oolithiques (De Vos et al., 2005). De la même façon, il est connu que le cérium peut s'accumuler dans des gisements de phosphates sédimentaires, et, lorsque mis en solution, s'adsorbe directement sur les oxydes de fer-manganèse (De Vos et al., 2005). L'association faible, mais significative des sédiments de couleur orange-rouge avec le pôle négatif va également dans le sens de l'interprétation précédente (**Figure 19**). Ce groupe montre également des ratios eK/eTh plus élevés.

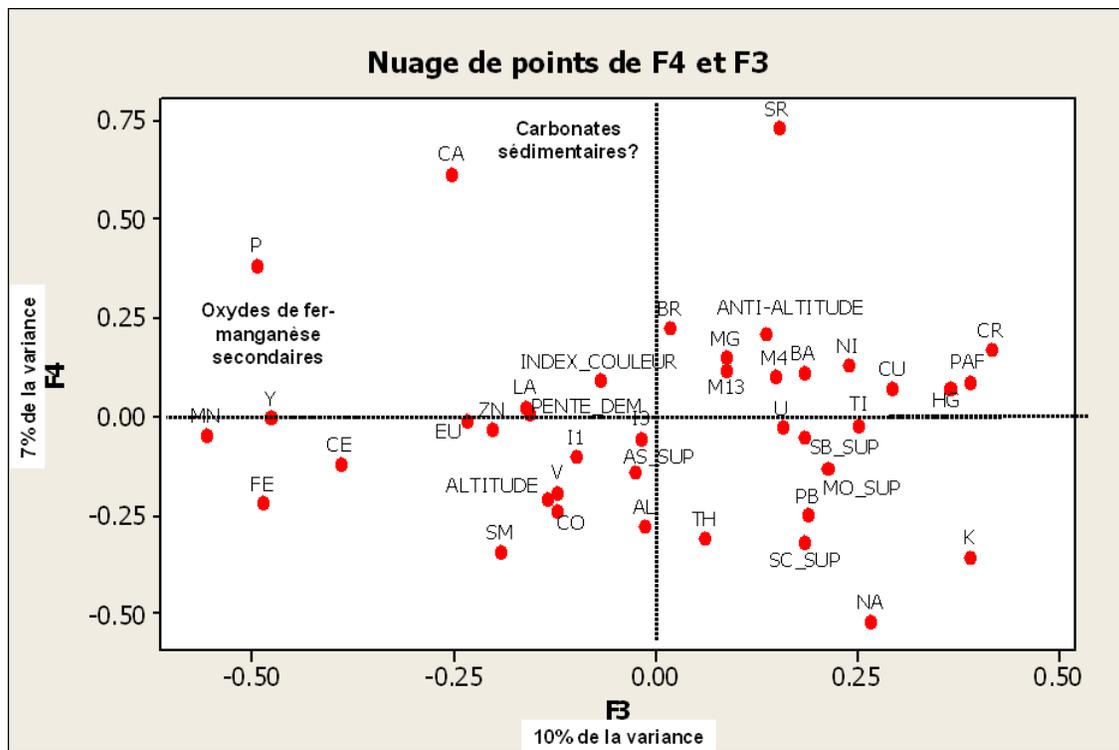


Figure 18. Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 3 et 4 des fractions fines.

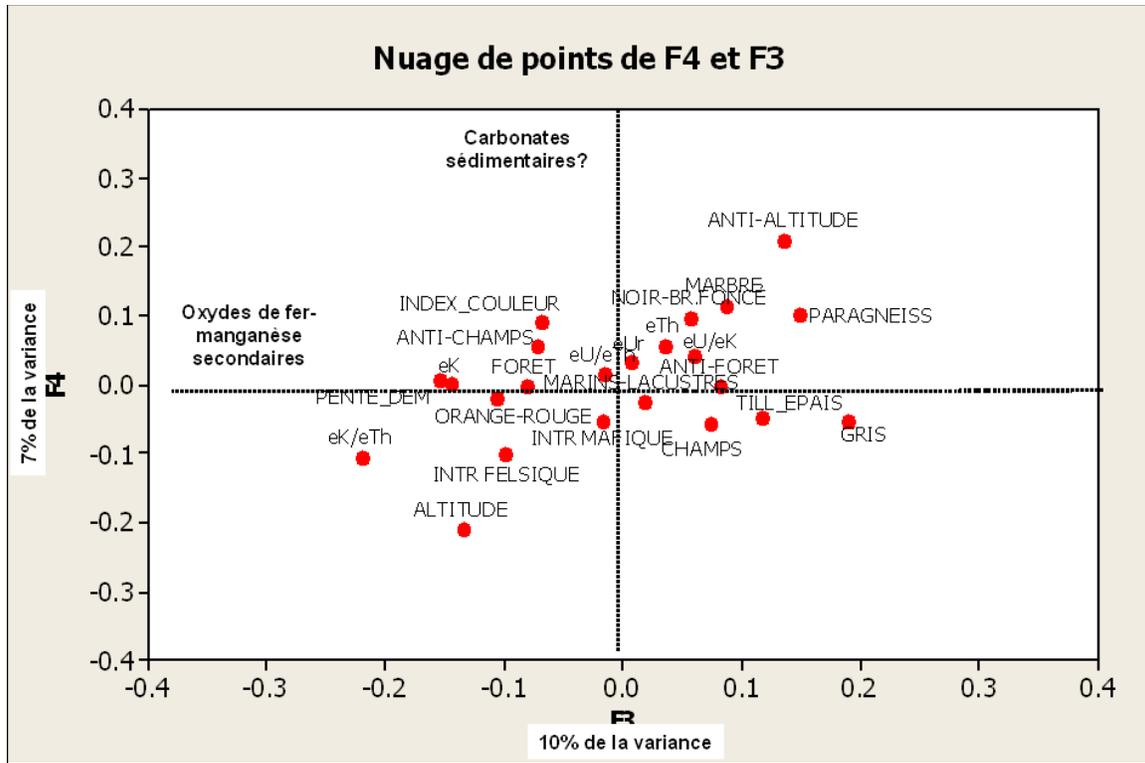


Figure 19. Corrélations entre variables qualitatives, lithologies et facteurs 3 et 4 des fractions fines.

La série d'éléments associés positivement au facteur (Cr, PAF, K, Hg) est plus difficilement explicable. L'association importante des sédiments de couleur grise, du potassium et de la perte au feu avec les valeurs positives pourrait signifier, de façon très spéculative, une autre forme d'association avec des argiles.

Les valeurs les plus positives se trouvent dans l'extrémité nord-ouest de la région. Cette large zone semble correspondre approximativement à l'étendue des roches du Parautochtone du Grenville, composée de gneiss et migmatites archéens (**Figure 20**).

Les valeurs les plus négatives du facteur sont concentrées sur la partie ouest de l'anorthosite de Morin, au sud, sur l'extrême nord-est de la région (charnockites) et sur la vallée de la rivière Saint-Maurice (gneiss).

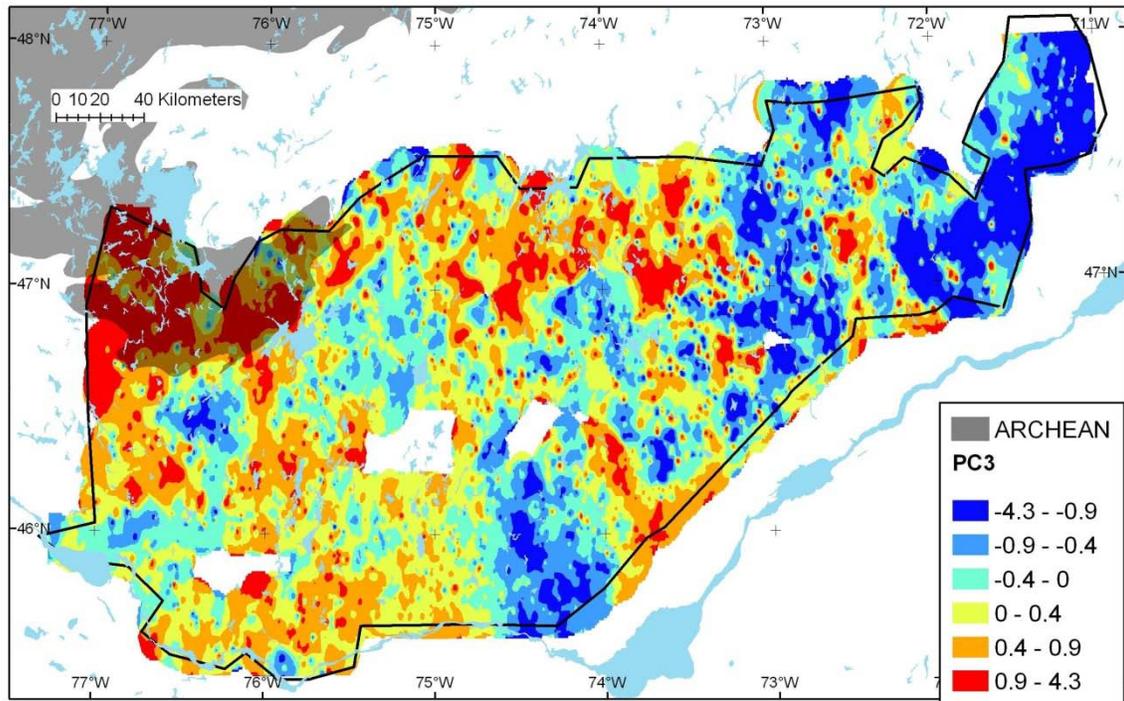


Figure 20. Carte du facteur 3 et roches archéennes (en ombragé).

Facteur 4 (7 % de la variance)

Le pôle positif du facteur 4 est caractérisé par une très forte association avec Sr et Ca, et dans une moindre mesure avec P (**Figure 18**). Cette association suggère fortement une relation du pôle positif avec la présence de carbonates dans le sédiment. Une association faible, mais significative avec la présence de paragneiss ou de marbres est notée au niveau statistique, mais la faiblesse de cette association laisse supposer que les carbonates sont plutôt d'origine sédimentaire que lithologique (**Figure 19**).

Les valeurs positives les plus élevées se retrouvent éparpillées dans une très large zone couvrant l'ensemble de la partie ouest de la région, dans une bande nord-sud se situant à l'est de l'anorthosite de Morin et le long de la rivière Saint-Maurice (**Figure 21**). Aucune association spatiale particulière ne peut être déduite à partir de ces relations pour l'instant.

Le pôle négatif de ce facteur est dominé par Na, K, Sc et Sm. Outre le fait que ces éléments sont plutôt d'origine clastique dans les sédiments de ruisseaux, il est plutôt difficile d'en tirer des conclusions évidentes.

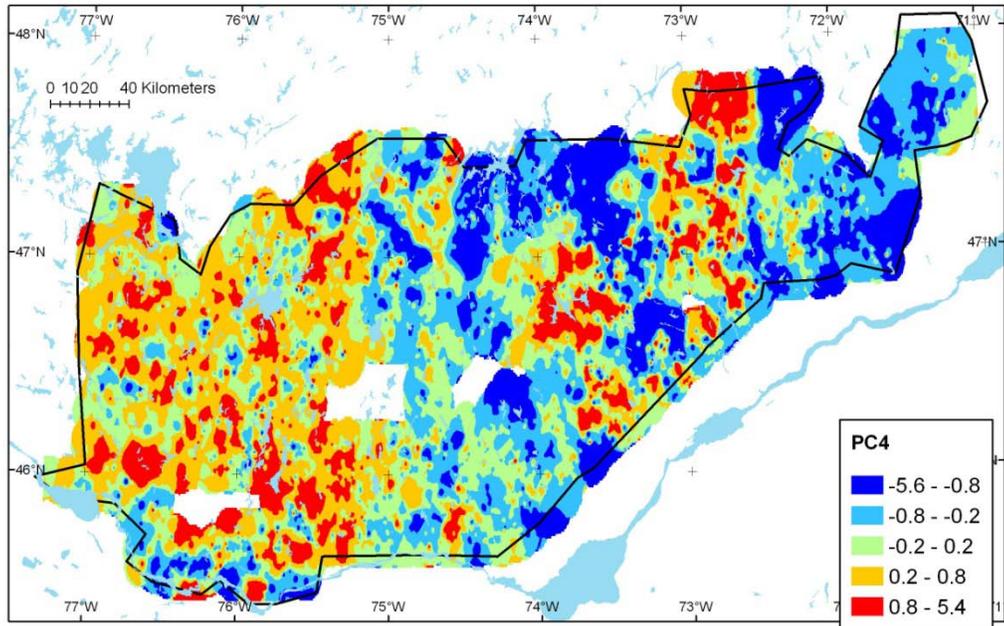


Figure 21. Carte du facteur 4.

Facteur 5 (7 % de la variance)

Ce facteur montre une opposition entre deux séries d'éléments (V, Al, Fe, Ce, U, Ti, La vs Ba, Co, Mn, Zn, Na, K; **Figure 22**) qui peut sembler difficile à expliquer au départ. On y remarque toutefois que le fer et le manganèse, deux éléments ayant un rôle souvent déterminant pour la mobilité chimique des éléments dans l'environnement secondaire, sont opposés. Cette opposition est probablement la clé pour interpréter le résultat de ce facteur.

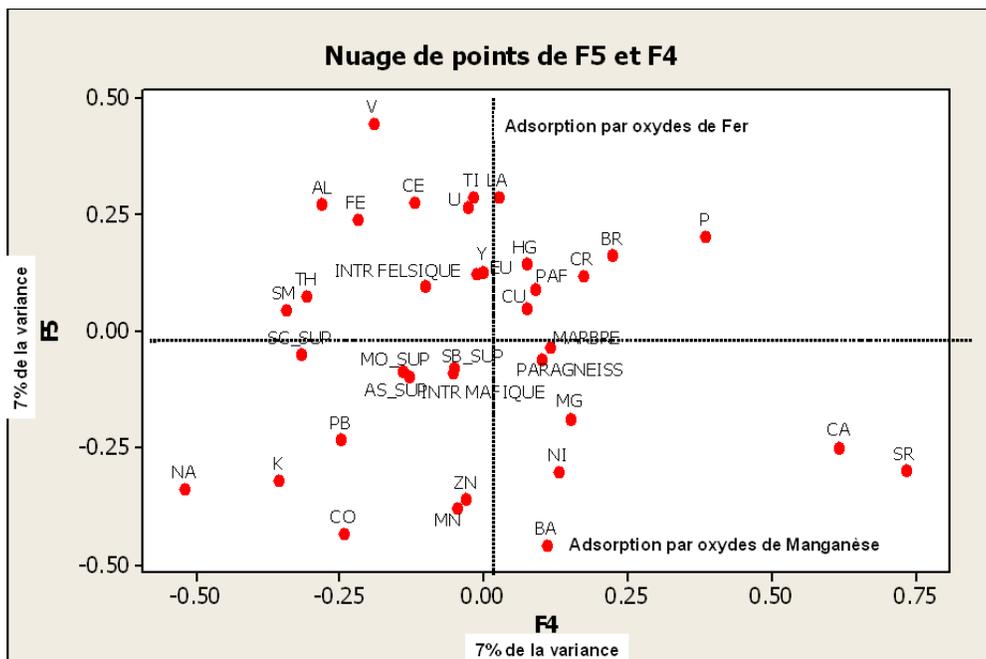


Figure 22. Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 4 et 5.

Ce facteur montre des valeurs positives situées sur l'extrémité nord-est de la région, et dans la partie centre-nord (**Figure 23**). Ces deux secteurs correspondent à des lithologies felsiques sur la carte générale du Grenville (**Figure 23**). Cependant, d'autres secteurs à lithologies felsiques montrent des valeurs qui sont moyennes ou faibles. Les valeurs les plus négatives se retrouvent le long de la vallée des rivières des Outaouais et Gatineau, ainsi que dans la partie centre-nord de la région (associé à un complexe de paragneiss).

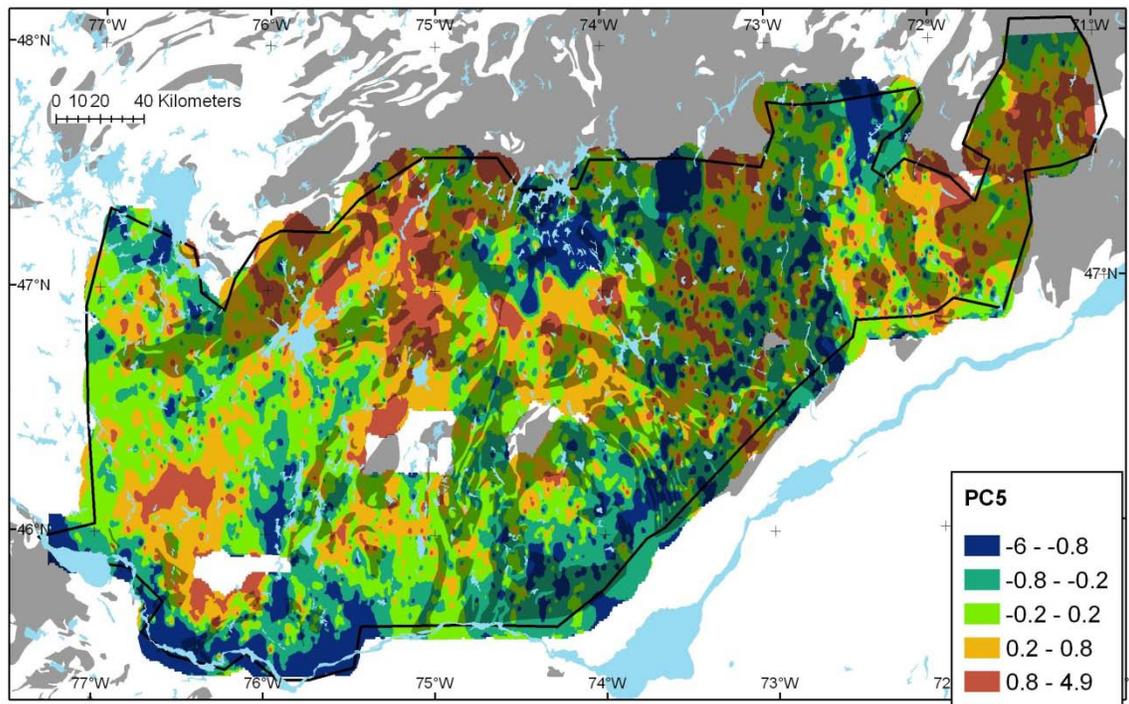


Figure 23. Carte du facteur 5 des fractions fines et intrusions felsiques (en ombragé).

Les oxydes de manganèse secondaires développent des charges de surface négatives pour la majorité des eaux naturelles de surface (Plant et Raiswell, 1994). Les oxydes de fer ont plutôt une charge de surface positive pour les pH normaux (ils deviennent négatifs à des pH plus alcalins que 8,5, qui sont assez rares en surface). En conséquence, les oxydes de manganèse tendent à attirer les métaux qui se retrouvent en solution sous forme d'ions positifs simples. Les oxydes de fer attirent préférentiellement les métaux qui se retrouvent en solution sous forme de complexes anioniques, négatifs. Par exemple, parmi les éléments corrélés ici positivement (avec Fe), l'uranium et le vanadium forment des complexes anioniques (De Vos et al., 2005). Parmi les éléments corrélés ici négativement (avec Mn), le cobalt, le zinc sont des éléments formant des ions positifs en solution.

L'hypothèse retenue est que ce facteur représente l'opposition entre l'adsorption par les oxydes de fer par rapport à l'adsorption par les oxydes de manganèse. Il est probable que ces phénomènes d'adsorption soient très dépendants du pH de l'eau; des mesures de pH auraient été nécessaires pour le savoir. Des données supplémentaires sur l'affinité des autres éléments (ETR, Ti, Al, Ba) aux oxydes de fer par rapport au manganèse seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse, mais dépassent le cadre de cette étude.

4.5.3 Analyse par grappes

Neuf groupes ont été identifiés dans les fractions fines par l'analyse par grappes. Comme l'analyse par grappes est basée sur la structure multivariable des données, une correspondance des groupes avec l'analyse factorielle est évidente (**Figure 24**).

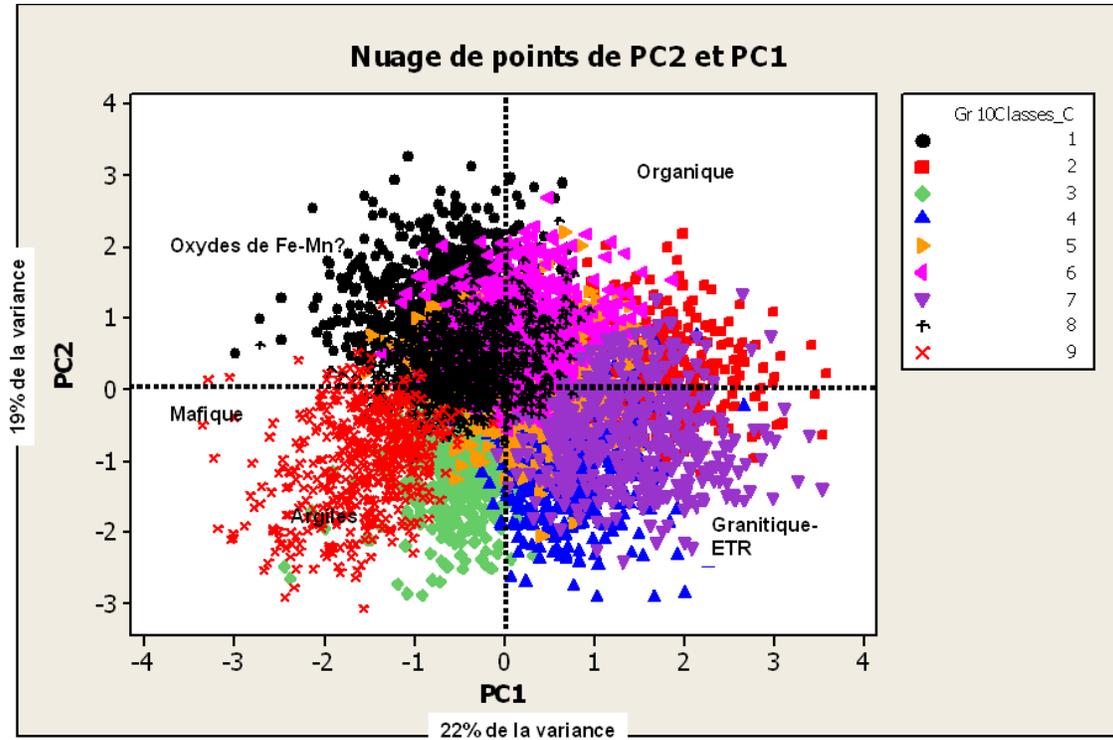


Figure 24. Relation entre les groupes de l'analyse par grappe et les facteurs 1 et 2 de l'analyse factorielle. Les étiquettes représentent l'interprétation de l'analyse factorielle.

Les différents groupes ont été examinés dans le but d'identifier les tendances géochimiques qui les caractérisent. Cette identification des groupes s'est basée sur les valeurs brutes des différents éléments dans les différents groupes et sur la relation entre les groupes et les différentes autres variables quantitatives et qualitatives.

Les différents groupes ont des teneurs en métaux clairement distinctes. Quelques exemples sont donnés dans les figures annexées (**Figure 25** à **Figure 31**). Quelques groupes aux extrêmes des tendances géochimiques méritent une attention particulière.

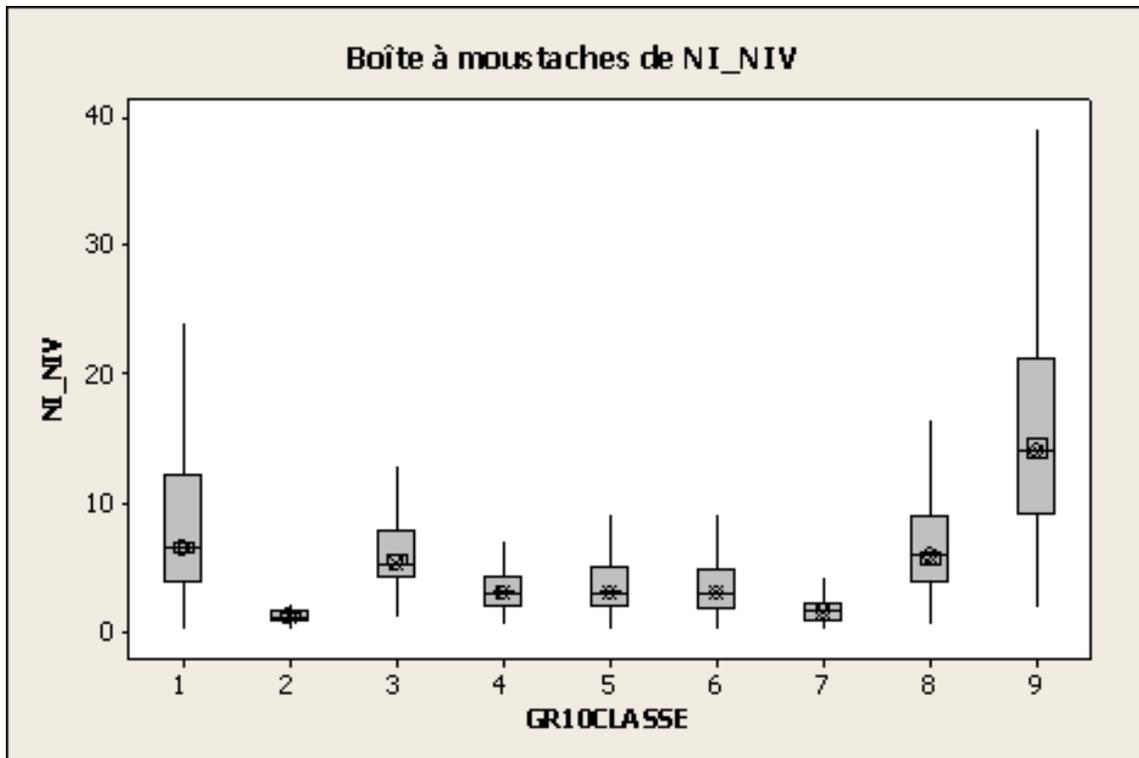


Figure 25. Teneurs en nickel dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

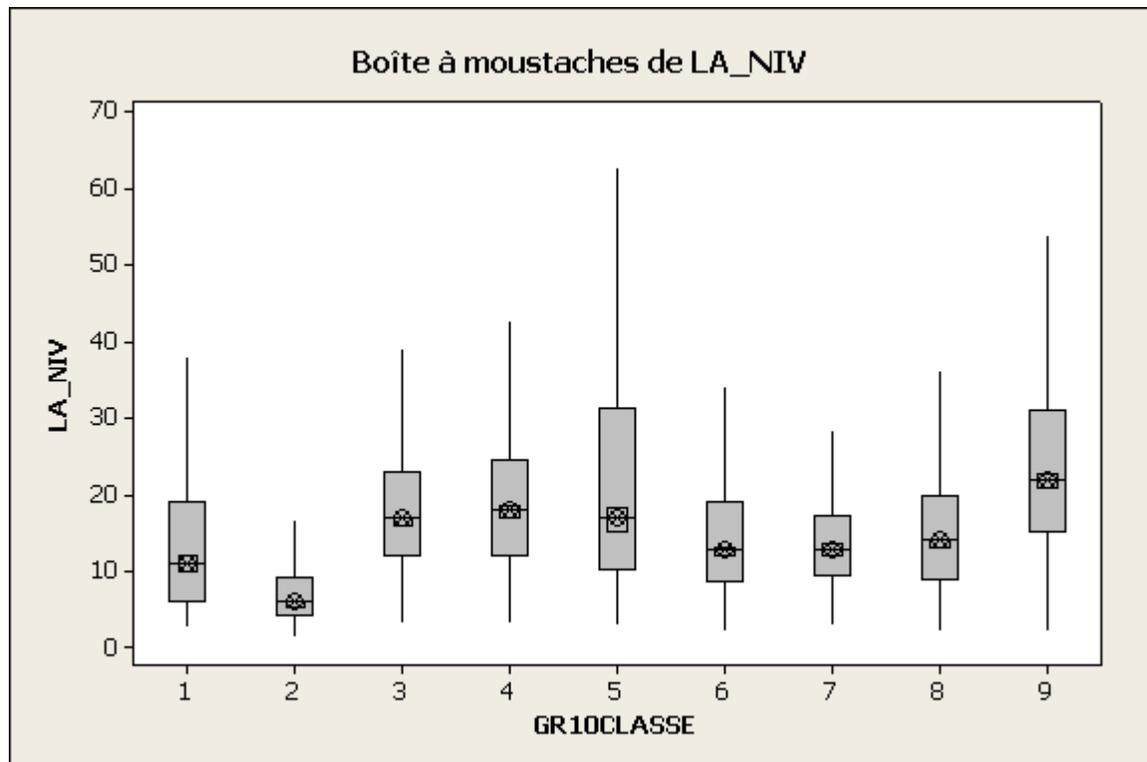


Figure 26. Teneurs en lanthane dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

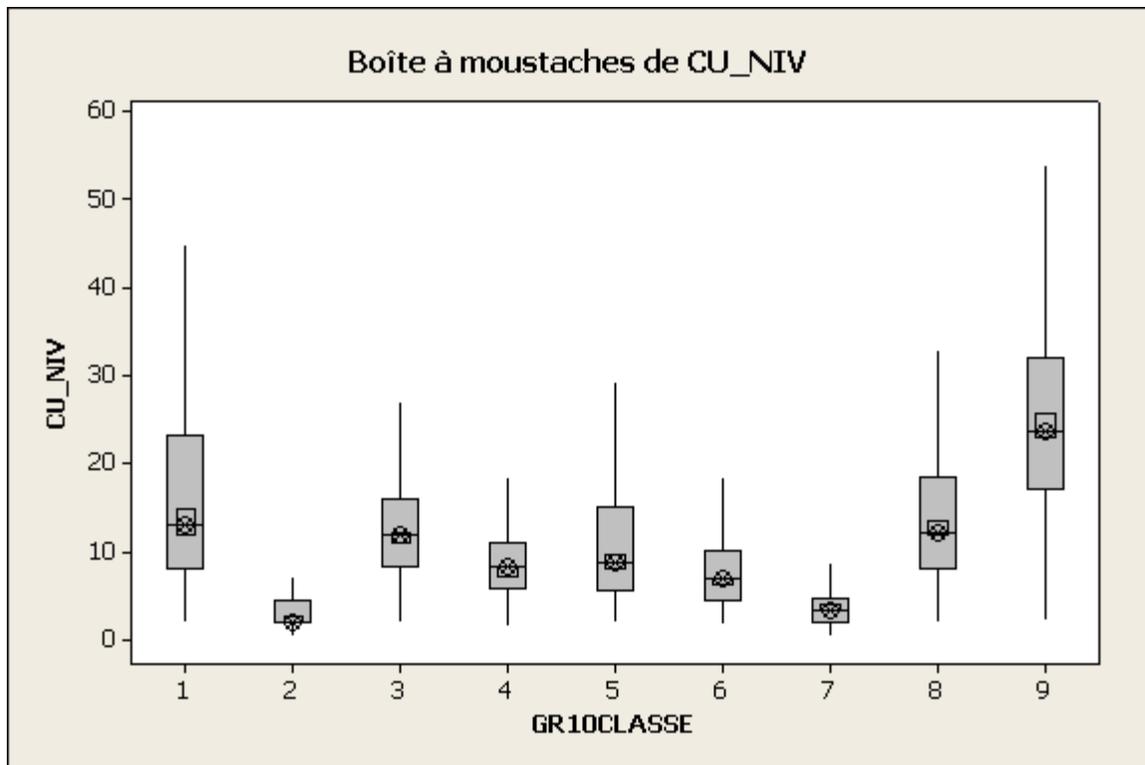


Figure 27. Teneurs en cuivre dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

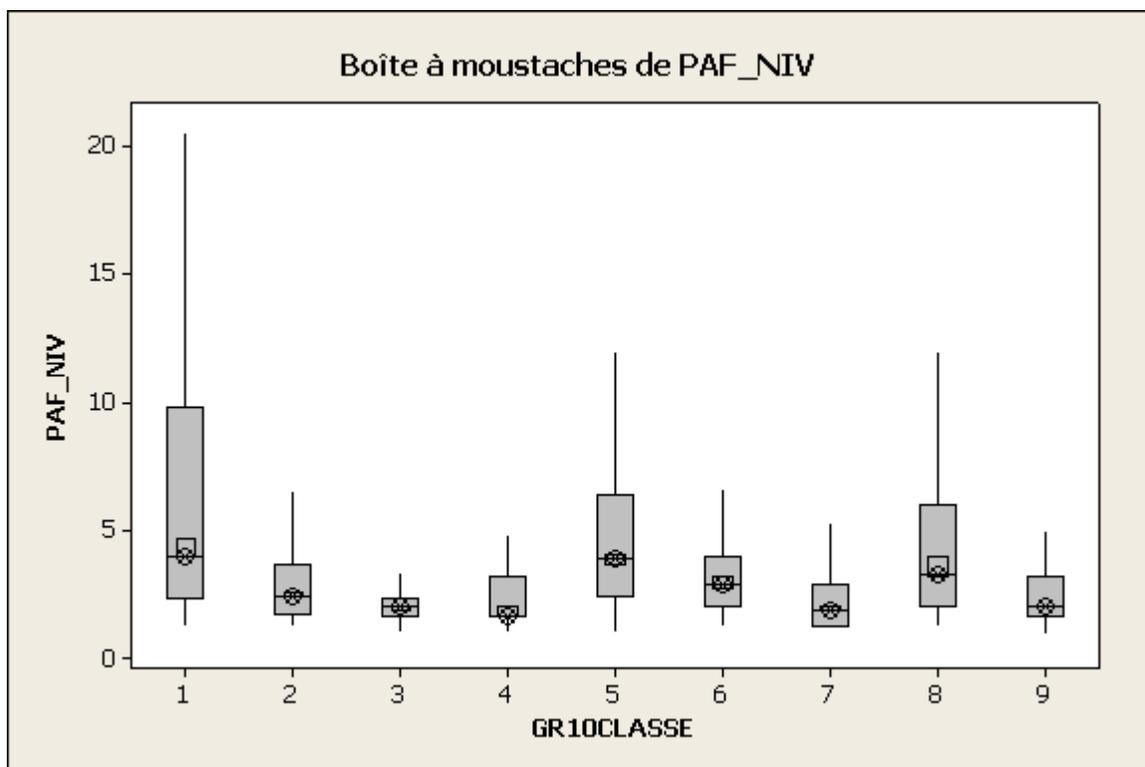


Figure 28. Valeurs en perte au feu dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

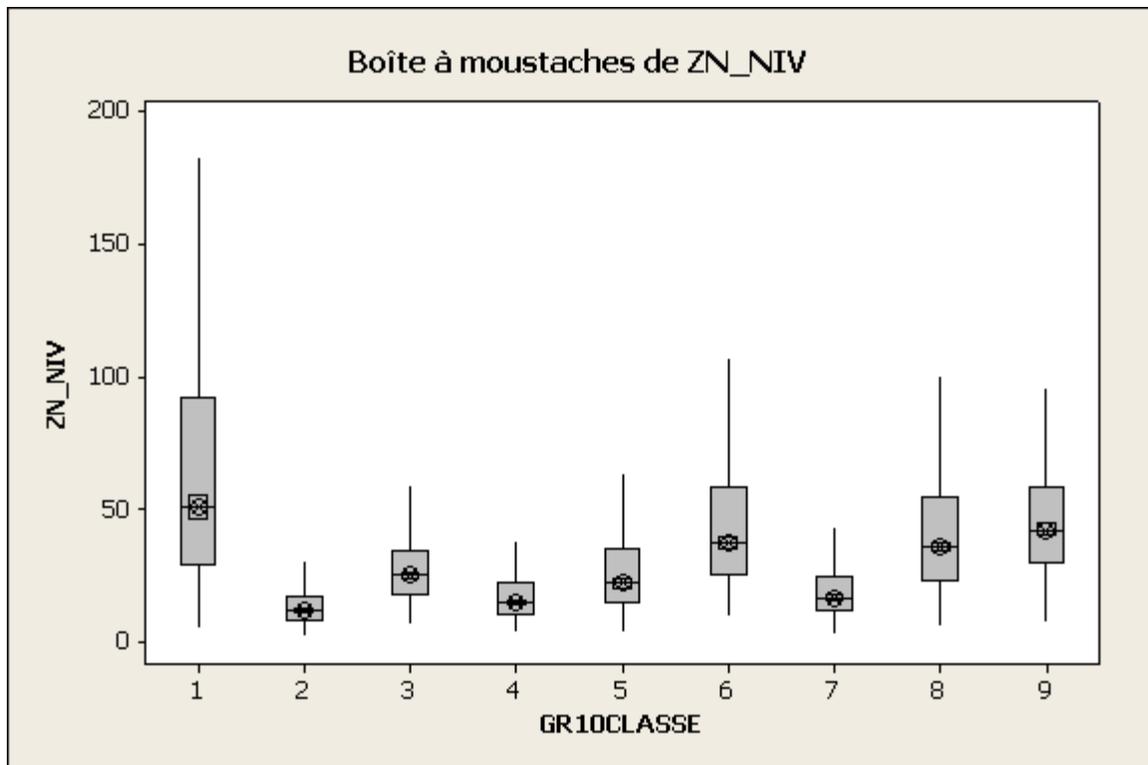


Figure 29. Teneurs en zinc dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

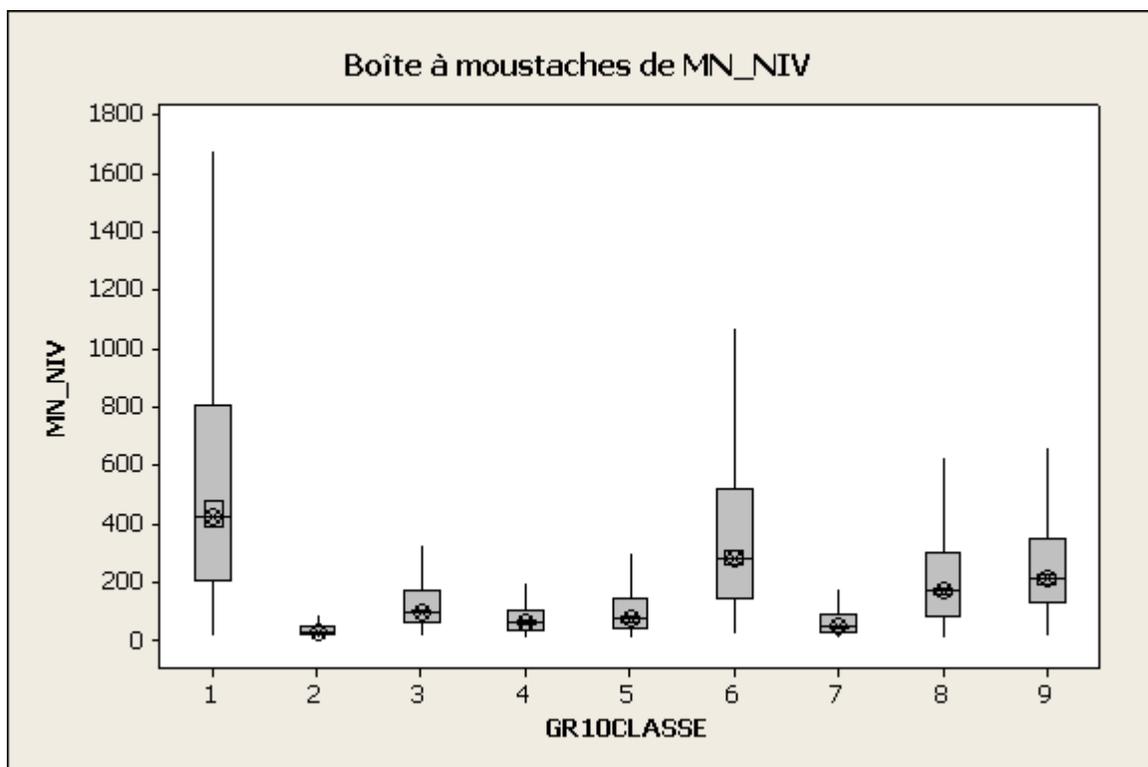


Figure 30. Teneurs en manganèse dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

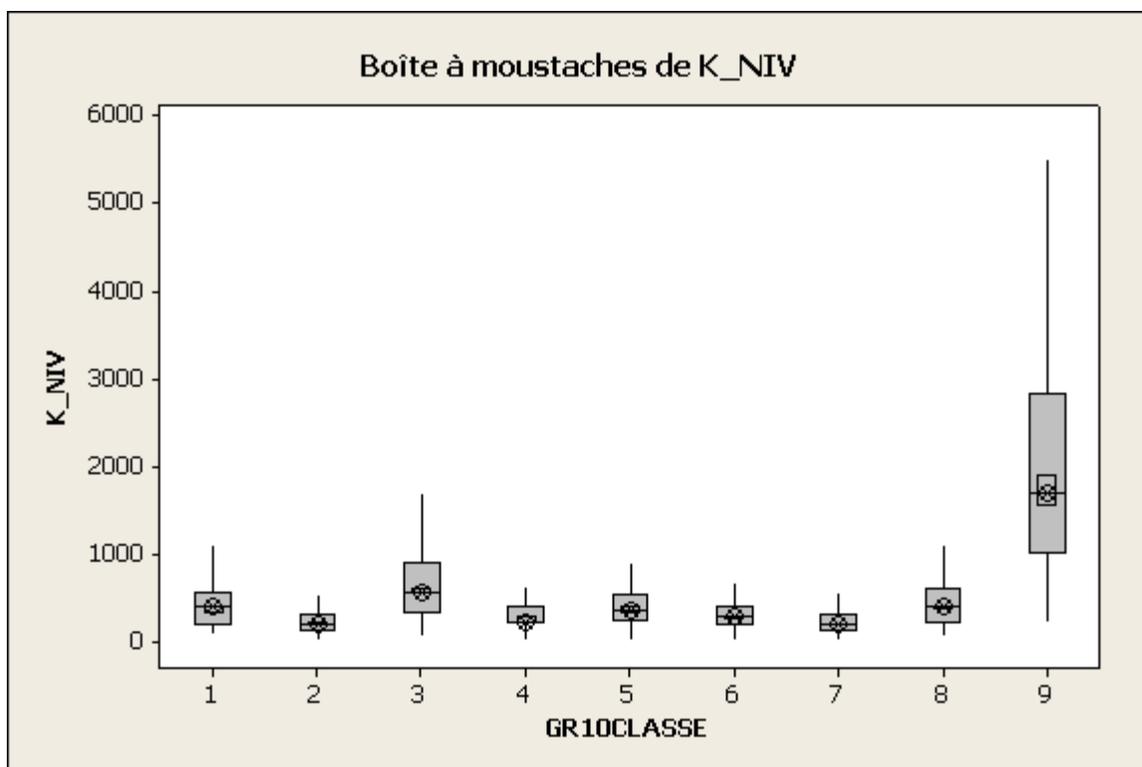


Figure 31. Teneurs en potassium dans les silts selon les groupes de l'analyse par grappes.

Groupe 1

Ce groupe est caractérisé par des valeurs de perte au feu et en éléments d'affinité organique très élevés. Ce groupe démontre le rôle important de la matière organique dans la concentration de nombreux métaux d'importance pour l'exploration (As, Zn, Co, Sb...). *Ces concentrations peuvent créer de fausses anomalies qui doivent être filtrées.*

Groupe 2

Ce groupe a comme particularité d'avoir des valeurs très faibles en tous les éléments analysés. Le total de tous les éléments des analyses, donne un total nettement inférieur aux autres (**Figure 32**). Ceci peut paraître d'abord incohérent, puisqu'une analyse chimique ferme par définition à 100 %. Il faut toutefois se rappeler que les analyses de sédiments de ruisseaux sont partielles selon deux points de vue. Tout d'abord, elles ne comprennent pas tous les éléments. Les deux éléments les plus abondants dans la matière minérale sont absents des analyses, soit Si et O. De plus, les extractions par acides faibles font en sorte que plusieurs minéraux ne sont pas dissous et ne peuvent donc pas contribuer aux éléments analysés tout en comptant tout de même dans le total de l'analyse.

On peut conclure de cette observation que le groupe 2 est plus riche en minéraux/éléments non analysés ou non dissous dans l'analyse. Il s'agit fort probablement de quartz et de feldspath.

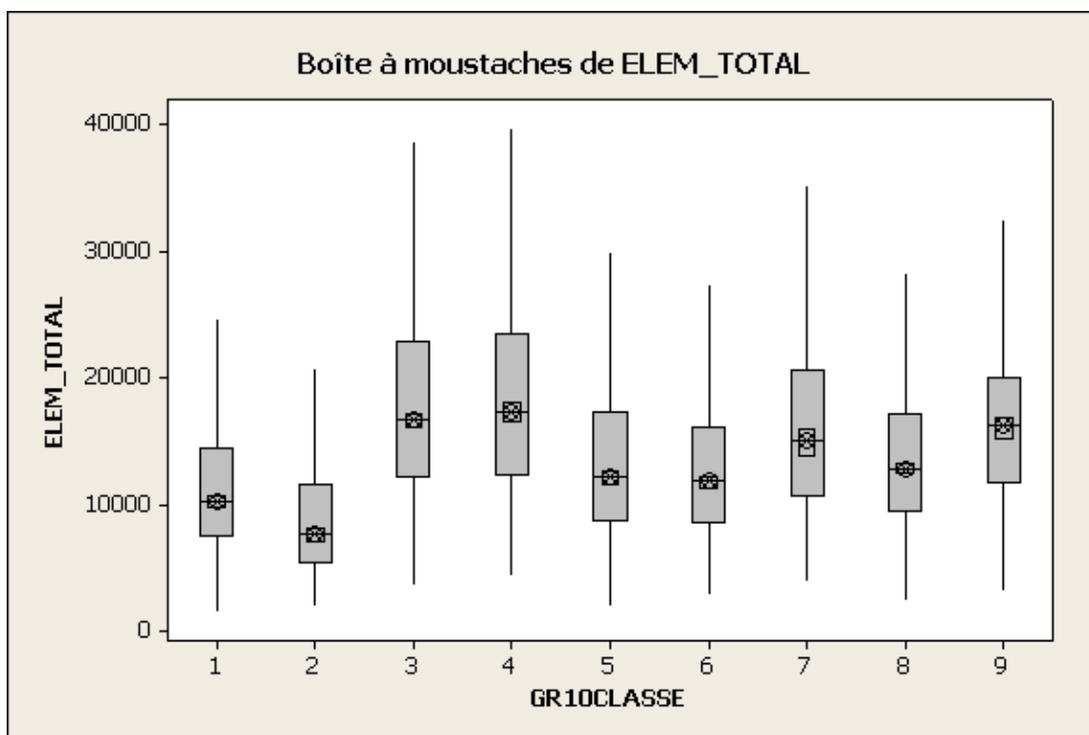


Figure 32. Total des éléments analysés selon les groupes de l'analyse par grappes.

Groupe 9

Les teneurs dans la plupart des éléments dans ce groupe sont très élevées. Plusieurs de ces éléments ont un intérêt direct pour l'exploration (Ni, ETR, Cu, V, Co...). Or, ce groupe représente des échantillons se trouvant dans des vallées défrichées/agricoles, occupées par des sédiments glacio-lacustres et glacio-marins (**Figure 33**). Ceci est particulièrement évident lorsque l'on regarde la localisation exacte des échantillons de ce groupe par rapport aux zones de forêt sur les cartes topographiques (**Figure 34**). La cause des teneurs très élevées pour la plupart des métaux de ce groupe est probablement la présence d'argiles dans les sédiments de ruisseaux de ces vallées. Les argiles ont une capacité importante à adsorber et fixer les métaux présents en solution et contiennent également dans leur structure des quantités importantes de plusieurs métaux. Ces argiles proviennent soit directement de l'érosion des dépôts quaternaires ou du fait de la plus faible énergie de ces vallées planes qui permettent l'accumulation d'argiles dans les ruisseaux.

Les teneurs élevées en métaux de ces échantillons sont susceptibles de former de fausses anomalies qui ne sont dues qu'à la présence d'argiles. Ces fausses anomalies devront être filtrées pour obtenir des anomalies d'intérêt pour l'exploration.

Tableau 4. Caractéristiques des groupes issus de l'analyse par grappes des fractions fines

Éléments							
Gr	Très enrichis	Enrichis	Légèrement enrichis	Appauvris	Très appauvris	Autres corrélations	Identification du groupe
1	Br Hg Co Mn Pb Zn Fe As Sb	Al Ba V Cr Cu Ti	Ti			(+)Intr. maf. (+)Brun-foncé-noir (+)Orange (-)Séd. Glacio-lacustres/Marins	Ultra-organique, oxydes de Fe-Mn, intr. maf.
2					Tous les éléments sauf U	(±)Intr. fels. (--) Séd. Glacio-lacustres/Marins	Argileux type 2 (?), légèrement felsique, pauvre en éléments analysés
3		Ba Sr Ca K P Mg	Eu Ti Th Ce	Hg		(+)Marbres (+)Gris (+)Séd. Glacio-lacustres/Marins	Argileux, inorganique
4	Ca P U	Th	Ce Eu La Th	Al Ba Br		(±)Marbres (±)Gris	Inorganique, ultra-carbonates
5	Ce La Eu Sm Th	Hg Ba U	Al Co Ti Pb V Br	Ca P		(+)Brun foncé-noir	Organique, granitique
6		Mn Pb Y Zn	Co Fe Br				Oxydes Fe-Mn, organique
7	Y			Cr Cu Mg Mn Th Ti V Zn Fe	Ba Sr Br Hg	(++)Intr. fels (±)Orange	Granitique, till régional, pauvre en éléments mafiques, oxydes de Fe-Mn
8			Ba Cr Cu Mg Ti U Zn Br Hg	Ce			Légèrement organique, légèrement carbonates
9	Al Ba Ce Cr Cu Eu K La Mg Na Ni Sr Th Ti V	Co Fe	Ca Mn			(++)Séd. Glacio-lacustres/Marins (++)Marbres (++)Gris (--) Brun foncé-noir Index couleur faible (-)Forêt (++)Champs	Ultra-argileux, inorganique, terres agricoles

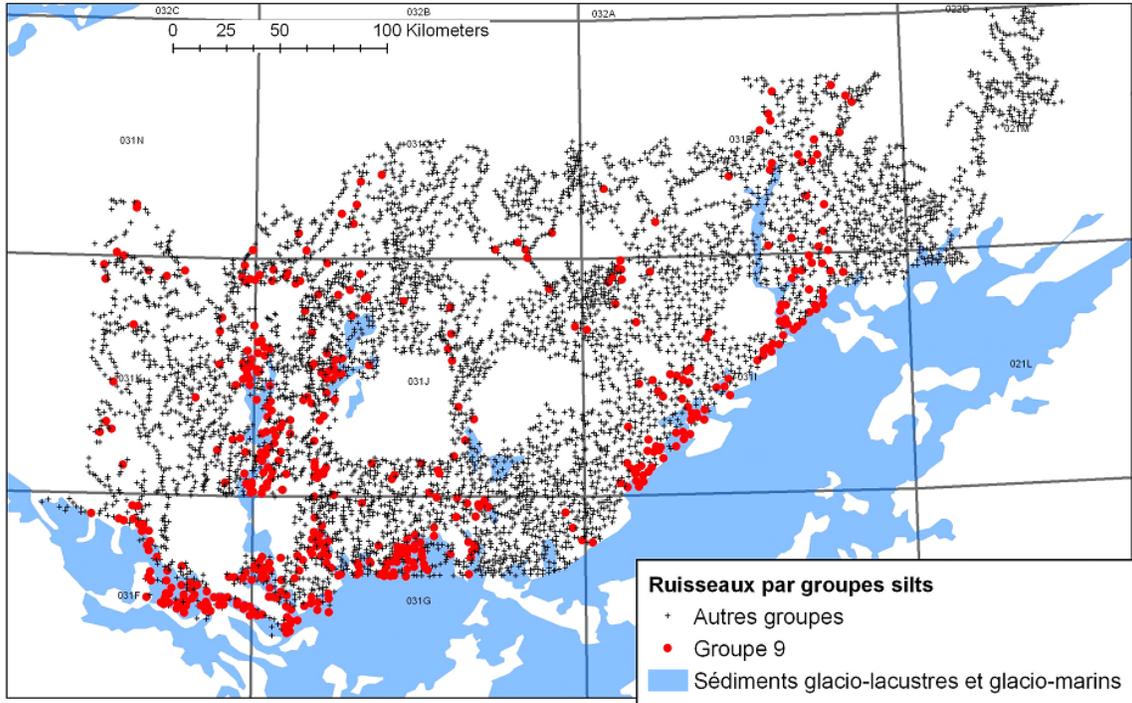


Figure 33. Groupe 9 de l'analyse par grappe vs sédiments glacio-marins et glacio-lacustres.

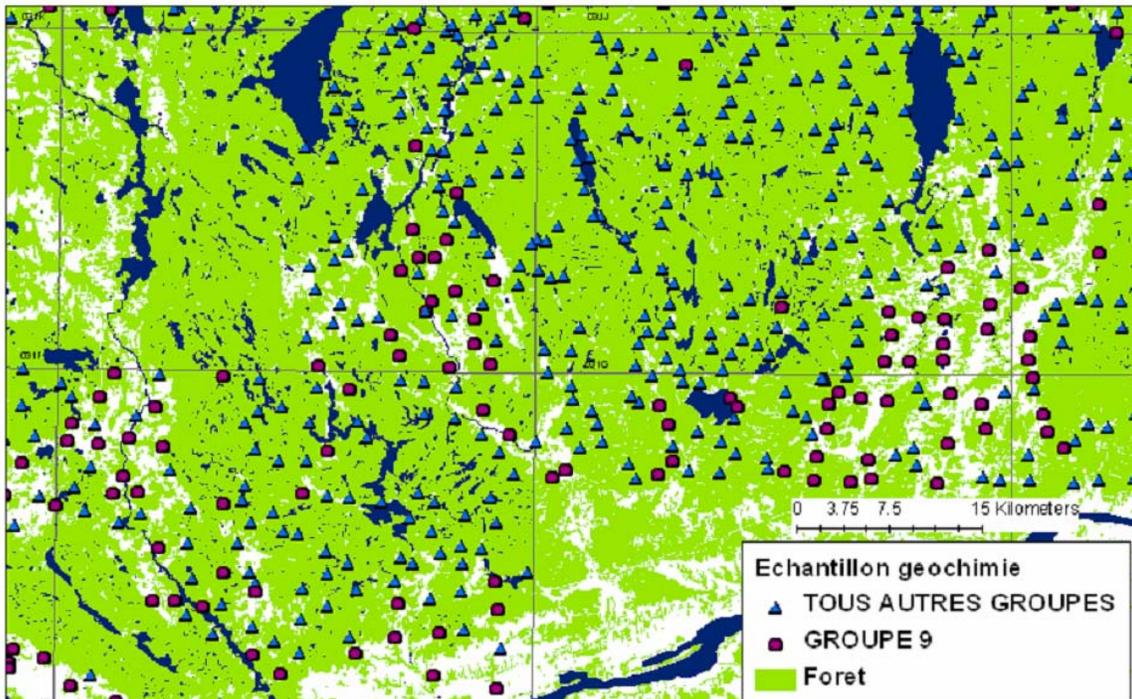


Figure 34. Groupe 9 vs zones de forêt (vert) sur les cartes topographiques. Secteur de la rivière Gatineau et de la Petite-Nation, Outaouais.

4.6 Analyse statistique et spatiale de la géochimie des minéraux lourds

4.6.1 Relation entre la couleur des échantillons, la perte au feu et les teneurs des minéraux lourds

Contrairement au cas des fractions fines, les relations entre les teneurs dans les minéraux lourds et les couleurs observées des échantillons des fractions fines sont faibles. Les **Figure 35** à **Figure 37**) montrent quelques exemples. On remarque dans les échantillons gris de légers enrichissements pour certains éléments, mais beaucoup moins évidents que pour les fractions fines.

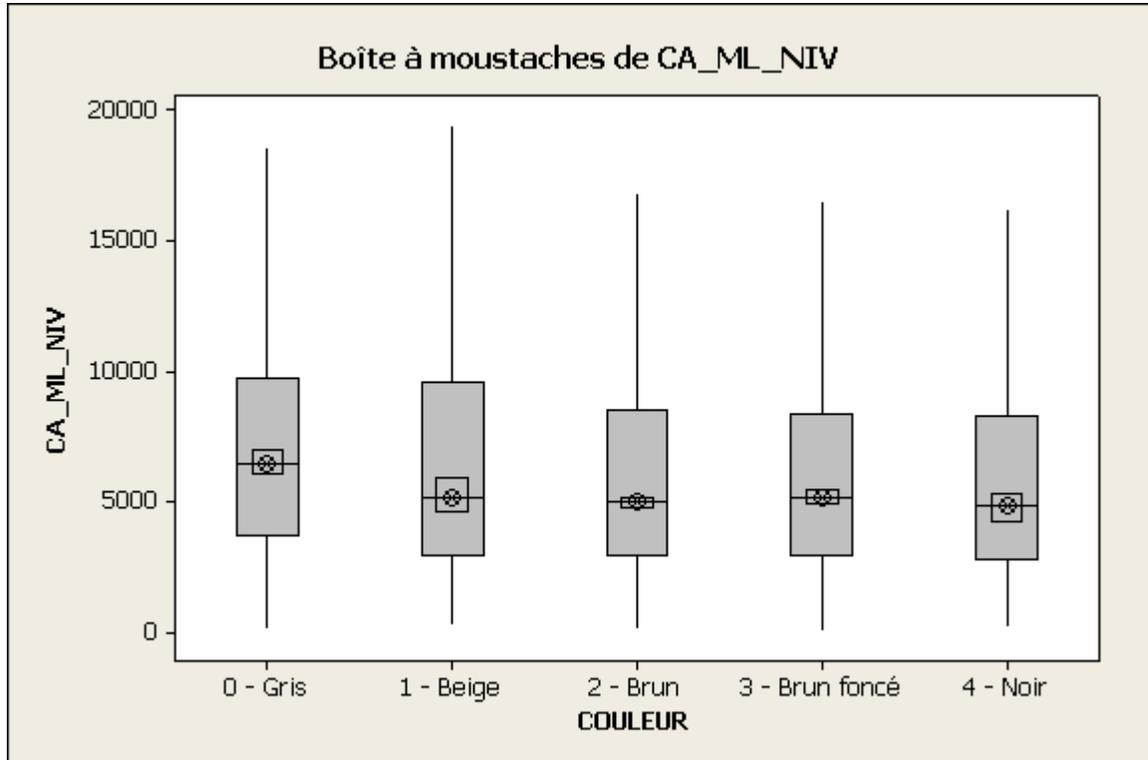


Figure 35. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en calcium dans les fractions minéraux lourds (ppm).

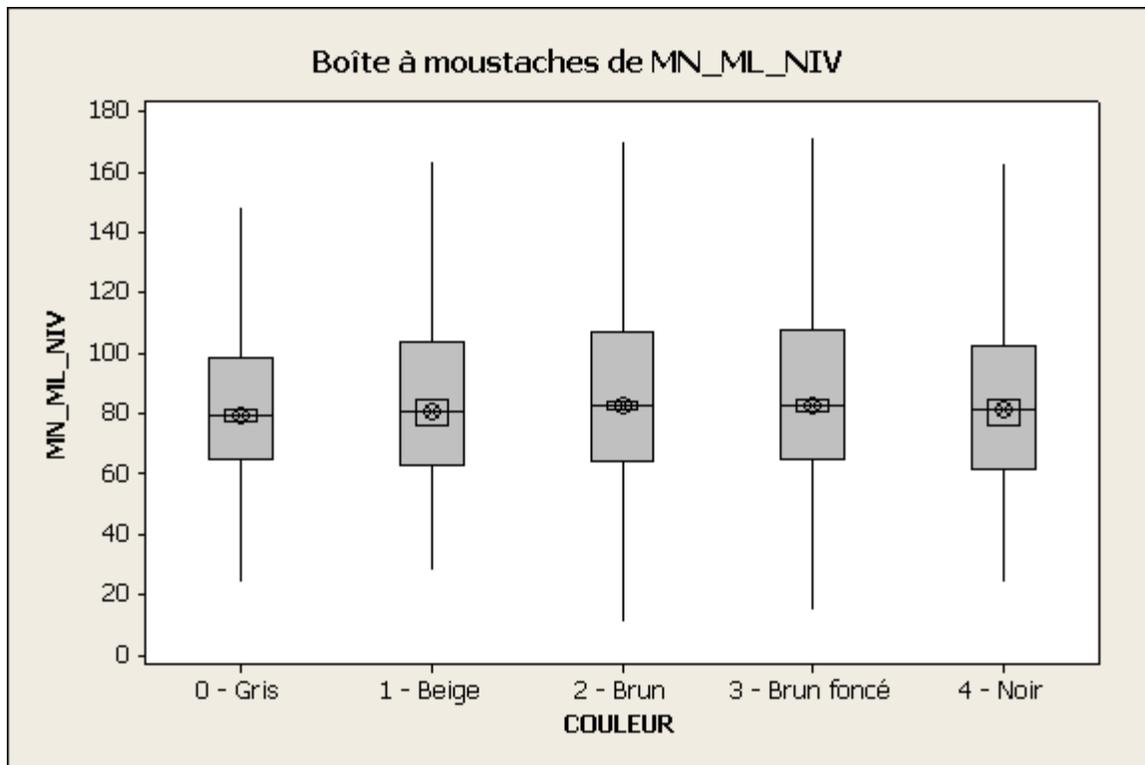


Figure 36. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en manganèse dans les minéraux lourds (ppm).

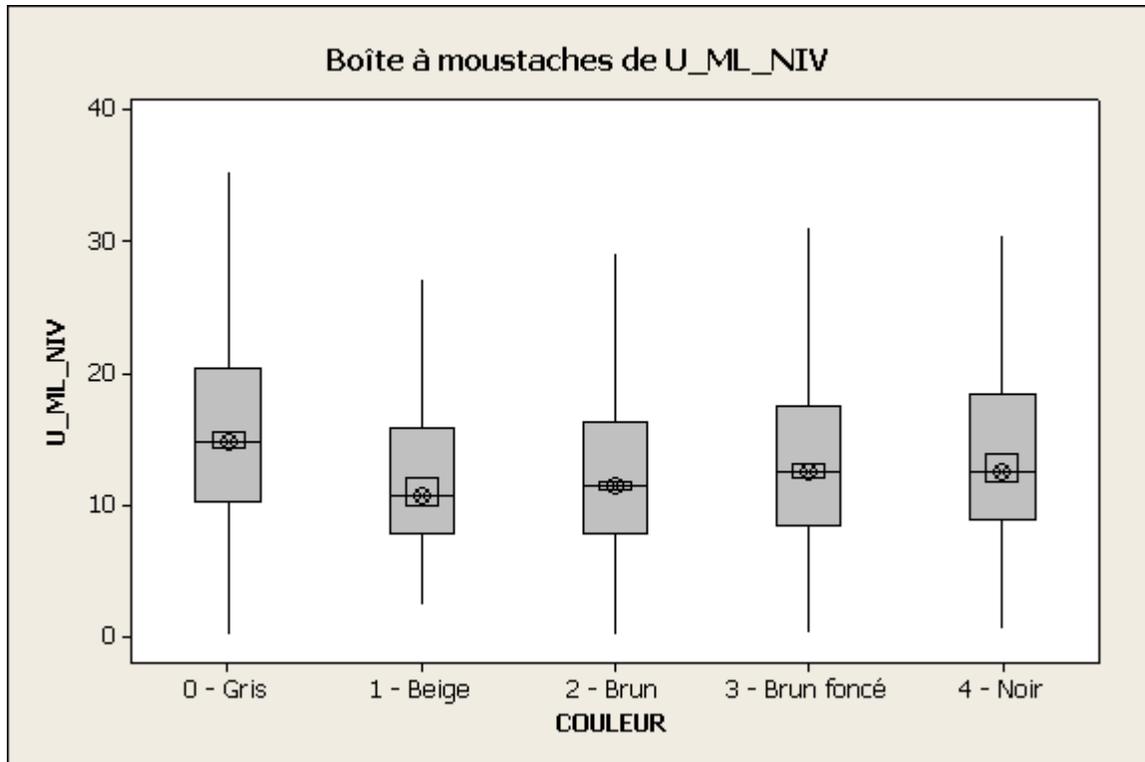


Figure 37. Relation entre la couleur de l'échantillon et la teneur en uranium dans les minéraux lourds (ppm).

4.6.2 Analyse factorielle

Nombre de facteurs extraits et signification

L'ensemble des facteurs a été calculé à partir des données géochimiques des minéraux lourds (22). L'examen du diagramme de Scree (**Figure 38**) montre toutefois que les 3 premiers sont les plus significatifs, selon une valeur propre de 0,5 comme seuil. Seuls ces derniers seront interprétés. Le **Tableau 5** donne un résumé de ces facteurs et de leur interprétation. Les bases de l'interprétation sont détaillées dans les pages suivantes.

Tableau 5. Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle des minéraux lourds

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Éléments pôle +	Mo, K, Co, Fe, Mn, Li, V, Pb, Al	Mg, Ni, Al, Ba, V, Cr, Zn Fe	Sm, Ce, Y, La
Éléments pôle -	Ca, Sr, P, Ce, Sm, La	W, U, La, Cr, Th, Sm, Y	U, W, Sr, Sb
Lithologies pôle +	Intrusion mafique	Intrusion mafique	Intrusion mafique
Lithologies pôle -	Marbre	Intrusion felsique	Paragneiss
Var. add. pôle +	eK / eTh, Altitude	Anti-Altitude	eK/eTh, Altitude
Var. add. pôle -	eTh, eU, eK, Anti-Altitude	Altitude, eU, eU/eK, eU/eTh, eTh	eU/eK, eUr, eTh, eU/eTh, Anti-altitude
Interprétation pôle +	Biotite	Pyroxènes ou amphiboles; Intr mafiques	Charnockites
Interprétation pôle -	Phosphates (Apatite – Monazite) – Felsique	Présence de roches felsiques	?

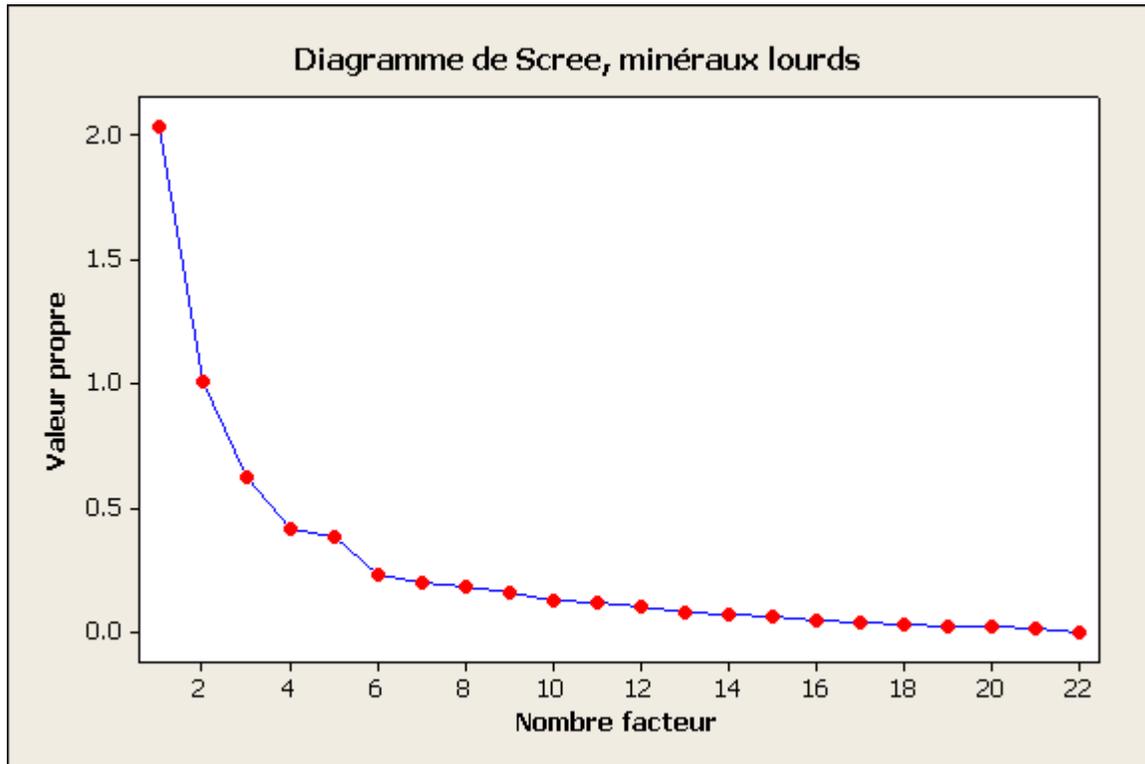


Figure 38. Diagramme de Scree pour les minéraux lourds.

Facteur 1 (34 % de la variance)

Le groupe d'éléments corrélés négativement au facteur (Ca, Sr, P, Ce, Sm, La; **Figure 39**) rappelle la formule de minéraux lourds du groupe des phosphates, très communs dans les roches métamorphiques et ignées felsiques. On peut penser à l'apatite, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$, et à la monazite, $(La,Ce,Th)PO_4$. L'apatite a été observée dans les concentrés de minéraux lourds du Sud du Grenville (**Tableau 1**). Les valeurs négatives du facteur montrent de bonnes corrélations avec la radiométrie, en particulier pour le thorium, mais aussi avec l'uranium et le potassium, ce qui confirme le caractère felsique de cette association (**Figure 40**).

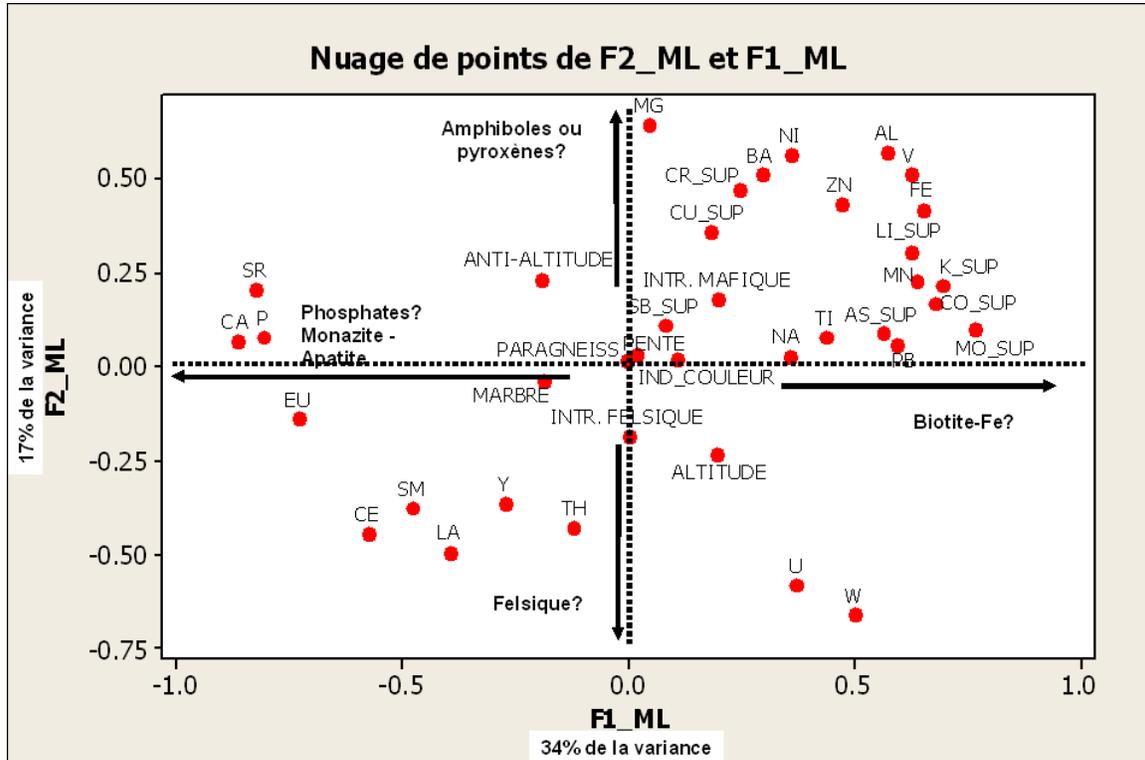


Figure 39. Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 1 et 2 des minéraux lourds.

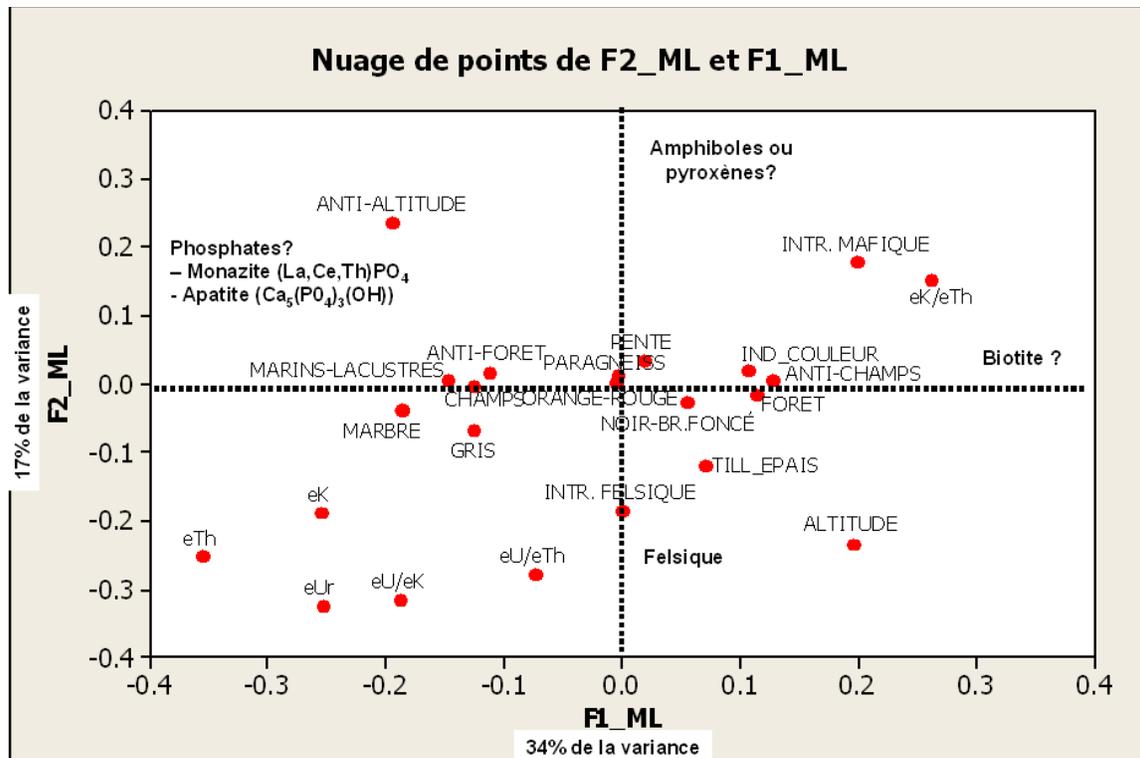


Figure 40. Corrélations entre lithologies, variables qualitatives additionnelles, et facteurs 1 et 2 des minéraux lourds.

Le groupe d'éléments corrélés positivement au facteur est assez diversifié (Mo, K, Co, Fe, Mn, Li, V, Pb, Al). Plusieurs de ces éléments sont présents en traces dans plusieurs minéraux. La présence du potassium dans ce groupe d'éléments limite le nombre de minéraux possibles pouvant l'expliquer; en effet, peu de minéraux lourds contiennent du potassium. Deux minéraux sont probables : la hornblende, et la biotite. L'hypothèse de la biotite est privilégiée sur la base de sa proportion plus grande que celle du potassium et du fait que la biotite montre des taux d'extraction dans l'acide nitrique qui sont de 10 à 20 fois plus élevés que la hornblende. Une très bonne corrélation de la partie positive du facteur est observée avec les intrusions mafiques. Cependant, la biotite n'est pas particulièrement abondante dans les intrusions franchement mafiques, mais plutôt dans les roches un peu plus intermédiaires.

Les valeurs les plus positives se trouvent concentrées dans une zone en forme de beigne située au centre de la région d'intérêt (**Figure 41**). Quoique cette zone comprenne les roches mafiques de l'anorthosite de Morin, il est assez difficile de voir la correspondance de cet ensemble avec la carte géologique du Grenville, puisqu'il semble les recouper (**Figure 42**). Par contre, on constate que cette zone correspond très précisément à des altitudes supérieures à 400 m (**Figure 43**). Il est probable que ce secteur de plus haute altitude correspond à un ensemble lithologique qui n'est pas reconnu sur les cartes actuelles. À l'inverse, les valeurs les plus négatives correspondent en général à des zones à forte radiométrie (**Figure 44**).

On peut noter finalement que les lithologies sont mieux corrélées avec ce facteur que toutes les autres variables additionnelles, reliées à l'environnement de surface sauf l'altitude (couleurs, dépôts de surface, etc.). Ce facteur montre donc des corrélations lithologiques assez bonnes et est moins dépendant des variations de l'environnement secondaire.

Ce facteur est interprété comme étant dû à des variations lithologiques. Les valeurs négatives sont interprétées comme étant dues à la présence de phosphates, abondants dans les zones

granitiques. Les valeurs positives seraient reliées à l'abondance de biotite, associée partiellement aux intrusions mafiques.

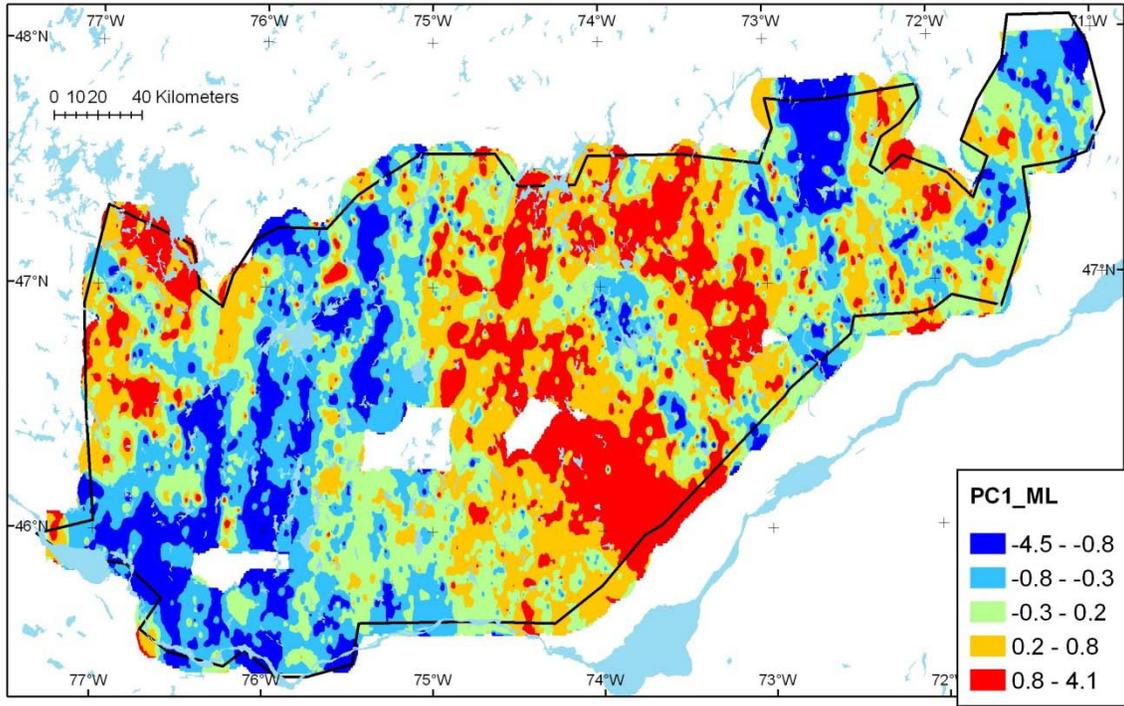


Figure 41. Carte du facteur 1 des minéraux lourds.

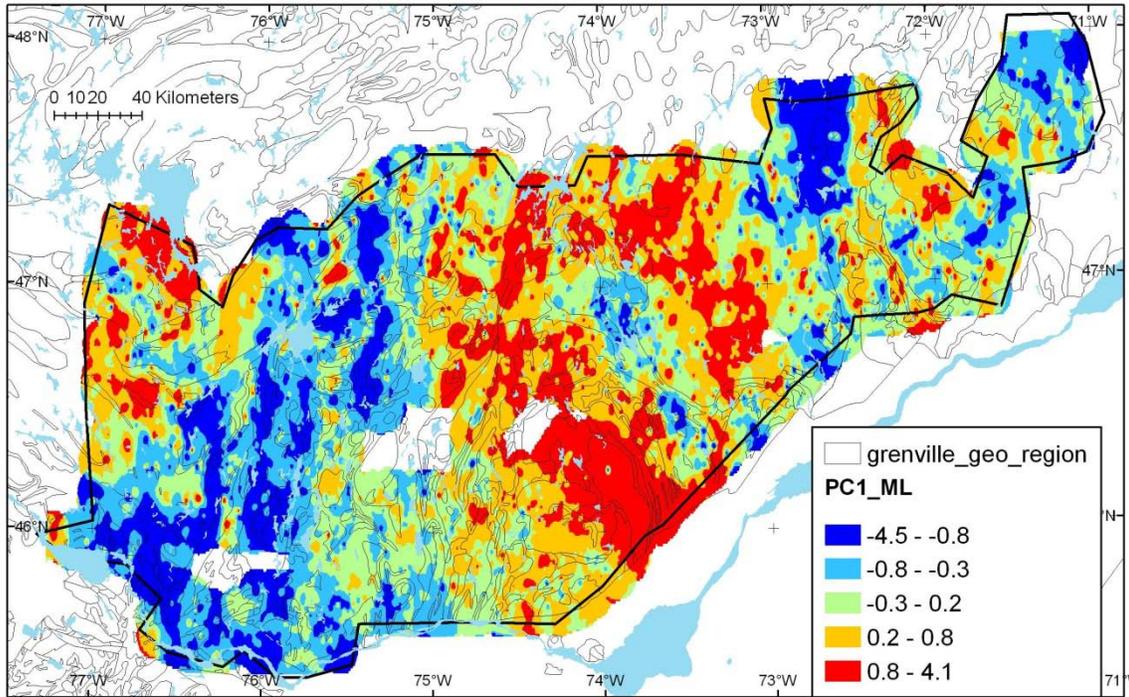


Figure 42. Carte du facteur 1 des minéraux lourds vs lithologies de la carte générale du Grenville.

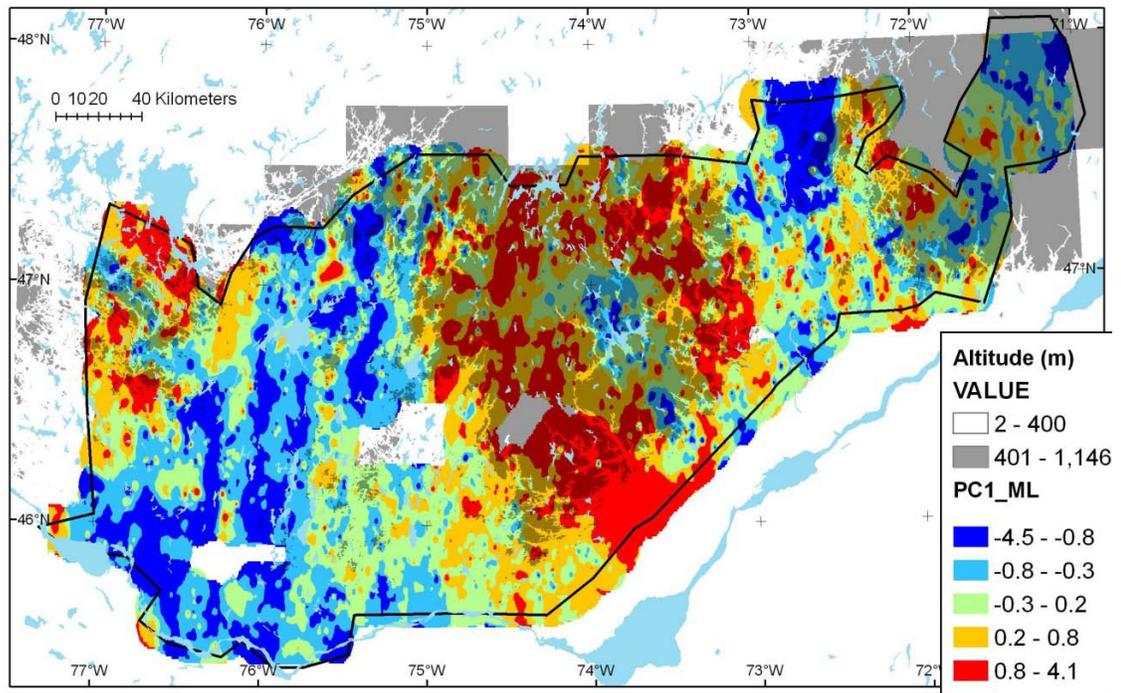


Figure 43. Carte du facteur 1 des minéraux lourds vs zones d'altitudes supérieures à 400 m (en ombragé).

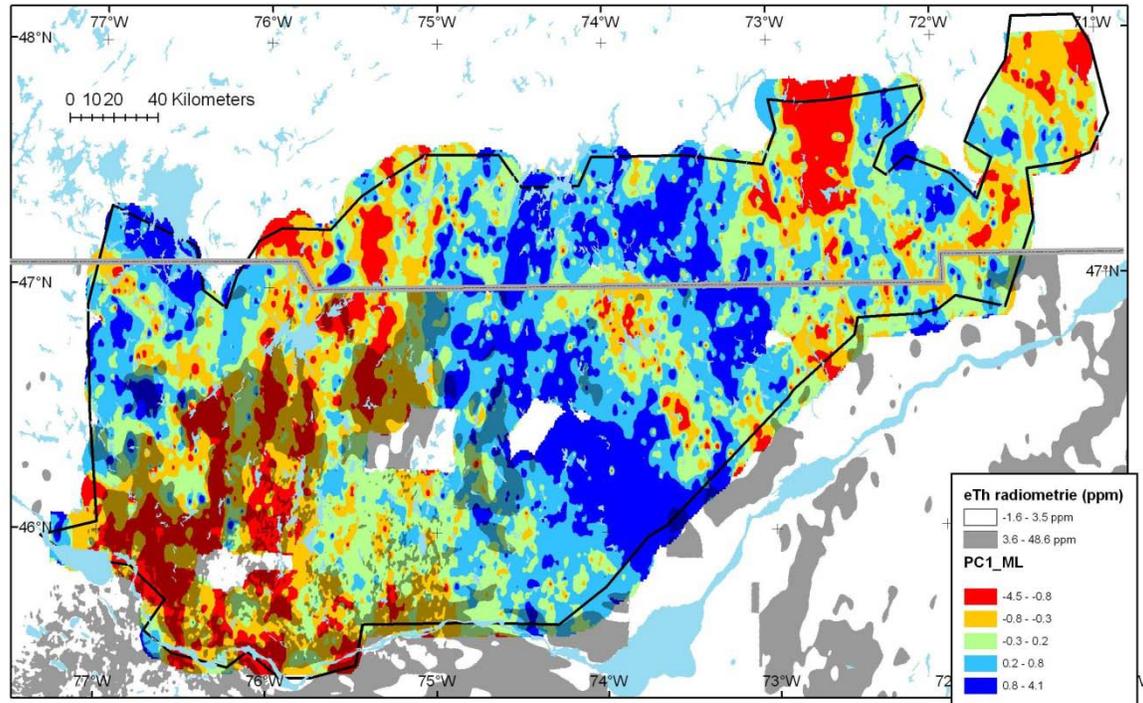


Figure 44. Carte du facteur 1 dans les minéraux lourds vs thorium dans la radiométrie (CGC, 2005). Note : la ligne grise montre la limite nord de la couverture radiométrique.

Facteur 2 (17 % de la variance)

Les éléments du pôle positif de ce facteur sont d'affinité mafique assez claire (Mg, Ni, Al, Ba, V, Cr, Zn Fe; **Figure 39**). Ce groupe d'éléments suggère la présence de pyroxènes ou d'amphiboles. Une très bonne corrélation avec les intrusions mafiques est également notée, ce qui supporte cette interprétation (**Figure 57**).

Le pôle négatif du facteur est caractérisé par des éléments d'affinité felsique (W, U, La, Cr, Th, Sm, Y). Ce pôle est également corrélé aux intrusions felsiques. L'affinité felsique est confirmée par l'association avec des valeurs de radiométrie élevées en uranium et thorium.

Les valeurs les plus positives sont concentrées dans deux secteurs (**Figure 45**). Le premier, dans la partie Centre-Sud de la région, correspond précisément aux roches mafiques de l'anorthosite de Morin (**Figure 46**). Le deuxième secteur, au Nord-Ouest, correspond en partie au Parautochtone du Grenville.

Une large zone de valeurs négatives du facteur est associée aux charnockites de l'extrémité Nord-Est de la région.

Ce facteur est donc interprété comme étant dû principalement à l'opposition entre lithologies mafiques et felsiques. Il montre de très bonnes correspondances avec les lithologies/minéralisations, et très peu avec les variables additionnelles reliées à l'environnement de surface. La corrélation lithologique de ce facteur est donc excellente.

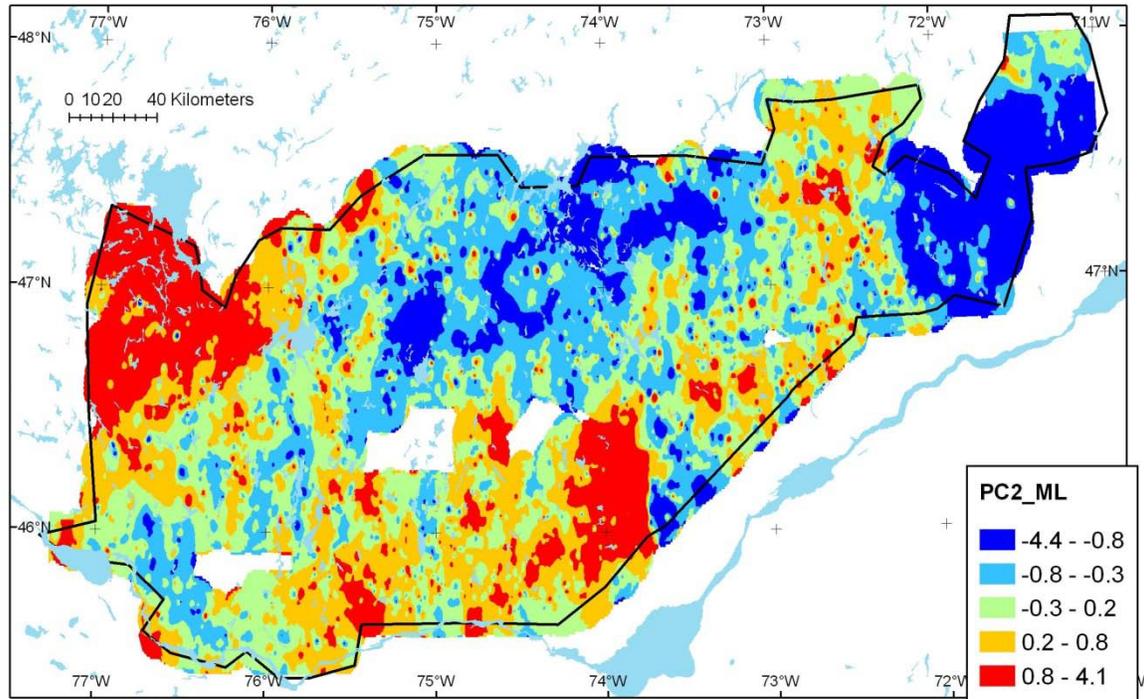


Figure 45. Carte du facteur 2 dans les minéraux lourds.

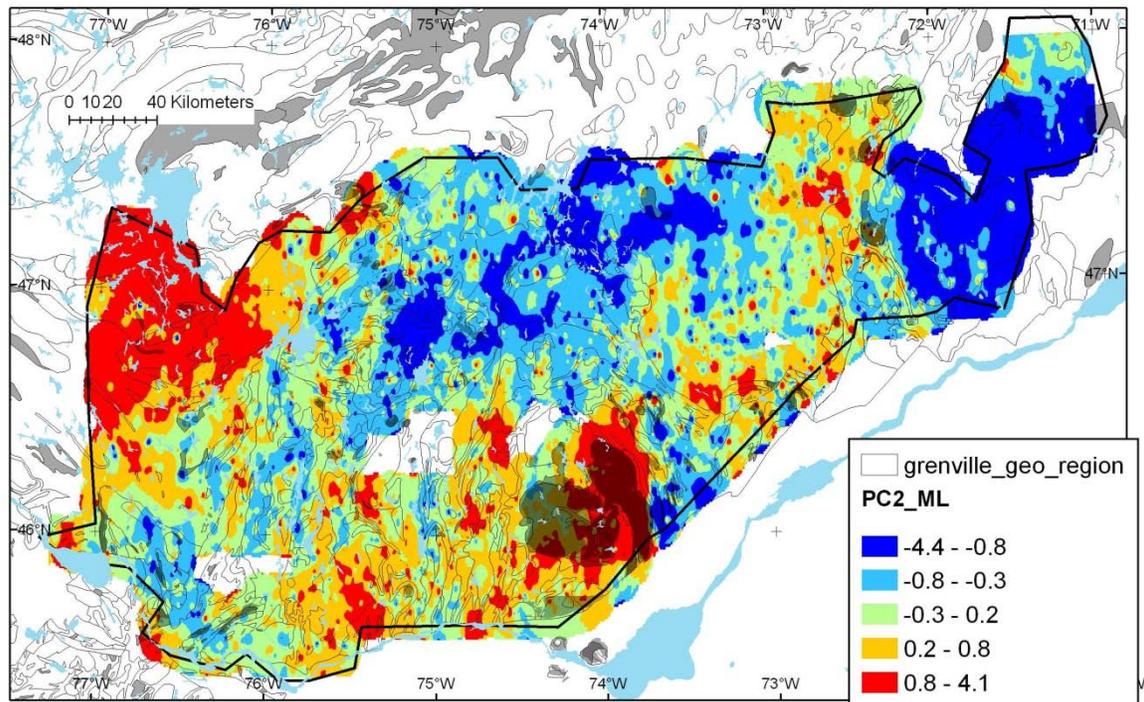


Figure 46. Carte du facteur 2 et lithologies. Les intrusions mafiques sont en ombragé, et les autres lithologies en contours seulement.

Facteur 3 (9 % de la variance)

Les valeurs de ce facteur sont corrélées positivement avec les terres rares et l'yttrium (**Figure 47**). En ce sens, on peut penser à un type d'association felsique. Les valeurs positives les plus fortes se trouvent dans l'extrémité Nord-Est de la région d'intérêt et autour de l'anorthosite de Morin (**Figure 49**). Dans les deux cas, on note une association étroite avec des unités de charnockite, ce qui est particulièrement évident autour de l'anorthosite de Morin (**Figure 50**). Toutefois, d'autres unités de charnockite de la partie Ouest de la région montrent des valeurs faibles ou négatives. De plus, les valeurs de la radiométrie sont corrélées négativement avec ce facteur, ce qui indique qu'il ne s'agit pas de granitoïdes très évolués (**Figure 48**).

Le pôle négatif du facteur est également caractérisé par une suite d'éléments d'affinité felsique distincte (U, W, Sr, Sb). Le pôle négatif est accompagné de valeurs élevées de la radiométrie pour l'uranium et le thorium. Le pôle négatif du facteur est particulièrement important dans la moitié Ouest de la région.

Le pôle positif de ce facteur est d'association lithologique et est relié à la présence de certaines unités charnockitiques. Le pôle négatif est probablement relié à des granites.

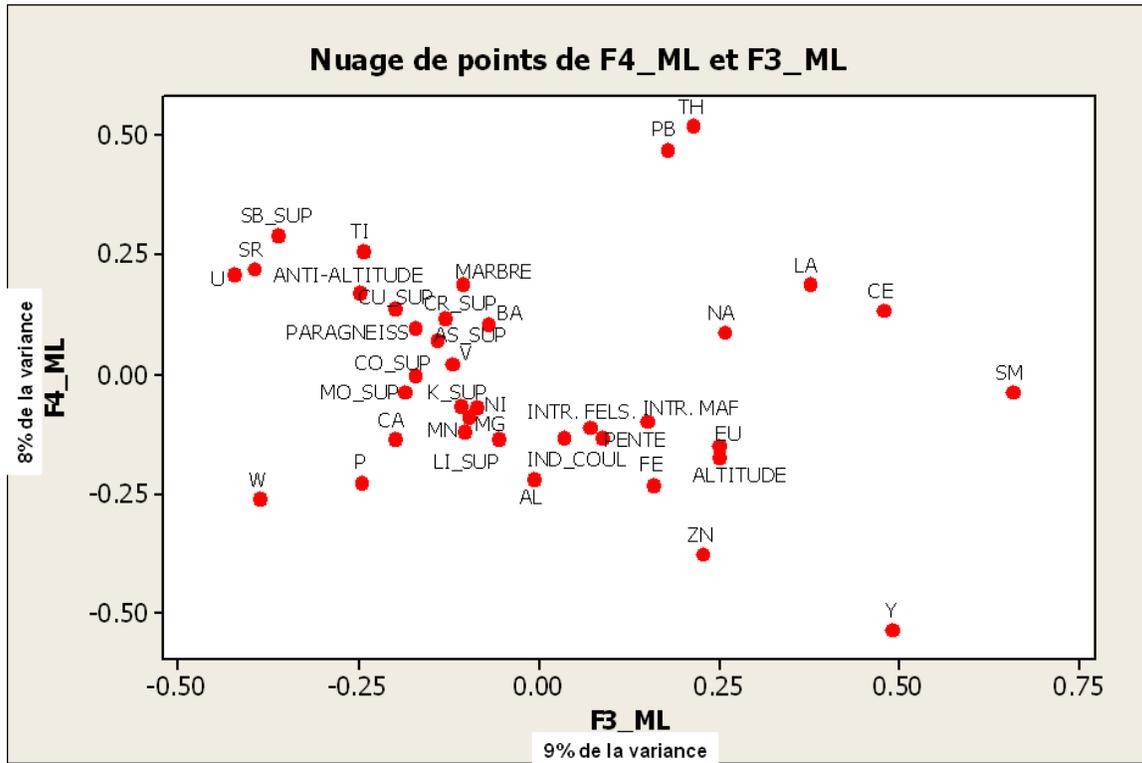


Figure 47. Corrélations entre éléments, lithologies, autres variables quantitatives, et facteurs 3 et 4 des minéraux lourds.

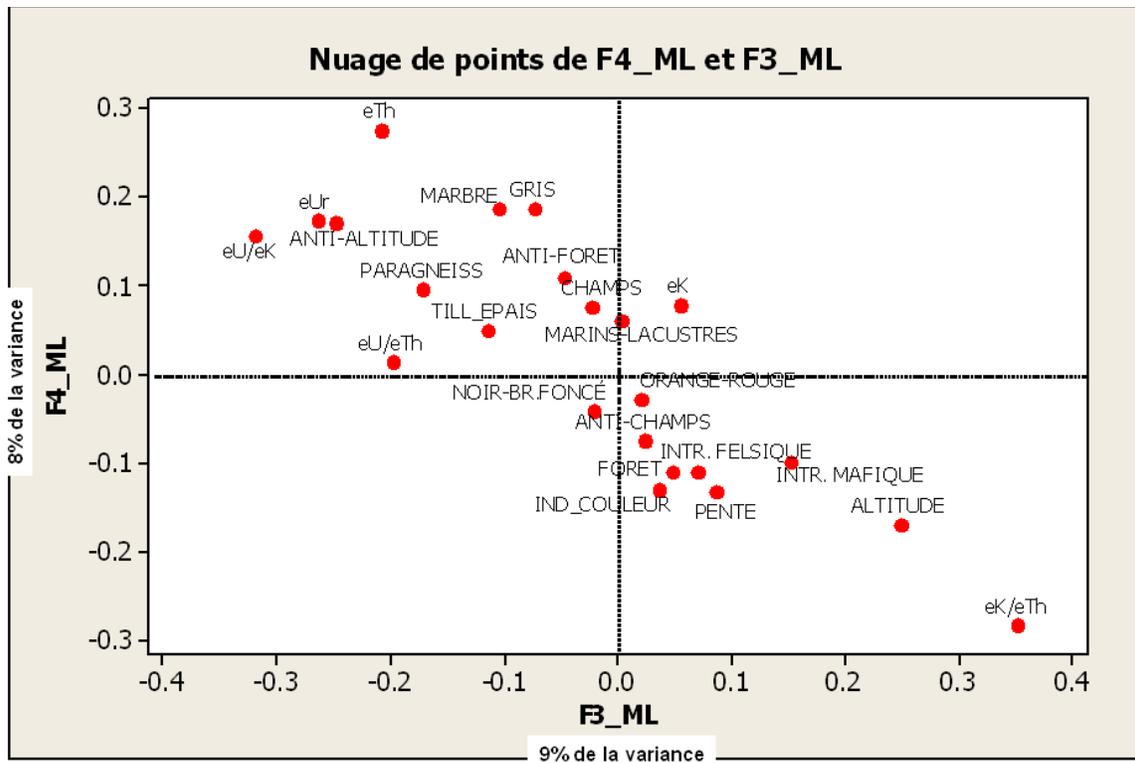


Figure 48. Corrélation entre lithologies, variables qualitatives additionnelles et facteur 3 et 4 des minéraux lourds.

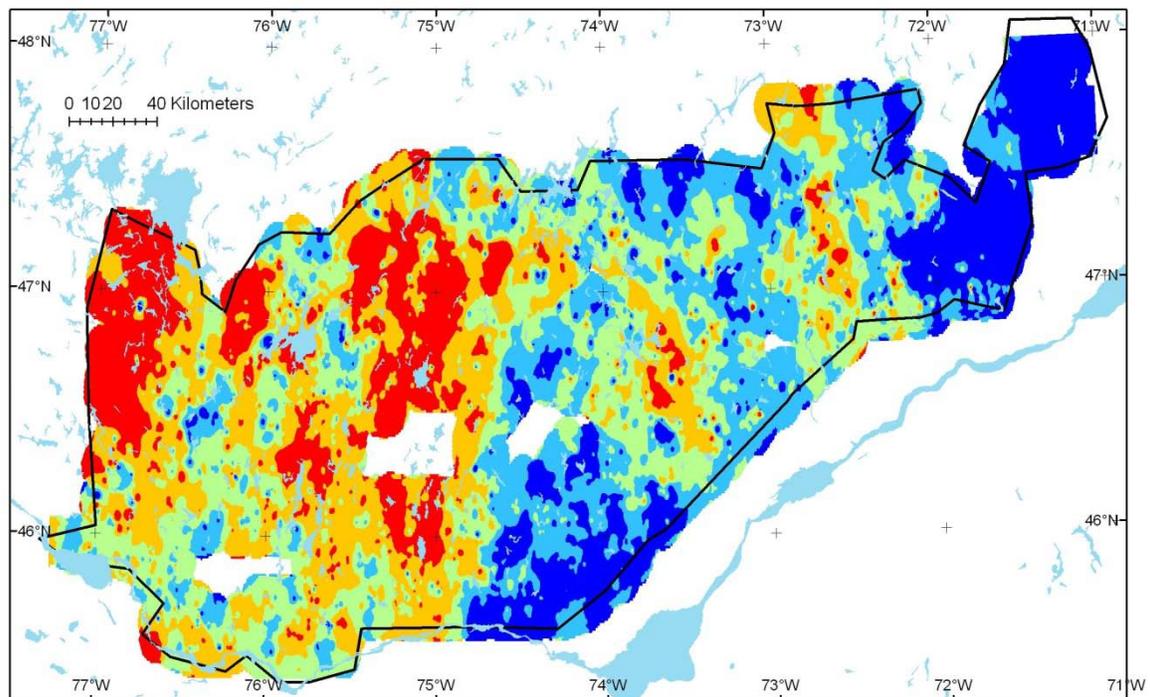


Figure 49. Carte du facteur 3 dans les minéraux lourds.

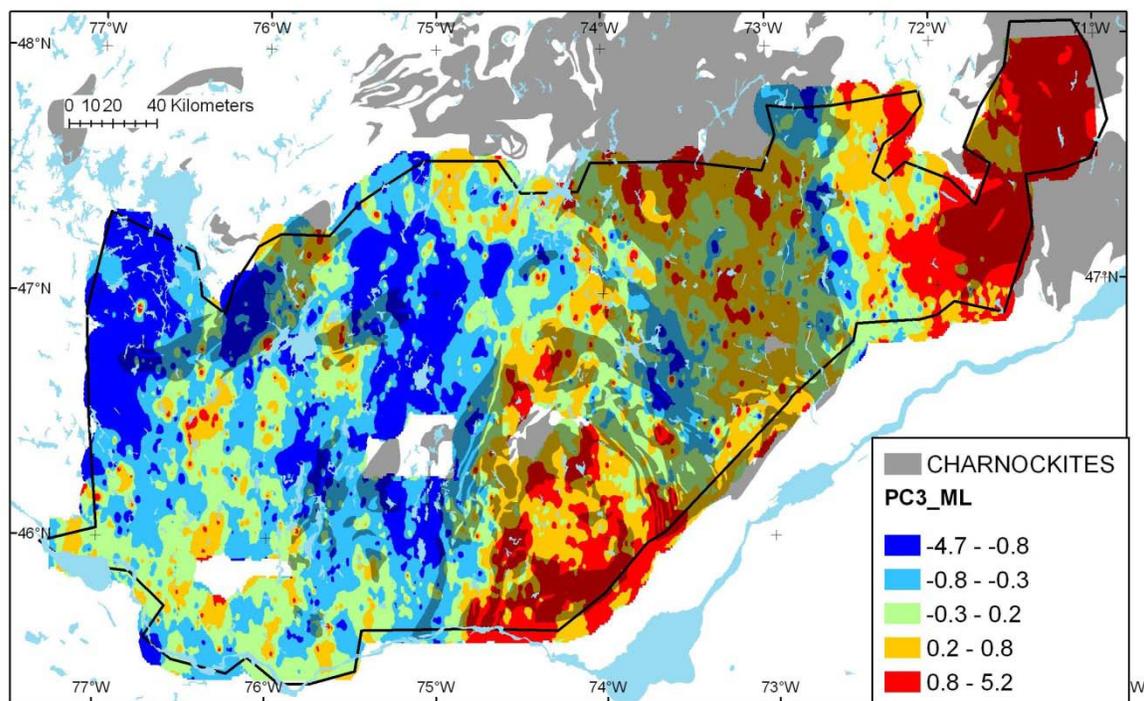


Figure 50. Carte du facteur 3 dans les minéraux lourds et charnockites (en ombragé).

4.6.3 Analyse par grappes

Neuf groupes ont été identifiés dans les minéraux lourds par l'analyse par grappes. Comme pour les fractions fines, les différents groupes ont été examinés dans le but d'identifier les tendances géochimiques qui les caractérisent.

Tableau 6. Caractéristiques des groupes de l'analyse par grappes des minéraux lourds

Éléments							
Gr	Très enrichis	Enrichis	Légèrement enrichis	Appauvris	Très appauvris	Autres corrélations	Identification du groupe
1	eK/eTh	Mn Zn	Li				Lobe ouest de l'anorthosite de Morin; granulites et charnockites
2		Sb		eK Ce Eu La Sm Th	eU/eTh Fe		?
3	Li	eTh eU Al Mg Ni	Sb			(++)Paragneiss (--)Altitude	Paragneiss
4	Eu Sm Ti Y	eK/eTh La Ce Hg	Ca			(++)Altitude (++) Intr. fels.	Charnockites
5	Hg	Pb W	U	P	Al Ba Ca Mg Ni Sr V Li		Granulites?
6	eTh eU Ca Ce La Mg Sr Th U Sb	Li Eu Sm Y K Cr	V		eK/eTh	(++)Marbres (--)Altitude	Marbres + Granites

Éléments							
Gr	Très enrichis	Enrichis	Légèrement enrichis	Appauvris	Très appauvris	Autres corrélations	Identification du groupe
7	Al	Ni V Zn		Ce P	eK eU eTh Ca La Eu Sm Sr Th Ti U K	(++)Intr. maf.	Intrusions mafiques; lobe est de l'anorthosite de Morin
8	eU/eTh eU/eK U	eTh eU eU/eK W	Li			(+)Paragneiss	Paragneiss
9	Ba K	Ca Sr V Cr	Ce Eu Mg Sm Y				

4.7 Comparaison des signaux géochimiques des minéraux lourds et des fractions fines

Teneurs et corrélations entre fractions fines et minéraux lourds

Lorsque l'on compare les valeurs médianes des fractions fines et des minéraux lourds en différents éléments (**Tableau 7**), on constate que certains éléments sont enrichis dans les minéraux lourds alors que d'autres le sont dans les fractions fines. Les éléments U, Y, Ca et P sont nettement enrichis dans les minéraux lourds (ratios fines/lourds < 0,6). Ba, Br, Al, Zn, Cu, K, Ni, Fe, V sont clairement enrichis dans les fractions fines (ratios fines/lourds > 2,5). D'autres éléments tels que Mg, Pb, Ti montrent des enrichissements légers à moyens dans les fractions fines (ratios 1,5 – 2,0).

Plusieurs métaux d'intérêt pour l'exploration (Zn, Cu, Ni, ratios > 2,5) sont assez nettement enrichis dans les fractions fines. Ceci indique donc que les phases légères transportent en général une grande partie de ces métaux. Ces phases légères sont probablement les argiles et/ou la matière organique.

Tableau 7. Comparaison entre teneurs médianes des minéraux lourds et fractions fines

Élément	Minéraux lourds	Fractions fines	Fractions fines / minéraux lourds
Al	1700	5200	3,05
Ba	6	37	6,2
Br	1	5	5
Ca	5000	3000	0,6
Ce	32	29	0,91
Cu	3	9	3
Eu	0,7	0,6	0,86
Fe	3600	7900	2,20
K	200	500	2,50
La	14	15	1,07
Mg	800	1400	1,75
Mn	110	161	1,46
Ni	2	5	2,5
P	1780	1080	0,6
Pb	5	8	1,6
Sr	9	10	1,1
Th	7	6	0,86
Ti	200	300	1,5
U	13,6	1,8	0,13
V	6	14	2,33
Y	15	9	0,6
Zn	10	34	3,4

Tableau 8. Corrélations entre minéraux lourds et fractions fines

Élément	Corrélations entre minéraux lourds et fractions fines
Al	0,32
Ba	0,04
Ca	0,16
Ce	0,38
Eu	0,35
Fe	0,14
K	0,20
La	0,30
Mg	0,45
Mn	0,29
Ni	0,27
P	0,34
Pb	0,00
Sr	0,07
Th	0,27
Ti	0,09
U	0,16
V	0,19
Y	0,37
Zn	0,33

Signaux lithologiques vs environnement secondaire

Les analyses multivariées des sections précédentes soulignent la différence importante entre les fractions fines et les minéraux lourds. On peut comparer la relation entre la géochimie, les lithologies et différents indicateurs de l'environnement secondaire sur la **Figure 8** et la **Figure 40**. Les corrélations avec les lithologies dominent les corrélations avec l'environnement de surface pour les minéraux lourds, alors que c'est le contraire pour les fractions fines. Cette différence est une conséquence de la présence de matière organique et des argiles dans les fractions fines, qui reflètent en grande partie les conditions de l'environnement secondaire, et qui masquent partiellement les tendances lithologiques.

Contrastes géochimiques des éléments d'intérêt dans les minéraux lourds vs fractions fines

On peut comparer le contraste géochimique causé par les anomalies possiblement dues à des minéralisations par rapport aux variations géochimiques. Pour ce faire, le centile 99,9 a été choisi comme représentant les minéralisations. La différence entre le centile 75 et le centile 58 a été choisie pour représenter l'ampleur de variation du bruit de fond. Le ratio Centile 99,9 / (Centile 75 – Centile 25) permet d'évaluer ce contraste. Plus la valeur du contraste est élevée, plus les anomalies sont faciles à détecter par rapport au bruit de fond. Le **Tableau 9** donne les résultats des contrastes pour différents métaux dans les minéraux lourds par rapport aux fractions fines.

Tableau 9. Contrastes entre les anomalies et les variations du bruit de fond pour différents métaux, dans les fractions fines et les minéraux lourds

Élément	Centile 99,9	Centile 75	Centile 25	Ratio Centile 99,9 / (Centile 75 – Centile 25)
Cu_Fines	102	16	5,3	9
Cu_MLourds	73	5	1	18
Zn_Fines	474	46	16	15,8
Zn_MLourds	107	11	6	21,4
Pb_Fines	121	9	3,5	22
Pb_MLourds	100	5,5	2,8	44,8
Ni_Fines	83	7,8	2,2	14,8
Ni_MLourds	27	2,2	1	22,5
U_Fines	61	2	0,9	55,5
U_MLourds	97	17,5	8,3	10,5
Co_Fines	76	5,5	1,7	20
Co_MxLourds	46	2	2	Inf.
Hg_Fines	602	38	12,8	23,8
Hg_MxLourds	492	26	10	30,75
La_Fines	193	22	9	14,8
La_MxLourds	225	20,1	8	18,75

Le contraste géochimique est systématiquement plus élevé dans les minéraux lourds par rapport aux fractions fines, sauf pour l'uranium où le contraste est nettement plus élevé dans les fractions fines. Pour l'uranium, le contraste est cinq fois plus élevé dans les fractions fines. Dans le cas des autres éléments, le contraste des minéraux lourds est de 1,5 à 2 fois plus élevé dans les minéraux lourds.

4.8 Conclusions et implications pour l'exploration

Les analyses précédentes montrent bien la différence fondamentale entre les fractions fines et les minéraux lourds. Les conclusions suivantes découlent des analyses statistiques effectuées :

- Les teneurs en métaux dans les fractions fines sont fortement influencées par la quantité de matière organique et possiblement par la quantité d'argiles dans les sédiments.
- Les métaux des fractions fines montrent des corrélations plus importantes avec les indicateurs de l'environnement secondaire (dépôts de surface, couleur des échantillons, perte au feu des échantillons...) qu'avec les lithologies.
- Les métaux dans les minéraux lourds montrent des corrélations plus fortes avec les lithologies du socle qu'avec les indicateurs de l'environnement secondaire.
- Les signaux géochimiques dans les minéraux lourds sont en général plus simples que ceux des fractions fines.
- Les corrélations entre les fractions fines et les minéraux lourds sont faibles pour la majorité des éléments. Les signaux représentés par les deux médiums sont donc fondamentalement différents.
- Les contrastes géochimiques entre les anomalies et le bruit de fond géochimique sont plus forts (avec les valeurs brutes) dans les minéraux lourds que dans les fractions fines, sauf pour l'uranium.

Ces observations ont des conséquences directes pour l'exploration :

- Les minéraux lourds et les fractions fines donnent des signaux différents et complémentaires. En conséquence, de façon idéale, les deux médiums peuvent être échantillonnés sur les mêmes sites.
- Il est probable que des seuils d'anomalies calculés sur les valeurs brutes dans les minéraux lourds seront (plus) robustes pour deux raisons :
 - Les signaux géochimiques dans les minéraux lourds y sont plus simples.
 - Les contrastes géochimiques entre les anomalies et le bruit de fond y sont plus importants.
- Pour obtenir des seuils d'anomalies robustes dans les fractions fines (sauf l'uranium) il est nécessaire de rehausser les signaux d'anomalies par des méthodes statistiques (sauf pour l'uranium), car :
 - les contrastes dans les fractions fines sont plus faibles
 - les variations des proportions de matière organique et/ou d'argiles sont susceptibles de causer de fausses anomalies.

Ces conclusions mènent à des méthodes d'identification d'anomalies particulières et seront confirmées par les études de cas de dispersion géochimique à partir des minéralisations connues dans le sud du Grenville.

5 MÉTHODES PROPOSÉES D'IDENTIFICATION DES ANOMALIES DANS LES SÉDIMENTS DE RUISSEAUX

Plusieurs approches de détermination des seuils d'anomalies proposées dans la littérature se basent sur les proportions de différentes lithologies dans les bassins de drainage des échantillons (Spadoni, 2006; Spadoni et al., 2005; Ahadjie, 2003). Toutefois, dans le cas actuel, l'analyse statistique de la section précédente souligne les variations importantes des teneurs dans les fractions fines causées par l'environnement secondaire. L'approche de détermination des seuils basée sur les lithologies des bassins de drainage est donc plus ou moins appropriée. Des approches statistiques seront plutôt utilisées ici pour enlever l'effet sur les fractions fines.

Deux approches de délimitation des anomalies sont utilisées ici, autant pour les fractions fines que les minéraux lourds :

1. Calcul de centiles séparés sur chacun des groupes de l'analyse par grappe.
2. Valeurs résiduelles de la régression sur les facteurs principaux de l'analyse factorielle.

5.1 Calcul de centiles séparés sur les groupes de l'analyse par grappe

Les groupes de l'analyse par grappes constituent déjà une séparation intéressante des données. Dans le cas des fractions fines, ils fournissent une séparation des échantillons riches en argiles et/ou en matière organique. Pour les minéraux lourds, ils identifient les différents groupes lithologiques. On peut calculer des centiles distincts sur chacun des groupes pour obtenir des seuils d'anomalies. Les centiles ont été calculés sur les valeurs nivelées ou sur les valeurs analytiques brutes dans le cas des éléments n'ayant pas pu être nivelés.

5.2 Valeurs résiduelles de la régression sur les facteurs principaux de l'analyse factorielle

Les principaux facteurs de l'analyse factorielle représentent l'essentiel des variations du bruit de fond géochimique; ils représentent les grandes tendances géochimiques se matérialisant dans l'ensemble des échantillons. Les anomalies géochimiques, au contraire, sont des phénomènes isolés qui ne sont en principe pas représentés dans ces grandes tendances. En termes statistiques, les anomalies géochimiques se retrouveraient ainsi dans les facteurs moins importants de l'analyse. Donc, si on peut éliminer l'effet des principaux facteurs sur les teneurs et obtenir une valeur « restante », on rehausse alors par défaut les valeurs des anomalies.

Il est possible, par des méthodes statistiques de filtrer l'effet de ces principaux facteurs. Bellehumeur et Jébrak (1993) proposent d'effectuer une reconstitution partielle de la matrice des données en excluant les principaux facteurs. On obtient ainsi des valeurs reconstituées qui rehaussent l'effet des anomalies géochimiques. Cette méthode de traitement n'est toutefois pas supportée par la majorité des logiciels de statistique. Sa mise en œuvre requiert une série de manipulations matricielles assez complexe.

Les résultats de telles reconstitutions partielles ont été comparés avec les valeurs résiduelles de régressions linéaires multiples qui utilisent les mêmes facteurs comme variables explicatives et les éléments individuels comme variables dépendantes. Dans tous les cas, la corrélation entre la valeur résiduelle et la valeur reconstituée est supérieure à 0,85, donc très similaire. Comme la régression linéaire multiple est supportée par la plupart des logiciels de statistiques, c'est cette méthode qui est ici privilégiée.

Pour chaque élément des fractions fines et des minéraux lourds, une régression multiple a été effectuée en utilisant les principaux facteurs des analyses factorielles. Dans le cas des minéraux lourds, les facteurs 1 à 5 (70 % de la variance représentée) qui ont été retenus. Pour les fractions fines, ce sont les facteurs 1 à 5 également (65 % de la variance totale). Comme les analyses factorielles ont été calculées sur des valeurs log-centrées des éléments, ces mêmes valeurs log-centrées des éléments ont été utilisées pour les régressions. La régression multiple permet d'obtenir pour chaque élément une formule du style :

$$\text{ZN_ML_LC_Prédit} = -1,38 + 0,224 * \text{F1_ML} + 0,205 \text{F2_ML} + 0,108 * \text{F3_ML} - 0,179 * \text{F4_ML} - 0,0148 * \text{F5_ML}$$

où LC représente la valeur log-centrée, ML les minéraux lourds, et F les facteurs.

La régression multiple donne ainsi une prédiction de la valeur de chacun des éléments. La valeur résiduelle de la régression est égale à la valeur log-centrée prédite moins la valeur log-centrée « réelle » (ou « mesurée »). Cette valeur résiduelle rehausse en principe les anomalies géochimiques puisqu'elle élimine une bonne partie du bruit de fond géochimique. Finalement, des centiles ont été calculés sur ces valeurs résiduelles dans le but d'obtenir des valeurs comparables à la méthode des centiles sur les groupes de l'analyse par grappes.

Les valeurs résiduelles ainsi calculées neutralisent les effets des variations lithologiques et des conditions de surface sur les teneurs. Ceci peut être constaté en comparant par exemple les valeurs résiduelles des fractions fines en Zn, Cu et Ni selon les différents groupes de l'analyse par grappes (**Figure 51** à **Figure 53**). Les valeurs résiduelles sont alors comparables peu importe le groupe.

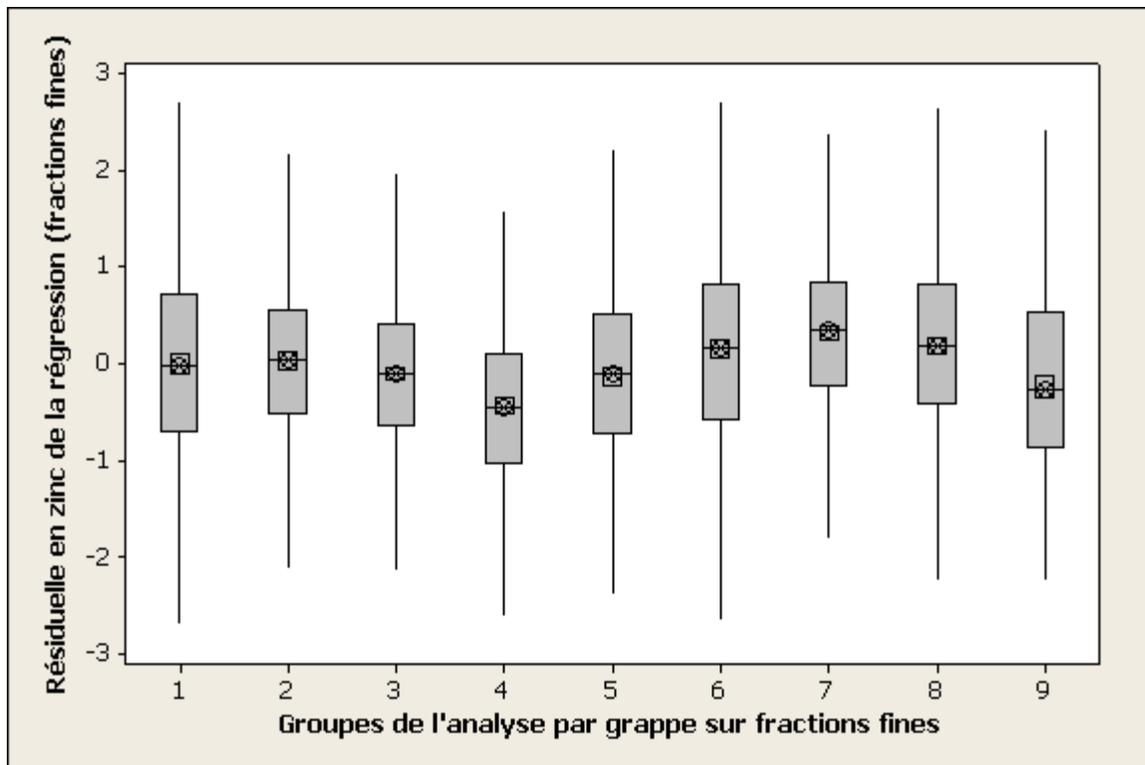


Figure 51. Valeurs résiduelles en zinc vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).

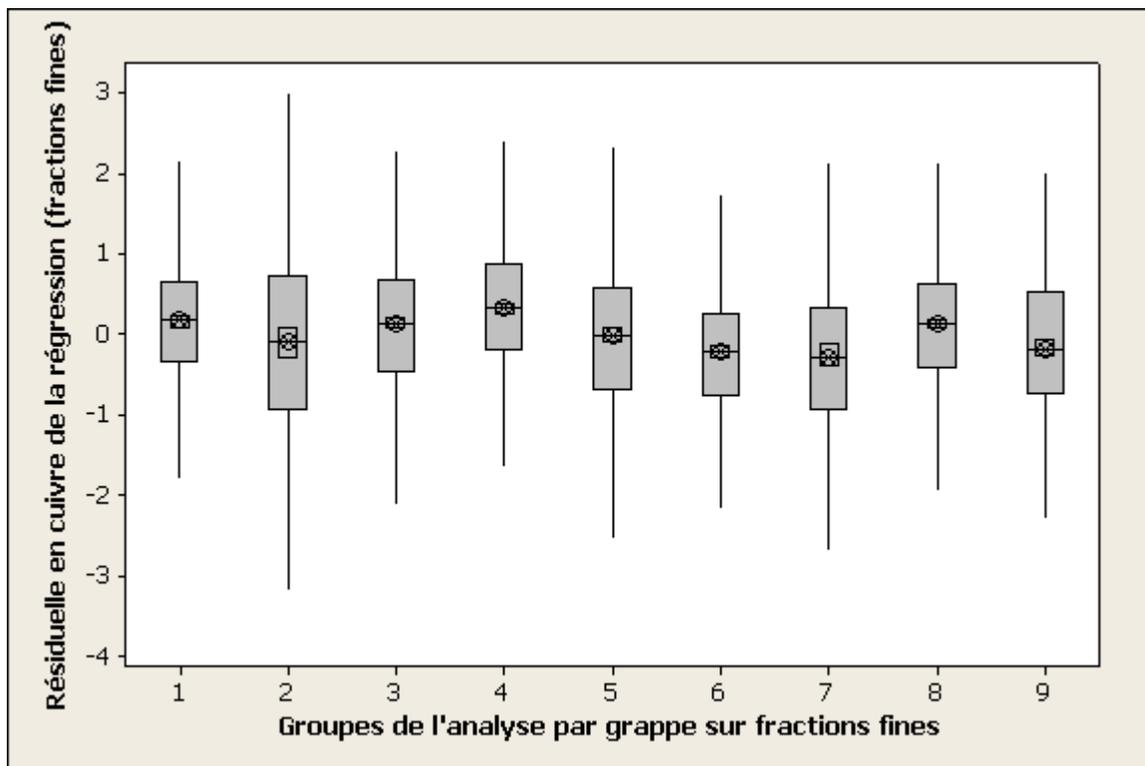


Figure 52. Valeurs résiduelles en cuivre vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).

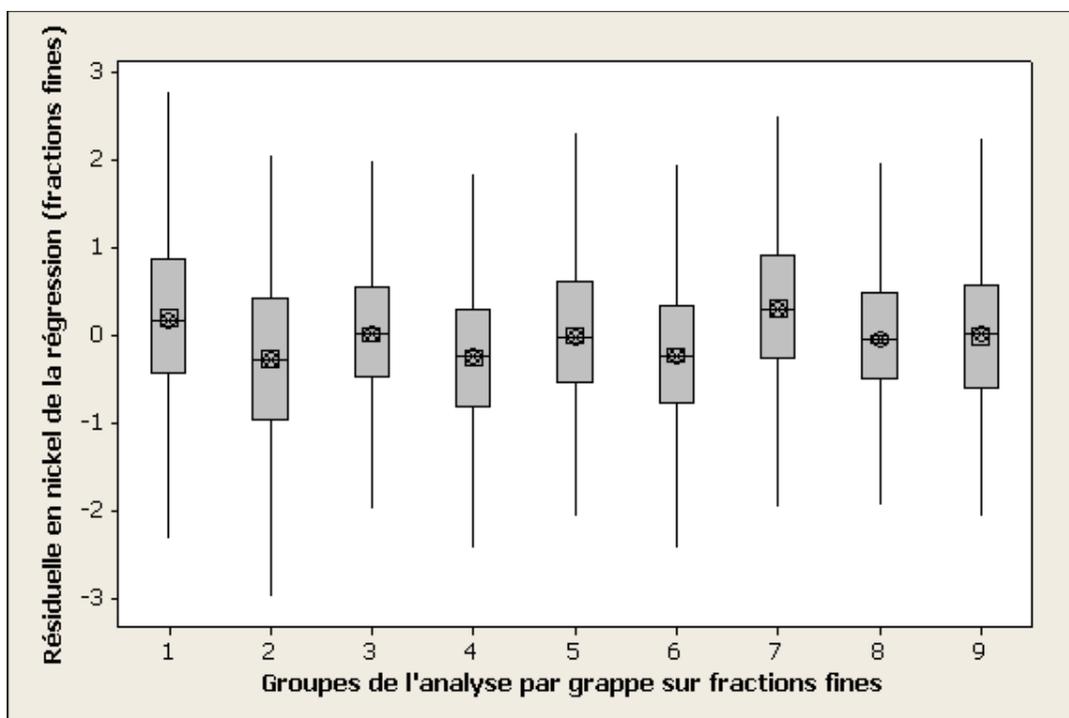


Figure 53. Valeurs résiduelles en nickel vs groupes de l'analyse par grappes (fractions fines).

6 ÉTUDES DE CAS DE DISPERSION GÉOCHIMIQUE DANS LES SÉDIMENTS DE RUISSEAUX EN MILIEU NORDIQUE

6.1 Études de cas de la littérature

6.1.1 Synthèse d'étude de cas de dispersion dans les sédiments de ruisseaux en Scandinavie

Bjorklund et al. (1994) affirment que le nombre de minéralisations trouvées en Finlande et en Suède dans lesquelles la géochimie des sédiments de ruisseaux ou de lacs a joué un rôle majeur est très limité, malgré des centaines de milliers d'échantillons. Seuls certains gîtes d'uranium ont été détectés avec succès en Suède à partir de l'échantillonnage de la matière organique des ruisseaux. Aucun gisement exploitable n'y a été trouvé. Le succès est plus évident dans les régions montagneuses de Norvège, où un grand nombre de gîtes a été détecté. De la même façon, au Groënland, où la topographie est plus accidentée et où les ruisseaux coulent communément directement sur la roche, les signatures géochimiques sont plus évidentes.

Les auteurs concluent que, dans les régions planes de la Suède et de la Finlande, l'efficacité des sédiments de ruisseaux est limitée, sauf pour le cas de l'uranium où la matière organique des ruisseaux semble un médium efficace. En Finlande, on conclut de la même façon que les sédiments de ruisseaux ne reflètent pas de façon fiable la géochimie régionale, et que des anomalies ne sont pas toujours développées à proximité de minéralisations.

La conclusion de ces études est que les sédiments de ruisseaux sont surtout efficaces dans les régions accidentées comme la Norvège ou le Groënland, où le drainage est bien développé, et

beaucoup moins dans les régions très planes comme la Finlande ou la Suède. Les auteurs privilégient l'utilisation de la géochimie du till pour cibler les minéralisations dans ces régions planes.

Les conditions climatiques et la géologie de la Scandinavie sont très similaires à ce que l'on trouve au Québec et au Canada. Ces conclusions pourraient nous faire penser que la géochimie de ruisseaux n'est utile que dans les secteurs montagneux comme les Appalaches ou les secteurs plus accidentés des autres provinces géologiques (secteurs du Grenville, fosse du Labrador par exemple).

Toutefois, on peut formuler certaines critiques par rapport à ces conclusions, notamment :

1. La détection des anomalies de sédiments de ruisseaux dans les fractions fines demande un rehaussement des anomalies par des techniques statistiques, comme cela sera mentionné dans l'étude de la banque du sud du Grenville. Les auteurs mentionnent l'utilisation de telles techniques pour la matière organique des ruisseaux, mais non dans les fractions fines en général.
2. Même si de nouvelles minéralisations n'ont pas été trouvées avec la géochimie de ruisseaux, il est probable que de nombreuses minéralisations déjà connues aient des signatures bien visibles dans les sédiments de ruisseaux. L'absence de nouvelle découverte avec la géochimie signifie peut-être que les régions couvertes sont assez matures en termes d'exploration des minéralisations présentes en surface.

Les sections suivantes montrent des études de cas de dispersion géochimique au Canada et au Québec.

6.1.2 Dispersion hydromorphique à partir d'un VMS en terrain de bouclier plat : Agricola Lake, Nunavut

Le gisement d'Agricola Lake (Yava Lake) est un amas sulfuré volcanogène situé dans la Province des Esclaves au Nunavut, en environnement de toundra et de pergélisol. Les ressources sont de 1-2 Mt à une teneur d'environ 3 % Zn, 0,5% Cu, 0,5 % Pb, 102,8 g/t Ag et 2 g/t Au. La découverte de ce gîte est directement due au suivi d'anomalies en métaux de base d'un levé régional de sédiments de lacs (Cameron, 1977). La signature géochimique dans l'environnement secondaire a été étudiée en détail par Cameron (1977).

Le drainage de l'amas sulfuré se fait le long d'une chaîne de lacs et de ruisseaux (**Figure 54**). Différents échantillons d'eau, de sédiments de ruisseaux et de sédiments de lacs ont été prélevés directement en aval de la minéralisation (jusqu'à 7 km) ainsi que dans des tributaires sans minéralisation connue. Le relief du secteur est relativement plat (**Figure 55**). La dénivellation totale entre la minéralisation et le dernier lac échantillonné à 7km en aval n'est que de 50 mètres. Cette étude de cas a déjà été mentionnée dans le projet 2005-03 du CONSOREM (Trépanier, 2006) pour la considération du choix des éléments à cibler dans les sédiments de lacs selon leur mobilité.

L'étude démontre que la dispersion principale à partir de la minéralisation est une dispersion hydromorphique. Le zinc, le cuivre et le cadmium sont mobiles et sont dispersés dans le système de drainage. Le plomb, l'argent et le mercure sont plus immobiles et concentrés dans les sols près de la minéralisation. Ce fractionnement chimique des anomalies est typique des dispersions hydromorphiques, qui dépendent du comportement chimique des éléments dans l'environnement secondaire.

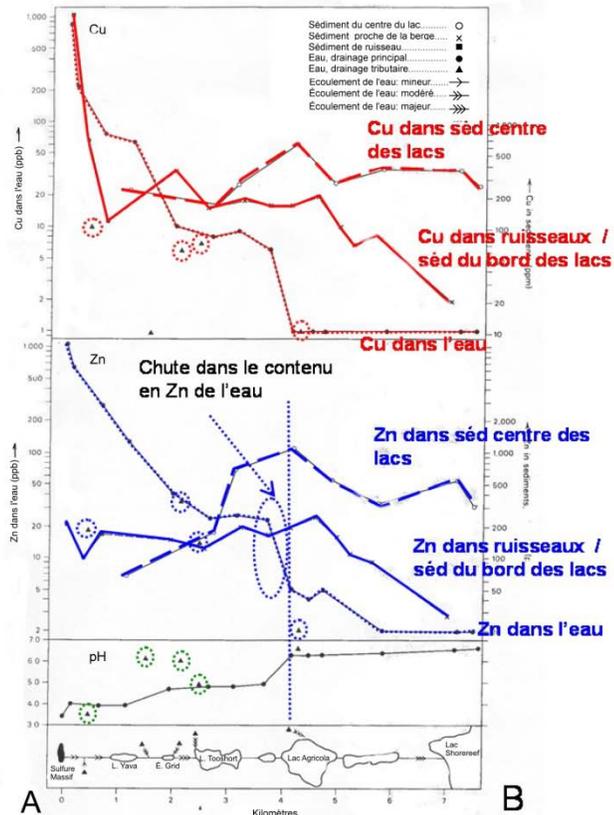
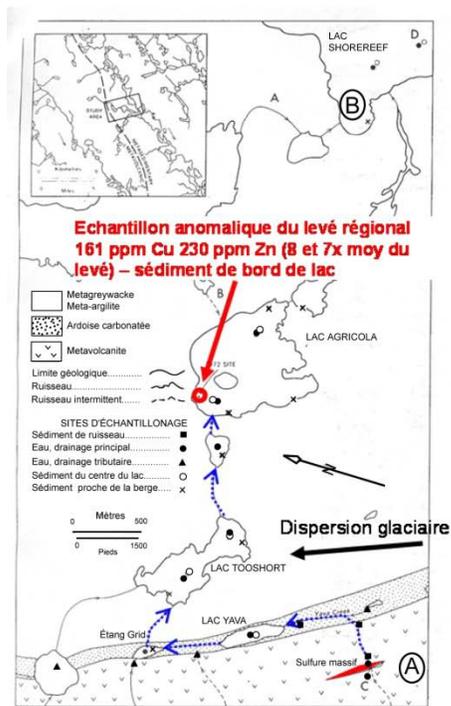


Figure 54. (A) Localisation du gîte Agricola (Yava), T-N-O et, (B) Profils du cuivre et du zinc dans l'environnement secondaire entre les points A et B. Tiré de Cameron, 1977.

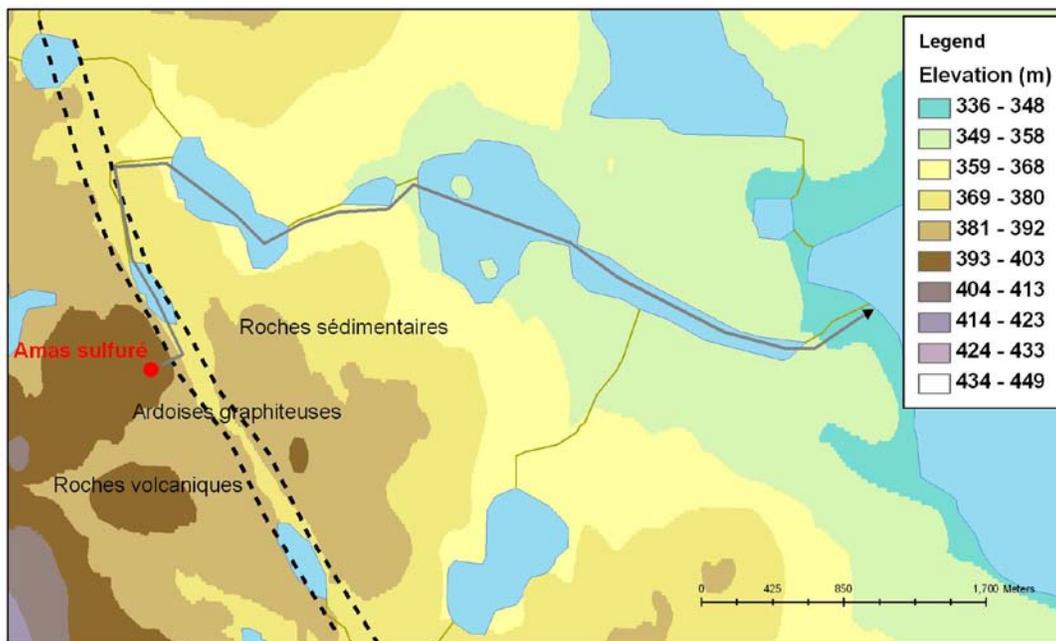


Figure 55. Relief du secteur de Agricola Lake.

Les eaux de surface drainant l'amas sulfuré montrent des anomalies claires en zinc et cuivre (**Figure 54**), qui diminuent de façon très graduelle en s'éloignant de la minéralisation. En comparant avec les teneurs en métaux des tributaires sans minéralisation, on peut estimer la distance de dispersion *dans l'eau* à environ 1,5 km pour le cuivre et de 3 km pour le zinc. La distance de dispersion est directement reliée au pH de l'eau ; lors de la première augmentation du pH, vers 1,5 km, le cuivre précipite est par fixation par des oxydes secondaires dans les sédiments. Vers 3 km une autre augmentation du pH provoque la précipitation du zinc. Pour le plomb, des anomalies importantes dans l'eau sont présentes sur le premier kilomètre, mais sont absentes par la suite (**Figure 56**)

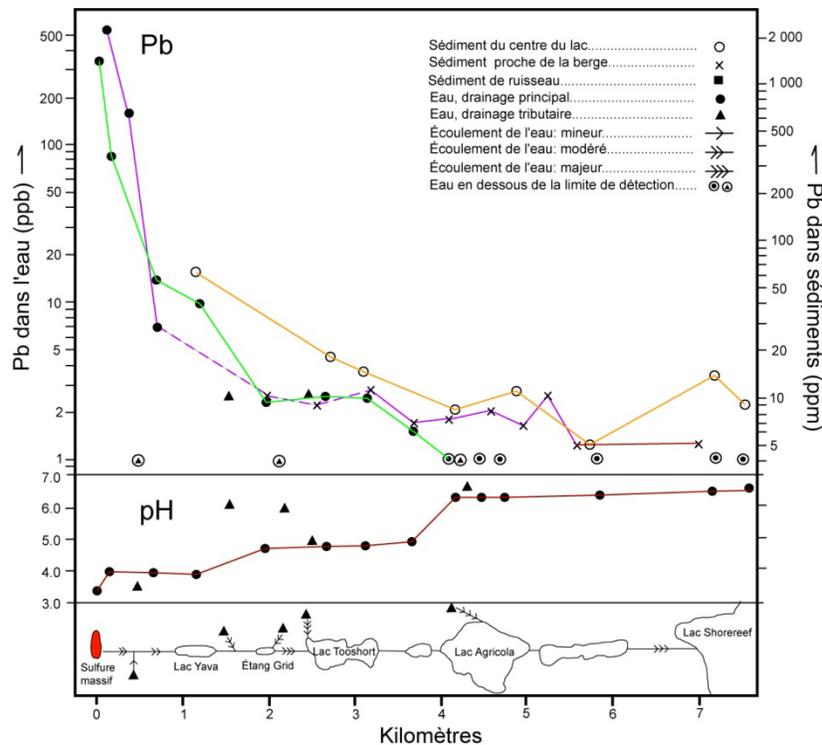


Figure 56. Profil des teneurs en plomb dans l'environnement secondaire entre les points A et B. Tiré de Cameron, 1977.

Les teneurs dans les sédiments de lacs et de ruisseaux en zinc *augmentent* en s'éloignant de la minéralisation, à mesure que le zinc précipite par augmentation du pH, et restent élevées jusqu'à 7 km de la minéralisation (300 à 1100 ppm entre 3 et 7 km). Les teneurs en cuivre sont très élevées dans les ruisseaux jusqu'à 500 m de la minéralisation puis restent constantes, mais élevées (100-800 ppm) pour le reste du drainage. On peut penser que les teneurs élevées observées à plus de 1,5 km pour le cuivre et à plus de 3 km pour le zinc représentent le transport clastique des oxydes secondaires précipités précédemment. Les anomalies en plomb évidentes sont limitées à environ 500 m de la minéralisation.

Cet exemple démontre bien que les processus hydromorphiques peuvent disperser les métaux d'une minéralisation sur des distances assez importantes en contexte de terrain plat et nordique.

6.1.3 Dispersion hydromorphique à partir d'un VMS en relief plat : Koke, Québec

Le gisement de Koke (1,06 Mt @ 6,86 % Zn, 0,70 % Cu, 1,03 % Pb, 54 g/t Ag, 1,03 g/t Au) est un amas sulfuré à pyrite-sphalérite-chalcopryrite-galène situé dans le Nord du Québec, à environ 50 km au sud de Kuujuaq (**Figure 57**). Tout comme l'exemple de Agricola Lake, cette étude de cas a déjà été mentionnée dans le projet 2005-03 du CONSOREM (Trépanier, 2006) pour la considération du choix des éléments à cibler dans les sédiments de lacs selon leur mobilité.

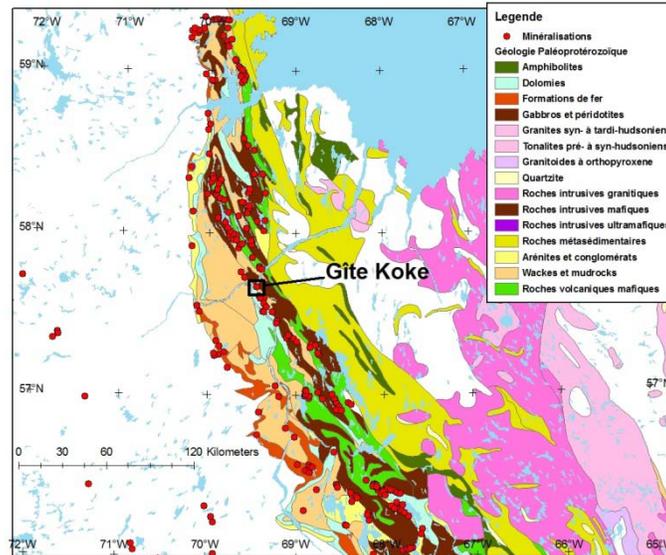


Figure 57. Localisation du gîte Koke, Fosse du Labrador, Québec.

Koke est situé dans un environnement de taïga ouverte, sans pergélisol. La minéralisation sulfurée se trouve à l'intérieur d'argilites graphiteuses et sulfurées; on ne trouve pas de carbonates susceptibles de neutraliser le drainage acide du gisement dans l'encaissant immédiat. Un chapeau de fer impressionnant est visible sur le gisement (**Figure 58**). Une légère pente permet un drainage vers le nord de la minéralisation, vers une zone marécageuse dans laquelle un ruisseau prend sa source. Le ruisseau coule sur toute sa longueur sur des dépôts de sable alluviaux bordant la rivière Koksoak.

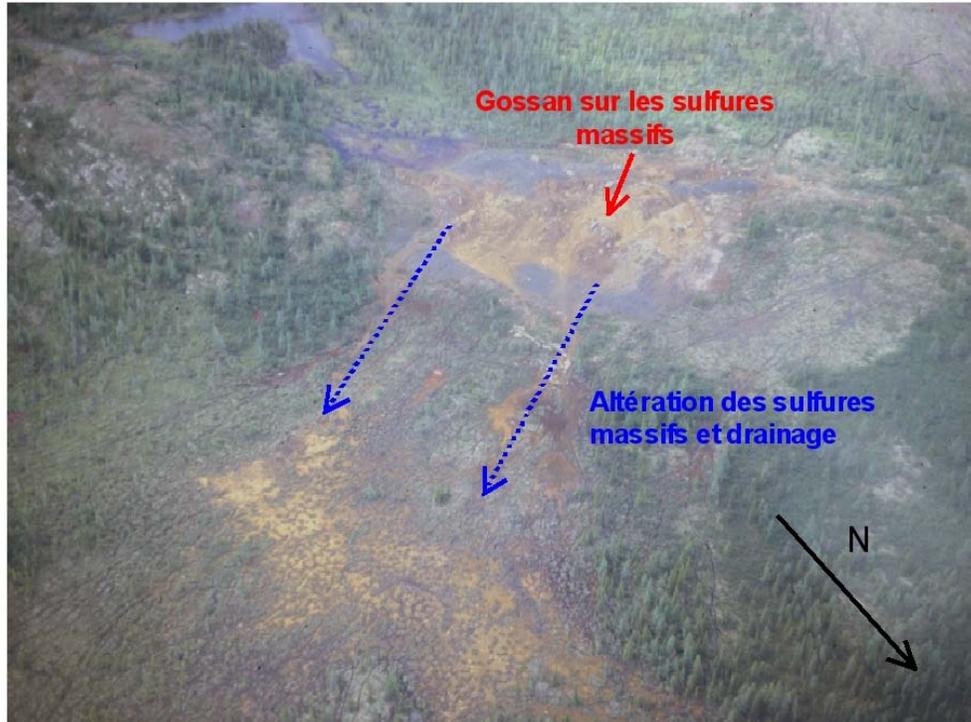


Figure 58. Vue aérienne du chapeau de fer associé aux sulfures massifs, gîte Koke. Photo de T. Clark, MRNF.

La géochimie des fractions fines des sédiments de ruisseaux (Trépanier, 2001) montre que le ruisseau qui draine le gisement est fortement anormalique en zinc (**Figure 59**) et cuivre (**Figure 60**) lorsque comparée à un levé régional. Les teneurs en plomb (**Figure 61**) et argent n'y sont relativement pas anormaliques. Quoique le pH n'y ait pas été mesuré, l'abondance de pyrite dans la minéralisation suggère que ce ruisseau est relativement acide. Une étude géochimique et minéralogique du chapeau de fer montre que le plomb, l'argent et l'or y sont principalement immobilisés (le plomb en sulfates comme l'anglésite et la plombojarosite). Les teneurs en cuivre et zinc sont élevées tout au long du ruisseau drainant le gisement (**Figure 62**). Le zinc montre même une augmentation en s'éloignant du gisement. Ceci est probablement le résultat de la mobilité plus grande du zinc que du cuivre, tout comme dans l'exemple précédent d'Agricola Lake. La distance de dispersion dans le ruisseau est d'au moins 2,5 km, et en réalité l'anomalie n'est pas fermée puisque le ruisseau se jette dans une rivière majeure par la suite. Comme le ruisseau coule sur toute sa longueur sur des sables alluviaux très épais, il n'y a aucun doute que les anomalies proviennent de la minéralisation affleurante.

Cet exemple montre encore une fois la dispersion hydromorphique du cuivre et du zinc en environnement sulfuré, et l'immobilisation d'autres métaux de la minéralisation (ici Pb, Ag, Au). Dans ce cas tout comme dans celui de Agricola Lake, la dispersion est pluri-kilométrique. La précipitation des métaux est probablement contrôlée par l'augmentation graduelle du pH en s'éloignant de la minéralisation. Comme dans le cas d'Agricola Lake, cet exemple montre également une dispersion importante dans un contexte de relief assez plat.

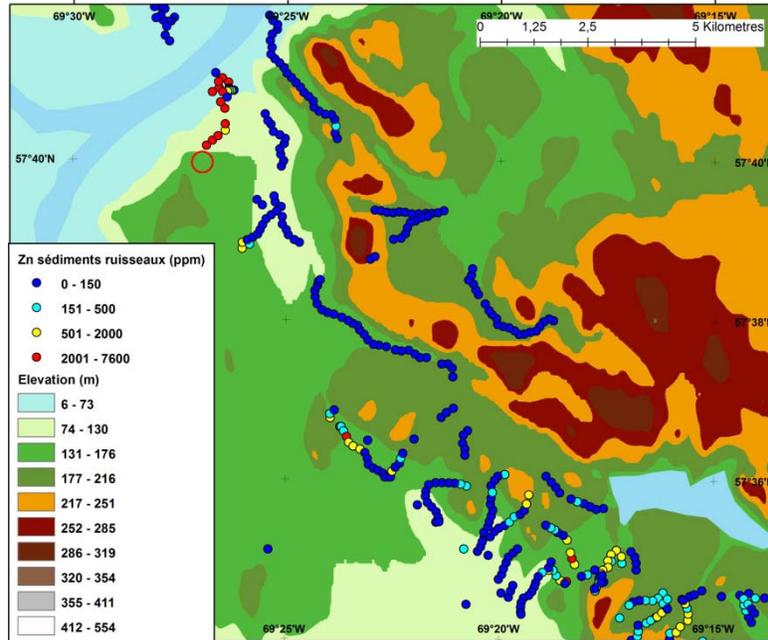


Figure 59. Zinc dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke. Le cercle rouge indique la localisation du gîte.

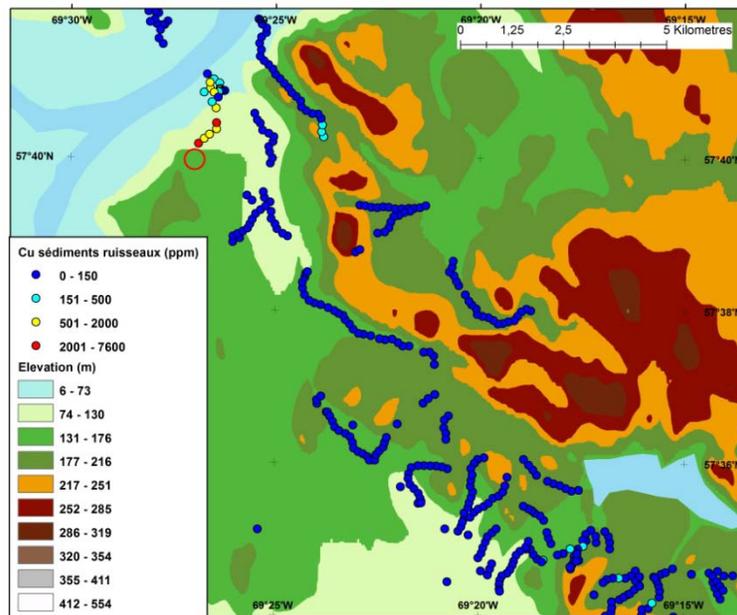


Figure 60. Cuivre dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke. Le cercle rouge indique la localisation du gîte.

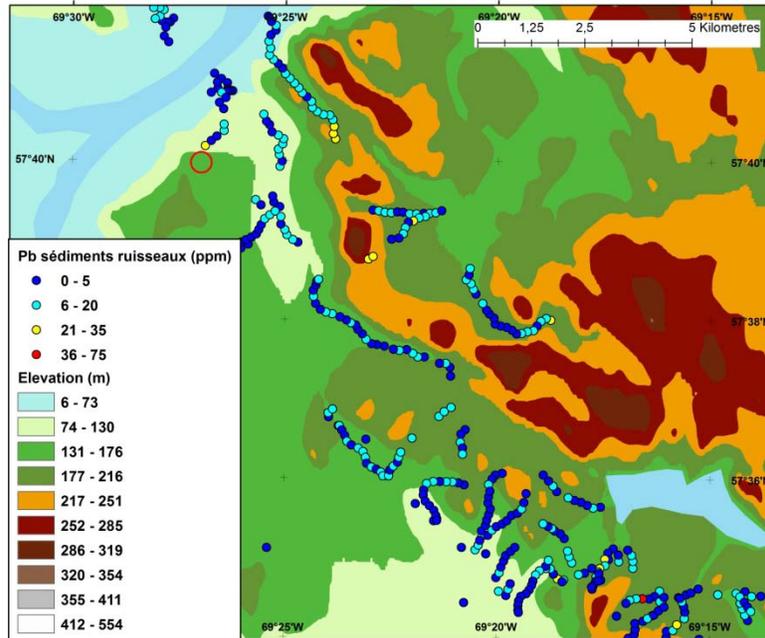


Figure 61. Cuivre dans les sédiments de ruisseaux, secteur du gîte Koke. Le cercle rouge indique la localisation du gîte.

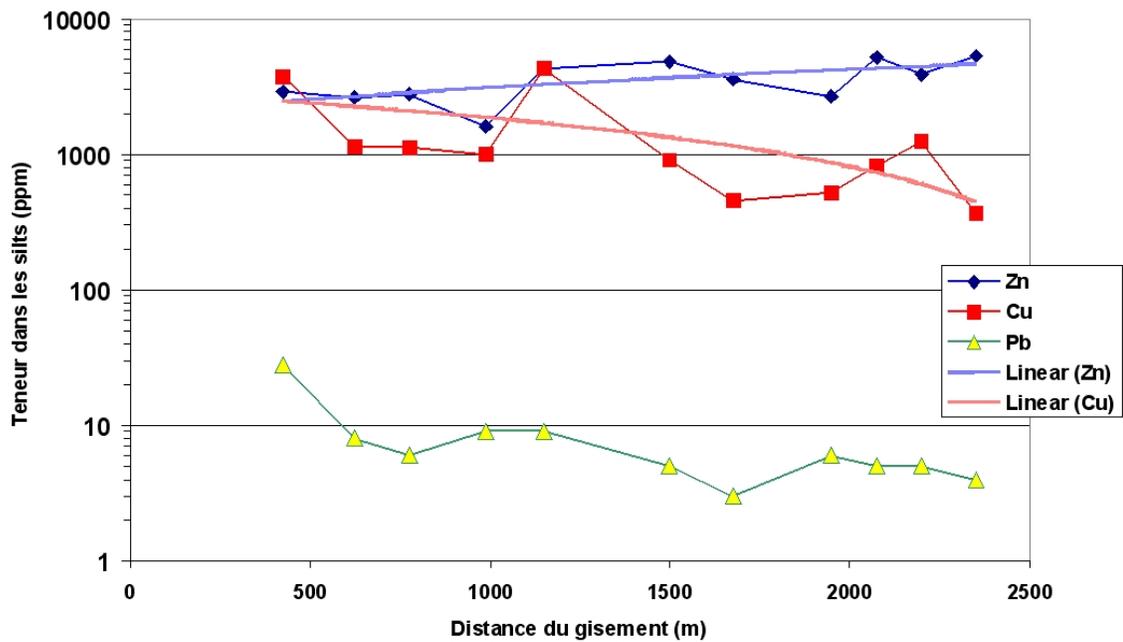


Figure 62. Profil géochimique des silt du ruisseau drainant la minéralisation du gîte Koke.

6.2 Signatures géochimiques des minéralisations du sud du Grenville dans les sédiments de ruisseaux et cibles d'exploration

6.2.1 Méthodologie

Sélection et catégorisation des minéralisations

Les gîtes métallifères contenus dans le SIGÉOM et situés à l'intérieur des limites générales de la région d'intérêt ont été extraits. Pour s'assurer d'une bonne représentativité des gîtes par rapport aux échantillons du levé, seuls les gîtes à moins de 5 km de distance linéaire à un échantillon ont été considérés. Un total de 202 gîtes a été ainsi sélectionné.

Les cartes des bassins de drainage réalisées durant le projet actuel ont par la suite été consultées pour déterminer si au moins un échantillon de sédiment de ruisseau se trouve en aval de chacune des minéralisations. Sur les 202 gîtes, 115 (56 %) se trouvent ainsi à l'intérieur du bassin de drainage d'au moins un échantillon.

Un certain nombre des gîtes sélectionnés se trouvent à une distance considérable de l'échantillon le plus proche se trouvant en aval. Il est peu utile d'étudier en détail la signature dans ces cas puisque la signature chimique des gîtes risque alors de s'être considérablement diluée. Une distance maximale de 5 km le long du drainage a été fixée arbitrairement comme limite. Sur les 115 minéralisations, 72 (35 % du total de 202) se trouvent à moins de 5 km de leur échantillon le plus proche en termes de distance de drainage (**Figure 63**).

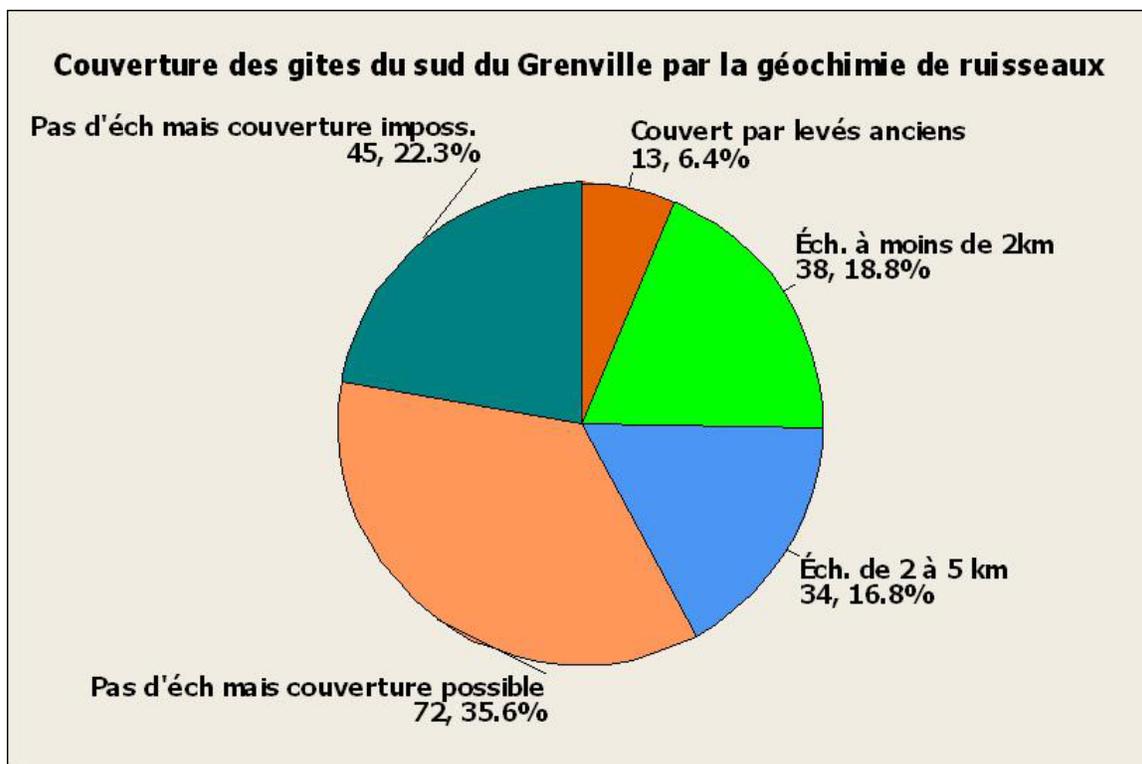


Figure 63. Couverture géochimique des gîtes du Sud du Grenville.

Ces 72 gîtes ont été classés d'après les descriptions contenues dans le SIGÉOM, selon les catégories suivantes :

- Ni-Cu±EGP, associé à des intrusions mafiques (15)
- Zn dans les marbres (14)
- Pegmatites à U-Th (8)
- Fe-Ti-V associé aux anorthosites (9)
- Skarns à U (5)
- Skarns à Mo±Cu (4)
- Volcanogène à Cu-Zn (4)
- Skarns à Cu±Zn (1)
- Skarns à Fe (2)
- Pegmatites à Mo (1)
- Autres - information insuffisante (9)

Pour obtenir des conclusions plus rigoureuses, seules les cinq premières catégories ont été retenues pour une étude détaillée.

Identification des anomalies

Trois méthodes d'identification des anomalies ont été retenues et comparées :

1. Centiles calculés sur l'ensemble de la banque en utilisant les valeurs brutes nivelées ou non (selon les éléments).
2. Centiles calculés sur les groupes des analyses par grappes des fractions fines et des minéraux lourds,
3. Centiles calculés sur les valeurs résiduelles des régressions multiples,

Les anomalies ont été par la suite définies arbitrairement de la façon suivante, pour chacune de ces trois méthodes :

- 97^e centile : anomalie « faible »;
- 99^e centile : anomalie « moyenne »;
- 99,5^e centile : anomalie « forte ».

Étude de la signature des minéralisations

Chacun des 72 gîtes ayant un échantillon en aval a été considéré en utilisant la définition précédente des anomalies. L'objectif était de déterminer si une signature d'anomalie dans les sédiments de ruisseaux existe dans chaque cas, et pour les cas positifs, si cette signature est cohérente avec le contenu métallique de la minéralisation. Si c'est le cas, la minéralisation a alors été considérée « détectée » par la géochimie des sédiments de ruisseaux. Par exemple, pour un gîte de Cu-Ni, si on trouve une anomalie « forte » en nickel par l'une ou l'autre des méthodes, on peut considérer la minéralisation comme détectée.

Outre la signature chimique, des informations supplémentaires ont été recueillies dans chaque cas. La distance de la minéralisation à l'échantillon ainsi que l'accumulation d'eau au site de l'échantillon selon la modélisation hydrographique ont été notées. La présence d'un lac entre le ruisseau échantillonné et la minéralisation a aussi été notée.

L'**annexe 1** compile la signature individuelle de chaque gîte par chacune des trois méthodes.

6.2.2 Ni-Cu magmatique

Signature des minéralisations

Quinze gîtes de nickel-cuivre dans des intrusions mafiques ont un échantillon en aval à moins de 5 km le long du drainage. Parmi ces 15 indices, certains ont le même échantillon en aval. On a éliminé ceux qui étaient les plus éloignés des échantillons communs et le total est ainsi ramené à 12 indices.

Sur ces 12 gîtes, 4 (33 %) ont une signature d'anomalie claire en Cu-Ni. Ce pourcentage peut sembler faible, mais lorsqu'on examine les valeurs de distance et d'accumulation du drainage des échantillons de ces minéralisations, on constate que tous les échantillons situés relativement proches de leurs minéralisations (< 2 km) et dont les bassins de drainage sont petits (< 10 km²) montrent des signatures d'anomalies claires (**Figure 64**). La relation entre la distance et la détection de la minéralisation est intuitivement évidente. Dans le cas de la relation avec la taille du bassin de drainage, on peut l'expliquer par le fait que la signature d'une minéralisation sera considérablement diluée et probablement invisible dans un cours d'eau trop important, qui draine une large région.

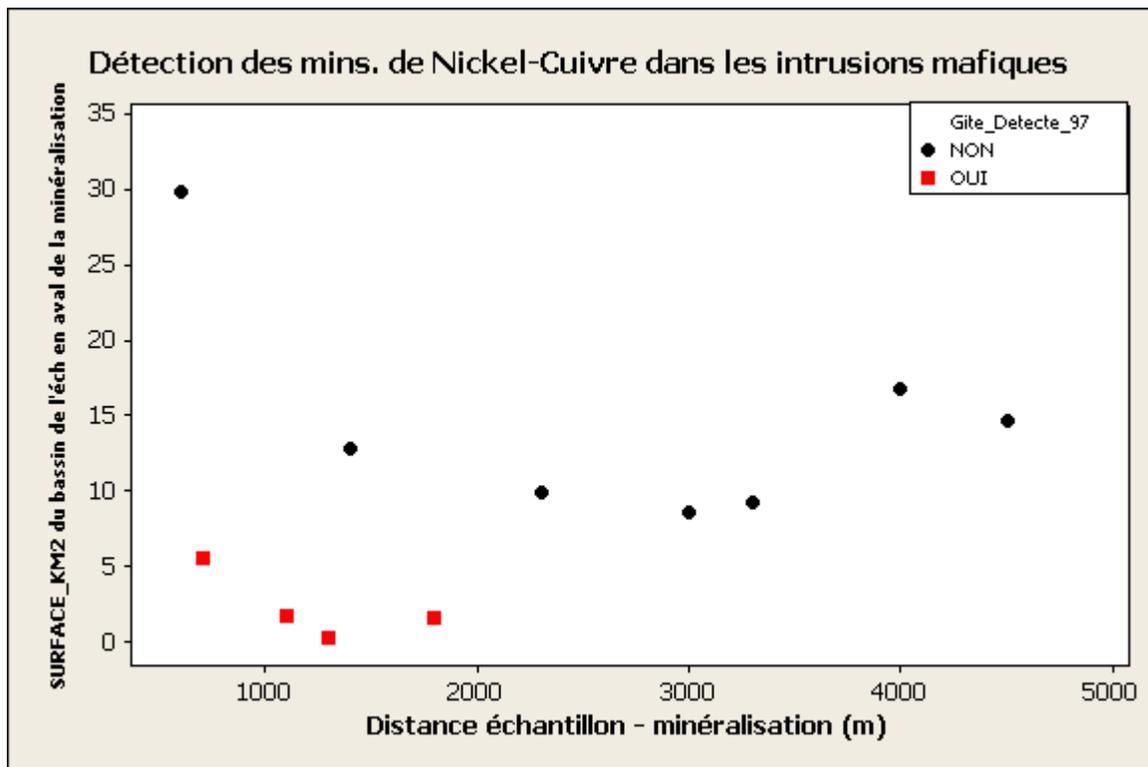


Figure 64. Détection des minéralisations de Ni-Cu dans les intrusions mafiques.

Le **Tableau 10** résume la signature des minéralisations détectées. Sur ce tableau, un élément marqué d'un # indique une anomalie forte, un + indique une anomalie moyenne et un élément entre parenthèses indique une anomalie faible. Le **Tableau 11** compile le nombre de gîtes qui montrent des anomalies selon chaque combinaison méthode/type d'échantillon.

Tableau 10. Signatures des minéralisations de Ni-Cu détectées par les sédiments de ruisseaux

Nom	Métaux de la minéralisation	Importance	Centiles par résiduelles	Centiles par valeurs brutes	Centiles sur groupes
Lac Alba	Cu Ni	Indice	#CU #CU_ML (NI_ML)	#CU #CU_ML (NI_ML)	#CU #CU_ML (NI_ML)
Lac Souris	Ni Cu	Gite travaillé	#NI (P)	(NI P)	(NI)
Indice du lac Sicotte	Cu Ni	Indice	#NI #NI_ML (U_ML)	+NI_ML	(NI_ML)
Chilton Nickel Zone A et B	Cu Ni Co	Gite travaillé	+CO_ML (NI PB_ML)	+CO_ML (NI_ML)	(CO_ML NI_ML)

Tableau 11. Nombres de gîtes montrant des anomalies selon la combinaison méthode de traitement/type d'échantillon pour les minéralisations Ni-Cu

	Ni fractions fines	Ni minéraux lourds	Cu fractions fines	Cu minéraux lourds	Co fractions fines	Co minéraux lourds
Résiduelles	3	2	1	1	0	1
Centiles sur valeurs groupes	1	3	1	1	0	1
Centiles sur valeurs brutes	1	3	1	1	0	1

À partir des données précédentes, on peut constater que, pour les minéralisations de cuivre-nickel :

1. La géochimie des sédiments de ruisseaux est efficace pour détecter les minéralisations Ni-Cu de façon claire à une distance de moins de 2 km et pour des échantillons drainant des zones de moins de 10 km².
2. En général, *le nickel donne des signaux plus clairs que le cuivre ou le cobalt*, que ce soit dans les fractions fines ou dans les minéraux lourds
3. Si on utilise les valeurs brutes, les minéraux lourds donnent des anomalies en nickel, cuivre ou cobalt plus claires.
4. Pour les fractions fines, l'utilisation des résiduelles sur la régression permet de détecter des anomalies en nickel dans les fractions fines qui n'apparaissent pas autrement.
5. Les minéraux lourds sont en général un peu plus efficaces pour détecter ces minéralisations, peu importe la méthode de traitement des anomalies (en particulier par centiles sur les groupes).

Il faut noter toutefois que ces conclusions restent statistiquement assez fragiles étant donné le nombre d'échantillons tout de même assez faible à proximité et en aval de ces minéralisations, et le nombre de minéralisations assez limité. Un échantillonnage plus systématique en aval des minéralisations serait en réalité nécessaire pour valider ces dernières.

Indice composé pour la détection des minéralisations de Ni-Cu et cibles d'exploration

On peut construire un indice composé permettant de détecter les minéralisations en Ni-Cu à partir des observations précédentes sur la signature des gîtes et en se basant sur le calcul des centiles pour chaque combinaison de méthode de traitement / type d'échantillons. L'accent est mis sur le nickel étant donné l'intérêt économique de cette substance. L'indice composé suivant est proposé :

$$\text{Indice composé Ni: } (3 * \text{Ni-Res} + \text{Ni-Br} + \text{Ni-Gr} + 3 * \text{Ni_ML-Gr} + 2 * \text{Ni_ML-Res} + 3 * \text{Ni_ML-Br}) / 13$$

Le suffixe ML indique les minéraux lourds ; le suffixe Gr indique les centiles calculés sur les groupes, Br les centiles calculés sur l'ensemble de la banque et Res désignent les valeurs résiduelles. La valeur théorique maximale d'indice est de 100 et le minimum est de 0.

Le contexte lithologique connu des meilleures anomalies (indices supérieurs à 97; 24 sites correspondent à un centile supérieur à 99,5 sur l'indice) est décrit de façon plus spécifique (**Figure 65**). Une priorité a été assignée selon la présence et/ou la possibilité de retrouver des intrusions mafiques ou des amphibolites, et en particulier des combinaisons d'intrusions mafiques et de roches métasédimentaires. Un de ces échantillons est à proximité de « l'Indice du lac Sicotte » du **Tableau 10**. La plupart des échantillons (18 sur 24; 75 %) montrent soit des intrusions mafiques, des amphibolites ou des diabases dans leur bassin de drainage et sont considérés prioritaires. Plusieurs montrent également des combinaisons roches mafiques–roches sédimentaires.

L'utilisation d'un intervalle entre 92 et 97 sur l'indice donne 84 anomalies (sur 5 600, donc 98^e centile). Les échantillons correspondants des trois autres gîtes du **tableau 10** obtiennent des valeurs supérieures à ce seuil sur l'indice.

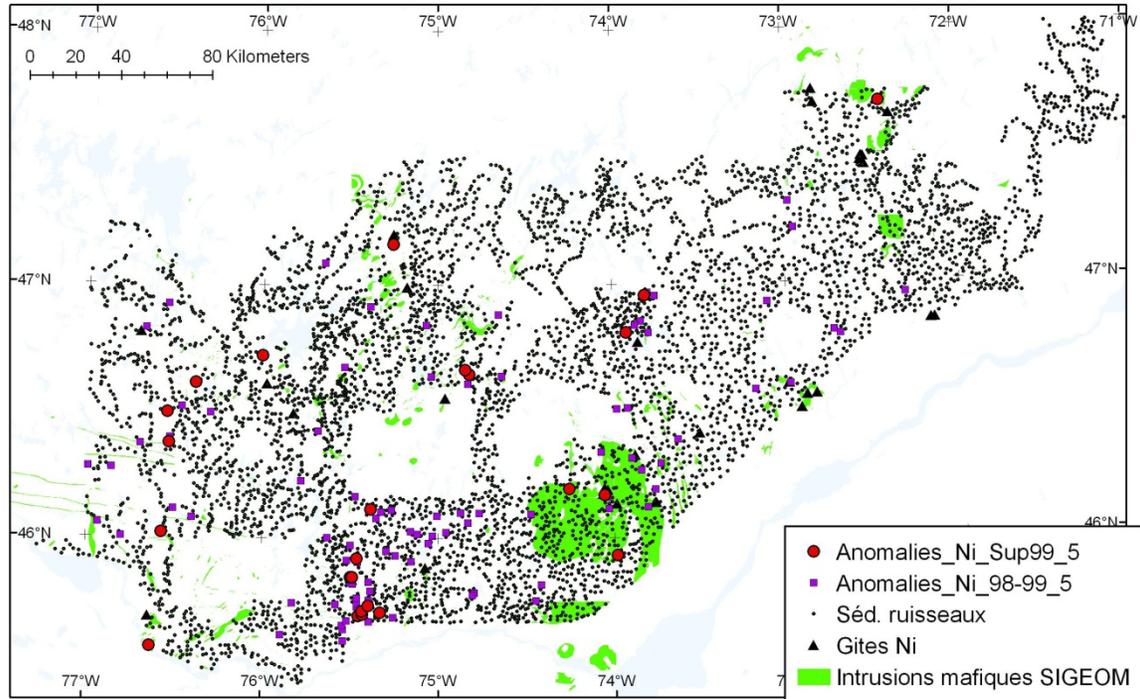


Figure 65. Anomalies définies par l'index Nickel.

6.2.3 Zinc dans les marbres

Signature des minéralisations

Quatorze gîtes de zinc dans les marbres ont un échantillon en aval à moins de 5 km selon le drainage. Sur les quatorze, certains partagent le même échantillon en aval. Si on ne conserve que ceux qui sont les plus rapprochés de l'échantillon, il en reste 12.

Sur les douze gîtes, trois possèdent une signature clairement attribuable à un gîte de zinc (**Tableau 12**). Encore une fois, cela peut sembler peu, mais deux des trois sont ceux ayant les échantillons les plus rapprochés de la minéralisation (**Figure 66**). Dans les deux cas les échantillons proviennent de cours d'eau relativement importants, mais les échantillons sont très rapprochés de la minéralisation (moins de 200 m).

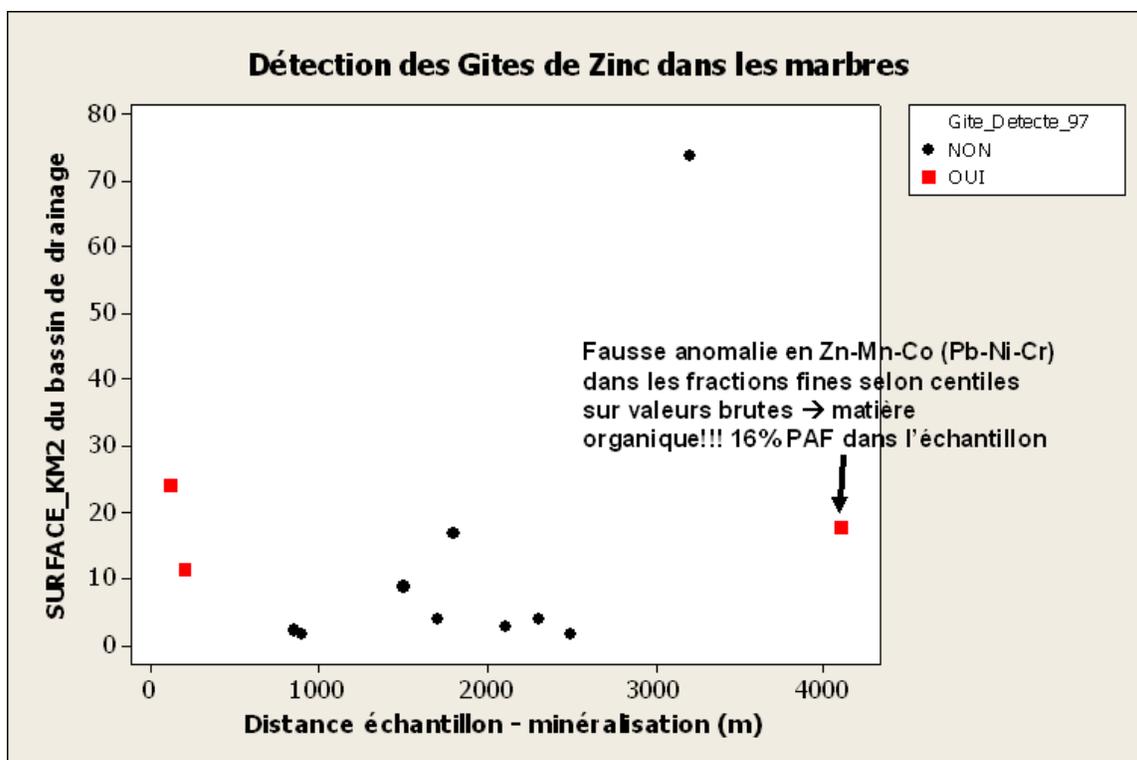


Figure 66. Détection des minéralisations de zinc dans les marbres.

Le troisième gîte (Davis) est très éloigné de son échantillon (> 4 100 mètres). Il est possible qu'une autre minéralisation soit présente plus proche de l'échantillon pour expliquer cette anomalie. On remarque par contre que les anomalies ne sont évidentes que pour les centiles sur valeurs brutes, et on ne trouve rien par les deux autres méthodes. Lorsque l'on regarde en détail cet échantillon, on constate qu'il s'agit d'un échantillon riche en matière organique (PAF = 16 %, groupe 1 – ultra-organique – dans les fractions fines). Il s'agit définitivement d'un cas parfait d'une *fausse anomalie* causée par l'abondance de matière organique, qui souligne l'importance du rehaussement d'anomalies par les deux autres méthodes.

Si on fait abstraction de cette fausse anomalie, le taux de détection des minéralisations zincifères est donc de 2 sur 12 (16,6 %). Par contre, on constate que les deux minéralisations les plus rapprochées (< 200 m) de leur échantillon sont détectées. Les autres minéralisations situées à plus de 800 m ne sont pas détectées.

Tableau 12. Signatures des indices de minéralisation en zinc dans les marbres

Nom	Métaux de la minéralisation	Importance	Centiles par résiduelles	Centiles par valeurs brutes	Centiles sur groupes
Des Nègres-Bouchette	Zn	Indice	#ZN_ML +MN (HG)	#ZN_ML (SB_ML U_ML)	#ZN_ML (HG SB_ML)
Davis (fausse anomalie)	Zn	Indice	(SM_ML)	#CO #MN #ZN (CR-NI-PB)	(CR)
Prospecteur (Lac Jésuites)	Zn	Indice	+ZN +TH_ML (LI MN_ML)	(MN_ML)	(MN_ML)

Lorsque l'on élimine le cas de la fausse anomalie du lac Davis, on ne retrouve que 2 minéralisations. Les conclusions que l'on peut tirer restent limitées à partir de seulement deux exemples, mais on peut tout de même dire :

1. Les gîtes situés près de leurs échantillons (< 200 m) sont détectés alors que lorsque l'on s'éloigne (< 800 m) aucune signature n'est visible. *La dispersion des métaux à partir d'indices de zinc dans les marbres semble donc assez restreinte, probablement < 500 m*). Il faut toutefois noter que la plupart de ces minéralisations sont des indices sans grande envergure.
2. Les minéraux lourds sont anomaliques en zinc selon toutes les méthodes pour « Des Nègres », mais pas les fractions fines.
3. Seules les fractions fines sont anomaliques en zinc pour « Prospecteur ».
4. Il semble y avoir des anomalies possibles en manganèse dans les silts ou les minéralisations, et possiblement en mercure et antimoine.
5. De façon préliminaire, les minéraux lourds apparaissent plus efficaces que les fractions fines pour détecter les anomalies en zinc impliquant ainsi un transport possible du zinc par des oxydes de fer.

Un échantillonnage plus détaillé serait clairement nécessaire pour préciser la distance de dispersion et le cortège métallique de ces minéralisations.

Absence de signature en Zinc dans les fractions fines des gîtes la vallée de la Gatineau

Il peut être surprenant de constater que les minéralisations de zinc des marbres du secteur de la Gatineau ne montrent pas d'anomalies en zinc dans les fractions fines. Par exemple, l'échantillon se trouvant à quelques centaines de mètres des gîtes du secteur Des Nègres-Bouchette (possiblement le gîte de Zn dans les marbres le plus important de la région) a des valeurs dans les fractions fines qui sont très faibles, peu importe la méthode de traitement.

Le zinc est normalement relativement mobile dans l'environnement secondaire et devrait former des anomalies assez évidentes dans les fractions fines. On peut possiblement expliquer l'absence d'anomalies dans les fractions fines par les marbres qui constituent l'encaissant des gîtes. La présence de marbres empêche probablement la formation d'eaux acides qui se forment normalement lors de l'altération des sulfures en surface. Le zinc, comme la plupart des autres métaux, est fortement mobile dans des eaux acides, mais beaucoup moins dans des eaux neutres. En conséquence, la présence de marbres inhibe probablement la mise en solution du zinc et sa dispersion de façon hydromorphique vers les ruisseaux. Le zinc serait plutôt immobilisé sous forme de composés insolubles (oxydes, sulfates ou carbonates de zinc) dans les sols près des minéralisations. L'expérience personnelle de l'auteur dans des projets d'exploration impliquant ce type de gîte confirme que des anomalies très spectaculaires en zinc dans les sols sont observées autour des gîtes de ce type dans cette région.

Dans les minéraux lourds, une anomalie est pourtant évidente près de ces mêmes gîtes. Ces anomalies dans les minéraux lourds pourraient provenir du transport mécanique des oxydes, carbonates ou sulfates de zinc insolubles vers les ruisseaux. L'absence d'anomalies dans les fractions fines des mêmes ruisseaux pourrait s'expliquer par une granulométrie assez grossière de ces phases (entre 177 et 850 microns, portion filtrée dans les fractions fines, mais présente dans les minéraux lourds).

Ces explications restent hypothétiques et une étude granulométrique, minéralogique et géochimique détaillée serait nécessaire pour les confirmer.

Indice composé pour la détection des minéralisations de Zn dans les marbres et cibles d'exploration

On peut proposer un indice composé permettant de détecter les minéralisations en Zn à partir des observations précédentes, et sur le calcul des centiles pour chaque combinaison de méthode de traitement / type d'échantillons. Il faut rappeler que cet indice se base sur un nombre de cas d'études très limité (seulement 2). L'indice suivant est proposé :

$$\text{Indice composé Zn marbres : } \text{Max} ((\text{Zn_ML-Gr} + \text{Zn_ML_Res}) / 2, ((2 * \text{Zn-Res} + \text{Zn-Gr}) / 3)$$

Le suffixe ML indique les minéraux lourds; le suffixe Gr indique les centiles calculés sur les groupes, et Res désignent les valeurs résiduelles. La valeur théorique maximale de l'index est de 100 et le minimum est de 0.

La fonction « Max » retourne le maximum des deux valeurs. Elle est utilisée ici pour permettre de considérer soit les minéraux lourds, soit les silts, selon ce qui répond le mieux pour chaque échantillon. Ceci est basé sur le fait que l'un des deux gîtes du **Tableau 12** montre une anomalie sur les minéraux lourds seulement alors que l'autre le montre dans sur les fractions fines seulement.

Le contexte lithologique connu des meilleures anomalies (indices supérieurs à 99; 27 sites, centile ~99,4 sur l'indice) est décrit de façon plus spécifique (**Figure 67**). Une priorité a été assignée selon la présence et/ou la possibilité de retrouver des marbres, et en particulier des contacts marbres-paragneiss. L'échantillon situé près des indices « Bouchette-Des Nègres » se trouve dans cette catégorie. Un échantillon situé à 2 km de l'indice « Prospecteur » s'y trouve également. Sur les 27 autres sites, 13 (48 %) montrent des quantités variables de marbres dans leur bassin de drainage et sont considérées comme des cibles de priorité « Très forte » ou « Forte ». Dans plusieurs autres cas, les cartes montrent des paragneiss non-différenciés ou mixtes plus ou moins bien cartographiés et qui peuvent contenir des bandes de marbres non reconnues.

L'utilisation d'un intervalle de 96-99 sur les valeurs de l'indice composé permet d'obtenir 76 anomalies supplémentaires également intéressantes (correspond aux ~98^e centile – 99,4^e centile) mais qui ne sont pas décrites en détail. L'échantillon situé près de l'indice « Prospecteur » se trouve parmi ces échantillons.

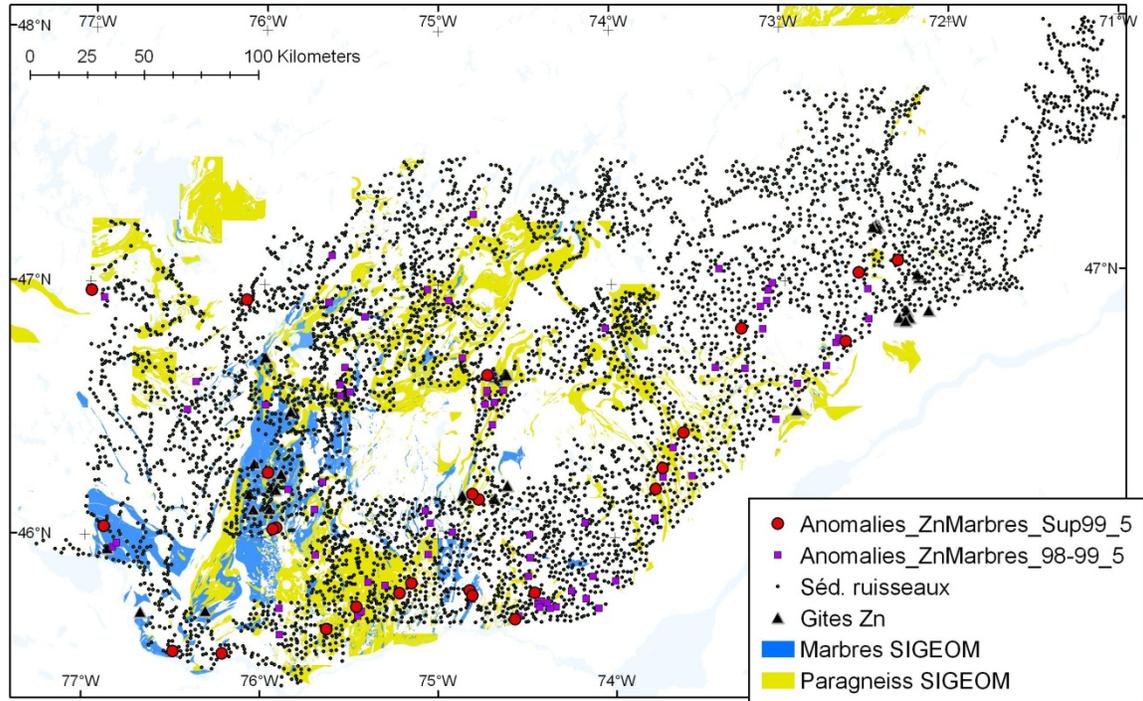


Figure 67. Anomalies définies par l'index Zn Marbres.

6.2.4 Pegmatites à U-Th

Huit gîtes de type pegmatites à uranium-thorium ont un échantillon en aval de la minéralisation à moins de 5 km. Cinq de ces minéralisations (62 %) sont détectées par leur signature d'anomalie U-Th (**Tableau 13**). Cette proportion est la plus élevée de tous les types de minéralisations considérés. Contrairement aux minéralisations Zn et Cu-Ni, il n'y a pas de relation entre la présence d'une anomalie et la détection des gîtes (**Figure 68**). Le **Tableau 14** compile le nombre de gîtes qui montrent des anomalies selon chaque combinaison méthode / type d'échantillon.

On peut conclure, pour les minéralisations de U-Th dans les pegmatites, que :

1. L'uranium est plus communément anomalique dans les fractions fines (somme de 3 pour U vs 1 pour Th pour les deux méthodes dans le **Tableau 14**) alors que le thorium l'est plus dans les minéraux lourds (somme de 4 pour Th vs 1 pour U pour les deux méthodes)
2. Les valeurs résiduelles en uranium dans les fractions fines permettent de détecter des gîtes qui ne le sont pas autrement
3. Pour le thorium dans les minéraux lourds, les deux méthodes de traitement sont relativement équivalentes.
4. Les centiles sur les groupes sont plus efficaces pour l'uranium dans les minéraux lourds et pour le thorium dans les fractions fines que les résiduelles.

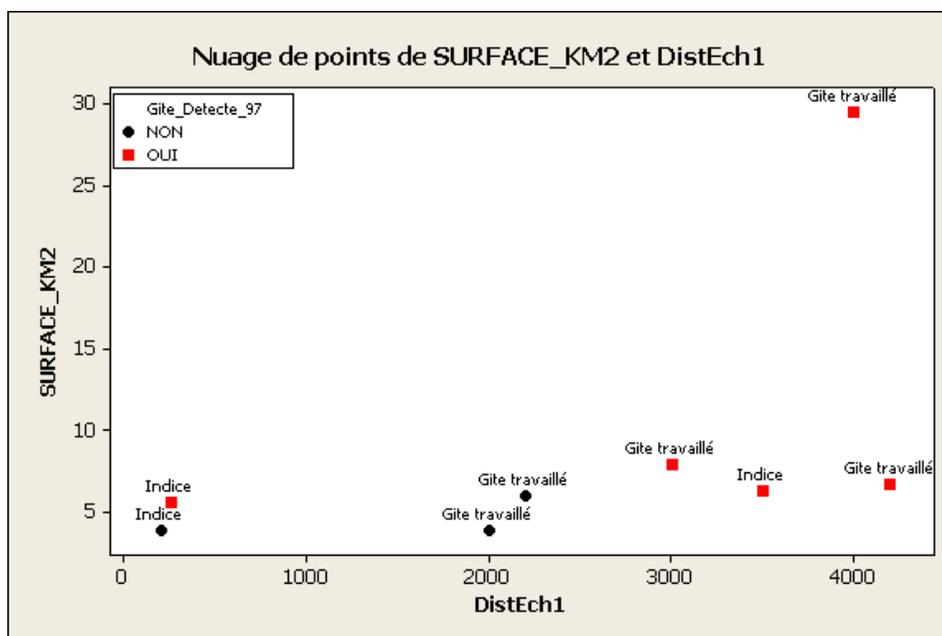


Figure 68. Détection des minéralisations d'uranium-thorium associé à des pegmatites.

Encore une fois, il faut noter que ces conclusions demeurent fragiles en raison du faible nombre de gîtes représenté. Toutefois, la grande facilité de dispersion hydromorphique dans l'environnement secondaire explique probablement la meilleure association des anomalies en uranium dans les fractions fines avec les minéralisations. À l'inverse, le caractère peu mobile du thorium explique probablement la meilleure réponse des minéraux lourds pour cet élément.

Tableau 13. Signatures des gîtes U-Th dans des pegmatites

Nom	Métaux de la minéralisation	Importance	Centiles par résiduelles	Centiles par valeurs brutes	Centiles sur groupes
Black Smoke Hill	U Th	Gîte travaillé	#CA_ML TH_ML +SB_ML (AS_ML)	(TH_ML)	(TH_ML)
Terrain Kelly	Th U Zr	Indice	#TH_ML MN (AS_ML)	#TH_ML (AS_ML)	(MN TH_ML)
Lac Marion	U	Gîte travaillé	(SR CE_ML W_ML)	#BR CE EU LA SM TH U Y W_ML +HG SR (AL CA LI LI_ML)	#AL BR CE EU PB U Y ZN +LA SM LI LA_ML (CA CR CU HG NA NI SR TH FE CE_ML LI_ML W)
Seneca-Zone-A	U	Indice	(U)	#U_ML + W_ML (MO_ML)	(MO_ML U_ML W_ML)
Prospect Gatineau	U	Gîte travaillé	(CR U)		

Tableau 14. Nombres de gîtes montrant des anomalies selon la combinaison méthode de traitement / type d'échantillon pour la détection des minéralisations U-Th dans des pegmatites

	U fractions fines	U minéraux lourds	Th fractions fines	Th minéraux lourds
Résiduelles	2	0	0	2
Centiles sur valeurs groupes	1	1	1	2

Indice composé pour la détection des minéralisations U-Th dans les pegmatites et cibles d'exploration

A partir des observations précédentes, on peut proposer un indice composé pour l'exploration :

$$\text{Indice composé U-Th Pegmatites : } (U\text{-Res} + U\text{-Gr} + Th_ML\text{-RES} + Th_ML\text{-Gr}) / 4$$

Le suffixe ML indique les minéraux lourds; le suffixe Gr indique les centiles calculés sur les groupes, et Res désignent les centiles calculés sur valeurs résiduelles.

Les meilleures anomalies sont définies par un indice composé de 95, ce qui correspond environ au centile 99,5 de l'indice composé, environ 30 échantillons. (**Figure 69** à **Figure 71**). Une série additionnelle d'anomalies peut être définie par une valeur de l'indice composé entre 88 et 95. Ceci correspond au 98^e centile des valeurs de l'indice et définit 87 échantillons anomaux additionnels.

La plupart de ces anomalies correspondent à des secteurs contenant des indices de minéralisation connus. Quelques secteurs additionnels sans gîtes connus se distinguent toutefois, en particulier dans les feuillets 31G11, 31G14, 31J03, 31J04, 31O03.

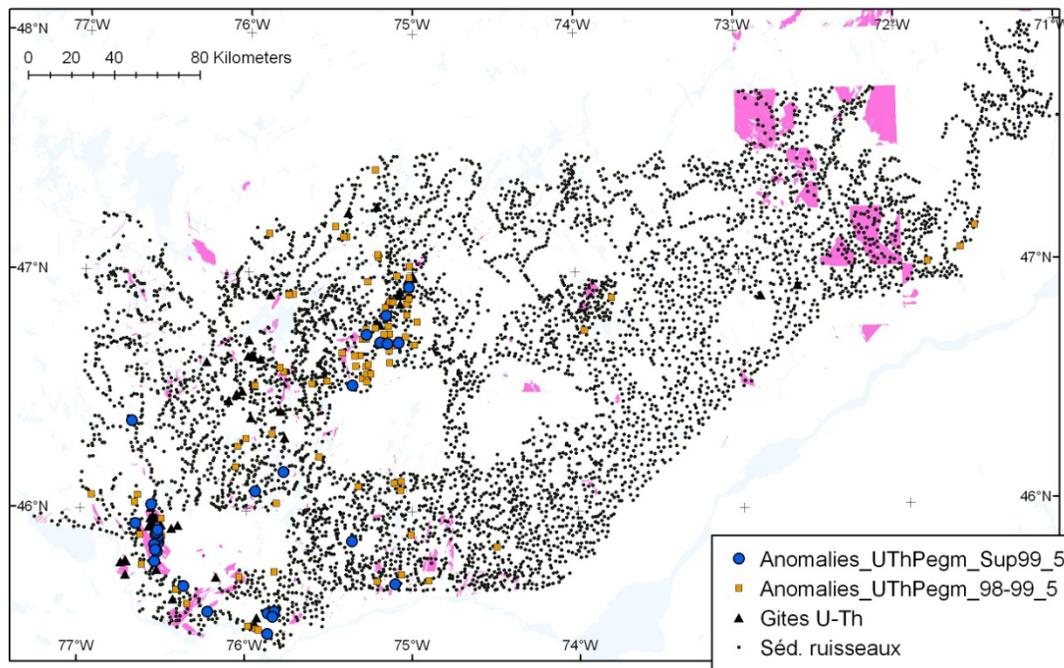


Figure 69. Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et granites (11B).

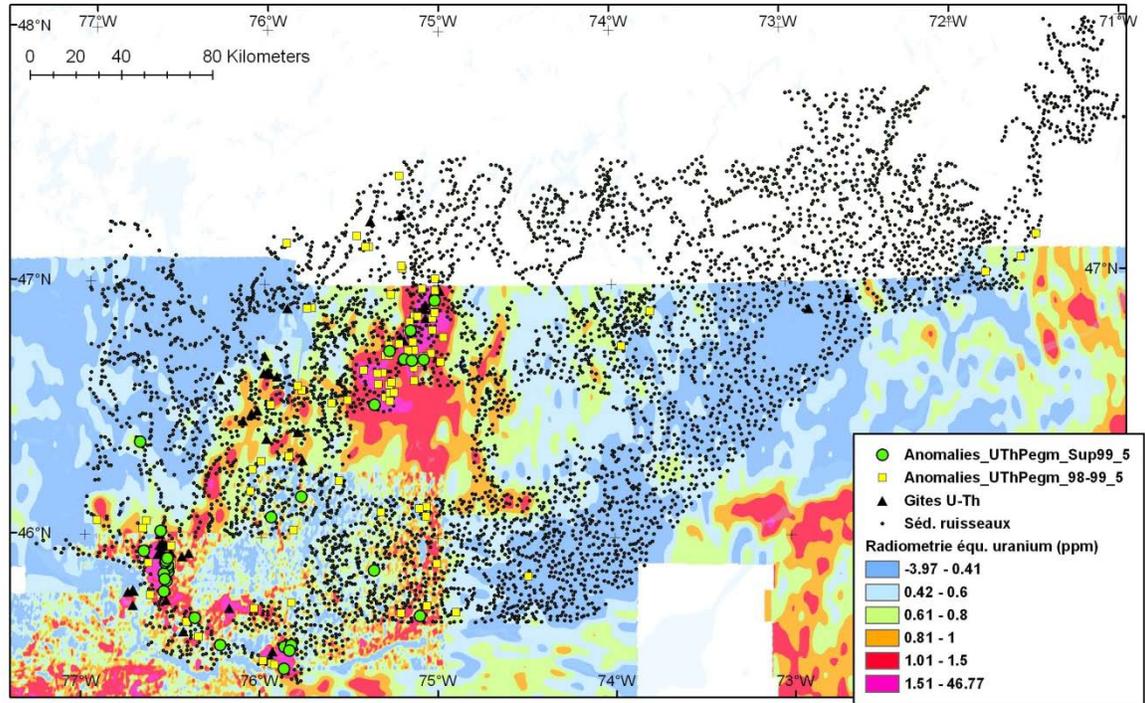


Figure 70. Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et radiométrie (eU ppm) (CGC, 2005).

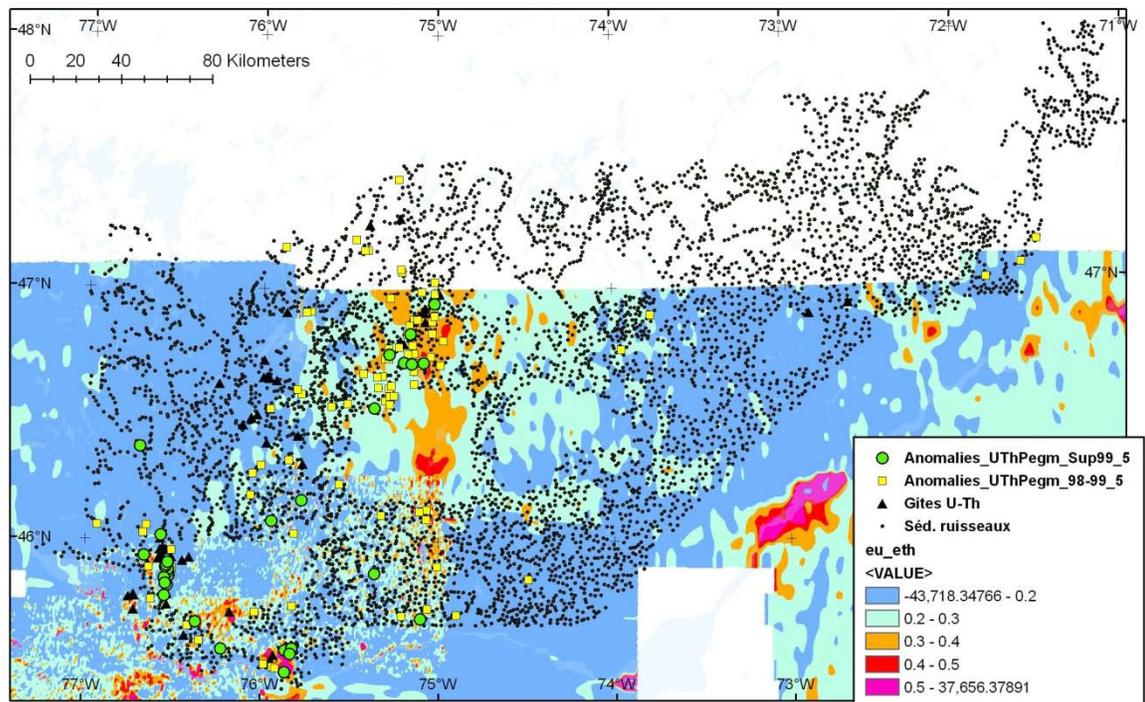


Figure 71. Anomalies définies par l'indice U-Th pegmatites et ratio eU / eTh (radiométrie) (CGC, 2005).

6.2.5 Couverture géochimique de la région

Couverture géochimique déduite de l'étude des minéralisations

Cette section examine plus en détail, la couverture géochimique de la région par rapport aux gîtes connus. Sur les 202 indices de minéralisation rapportés dans la région, 72 seulement (36 %) ont un échantillon à moins de 5 km en aval dans les levés considérés (**Figure 63**). Treize des 205 ont un échantillon de levés plus anciens (qui n'ont pas été étudiés durant ce projet) à moins de 5 km. Donc, au total, 85 gîtes ont un échantillon à moins de 5 km de distance en aval, dans des levés plus anciens ou dans ceux considérés ici.

La situation géographique des 117 autres gîtes a été examinée de façon individuelle. Il serait impossible de prélever un échantillon de sédiments de ruisseaux en aval d'un certain nombre de ces gîtes (45) pour différentes raisons (pas de ruisseaux en aval, gîte situé sur une île dans un lac ou sur le rivage d'un grand lac). Dans le cas de 75 autres, il serait possible d'échantillonner un ruisseau en aval à proximité.

Donc, 85 gîtes ont un échantillon en aval à moins de 5 km, alors que dans le cas de 75 autres, il n'y en a pas, mais cela pourrait être fait. *Ceci donne donc une couverture géochimique des minéralisations d'environ 53 % pour la région par rapport à ce qui est possible. Ceci considère une distance de 5 km de dispersion. Par contre, les études de cas montrent des distances de dispersion pour de 2 km ou moins pour les minéralisations de Ni-Cu (2 km) et de moins de 500 m pour les minéralisations en Zn dans les marbres. Si on diminue cette distance, la couverture géochimique de la région diminuerait alors considérablement. Seulement 38 gîtes ont un échantillon à moins de 2 km. La couverture géochimique des gîtes serait alors de 23 % seulement (38 sur 160).*

Ces calculs de couverture géochimique indiquent que la densité d'échantillons des levés considérés aurait avantage à être augmentée.

Couverture géochimique déduite des bassins de drainage calculés

On peut également considérer la couverture géochimique de la région à partir des bassins de drainage déterminés pour l'ensemble des échantillons. La surface calculée de la région couverte par les levés 1987-1989 est de 61,700 km², si on fait abstraction de secteurs couverts seulement par des levés plus anciens inclus dans la région (**Figure 72**). Les bassins de drainage se superposant ont été fusionnés et la surface totale de la carte résultante a été calculée (**Figure 73**). La surface totale de l'union des bassins de drainage est de 33 220 km². *La couverture géochimique calculée est ainsi de 53 %.*

Toutefois, certains bassins de drainage d'échantillons sont très grands et on ne peut considérer dans ces cas que les échantillons couvrent leurs bassins entiers. Si on considère seulement la partie de chacun des bassins de drainage qui est située à moins de 5 km (linéaire) de son échantillon, la couverture diminue alors drastiquement. Si on fait l'union géométrique de tous les bassins de drainage pour éliminer les superpositions et que l'on calcule la somme des aires, on obtient une surface de 18 410 km² (**Figure 74**). *Ceci représente environ 29 % de la surface de la région.* Si on considère la partie à moins de 2 km, ce qui correspond à la distance de dispersion des gîtes de Ni-Cu, on obtient une surface de 9 360 km² *qui représente environ 15 % de la surface de la région.* Le **Tableau 15** résume ces calculs.

Tableau 15. Couverture géochimique de la région calculée à partir des bassins de drainage des échantillons

	Surface (km ²)	Proportion de la région d'intérêt couverte
Bassins de drainage fusionnés complets	33 220	53 %
Bassins de drainage fusionnés, limités à 5 km des échantillons	18 410	29 %
Bassins de drainage fusionnés, limités à 2 km des échantillons	9 360	15 %

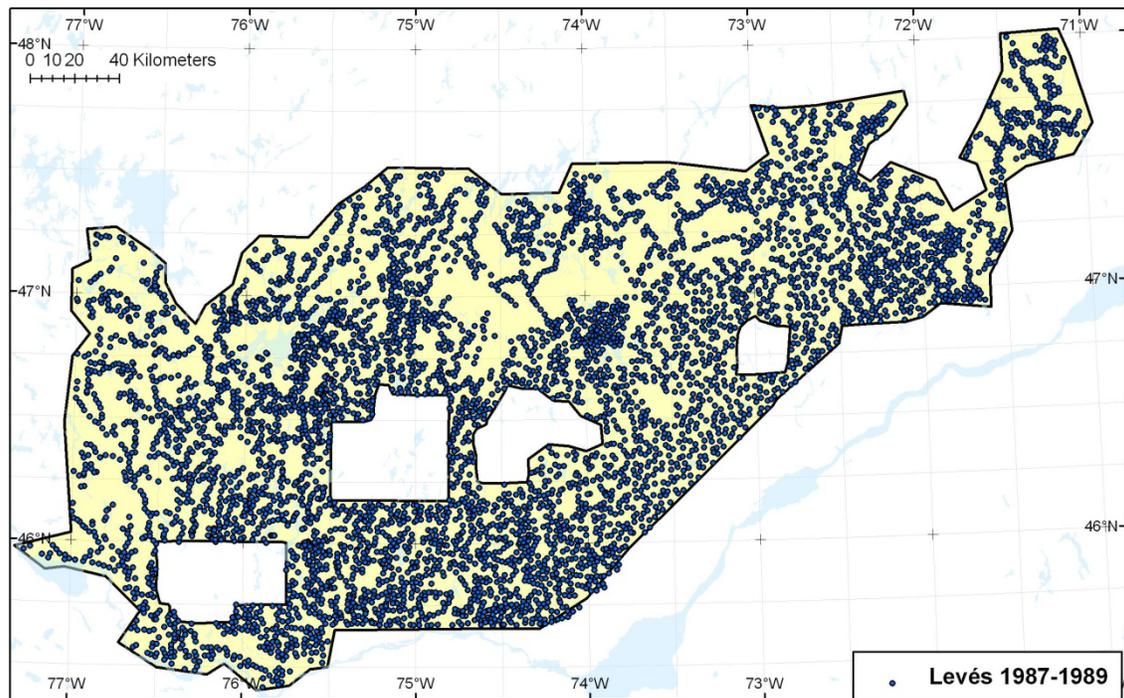


Figure 72. Région couverte par les levés 1987-1989.

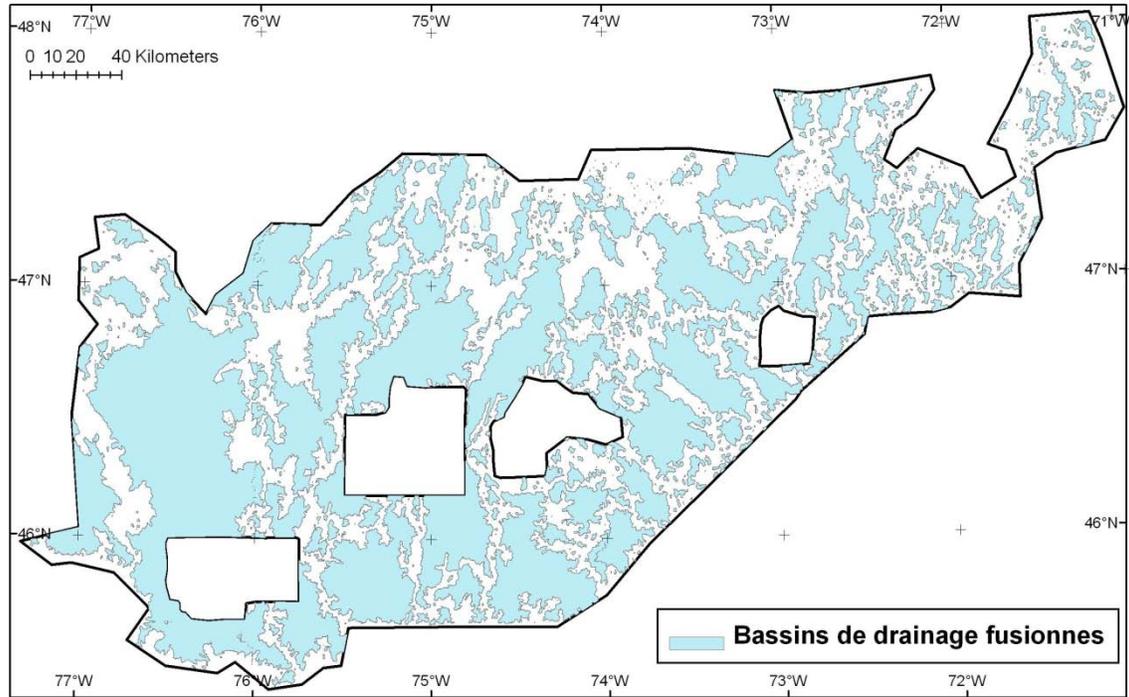


Figure 73. Bassins de drainage des levés 1987-1989, fusionnés.

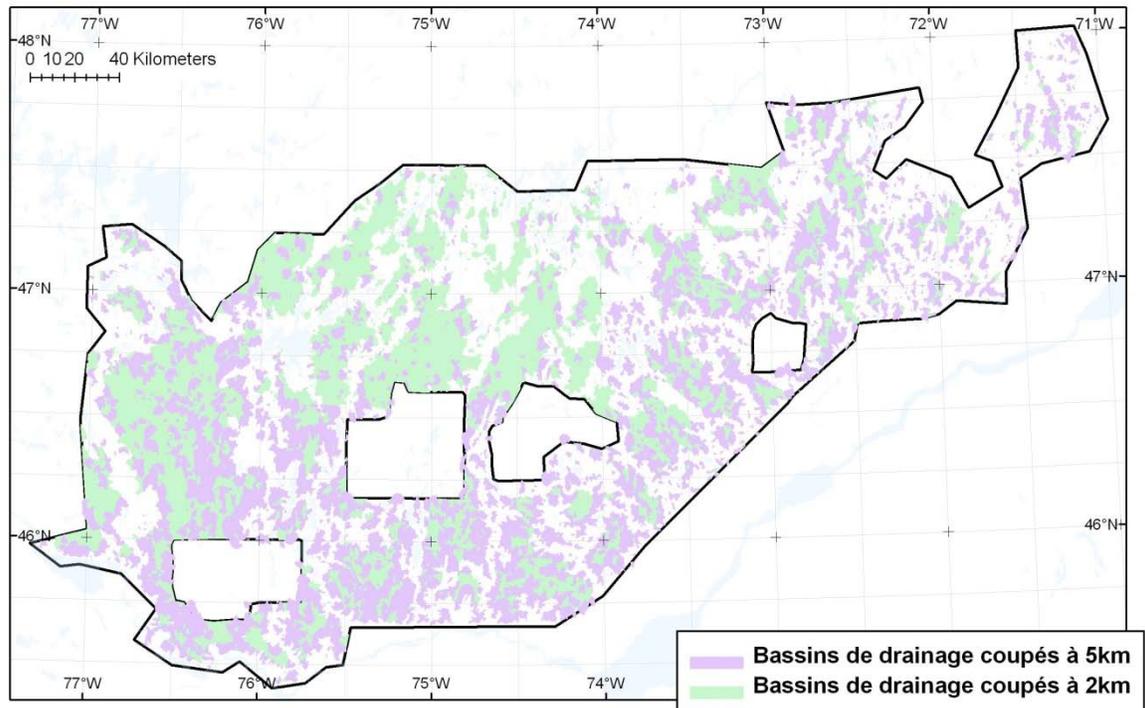


Figure 74. Bassins de drainage coupés à moins de 5 km et 2 km des échantillons correspondants.

6.3 Conclusions sur les études de cas

Les études de cas précédentes du Québec et du Canada ainsi que les exemples réalisés à partir de la banque de données du Grenville donnent une image de l'utilité des sédiments de ruisseaux en contexte boréal et plat qui est différente de celle rapportée par les études de la Scandinavie.

Le cas d'Agricola Lake est un exemple de gisement découvert directement par un levé régional de géochimie des sédiments de lacs, et qui présente une signature métallique très évidente à l'échelle locale dans les sédiments de lacs, dans les sédiments de ruisseaux et dans l'eau. Le cas de Koke, quoique n'ayant pas été découvert par la géochimie, est également un exemple sans équivoque de l'utilité des fractions fines pour l'exploration.

Gîtes de Ni-Cu

Dans le cas du Grenville du Sud du Québec, on trouve des signatures évidentes d'anomalies Ni±Cu±Co dans les ruisseaux pour tous les gîtes (*sans exception*) ayant un échantillon à moins de 2 km en aval et qui draine une région de moins de 5-10 km². Les échantillons plus éloignés des gîtes ou représentant des bassins de drainage plus grands ne montrent pas d'anomalies claires. Les gîtes détectés montrent en général des signatures évidentes en nickel dans les minéraux lourds, peu importe la méthode de traitement. Pour les fractions fines, le signal doit être rehaussé par l'emploi des valeurs résiduelles des régressions. Ceci est une conséquence du bruit de fond géochimique plus élevé dans les fractions fines, tel qu'indiqué de façon théorique dans la section 4.8. Ces gîtes montrent des anomalies variables en cuivre et en cobalt. Ceci indique que la géochimie des sédiments de ruisseaux est très efficace pour détecter ces minéralisations dans ce contexte, en autant que l'échantillonnage soit suffisamment dense.

Gîtes de Zinc dans les marbres

Dans le cas des gîtes de zinc dans les marbres, on trouve des signatures évidentes dans le cas de deux gîtes seulement sur les douze ayant un échantillon en aval à moins de 5 km. Toutefois, ces deux gîtes détectés sont les plus rapprochés des échantillons de ruisseaux associés. On peut donc affirmer que tous les gîtes situés à moins de 500 m d'un échantillon ont une signature en zinc évidente dans les ruisseaux. Les gîtes qui sont à plus de 500 m des échantillons ne sont pas détectés. Dans un cas, les anomalies se manifestent dans les minéraux lourds alors que dans l'autre cas, les fractions fines montrent la meilleure réponse. Il faut noter que l'anomalie dans les fractions fines n'est obtenue que par la méthode de régression statistique. La géochimie de ruisseaux détecte donc les gîtes de zinc dans les marbres, mais comme la distance de dispersion est plutôt faible (< 500 m), on peut questionner l'intérêt d'échantillonner les ruisseaux plutôt que les sols, qui ont démontré leur utilité pour ce type de minéralisation.

Gîtes U-Th dans des pegmatites

Pour les gîtes d'uranium-thorium dans les pegmatites, on ne trouve pas de correspondance précise entre la signature des échantillons, la distance de dispersion et la taille des bassins de drainage. Par contre, ce type de minéralisation montre le plus fort taux d'anomalies clairement identifiables (50 %) pour les échantillons à moins de 5 km en aval des gîtes. Les signatures des anomalies indiquent que les fractions fines sont les plus efficaces pour détecter l'uranium associé aux gîtes alors que les minéraux lourds permettent d'identifier les anomalies en thorium associées. Les valeurs résiduelles semblent légèrement plus efficaces que les centiles sur les groupes pour les fractions fines en uranium. Dans le cas du thorium dans les minéraux lourds, les deux méthodes de traitement donnent des résultats comparables.

Couverture géochimique

Les études de cas indiquent également que la couverture géochimique de la région n'est pas complète pour les sédiments de ruisseaux. En utilisant une distance de dispersion utile arbitraire

de 5 km, on peut calculer une couverture d'un peu plus de 50 % pour la région. Si on utilise une distance de dispersion de 2 km (plus réaliste) alors la couverture est de moins de 25 %. La couverture a également été calculée à partir des bassins de drainage des échantillons. La couverture ainsi calculée est de 30 % en limitant les bassins à 5 km de leur échantillon, et diminue à 15 % en les limitant à une distance de 2 km.

7 CONCLUSION

L'étude statistique réalisée dans le cadre de ce projet sur les levés du Sud du Grenville confirme les différences importantes dans les signaux géochimiques fournies par les fractions fines des sédiments de ruisseaux par rapport aux minéraux lourds. La géochimie des fractions fines est complexe et les teneurs y sont fortement influencées par la proportion d'argiles, de matière organique et d'oxydes de fer dans les sédiments. Les proportions de ces constituants sont fortement influencées par les conditions géochimiques de surface (type de dépôts de surface, présence de zones agricoles, etc). On note par exemple un nombre important de fausses anomalies en différents métaux causées par la présence de champs/terres agricoles. Les teneurs dans les fractions fines sont assez faiblement corrélables avec la géologie du socle. Les signaux géochimiques des minéraux lourds sont plus simples et sont plus facilement corrélables aux variations des lithologies du socle.

Ces observations suggèrent que les valeurs en métaux des fractions fines devraient être rehaussées par des méthodes spatiales ou statistiques alors que les valeurs brutes sont susceptibles de rester assez efficaces dans le cas des minéraux lourds. L'étude statistique des contrastes géochimiques entre les anomalies et le bruit de fond (**section 4.7**) suggère également que les anomalies dans les minéraux lourds sont plus clairement démarquées des variations du bruit de fond que le sont les fractions fines.

Deux méthodes ont été proposées pour rehausser les signaux géochimiques dans les sédiments de ruisseaux. Une première méthode simple consiste à séparer les analyses en groupes en se basant sur une analyse multivariable par grappes, et de calculer des seuils d'anomalies par des centiles sur les valeurs de ces groupes. La deuxième méthode proposée consiste à utiliser les valeurs résiduelles de régressions multiples qui utilisent les facteurs d'une analyse factorielle multivariable comme variable explicative et les métaux d'intérêt comme variables à modéliser.

L'étude de la signature géochimique des minéralisations du Sud du Grenville par les méthodes de traitement précédentes, appliquées de façon indépendante aux fractions fines et aux minéraux lourds, montre que :

- Tous les gîtes Ni-Cu à moins de 2 km en aval de l'échantillon le plus proche et dans des ruisseaux drainant moins de 5-10 km² montrent des anomalies claires en Ni±Co±Cu. Les gîtes plus éloignés ou dans des ruisseaux trop importants ne sont pas détectés.
- Dans le cas des minéralisations en Zn dans les marbres, tous les gîtes à moins de 500 m sont clairement identifiés.
- Le cas des gîtes d'uranium ne permet pas de déduire une distance de dispersion, mais la proportion des minéralisations détectées par les échantillons à moins de 5 km en aval est la plus élevée des types de gîtes considérés.

Les études de cas confirment également que la détection d'anomalies associées aux gîtes dans les fractions fines requiert dans la plupart des cas un rehaussement des valeurs par la méthode de régression statistique. C'est clairement le cas pour le zinc et le nickel, et possiblement pour l'uranium. Dans le cas des minéraux lourds, l'utilisation d'une méthode plus simple comme celle

des centiles sur les valeurs brutes calculées sur les groupes de l'analyse par grappe est jugée satisfaisante.

L'étude de la signature des gîtes et des bassins de drainage calculés pour les échantillons des levés a également permis de constater que la couverture géochimique de la région est partielle, et varie entre 15 % et 50 % selon la méthode de calcul et la distance maximale de détection des gîtes considérée.

Des indices composés d'anomalies ont été construits à partir des études de cas. Ces indices composés fournissent une série de cibles pour l'exploration Ni-Cu, Zn dans les marbres et U-Th dans les pegmatites. L'examen du contexte lithologique des bassins de drainage des meilleures anomalies montre que la plupart se trouvent dans des contextes lithologiques très favorables dans chacun des cas.

Le projet actuel démontre l'efficacité de la géochimie des sédiments de ruisseaux pour détecter les minéralisations en métaux de base et en uranium, à tout le moins dans le contexte du Sud du Grenville, si les conditions suivantes sont respectées :

- L'échantillonnage doit être suffisamment dense et les ruisseaux échantillonnés doivent drainer des régions relativement petites (surtout pour Ni-Cu et Zn).
- Les signaux d'anomalies dans les fractions fines pour les métaux usuels et possiblement pour l'uranium doivent être rehaussés par des approches statistiques/spatiales comme la régression.
- Les signaux d'anomalies dans les minéraux lourds n'ont pas en général à être rehaussés, mais peuvent l'être par régression ou en séparant la banque en groupes pour renforcer l'identification d'anomalies.

Des études similaires sur d'autres secteurs du Québec sont recommandées pour confirmer ou nuancer les conclusions de la présente étude.

RÉFÉRENCES

- Ahadjie, J. 2003. Spatial data integration for classification of stream sediment geochemical anomalies in Masbate Island, The Philippines. Thèse de doctorat, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands.
- Aitchison, J., 1984, The statistical analysis of geochemical compositions: *Mathematical Geology* 16, p. 531–564
- Bellehumeur, C., Jébrak, M. 1992. Analyse multidimensionnelle des données géochimiques appliquées à la prospection géochimique dans la région de la Gatineau. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, document MB-92-05.
- Bellehumeur C., and Jébrak, M., 1993. Filtering of background variation factors in stream sediment geochemical survey. Application to Zn Sedex deposits in the Gatineau area, Southwestern Quebec, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 2-1, p. 63-72.
- Bellehumeur, C., Marcotte, D., Jébrak, M. 1994. Multi-element relationships and spatial structures of regional geochemical data from stream sediments, southwestern Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration* 51, p. 11-35.
- Björklund, A., Lehmuspelto, P., Ottesen, R.T., Steenfelt, A. 1994. Drainage geochemistry in glaciated terrain. *Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.
- Cameron, E.M. 1977. Geochemical dispersion in lake waters and sediments from massive sulphide mineralization, Agricola lake area, Northwest Territories. *Journal of Geochemical Exploration* 7, p. 301-326.
- Cameron, E. M. 1994. Lake sediment sampling in mineral exploration. *Dans: Drainage Geochemistry. Édité par M. Hale et J.A. Plant, Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.
- Choinière, J. 1992. Géochimie des minéraux lourds et des sédiments de ruisseaux – Région de Mauricie-Portneuf. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, document MB-92-18.
- Church, S.E., Mosier, E.L., Motooka, J.M. 1987. Mineralogical basis for the interpretation of multi-Element (ICP-AES), Oxalic acid, and aqua regia partial digestions of stream sediments for reconnaissance exploration geochemistry. *Journal of Geochemistry Exploration*, 29, p. 207-233.
- Daneshfar, B., Cameron, E. 1998. Leveling geochemical data between map sheets. *Journal of Geochemical Exploration*, 63: 189-201.
- Davidson, A., 1998. Geological map of the Grenville Province, Canada and adjacent parts of the United States of America: Geological Survey of Canada, Map 1947A, scale 1:2,000,000.
- De Vos, W., Tarvainen, T., Salminen, R., Reeder, S., De Vivo, B. 2006: *Geochemical Atlas of Europe. Part 2: Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications.* 690 p
- Fulton, 1995. *Surficial materials of Canada / Matériaux superficiels du Canada.* Commission géologique du Canada, Cartes série "A" 1880A.
- Hale, M. 1994. Strategic choices in drainage geochemistry. *Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.

- Jébrak, M. 1989. Étude comparée des minéraux lourds et des sédiments de ruisseaux de la région de la Gatineau. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, document MB-89-36.
- Karimzadeh Somarin. 2004. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 81, p. 47-54.
- MRN, 2004. Données géochimiques d'échantillons de sédiments de lac. Système d'information géominière du Québec (SIGEOM). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; www.mrnf.gouv.qc.ca/produits-services/mines.jsp (consulté le 1er juillet 2004).
- MRN, 2008. Données géochimiques d'échantillons de sédiments de lac. Système d'information géominière du Québec (SIGEOM). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; www.mrnf.gouv.qc.ca/produits-services/mines.jsp (consulté le 1er septembre 2008).
- Ottesen, R.T., Theobald, P.K. 1994. Stream sediments in mineral exploration. In : *Drainage Geochemistry. Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.
- Pan, G., Harris, P.D. 2000. *Information synthesis for mineral exploration*. Oxford University Press.
- Plant, J.A., Raiswell, R.W. 1994. Modification to the geochemical signatures of ore deposits and their associated rocks in different surface environments. *Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.
- RNCAN, 2008. Données topographiques vectorielles CANVEC. <http://geogratis.gc.ca/geogratis/fr/product/search.do?id=28954> (consulté le 15r septembre 2008).
- Section de la géophysique de rayonnement, CGC - Division du Centre du Canada, Commission géologique du Canada, Secteur des sciences de la Terre, Ressources naturelles Canada. 2005. Base de données du Programme national de spectrométrie gamma.
- Snäll, S., Liljefors, T. 2000. Leachability of major elements from minerals in strong acids. *Journal of Geochemical Exploration* 71, p. 1-12.
- Spadoni, M. 2006. Geochemical mapping using a geomorphological approach based on catchments. *Journal of Geochemical Exploration* 90, p. 183-196.
- Spadoni, M., Voltaggio, M., Cavarretta, G. 2005. Recognition of areas of anomalous concentration of potentially hazardous elements by means of a subcatchment-based discriminant analysis of stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration* 85, p. 83-91.
- Trépanier, S. 2001. GM-60772. Dossier d'exploration minérale du MRNF, Québec.
- Trépanier, S. 2007. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lacs. Rapport projet CONSOREM 2004-09, 88p.
- Trépanier, S. 2006. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lacs, phase 2. Rapport projet CONSOREM 2005-03, 74p.
- 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 interne CONSOREM Projet 2008-09-A.

ANNEXE 1 : SIGNATURES GÉOCHIMIQUES DES MINÉRALISATIONS DU SUD-OUEST DU GRENVILLE AYANT UN ÉCHANTILLON À MOINS DE 5 KM EN AVAL

Gîte	Substances	Type Gîte	Importance	Gîte_De tecte_97	DistEch1	ACC1	SURFACE_KM2	ACC_NOTE	Anom. Residuelle	Anom. Brute	Anom. par Groupes
Doherty-Sud	Mo	Autre	Indice	NON	1000	4000	1.47		#AS (V BA, ML, NA, ML)	(AS)	(AS)
Lac du Sorbier	Cu Zn	Autre	Gîte travaillé	NON	2500	16500	6.07		(AL, CU, NI, ML)		
Trudel	Pb Ag	Autre	Gîte travaillé	NON	2200	4600	1.69		(AL)		
Cameron	Fe	Autre	Gîte travaillé	NON	200	2300	0.85		(MG, ML, W, ML)	(CR)	
Dajo-Cunre	Cu	Autre	Gîte travaillé	NON	250	12000	4.42		(MO, ML, V, ML)		
Russeau Passageur	Ag Zn Cr Ni										
	Cu	Autre	Gîte travaillé	NON	1000	116700	42.95		(SB, ML)		(CO)
Carbonatite de Cantley	ETR	Autre	Indice	NON	3500	60000	22.08	Coulee sur dépôts meubles	BA, BA, ML (LA, ML)	(BA, LA, ML)	(BA)
Indice Henry	Cu	Autre	Indice	NON	1500	20200	7.43				
Lac Canard	U	Autre	Indice	NON	1000	15000	5.52	APRES LAC			
Lac Alba	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	OUI	1000	4500	1.66	Après lac	#CU, CU, ML (NI, ML)	#CU, CU, ML (NI, ML)	#CU, CU, ML (NI, ML)
Lac Souris	Ni Cu	Cu-Ni magmatique	Gîte travaillé	OUI	1100	4700	1.73		#NI (P)	(NI, P)	(NI)
Indice du lac Sicotte	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	OUI	1300	865	0.32	Après lac	#NI, NI, ML (U, ML)	NI, ML	(NI, ML)
Chilton Nickel Zone A et B	Cu Ni Co	Cu-Ni magmatique	Gîte travaillé	OUI	700	15300	5.59	Grande rivière, près du	CO, ML (NI, PB, ML)	CO, ML (NI, ML)	(CO, ML, NI, ML)
								Après lac, autre gîte plus			
Indice du lac Baume	Cu Ni Co	Cu-Ni magmatique	Gîte travaillé	OUI	2200	15200	5.59	Après lac, autre gîte plus	CO, ML (NI, PB, ML)	CO, ML (NI, ML)	(CO, ML, NI, ML)
SC-95-05	Cu Ni Co	Cu-Ni magmatique	Gîte travaillé	OUI	2200	15200	5.59	Après lac, autre gîte plus	CO, ML (NI, PB, ML)	CO, ML (NI, ML)	(CO, ML, NI, ML)
Dyke 1 et 2	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	2300	27000	9.94	APRES LAC	#CR, ML (ZN, ML)		
Dyke 7	Ni Cu	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	2300	27000	9.94	APRES LAC	#CR, ML (ZN, ML)		
Fillon	Ni Cu	Cu-Ni magmatique	Gîte travaillé	NON	1400	35000	12.88		#P, ML (HG, SR, SR, ML)	#P, ML +SR, CA, ML, LA, ML	(HG, SR, CA, ML, NA, ML)
Rochette Ouest	Ni Cu	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	4500	40000	14.72	Après grand lac	#SR +FE, AS, ML (BA, V, BA, ML)	SM, ML, TH, ML	P, MP, SR, ML
SC-95-02	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	4000	45700	16.82		(MG, SR, ML)	(SR, AS, ML)	
Rivière Versailles	Cu	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	500	91000	29.91		(MG)		
Lac Kennedy	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	3000	23500	8.65		(P, ML)	(P, P, ML)	(P, ML, W, ML)
Lac Matte	Cu Ni	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	4200	86300	31.39	Après grand lac	P (TI, EU, P, ML)	#P (CA, EU, P, ML)	(P)
SC-95-10	Cu	Cu-Ni magmatique	Indice	NON	3000	25000	9.20	Après lac	V, ML	(V, ML)	(V, ML)
Lac Piche	Fe Ti	Fe-Ti	Gîte travaillé	OUI	1300	8000	2.94		#V, Y		CA, ML, P, ML, V, ML
Tamarac-Nord (Mercier)	Fe Ti	Fe-Ti	Gîte travaillé	OUI	500	12600	4.64	Après lac	#V, ML (CA, TH, ML, TI, ML)	#V, ML (ZN, ML)	(EU, ML, TI, ML)
Mine Iry	Fe Ti	Fe-Ti	Mine fermée	NON	2800	15000	5.52		(Y, LJ)		
Lac Ouareau	Fe Ti V Ni	Fe-Ti	Gîte travaillé	NON	500	703	0.26		(MO, V, ML)		
Lac Adair	Fe Ti	Fe-Ti	Gisement tonnage	NON	4600	14200	5.23		(SM, ML)		
Lynch	Fe Ti	Fe-Ti	Gîte travaillé	NON	3000	26300	9.68		SM (MG, NI, PB, ML)		#CO, SM, V, +CE, CR, EU
Ferren	Fe Ti	Fe-Ti	Indice	NON	1500	70900	26.09				LA, NI, TH, Y, FE, MO (AL, BR, CU, MG)
Lac du Moulin	Fe Ti	Fe-Ti	Gisement tonnage	NON	2700	12500	4.60	Après 3 lacs			
Saint-Hyppolite	Fe Ti	Fe-Ti	Gisement tonnage	NON	4100	39200	14.43				
Welsh	Mo	Pegmatite Mo	Gîte travaillé	OUI	300	55300	20.35		(LJ, CU, ML)	LA, ML, TH, ML (U, CE, ML, CU, ML)	U
Black Smoke Hill	U Th	Pegmatite U Th	Gîte travaillé	OUI	3000	21500	7.91		#CA, ML, TH, ML +SB, ML		
Terrain Kally	Th U Zr	Pegmatite U Th	Indice	OUI	250	15000	5.52		(AS, ML)	(TH, ML)	(MN, TH, ML)
									#TH, ML, MN (AS, ML)	#TH, ML (AS, ML)	
Lac Marion	U	Pegmatite U Th	Gîte travaillé	OUI	4000	80000	29.44	Après lac	(SR, CE, ML, W, ML)		
Seneca-Zone-A	U	Pegmatite U Th	Indice	OUI	3500	17000	6.26		(U)		
Prospect Gagneau	U	Pegmatite U Th	Gîte travaillé	OUI	4300	19000	6.62		(CR, U)		
Lac Siopeh	U Th	Pegmatite U Th	Gîte travaillé	NON	2200	16300	6.00	Après grand lac	(MG)		
Ragnar	Th U	Pegmatite U Th	Indice	NON	200	10500	3.86		(NI)	(AL, CR, NI)	(HG)
Obalski	U	Pegmatite U Th	Gîte travaillé	NON	2000	10500	3.86	Autre gîte plus proche	(NI)	(AL, CR, NI)	(HG)
Mine du lac à l'Indienne	Mo Cu	Skarn MoCu	Mine fermée	OUI	1000	48000	17.66	Après grand lac, contamination probable (dépôt)	#CU, MG, TH, CO, ML, CU, ML, FE, ML, NI, ML, TH +AS, ML (NI, CA, ML, P, ML, ZN, ML)		
Watson	Cu	Skarn CuZn	Indice	OUI	200	5660	2.08		LI, AS, ML (CU)		
Mine Baldwin	Fe	Skarn Fe	Mine fermée	NON	3800	18381	6.76		(HG)	#AS, ML (MO, ML, W, ML)	#NI, CR, K (AL, BA, CA, CO, CU, MG)
Mine Haycock	Fe	Skarn Fe	Mine fermée	NON	3500	60000	22.08		BA, BA, ML (LA, ML)	(BA, BA, ML)	(BA)
Sharpe	Cu Mo	Skarn MoCu	Indice	NON	1000	1200	4.42				
Tippan	Mo	Skarn MoCu	Indice	NON	3000	45300	170.72		TH	(TH, ML)	
Kirkham	Mo	Skarn MoCu	Gisement tonnage	NON	3000	48300	170.72		TH	(TH, ML)	
Lac Hanson Extension-Est	U Cu Mo Th	Skarn Uranium	Gîte travaillé	OUI	3700	11500	4.23	Après lac	(TH, U, LI, ML, ZN, ML)	(TH, U, ZN, LI, U, ML)	U, U (AL, CU, TH, AL, ML, LI, ML, ZN, ML)
Gagnon	U Cu Ni Cl	Skarn Uranium	Gîte travaillé	NON	175	12000	4.42		(FE, ML)	(SB, ML)	(CU, ML, SB, ML)
Lac Hanson	U	Skarn Uranium	Gisement tonnage	NON	1200	5000	1.84	Après lac			
Lack Lake	Th U	Skarn Uranium	Gîte travaillé	NON	1300	3500	1.29	Après lac		(AL, ML, AS, ML, CO, ML, U, ML)	(AL, ML)
Clarendon XIB-3	U	Skarn Uranium	Gîte travaillé	NON	1500	65200	23.99	Coulee sur dépôts meubles			
Conducteur Miv-15 (Dussault)	Zn Cu Au Ag	Volcanogène Cu-Zn	Indice	NON	3000	58200	21.42		#MO, NI, ML	NI, ML (PB, ML)	NI, ML (SM, ML)
Tête Nord	Cu Zn Au Ag	Volcanogène Cu-Zn	Gîte travaillé	NON	3100	7200	2.65		FE	(FE, ML)	CE, ML, LA, ML (EU, ML)
Placer Dome Indec 5 et 6	Zn Ag Cu	Volcanogène Cu-Zn	Gîte travaillé	NON	600	1132	0.42				
Indice no 1	Cu Ag Au Zn	Volcanogène Cu-Zn	Indice	NON	1200	5900	2.17				
Des nègres-Bouchette	Zn	Zn marbres	travail	OUI	200	30700	11.30		#ZN, ML +MN (HG)	#ZN, ML (SB, ML, U, ML)	#ZN, ML (HG, SB, ML)
Dans	Zn	Zn marbres	Indice	OUI	4100	47800	17.59		(SM, ML)	#CO, MN, ZN (CR, NI, PB)	(CR)
Prospecteur(Lac Jésusites)	Zn	Zn marbres	Indice	OUI	120	66000	23.92		ZN, TH, ML (U, MN, ML)	(MN, ML)	(MN, ML)
Higginson	Zn	Zn marbres	Indice	OUI	1300	66000	23.92	Autre gîte plus proche	ZN, TH, ML (U, MN, ML)	(MN, ML)	(MN, ML)
Propriété Ski	Zn	Zn marbres	Indice	NON	2500	3752	1.39	Après lac	#U (U, ML, BA, ML)	(BA, U)	(U)
Conception Zinc-94	Zn	Zn marbres	Indice	NON	900	4100	1.51		(CU, ML)		
Teacher	Zn	Zn marbres	Indice	NON	1000	45300	16.67		(HG)	(SB, ML)	
Du Tréfilé	Zn	Zn marbres	Indice	NON	1900	23300	8.57	Après très grand lac	(MG, ML, W, ML)	(CR)	
Gasmara-Nantel	Zn	Zn marbres	Indice	NON	2100	7300	2.69	Après grand lac	(PB, ML)		(W, ML)
Lac-Richer Bouchette	Zn	Zn marbres	Indice	NON	850	5700	2.10		NI	(U, ML)	(U, ML)
Blue Sea	Zn	Zn marbres	Indice	NON	3200	20300	73.80				
Route 107	Zn	Zn marbres	Gîte travaillé	NON	1700	11000	4.05	Après lac	TH (BR)		(CE, ML, TH, ML)
Aumond	Zn	Zn marbres	Gîte travaillé	NON	2300	11000	4.05	Après lac	TH (BR)		(CE, ML, TH, ML)
Zone A	Zn	Zn marbres	Indice	NON	950	5400	1.99				

Note : #, +, () indiquent des anomalies au 99,5^e, 99^e et 97^e centile respectivement pour tous les éléments qui suivent jusqu'au symbole suivant. Les distances sont en mètres, l'accumulation en pixels selon la modélisation du bassin hydrographique.