

Modélisation de cibles de l'environnement secondaire par des techniques de seuils naturels et de régression spatiale multiple



Daniel Lamothe

2010

DOCUMENT PUBLIÉ PAR GÉOLOGIE QUÉBEC

Direction générale de Géologie Québec

Robert Marquis

Direction de l'information géologique

Luc Charbonneau

Édition

Charles Gosselin

Graphisme

André Tremblay

Document accepté pour publication le 4 mai 2010

Résumé

Cette étude comporte deux volets. Le premier volet présente une méthode permettant de réaliser un atlas de zones géochimiques anormales pour tous les types d'échantillons de l'environnement secondaire (lac, ruisseau, till et sol) de la base de données SIGÉOM et couvrant l'ensemble du Québec. Cet atlas constitue un outil utile pour la gestion du territoire dans le cadre du processus de conception des aires protégées, particulièrement dans les zones nordiques peu explorées de la province. Ce volet concerne 11 métaux économiques : Ag, As, Au, Co, Cu, Li, Mo, Ni, U, Y et Zn. À l'aide d'un traitement ModelBuilder, les zones anormales sont définies, pour chaque élément et pour chaque type d'échantillon, par une méthode de seuils naturels à partir de populations associées à des ensembles géologiques considérés relativement homogènes. La favorabilité de ces zones a été calculée à l'aide de la méthode du poids de la preuve.

Le deuxième volet vise plus spécifiquement la définition de cibles de sédiments de lac par une méthode de régression spatiale multiple. Cette méthode est très efficace pour déterminer des cibles d'exploration à partir d'échantillons ne présentant pas, a priori, de valeurs anormales significatives. Elle a été utilisée pour constituer une banque de cibles ponctuelles pour : 1) un groupe de cinq éléments associés aux gîtes monométalliques (Cu, La, Ni, U, Zn); 2) un groupe de deux éléments (Cu, Zn) associés aux gîtes de sulfures massifs volcanogènes (SMV); 3) un groupe de deux éléments (Ni, Cu) associés aux gîtes de Ni-Cu d'origine magmatique; et 4) un groupe de trois éléments (Cu, U, La) associés aux gîtes d'oxydes de fer enrichis en Cu-U-ÉTR. Le présent traitement utilise une banque de 90 844 échantillons dont 43 336 échantillons ont été réanalysés pour 53 éléments par ICPMS en 2008-2009 et à partir desquels un nivellement a été effectué pour les 18 éléments suivants : Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V et Zn.

Les produits livrés en format numérique accompagnant ce document comprennent : 1) Les grilles interpolées de l'environnement secondaire en format ArcGIS, ASCII ou PDF. Ces grilles intègrent les données de lac, ruisseau, till et sol pour 11 éléments (non nivelés) pour l'ensemble du Québec. 2) Les polygones des zones favorables déterminées à partir de l'environnement secondaire pour neuf éléments (Ag, As, Co, Cu, Mo, Ni, U, Y et Zn). Ces polygones sont livrés en format de fichier de forme ArcGIS et en format Google Earth. 3) Un dossier présentant en format ArcGIS les cibles proposées dans ce volet et qui n'était pas jalonnées en date du 31 octobre 2009. 4) Les cibles de régression spatiale multiple regroupées par contexte métallogénique en format de fichier de forme ArcGIS et Google Earth. 5) Les grilles interpolées des teneurs nivelées pour chacun des 18 éléments utilisés dans cette étude en format ArcGIS, ASCII et Google Earth.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
INTRODUCTION	5
Objectifs de l'étude	5
VOLET 1 - ZONES GÉOCHIMIQUES ANOMALES DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE DÉLIMITÉES PAR LA MÉTHODE DES SEUILS NATURELS	5
Méthodologie	7
Définition d'ensembles géologiques homogènes	7
Création d'un traitement ModelBuilder.....	8
Détermination des seuils effectifs de prédictivité.....	11
Création de zones favorables et de cibles pour chaque élément	14
Discussion des résultats.....	15
VOLET 2 - CIBLES PONCTUELLES DE SÉDIMENTS DE LAC DÉFINIES PAR LA MÉTHODE DE RÉGRESSION SPATIALE MULTIPLE	16
Méthodologie	17
Nivellement des éléments utilisés.....	19
Traitement de régression spatiale multiple en fonction de groupes d'éléments choisis	20
Détermination des cibles et validation.....	21
Exemples de résultats pour quelques gîtes connus	23
Conclusion.....	25
RÉFÉRENCES	26
ANNEXE 1	27

INTRODUCTION

Objectifs de l'étude

Le premier des deux volets de cette étude vise à créer un atlas de zones géochimiques anormales pour tous les types d'échantillons de l'environnement secondaire (lac, ruisseau, till et sol) de la base de données SIGÉOM. Ce volet concerne 11 métaux économiques, soit l'argent, l'arsenic, le cobalt, le cuivre, le lithium, le molybdène, le nickel, l'or, l'uranium, l'yttrium et le zinc. Les résultats analytiques utilisés par les divers traitements modélisés sont bruts et n'ont pas été nivelés à cette étape (voir la section « Volet 2 – Cibles ponctuelles de sédiments de lac définies par la méthode de régression spatiale multiple »). Le traitement utilisé pour chaque élément a été conçu pour minimiser les fluctuations des teneurs attribuables aux différentes méthodes analytiques ainsi qu'à l'influence des différents assemblages lithologiques des provinces géologiques. Cet atlas de zones géochimiques anormales constitue un outil utile pour la gestion du territoire dans le cadre de définition d'aires protégées, tout particulièrement dans les zones nordiques peu explorées de la province. Cet atlas concerne aussi l'exploration géologique, en délimitant de nombreux secteurs où le potentiel de découverte de nouveaux gisements est élevé¹.

Le deuxième volet vise plus spécifiquement le concept de potentiel minéral associé au contenu analytique des sédiments de lac. Cette approche est identique à celle adoptée par Trépanier (2006) dans une étude réalisée pour le CONSOREM² et portant sur la définition de domaines géochimiques à partir de ce type de sédiments. Cette étude met en lumière diverses techniques permettant de séparer la composante anormale d'un échantillon, de sa composante régionale caractéristique du bruit de fond. Parmi ces techniques, la méthode de régression spatiale multiple s'est avérée particulièrement efficace pour cibler certaines zones anormales où les échantillons ne présentaient pas, à priori, de teneurs anormales significatives. Cette méthode a donc été utilisée pour constituer une banque de cibles ponctuelles³ pour : 1) un groupe de cinq éléments associés aux gîtes monométalliques (Cu, La, Ni, U, Zn); 2) un groupe de deux éléments (Cu, Zn) associés aux gîtes de sulfures massifs volcanogènes (SMV); 3) un groupe de deux éléments (Ni, Cu) associés aux gîtes de Ni-Cu d'origine magmatique; et 4) un groupe de trois éléments (Cu, U, La) associés aux gîtes d'oxydes de fer enrichis en Cu-U-ÉTR. Les images matricielles des 18 éléments nivelés suivants sont également fournies dans l'étude: Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V et Zn. Une version améliorée incorporant les résultats de réanalyse par ICPMS couvrant le secteur de la Baie-James sera publiée en format Google Earth en 2010.

VOLET 1 – ZONES GÉOCHIMIQUES ANORMALES DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE DÉLIMITÉES PAR LA MÉTHODE DES SEUILS NATURELS

La superficie du territoire québécois couverte par des aires protégées devrait passer de 8,2% à 12% vers 2015⁴. Une grande partie des nouvelles aires proposées par le MDDEP se situera en territoire nordique, où le niveau des connaissances géologiques est relativement faible. Comme la création de ces aires amènera une interdiction de jalonnement et par conséquent de l'activité d'exploration minière, il importe donc d'évaluer le potentiel minéral dans ces régions cibles et ce, avant leur délimitation définitive. À ce titre, les données analytiques de l'environnement secondaire constituent la meilleure source d'information pour évaluer le potentiel minéral de ces régions peu connues.

La base de données SIGÉOM⁵ se compose de presque un demi million d'échantillons de sédiments de l'environnement secondaire comprenant des sédiments de lac, de ruisseau, de till et de sol (tableau 1). Le but de ce premier volet est : 1) de constituer, pour 11 éléments d'intérêt économique (Ag, As, Au, Co, Cu, Li, Mo, Ni, U, Y et Zn), une image provinciale de l'information contenue dans

1- Les zones favorables de l'environnement secondaire générées par le traitement des seuils naturels ont été publiées en novembre 2009 en format ArcGIS dans le GM 64290; elles peuvent aussi être consultées en format Google Earth téléchargeable à l'adresse suivante : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp>. Ces deux produits sont inclus dans les données numériques accompagnant ce document.

2- Consortium de Recherche en Exploration Minérale, Université du Québec à Chicoutimi.

3- Ces cibles sont disponibles en format numérique ArcGIS ou en format Google Earth dans les données numériques accompagnant ce document. Les données Google Earth sont aussi téléchargeables à l'adresse suivante : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp>

4- Déclaration de Jean Charest, La Presse, 15 novembre 2008.

5- Système d'Information Géominière du MRNF.

cette base de données; et 2) de définir des seuils anomaux pour chaque type d'échantillon à partir de populations associées à des ensembles géologiques considérés homogènes.

Tableau 1 – Type et nombre d'échantillons dans la base de données SIGÉOM.

Type	Nombre
Lac	126 368
Ruisseau	230 362
Till	40 931
Sol	76 036
Total	473 697

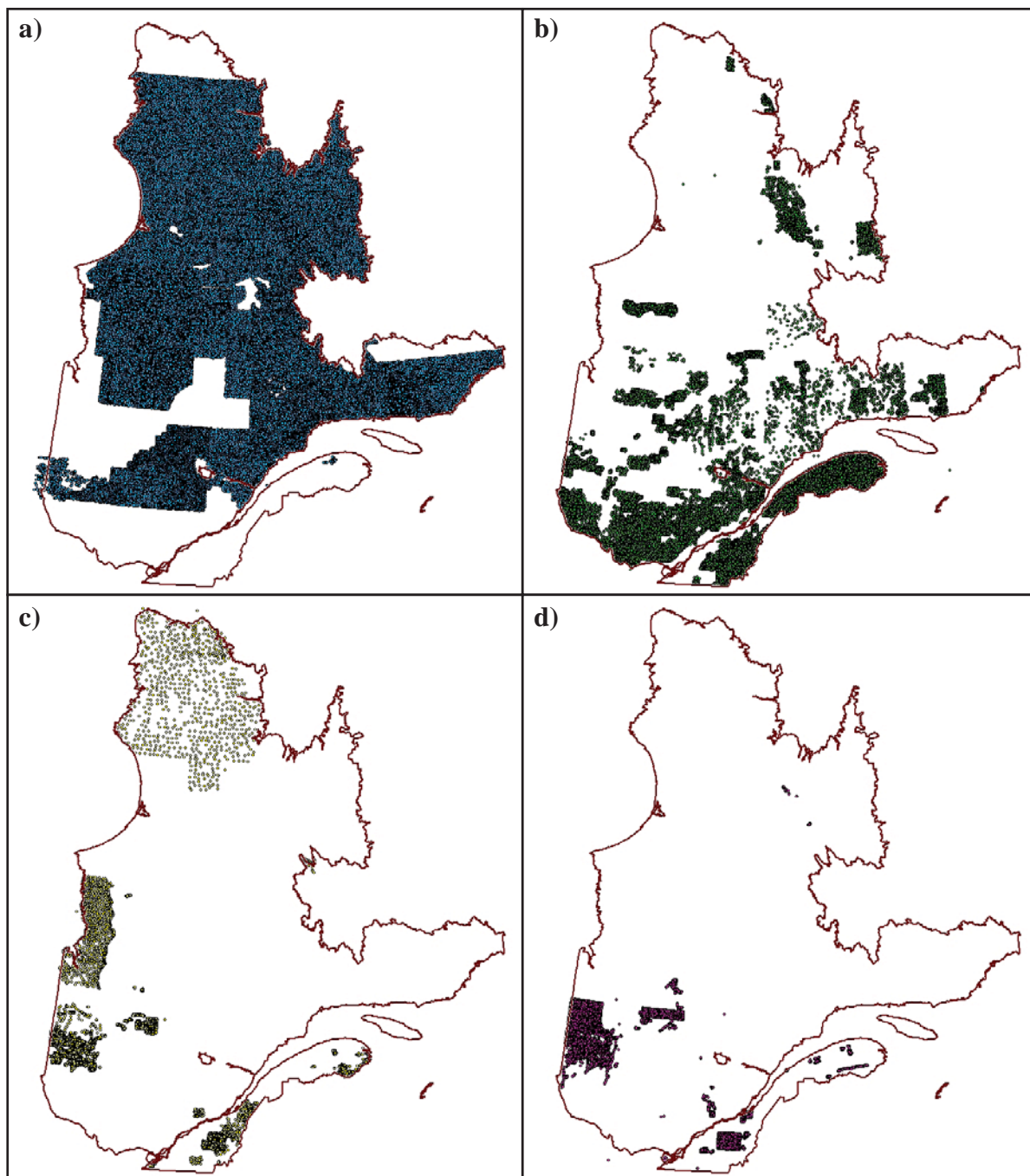


FIGURE 1 – Position des échantillons de : a) sédiments de lac; b) sédiments de ruisseau; c) sédiments de till; et d) sol.

Méthodologie

Le premier volet comprend quatre étapes:

1. Définition d'ensembles géologiques constitués de caractéristiques lithologiques grossièrement homogènes.
2. Création d'une application ModelBuilder pour chaque substance permettant de définir 25 classes de valeurs en fonction de la nature des échantillons, de la méthode analytique et de son environnement lithologique. Le but de cette application est de créer une image de classes de valeurs définies par la méthode des seuils naturels pour les échantillons de lac, de ruisseau, de till et de sol.
3. À partir de l'image matricielle des 25 classes de seuils naturels pour chaque élément, déterminer à l'aide d'une méthode de pondération par le poids de la preuve (*WofE*), le seuil effectif de prédiction pour la présence de gîtes minéralisés contenant l'élément considéré.
4. Conversion des classes prédictives pour chaque élément en polygones vectoriels définissant des zones favorables de l'environnement secondaire (ZFES) pour cet élément.

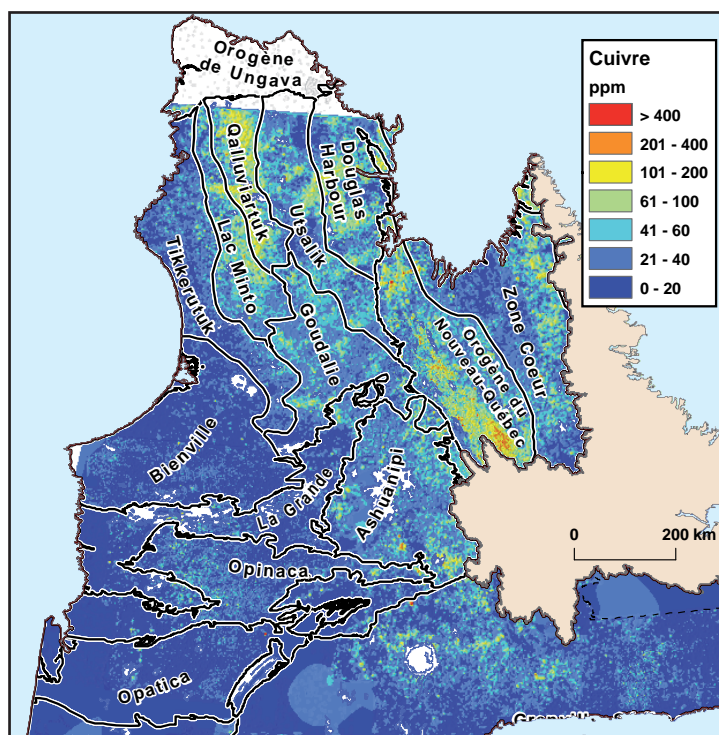


FIGURE 2 – Carte du cuivre dans les sédiments de lac du Grand Nord (modifiée de Lamothe, 2009). L'influence des ensembles géologiques (représentés par les diverses sous-provinces et domaines lithotectoniques) sur la distribution du cuivre y est bien illustrée.

Définition d'ensembles géologiques homogènes

Le but du traitement étant de définir, pour l'ensemble du Québec, les seuils anomaux de chacun des 11 éléments traités, il importe que ces seuils soit établis à partir de populations géochimiques associées à un territoire présentant un contexte lithologique et géologique relativement homogène. En effet, comme le montrent les figures 2 et 3, la signature régionale de la plupart des éléments de l'environnement secondaire est clairement contrôlée par le contexte lithologique sous-jacent. La première étape de ce volet a donc été de définir des blocs géologiques ou lithologiques cohérents représentant des populations géochimiques qu'on peut espérer distinctes. Dans le cas des provinces du Supérieur et de Churchill, les sous-provinces et domaines géologiques majeurs reconnus correspondent par définition à cette notion de bloc géologique cohérent (tableau 2; figure 3). Pour le Grenville,

six assemblages de lithologies parentes ont été constitués⁶. Pour les provinces des Appalaches et des plates-formes paléozoïques, aucune subdivision n'a été créée.

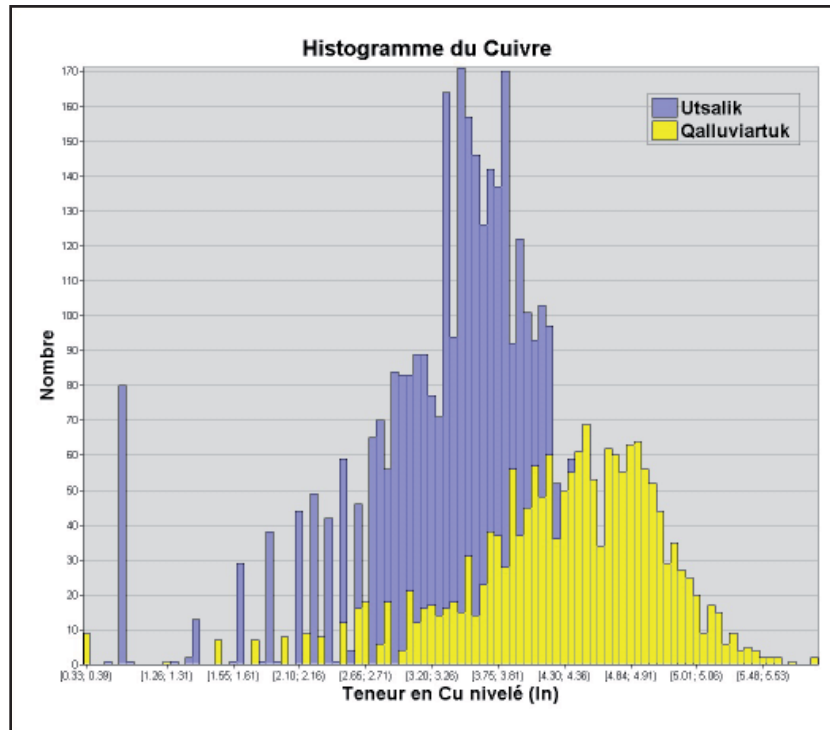


FIGURE 3 - Histogramme des teneurs en cuivre (en log naturel) pour les domaines d'Utsalik et de Qalluviartuk (voir figure 2) montrant que le domaine de Qalluviartuk est relativement enrichi en cuivre.

TABLEAU 2 – Subdivisions géologiques et lithologiques utilisées pour le traitement par seuils naturels.

Province	Ensembles géologiques
Plates-formes paléozoïques	Plates-formes du St-Laurent et de la Baie d'Hudson
Appalaches	non subdivisé
Grenville	Anorthosite et intrusion mafique ou ultramafique – Charnockite – Granitoïdes et gneiss granitiques – Granite tardif et pegmatite – Syénite et monzonite – Sédiments et volcanites
Churchill	Orogène des Torngats – Orogène du Nouveau-Québec – Orogène de l'Ungava – Zone Coeur
Supérieur	Bassins sédimentaires protérozoïques – Abitibi – Ashuanipi – Bienville – Douglas Harbour – Goudalie – La Grande – Lac Minto – Opatica – Opinaca – Qalluviartuk – Tikkerutuk – Utsalik

Création d'un traitement ModelBuilder

Pour la définition des classes de teneurs anormales pour chaque substance, 11 traitements ModelBuilder⁷ personnalisés (un par substance) ont été réalisés. Chaque traitement réalise les opérations suivantes (annexe 1):

1. Extraction en fonction de la méthode analytique des différentes populations d'échantillons de la base de données de l'environnement secondaire (BDES) (provenant de SIGÉOM). Les 473 697 échantillons sont répartis en groupes distincts en fonction des diverses méthodes analytiques (absorption atomique (AA), activation neutronique (AN), émission de plasma, ICPMS, et fluorimétrie) utilisées historiquement pour l'élément traité. Ces sous-populations sont traitées séparément afin de ne pas regrouper des analyses ayant des seuils de détection différents ($CU_{seuilAA} = 1 \text{ ppm}$; $CU_{seuilICPMS} = 10 \text{ ppb}$) ou des méthodes de préparation d'échantillons différentes (CU_{AA} vs CU_{AN}). Les étapes 2 à 14 ci-dessous sont exécutées séquentiellement pour chaque méthode analytique disponible pour l'élément traité.

6- La compilation de Davidson (1998) a été utilisée pour créer le regroupement lithologique. Les volcanites ont été regroupées avec les métasédiments à cause de leur très faible volume.

7- ModelBuilder est une application interne d'ArcGIS permettant la réalisation en mode graphique de programmes utilisant tous les outils de traitement et d'analyse spatiale livrés lors de l'installation de la version 9.x

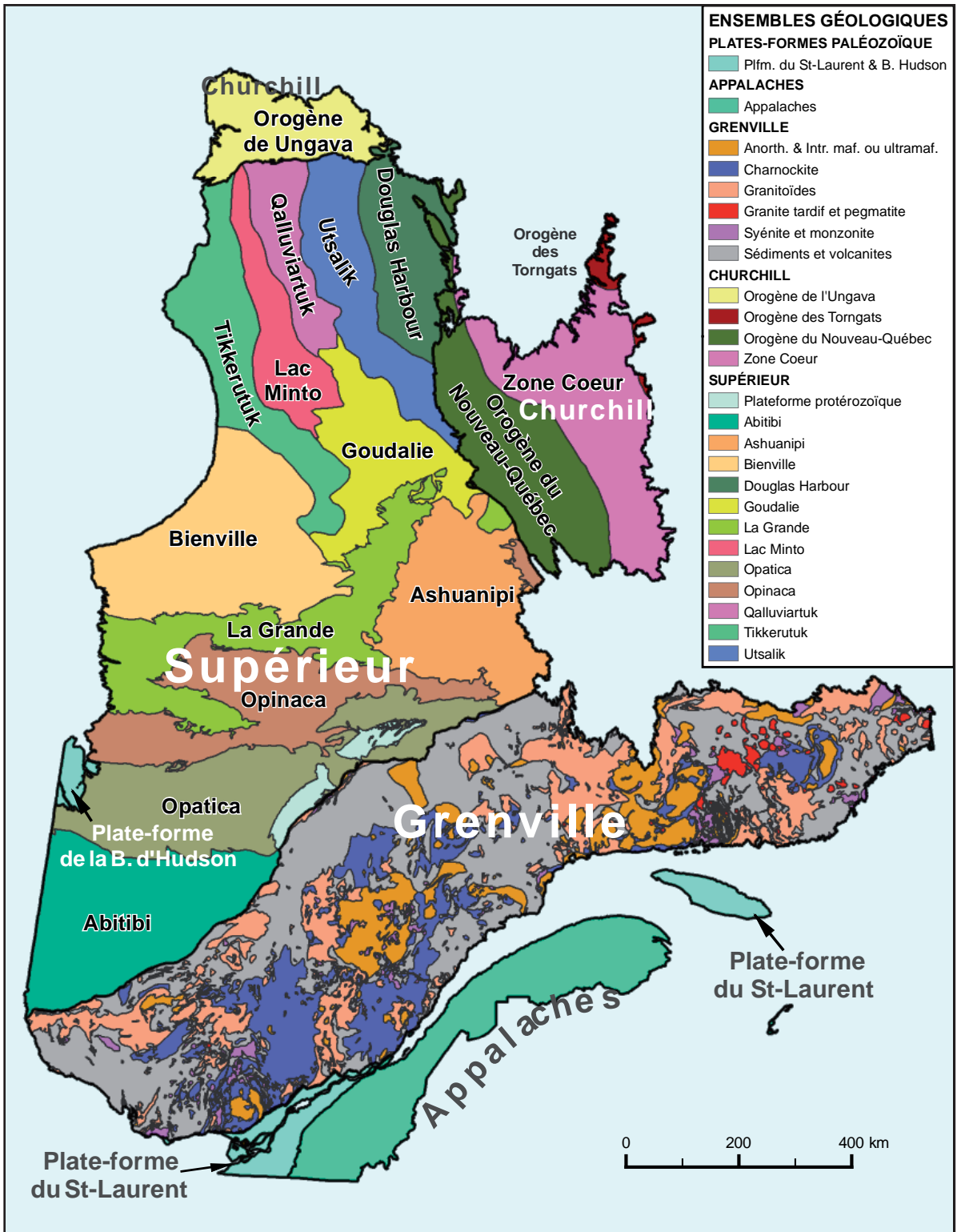


FIGURE 4 - Ensembles géologiques homogènes utilisés pour le traitement ModelBuilder.

2. Séparation de chaque population analytique en 9 sous-types de sédiments, en fonction du type de levé et la nature des échantillons (lac, ruisseau 1, sol 3, till 2, etc.; tableau 3 et annexe 1). La classification utilisée a été optimisée pour les sols et les tills de façon à éviter la création de populations trop petites qu'il serait difficile de briser en 25 classes à l'étape 10.
3. Interpolation par la technique du voisinage naturel des teneurs de chaque sous-types d'échantillons sur l'ensemble du Québec. L'interpolation par voisinage naturel sélectionne les échantillons adjacents au point évalué et applique une pondération proportionnelle à la répartition en surface de ceux-ci. L'application de cette technique est locale et se prête particulièrement bien aux échantillonnages de densité très variable qui caractérisent la base de données (figure 1).
4. Pour éviter que l'interpolation ne propage les teneurs à des distances déraisonnables, un masque de distance variable en fonction de la mobilité de la substance traitée et de la nature de l'échantillon est appliqué autour des points d'échantillonnage de chaque sous-groupe (tableau 4). Les distances pour les échantillons de ruisseau et de lac ont été estimées à partir des travaux de Cameron (1977), une des très rares études portant sur la dispersion d'éléments économiques dans l'environnement secondaire à partir d'un dépôt minéralisé. Les teneurs d'échantillons de sol sont systématiquement limitées à 500 m de distance, soit la taille des cellules composant la grille d'interpolation couvrant le Québec. Finalement, les distances pour les échantillons de till ont arbitrairement été définies comme égales ou inférieures à celles des ruisseaux.
5. Création d'une carte des teneurs géochimiques pour chaque méthode analytique pour l'ensemble du Québec; les images créées pour chaque sous-type de sédiments sont intégrées dans une image unique. En cas de superposition spatiale de pixels de teneurs provenant de plusieurs types de sédiments, la valeur maximale l'emporte.
6. Création de la carte géochimique des teneurs brutes du Québec pour chaque élément traité. L'intégration dans une image unique des teneurs géochimiques interpolées pour toutes les méthodes analytiques est conçue en respectant une hiérarchie de fiabilité des méthodes analytiques⁸ (tableau 5). Ainsi par exemple, tous les pixels provenant de l'image des teneurs géochimiques pour l'ICPMS générée à l'étape 5 se retrouveront sur la carte géochimique finale; en cas d'absence de teneur pour l'ICPMS dans un secteur, ce sont les pixels de la deuxième méthode la plus fiable du tableau 5 pour l'élément traité qui rempliront les vides. Cet exercice complété, les pixels vides seront remplis par la 3^e méthode la plus fiable pour l'élément et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les méthodes analytiques aient été incorporées.
7. Création de la carte des classes centiles des teneurs brutes intégrées pour tous les sous-types de sédiments et toutes les méthodes d'analyse.
8. Transformation des teneurs interpolées masquées générées à l'étape 4 en log naturel.
9. Pour chaque groupe de sédiments défini à l'étape 2, extraction des valeurs transformées au logarithme naturel pour chaque ensemble géologique (figure 4).
10. Bris des teneurs de la population de chaque ensemble géologique en 25 classes par la méthode des seuils naturels (Jenks, 1967). Cette méthode permet de bien définir les regroupements naturels dans une distribution de valeurs en utilisant la présence de variations marquées dans les valeurs comme point de séparation des classes. Contrairement aux méthodes du type centile ou écart-type, les classes ne sont donc pas définies par un choix arbitraire de seuil, mais bien par les variations intrinsèques des teneurs de la population étudiée. Dans le cas présent toutefois, le choix du nombre de classes (25) est arbitraire. La méthode utilisée pour détermination le seuil anomalique parmi ces 25 classes sera présentée à la section suivante « Détermination des seuils effectifs de prédictivité ».
11. Intégration, au sein des 9 sous-types de sédiments définis à l'étape 2, des 25 classes de bris naturels de tous les ensembles géologiques pour ainsi créer 9 mosaïques des seuils naturels pour chacune des méthodes analytiques.
12. Les 9 groupes de sédiments sont regroupés en quatre types principaux (lac, ruisseau, till ou sol). Les deux sous-types de sédiments de ruisseau (non différencié et minéraux lourds) sont intégrés afin de créer une image unique des sédiments de ruisseau. La même opération est

8- La fiabilité des méthodes a été évaluée à partir du seuil de détection de la méthode analytique et par le calcul d'un coefficient de corrélation établi à partir de groupes d'échantillons analysés par deux méthodes ou plus, en assumant que la méthode par ICPMS est au départ la plus fiable.

réalisée pour les trois sous-types de sédiments de sol ainsi que pour les trois groupes de tills (tableau 3), pour créer une image unique des sols et des tills. En cas de superposition spatiale de pixels de classes distinctes de seuils naturels dans chaque sous-type de sédiments, la valeur maximale l'emporte. Quatre cartes des seuils naturels, une par type principal de sédiments, sont créées par intégration des pixels de chaque type en respectant une hiérarchie des méthodes analytiques identique à celle définie à l'étape 6.

13. Pour chaque méthode analytique, création d'une carte multisource des seuils naturels en intégrant les pixels des classes 1 à 25 des quatre types principaux de sédiments; en cas de superposition spatiale de pixels de classes distinctes de seuils naturels, la valeur maximale l'emporte.
14. Création de la carte des seuils naturels du Québec pour l'élément traité: intégration dans une image unique des classes de seuils naturels pour tous les types de sédiments et toutes les méthodes analytiques en respectant une hiérarchie des méthodes analytiques identique à celle définie à l'étape 6 (tableau 5).

TABLEAU 3 – Classification des échantillons analysés en fonction du type de levé et la nature des sédiments.

Sous-type	Description
1	Sédiments de lac
2a	Sédiments de ruisseau non différenciés
2b	Sédiments de ruisseau, minéraux lourds
3a	Sol non différencié
3b	Sol, horizons A à C
3c	Sol, horizon C; minéraux lourds ou argile
4a	Till, fraction fine
4b	Till, fraction lourde
4c	Till, fraction légère

TABLEAU 4 – Distance d'interpolation (en mètres) pour les 11 éléments en fonction du type d'échantillon.

Élément \ Type	Lac	Ruisseau	Sol	Till
Ag	2000	1000	500	1000
As	3000	1000	500	1000
Au	2000	1000	500	1000
Co	7000	5000	500	4000
Cu	7000	5000	500	4000
Li	6000	4000	500	3000
Mo	6000	4000	500	3000
Ni	8000	6000	500	4000
U	8000	7000	500	5000
Y	6000	3000	500	2000
Zn	7000	5000	500	4000

Détermination des seuils effectifs de prédictivité

Chacune des images matricielles par type de sédiments pour chacun des 11 éléments traités réalisée à l'étape 12 se compose de pixels de valeur 1 à 25 déterminés par seuils naturels, représentant des classes de teneurs progressivement croissantes, qui tiennent compte de la méthode analytique et du contexte géologique. Comment déterminer le seuil à partir duquel, le cas échéant, les classes de seuils naturels commencent à être des indicateurs fiables de la présence de gîtes minéralisés environnants?

Pour répondre à cette question, une validation par la méthode du poids de la preuve (Spiegelhalter, 1986; Bonham-Carter *et al.*, 1988; Lamothe, 2009) a été appliquée aux 4 grilles de seuils naturels (lacs, ruisseau, till, sol) pour chacun des 11 éléments traités.

TABLEAU 5 – Ordre d'intégration des différentes méthodes analytiques pour les 11 éléments traités. Les analyses par ICPMS ont toujours préséance sur les autres méthodes analytiques. (Codes des méthodes analytiques: **AA** = absorption atomique; **AN** = activation neutronique; **CO** = colorimétrie; **FL** = fluorimétrie; **FX** = fluorescence par rayon-X; **ICPMS** = *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*; **PL** = émission de plasma; **PY** = pyroanalyse)

Élément \ Méthode	AA	AN	CO	FL	FX	ICP	PL	PY
	Rang	Rang	Rang	Rang	Rang	Rang	Rang	Rang
Ag	2	5	3			1	4	
As	3	2	4			1	5	
Au	4	2				1	5	3
Co	2	4	5			1	3	
Cu	2	4	5		6	1	3	
Li	2	4				1	3	
Mo	2	3	5		6	1	4	
Ni	2	6	5		4	1	3	
U	4	3	6	2		1	6	
Y		4			3	1	2	
Zn	3	4	5		6	1	2	

Le processus peut être illustré en utilisant l'exemple du cuivre dans les sédiments de lac. La méthode du poids de la preuve est une technique d'analyse spatiale qui permet de calculer la probabilité d'association spatiale entre les différentes classes d'un paramètre géologique et la localisation de gîtes connus⁹. Cette probabilité d'association est exprimée par une valeur de contraste (C) plus petite ou égale à zéro si l'association est négative ou nulle. Plus l'association est forte, plus C sera élevé. Il est généralement reconnu qu'une valeur de $C \geq 1,5$ signifie que l'association est probante (prédictive). Dans la présente étude, une valeur de contraste d'au minimum 1,8 a été utilisée pour renforcer la crédibilité des seuils anomaux.

Comme le montre l'exemple du tableau 6 pour le cuivre, la valeur de contraste a été calculée pour chacune des classes de chaque sous-type de sédiments (tableau 3) pour les 11 éléments traités. Lorsque tous les sous-types d'un type de sédiments sont prédictifs, leurs images ont été combinées dans une image unique en préservant les pixels des sous-types les plus prédictifs afin de ne conserver au maximum que 4 ensembles de cibles générées (lac, ruisseau, sol ou till). Après combinaison, un nouveau calcul du contraste a été effectué sur l'image résultante. Ainsi pour le cuivre, les sédiments de ruisseau 2a et 2b (tableau 3), tous deux prédictifs en fonction d'un premier calcul du contraste, ont été combinés en une grille unique en préservant les pixels du fichier avec la meilleure valeur de contraste (figure 6). La même approche a aussi été adoptée pour les sous-types 3a, 3b et 3c pour les sols. Dans le cas des tills, seul l'image de la fraction lourde (sous-type 4b) a été conservée, les deux autres sous-types ayant des valeurs de contraste trop faibles.

L'évaluation de la valeur de contraste par le poids de la preuve a permis de déterminer pour la plupart des éléments traités le type de sédiments possédant des classes de seuils naturels représentant des indicateurs fiables de minéralisation proximale (tableau 7). Seuls deux substances (lithium et or) n'ont pu démontrer une association positive avec des gîtes connus. Dans le cas du lithium, il existe trop peu de gîtes connus (32) pour effectuer une mesure fiable de la prédictivité des classes de seuils naturels. Le cas de l'or est différent alors qu'il existe 3193 gîtes aurifères connus au Québec. Bien que les valeurs de contraste calculées pour les classes de seuils naturels 24 et 25 des échantillons de sédiments de lac soient relativement élevées, elles demeurent sous le seuil de 1,8 fixé au début du traitement (tableau 8). La très faible mobilité de l'or dans l'environnement secondaire (Trépanier, 2001) est probablement responsable de ce résultat. En effet, à moins que l'échantillon de sédiments de lac soit à très faible distance de la minéralisation, il y a peu de chances que les concentrations en or soient au-dessus du seuil de détection pour des méthodes analytiques traditionnelles (absorption atomique, émission au plasma, ...etc). Il est possible aussi que plusieurs teneurs élevées en or dans les divers types de sédiments soient en réalité un effet pépite sans lien avec une minéralisation, ce qui nuirait au calcul de la valeur de contraste.

Après évaluation par le poids de la preuve, les pixels des classes prédictives déterminées pour les 24 ensembles (tableau 7), comprenant tous les types de sédiments jugés prédictifs parmi les 11 substances, ont été convertis en polygones.

9- Le lecteur est référé à Lamothe (2009) pour une description plus approfondie de la méthode.

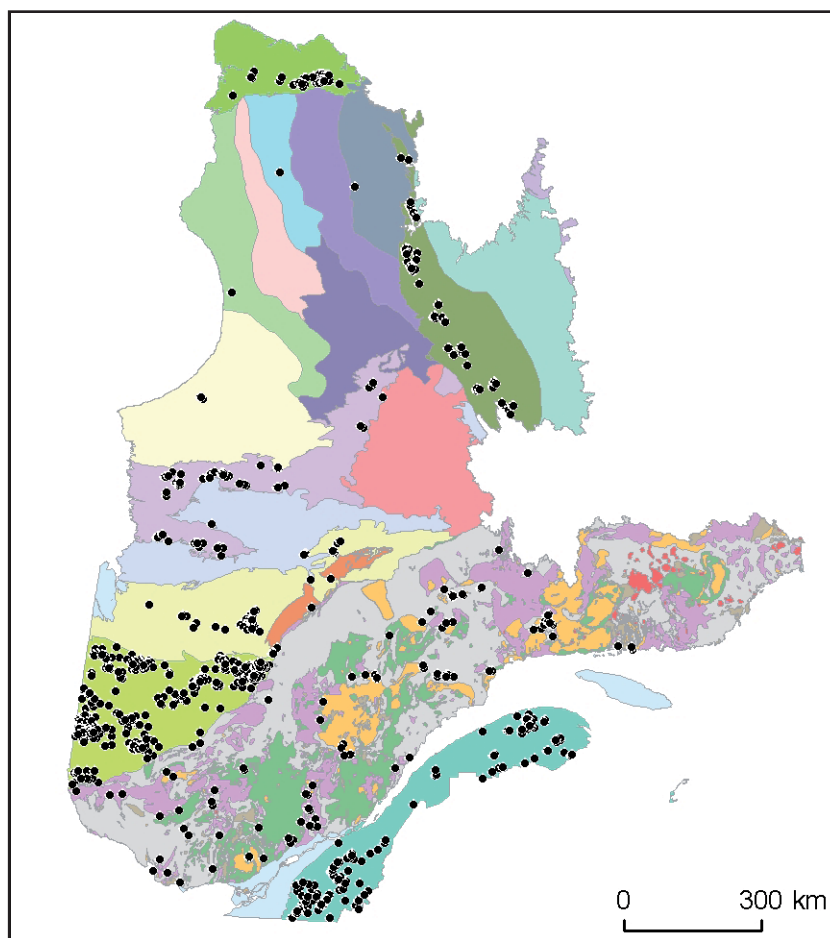


FIGURE 5 – Localisation des gîtes de cuivre utilisés pour déterminer le seuil effectif de prédictivité des classes de seuils naturels des grilles de lac, ruisseau, till et sol pour le cuivre dans l’ensemble du Québec. Cet ensemble de gîtes ne comprend pas les indices qui présentent généralement une trace très modérée dans l’environnement secondaire.

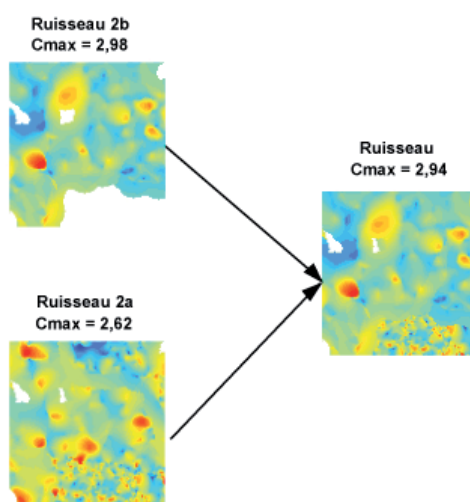


FIGURE 6 – Combinaison des pixels des deux sous-types prédictifs de ruisseau dans une grille unique. Les pixels du sous-type le plus prédictif (ruisseau 2b) sont tous conservés lors de l’intégration.

TABLEAU 6 – Méthode du poids de la preuve: calcul de la valeur de contraste pour la grille des seuils naturels du cuivre dans les 4 types de sédiments. Lorsque tous les sous-types d'un type de sédiments sont prédictifs, les grilles des sous-types ont été combinées dans une grille unique en préservant les pixels des sous-types les plus prédictifs pour minimiser le nombre de types de cibles générées. Ainsi, les grilles des deux sous-types de ruisseau (2a et 2b, tableau 3), tous deux prédictifs, ont été regroupées dans une seule grille en préservant en priorité les cellules du type 2b, dont la prédictivité est la plus forte. La même procédure d'intégration prioritaire a été appliquée aux 3 grilles de sols et de tills. Les grilles qui ne présentent pas de prédictivité suffisante ne sont pas considérées pour la genèse de cibles. Les classes en jaune possèdent des valeurs de contraste suffisantes ($C \geq 1,8$) pour être considérées comme prédictives pour la présence de gîtes de cuivre.

Lac																									
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Aire_km ²	1885	5501	11013	17155	25513	35452	45910	56642	67884	77303	84804	89338	89729	86834	81170	73463	62974	51862	41287	31856	22546	15227	8586	3817	1428
No_Points	0	0	6	19	10	7	8	14	17	16	16	29	36	49	38	24	39	31	39	35	25	20	14	6	5
Contraste			0,17	0,90	-0,17	-0,87	-1,00	-0,65	-0,64	-0,84	-0,94	-0,38	-0,15	0,22	0,01	-0,37	0,31	0,27	0,76	0,91	0,91	1,07	1,28	1,23	2,04
Ruisseau																									
Aire_km ²	14076	7198	9950	13258	17062	21099	25151	28696	30789	31015	30679	28425	25468	22501	20197	17223	13643	10831	7764	5741	3876	2450	1497	1029	483
No_Points	4	2	14	16	25	18	34	30	28	34	57	51	39	32	33	21	37	24	31	17	26	19	15	30	10
Contraste	-1,80	-1,80	-0,17	-0,33	-0,13	-0,69	-0,22	-0,49	-0,64	-0,44	0,12	0,09	-0,09	-0,16	-0,02	-0,32	0,52	0,30	0,91	0,59	1,43	1,57	1,79	2,94	2,56
Sol																									
Aire_km ²	33	72	110	170	211	238	262	328	342	377	385	394	394	406	358	311	290	280	262	212	139	118	82	51	18
No_Points	1	0	0	2	0	6	3	2	3	7	5	3	5	4	6	4	2	0	2	7	4	7	1	3	6
Contraste	0,79			-0,20		0,62	-0,23	-0,89	-0,51	0,29	-0,10	-0,66	-0,12	-0,39	0,18	-0,11	-0,76		-0,65	0,91	0,74	1,55	-0,16	1,51	3,60
Till (fraction lourde)																									
Aire_km ²	217	655	1095	1341	1684	1841	2090	2406	2468	2509	2374	2289	2114	1809	1557	1410	975	734	580	431	302	237	168	108	58
No_Points	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	1	1	2	7	5	6	2	1	1	1	1	1	0	1	1
Contraste							-0,97	-1,12	-0,43	-0,01	-1,11	-1,07	-0,26	1,31	1,07	1,39	0,55	0,12	0,36	0,67	1,03	1,27		2,07	2,71

TABLEAU 7 – Types de sédiments dont les classes supérieures des seuils naturels ont été évaluées comme des indicateurs fiables de minéralisation proximale pour tous les éléments traités. Au total, 24 ensembles ont démontré leur capacité de prédictivité et ont été convertis en polygones.

Élément	Lac	Ruisseau	Sol	Till
Ag	√	√	√	√
As	√	√		
Au				
Co	√	√		
Cu	√	√	√	√
Li				
Mo	√	√		
Ni	√	√		
U	√	√		
Y	√	√		
Zn	√	√	√	√

TABLEAU 8 – Valeurs de contraste pour les classes de seuils naturels pour l'or dans les sédiments de lac et de ruisseau. Même si les classes les plus élevées sont nettement anormales, leur valeur de contraste reste sous la limite de 1,8 fixé comme seuil effectif de prédictivité.

Lac																									
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Aire_km ²	289925	36297	32698	37649	90428	40625	41350	38262	34466	29703	24502	19295	14601	19653	27088	12188	10516	7724	4421	3015	1962	1241		1277	282
No_Points	150	18	14	18	121	21	20	36	35	21	17	19	13	32	22	17	17	9	4	1	0	3		5	1
Contraste	-0,53	-0,43	-0,58	-0,47	0,68	-0,39	-0,46	0,24	0,32	-0,06	-0,08	0,28	0,18	0,81	0,08	0,63	0,78	0,45	0,19	-0,82		1,18		1,66	1,56
Ruisseau																									
Aire_km ²	22119	3298	2264	1780	17294	2776	1869	7391	1720	1755	1887	1099	911	875	738	686	476	412	397	309	275	938	166	131	95
No_Points	84	10	7	7	53	22	13	9	11	9	12	13	14	9	10	17	4	5	10	7	5	9	2	1	2
Contraste	-0,33	-0,48	-0,46	-0,21	-0,56	0,53	0,38	-1,46	0,29	0,07	0,29	0,93	1,20	0,78	1,06	1,70	0,57	0,94	1,70	1,58	1,35	0,71	0,93	0,46	1,50

Création de zones favorables et de cibles pour chaque élément

La procédure d'intégration utilisée aux étapes 12 et 13 (annexe 1 et section « Création d'un traitement ModelBuilder ») conserve les cellules de valeur maximale des classes de seuils naturels lorsque plusieurs types de sédiments sont combinés. Toutefois, il est possible que certains pixels de classe élevée comprennent malgré tout des teneurs faibles pour l'élément évalué. En effet, si la population traitée comprend peu d'échantillons dans un ensemble géologique (par exemple, une centaine d'échantillons de sol dans l'Opatoca), il est très possible que la classe la plus élevée dans la distribution des valeurs soit composée, malgré tout, des teneurs relativement basses. Une zone de sol de classe 25 dans l'Opatoca pourrait être ainsi moins pertinente qu'une zone de classe 25 en Abitibi établie à partir d'une population de plusieurs milliers d'échantillons et qui serait susceptible de représenter des teneurs significativement plus élevées.

La dernière étape du traitement consiste donc à ne conserver, pour chacun des 24 ensembles créés (tableau 7), que les polygones (convertis à partir des pixels favorables) dont les teneurs maximales pour l'élément considéré représentent clairement une valeur anormale. La détermination du seuil au-delà duquel les teneurs sont considérées anormales est établi à l'aide d'un diagramme quantile-quantile appliqué aux teneurs maximales enregistrées dans les polygones de chacun des 24 ensembles. La figure 7 présente les exemples de quatre diagrammes quantile-quantile représentant les teneurs maximales des polygones des ensembles de lac, ruisseau, sol et till pour le cuivre. Dans chaque cas, il est possible de définir un seuil (indiqué par la teneur en Cu) à partir duquel un changement significatif de la pente s'opère. Les polygones dont les teneurs maximales se situent au-dessus de ce seuil ont été conservés et constituent les cibles fournies dans les données numériques de ce rapport.

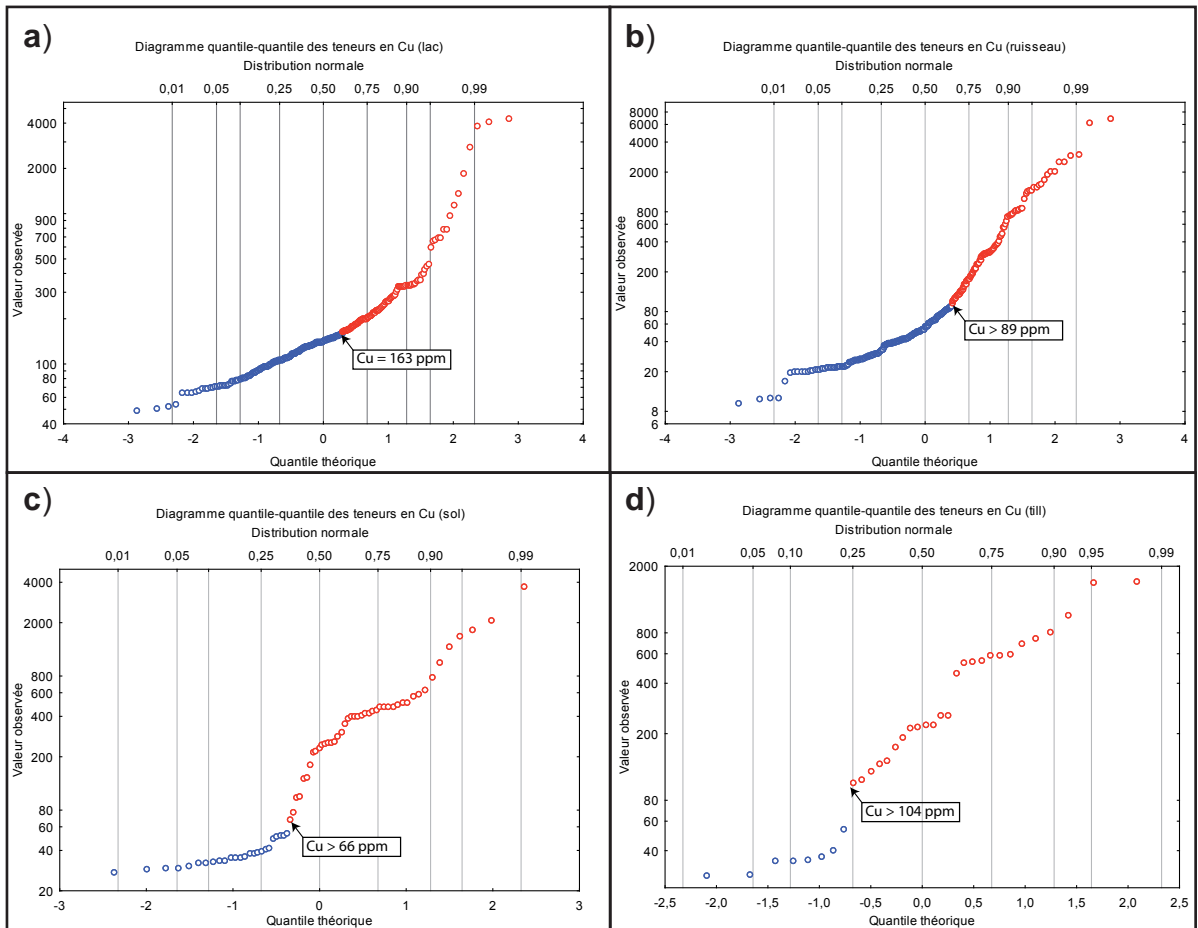


FIGURE 7 – Détermination du seuil anormal en cuivre des zones favorables pour les 4 types de sédiments. Dans chaque cas, un diagramme quantile-quantile est réalisé en utilisant la teneur maximale en cuivre mesurée sous chaque polygone d'un ensemble de zones favorables. Les portions rectilignes faiblement inclinées (en bleu) au bas de chaque diagramme indiquent une distribution normale des teneurs (entre 0 et 163 ppm pour les échantillons de lac, par exemple). Dans chaque cas, un bris de pente au niveau de la teneur indiquée marque le seuil anormal au-dessus duquel les polygones ont été conservés.

Discussion des résultats

La méthode utilisée dans cette première section permet de définir des zones statistiquement anormales en fonction de la nature des sédiments, des grandes subdivisions géologiques et de la méthode analytique. Certains points doivent être soulignés :

1. Cette approche vise d'abord à permettre une gestion du territoire, notamment lors de la création d'aires protégées, basée sur la définition de zones favorables pour un groupe de 9 substances réparties sur l'ensemble du territoire québécois. Dans le contexte de l'exploration minière, l'approche présentée dans la deuxième section est plus appropriée pour certaines de ces substances (Cu, Ni, U et Zn).

2. Les modules Modelbuilder réalisés pour cette étude permettent la réalisation d'images montrant la distribution de substances dans l'environnement secondaire pour le Québec en fonction de leur teneur brute, des classes centiles ainsi qu'en fonction d'un regroupement en 25 classes par la méthode des seuils naturels. Ces modules peuvent aisément être adaptés pour d'autres éléments au besoin.
3. Le traitement segmente l'ensemble des échantillons sur la base de la méthode analytique, entre autres facteurs. En l'absence de nivellement entre les différents types de levés, cette approche repose sur le postulat que les différences analytiques seront relativement faibles pour une même méthode. Toutefois, pour des teneurs peu élevées pour une substance donnée, il est fort possible que ces différences analytiques soient davantage accentuées, ce qu'un examen des images des teneurs brutes ou de classes centiles permet de constater, notamment dans le cas du cuivre (voir l'image PDF des classes centiles du cuivre dans les produits numériques livrés hors-texte). Dans le cas de teneurs plutôt élevées, les différences sont généralement moins marquées.
4. Le choix de prioriser une méthode analytique, notamment l'ICPMS sur les autres méthodes, a des conséquences sur l'intégration de certaines données par rapport à d'autres. Ainsi, dans les secteurs de La Tuque et de Baie-Comeau, il y a superposition entre des échantillons de sédiments de lac réanalysés par ICPMS et des échantillons de sédiments de ruisseau analysés par absorption atomique ou émission de plasma. Comme ces deux dernières méthodes sont moins précises que l'ICPMS et donc « moins prioritaires », seules les données de sédiments de lac sont intégrées à l'image finale pour la plupart des substances sauf toutefois pour l'Ag, l'As et l'Au dont les distances d'interpolation pour les lacs sont plus limitées, ce qui permet l'insertion interstitielles des données de sédiments de ruisseau.
5. La présence de zones favorables en métaux de base de grande étendue, par exemple, les zones riches en nickel ou en zinc dans la Fosse du Labrador, est probablement le reflet d'une signature lithologique respectivement magmatique ou sédimentaire. Ces zones ne sont donc pas forcément liées à des minéralisations importantes pour ces éléments. Toutefois, la superposition de cibles de régression spatiale (voir section suivante) en nickel et en zinc confirme le potentiel économique élevé de ce secteur.

VOLET 2 – CIBLES PONCTUELLES DE SÉDIMENTS DE LAC DÉFINIES PAR LA MÉTHODE DE RÉGRESSION SPATIALE MULTIPLE

La fonctionnalité de la méthode des seuils naturels repose sur l'hypothèse que toute minéralisation laisse dans l'environnement secondaire un enrichissement significatif en éléments signalant sa présence. Cependant, si cet enrichissement est local et de faible importance, la méthode des seuils naturels ne permettra pas de cibler ces minéralisations. La méthode de régression spatiale multiple permettra de définir le bruit local et d'en étudier les variations significatives.

On peut considérer que la teneur de chaque échantillon de sédiments de lac se compose potentiellement de deux fractions : une composante géochimique d'origine lithologique ou environnementale, et une composante anormale provenant de minéralisations proximales. L'objectif du traitement présenté ici est de séparer ces deux composantes, non pas au niveau des populations d'échantillons, mais plutôt au niveau de la teneur de chaque échantillon.

Rappelons que le traitement par régression spatiale de Trépanier (2006) a été réalisé à partir d'une banque analytique de 75 610 échantillons nivelée sur la base du levé du projet Grand Nord réalisé en 1997 et analysé pour 44 éléments par la technique d'émission de plasma ou activation neutronique (Trépanier, 2007). Le présent traitement utilise une banque de 90 844 échantillons dont 43 336 échantillons ont été réanalysés pour 53 éléments par ICPMS¹⁰ en 2008-2009 et à partir desquels le nivellement a été effectué.

¹⁰- *Inductively coupled plasma mass spectrometry.*

Méthodologie

La méthode de régression spatiale multiple a été développée par Sylvain Trépanier (2006) à partir du concept de « Geographically Weighted Regression » de Fotheringham *et al.* (2002). Le principe de base repose sur le concept qu'il est possible d'évaluer la teneur d'un élément dans un échantillon donné à partir des autres éléments composant les échantillons situés dans le voisinage immédiat. L'objectif est de prédire la teneur pour un élément dans un échantillon en présumant que la contribution lithologique environnante est entièrement responsable de cette teneur. Si la teneur mesurée dans l'échantillon pour cet élément est significativement supérieure à la teneur prédite, cette **valeur résiduelle**¹¹ pourrait s'expliquer par la présence d'une minéralisation. Cette prédiction est calculée par une équation de régression spatiale multiple qui utilise comme variable explicative¹² un certain nombre d'éléments analysés dans les échantillons et comme variable dépendante l'élément recherché. L'équation de régression est une formule mathématique qui pourrait ressembler à ceci:

$$Cu_{\text{prédit}} = 0,7 * Al + 0,1 * Ba - 0,2 * Ca + 1,08 * Ce + 0,07 * Co - 0,2 * Cr \dots + 2,4$$

Dans cette équation, la teneur en cuivre est prédite à l'aide d'éléments autres que le cuivre, généralement représentatifs de l'apport lithologique dans l'environnement proximal. Chaque élément est associé à un coefficient de régression représentant la contribution effective de cet élément dans la prédiction. Si la corrélation entre l'élément recherché et la variable explicative est forte, le coefficient sera positif et élevé; à l'inverse, ce dernier sera négatif. La constante à la fin de l'équation représente la valeur anticipée de l'élément recherché si toutes les variables explicatives sont nulles. Les éléments choisis pour définir la contribution lithologique avoisinante sont : Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V et Zn. Ces éléments ont été choisis parce qu'ils sont présents dans un grand nombre de levés et que leur qualité analytique est bonne.

La régression spatiale multiple permet de déterminer les signaux géochimiques régionaux spécifiques à chaque échantillon. Le traitement de régression spatiale¹³ utilise une grille de points espacés de 20 km et calcule une série de coefficients de régression pour 17 éléments parmi les 18 listés plus haut (l'élément recherché est bien entendu soustrait du traitement). Ces coefficients sont établis à partir de la population d'échantillons situés dans un rayon de 20 km (figure 9, tableau 9) pour éviter les variations de teneur reliées au contrôle structural¹⁴. Dans une deuxième étape, le calcul des valeurs prédites de l'élément recherché et de la résiduelle pour chaque échantillon est effectué en utilisant les valeurs de coefficient du plus proche point de régression de la grille. Un minimum de 20 échantillons est nécessaire pour effectuer le traitement¹⁵. Pour éviter que de grandes variations de valeurs mesurées n'entraînent des erreurs de calculs de coefficients, les teneurs ont été converties en logarithmes naturels pour toutes les variables utilisées.

Les contraintes de traitement de cette méthode sont les suivantes:

1. Les échantillons doivent tous être du même type (lac, ruisseau, till ou sol). Seuls les échantillons de lac sont traités dans le présent document (figure 1a), de sorte que l'Orogène de l'Ungava, l'Abitibi, le sud du Grenville, la plate-forme du St-Laurent et les Appalaches ne sont pas couverts par cette approche.
2. Les échantillons de sédiments de lac doivent avoir été analysés pour les 18 éléments utilisés dans ce travail. Sur un total de 118 610 échantillons, seuls 90 844 ont satisfait à cette condition (figure 10).
3. Les teneurs des 18 éléments utilisés dans le calcul de régression spatiale doivent être nivelées entre les divers projets d'échantillonnage (et/ou blocs d'échantillons réanalysés) pour éviter les écarts dus aux différentes méthodes analytiques ainsi qu'aux inégalités dans les seuils de détection.
4. Un minimum de 20 échantillons autour de chaque point de référence de la grille de régression (20 km x 20 km) est nécessaire pour réaliser le calcul des coefficients de régression.

11- En statistique, la différence entre une valeur prédite et une valeur mesurée est une **résiduelle**.

12- Variable utilisée pour prédire les valeurs d'une autre variable (dépendante) dans un modèle. On l'appelle aussi **variable prédictive** dans un modèle de régression parce que la valeur de cette variable nous permet de savoir avec une certaine précision la valeur de la variable dépendante.

13- Le calcul est effectué par un module .NET développé par Sylvain Trépanier pour le CONSOREM

14- Pour que le calcul de la contribution lithologique soit réaliste, seuls les échantillons à l'intérieur d'un périmètre raisonnable devraient être considérés. Quelques modélisations à l'aide de variogrammes expérimentaux développés par Trépanier (2006) montrent que dans le levé du Grand Nord, l'influence de l'orientation structurale des lithologies sur les teneurs d'un échantillon de sédiment de lac ne commence à se manifester qu'au-delà de 45 km (figure 8), d'où le rayon de 20 km utilisé pour la sélection des échantillons.

15- Ce choix a pour conséquence que les échantillons situés à la périphérie du groupe de 118 610 échantillons de la figure 10a ne pourront être traités.

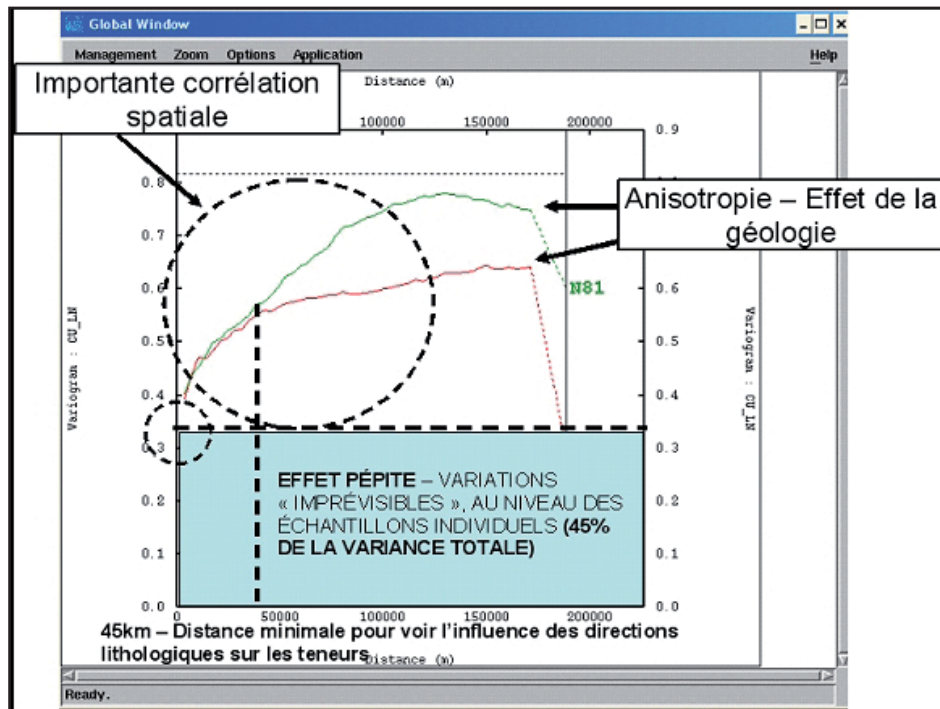


FIGURE 8 – Variogramme expérimental anisotrope pour le cuivre dans le levé de sédiments de lac du Grand Nord (Trépanier, 2006).

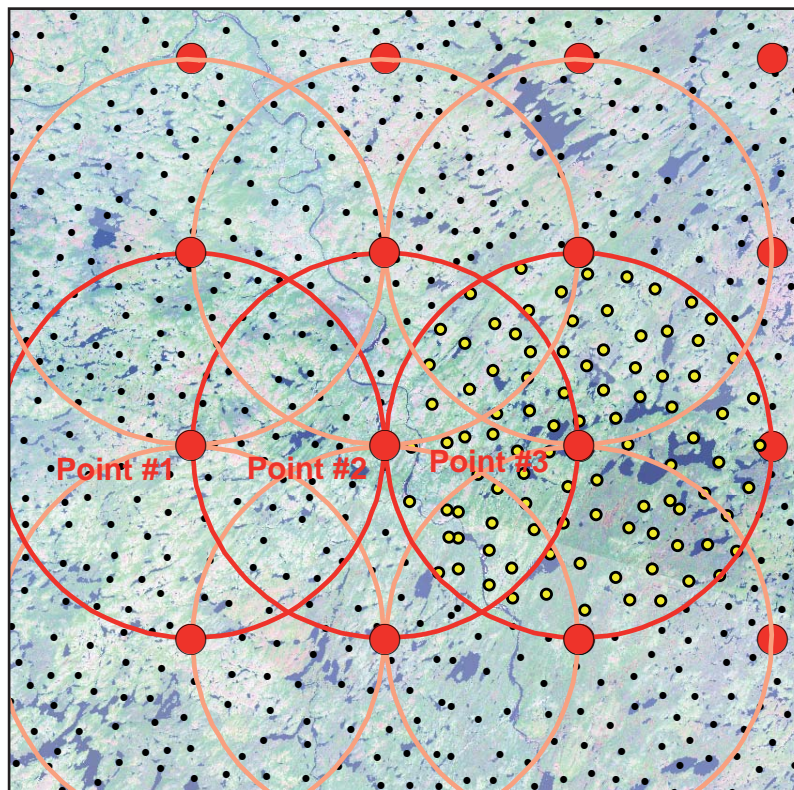


FIGURE 9 – Exemple de calcul des coefficients de régression spatiale. Dans une première étape, une grille de points de référence espacés de 20 km est créée. Les échantillons dans un rayon de 20 km autour de chaque point de référence (point #3 en l'occurrence) sont sélectionnés et le coefficient pour chaque variable explicative est calculé à partir de cette population.

TABLEAU 9 – Coefficients de régression spatiale des variables explicatives du point #3 (figure 9) pour le calcul de la valeur prédite du cuivre. Le traitement utilise 99 échantillons situés dans un rayon de 20 km autour du point. La variable R2 est une statistique décrivant la performance du modèle (83,7 % de la variation en cuivre dans les échantillons autour du point #3 est prédite par le modèle). La variable B correspond à la constante d'erreur du modèle, soit la valeur qu'aurait le cuivre si toutes les variables explicatives étaient nulles. Ces coefficients serviront aux échantillons les plus près de ce point de référence dans un rayon de 20 km pour le calcul de la valeur prédite en cuivre.

R2	AL_NIV	BA_NIV	CA_NIV	CE_NIV	CO_NIV	CR_NIV	FE_NIV	K_NIV	LA_NIV
0,83721	0,27692	0,00964	0,16965	-0,28440	-0,40742	-0,22522	-0,06527	-0,38453	0,45207
MG_NIV	MN_NIV	NI_NIV	P_NIV	TI_NIV	U_NIV	V_NIV	ZN_NIV	B	N
0,08091	-0,00682	0,85661	-0,06151	0,21140	0,03863	0,15325	0,15230	-1,49455	99,00000

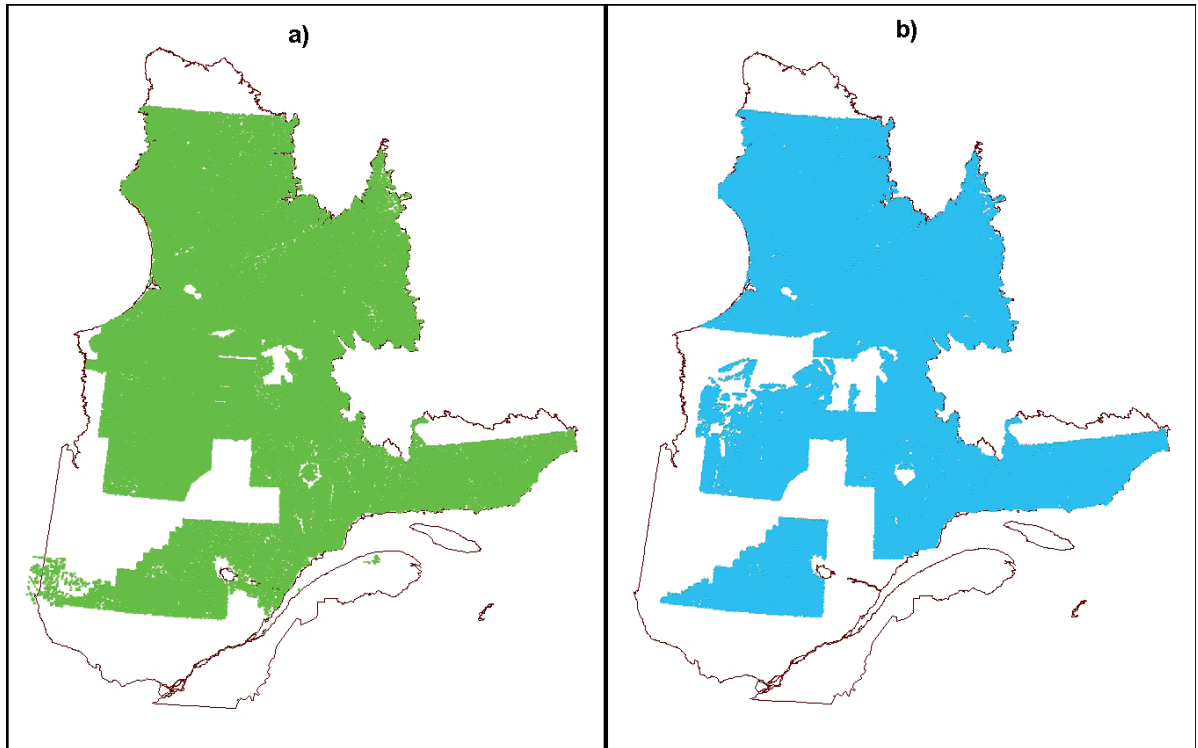


FIGURE 10 – Levés de sédiments de lac : **a)** couverture des levés réalisés entre 1957 et 2008 (118 610 échantillons); **b)** zone couverte par les échantillons qui ont été analysés pour les 18 éléments utilisées et traités avec succès par la méthode de régression spatiale (90 844 échantillons).

Nivellement des éléments utilisés

Le nivellement pour chacun des 18 éléments a été réalisé à l'aide du module GSL développé par Sylvain Trépanier en langage Visual Basic.NET et la méthode est basée sur les travaux de Daneshfar et Cameron (1998). Dans une première phase, les échantillons de sédiments de lac sont regroupés par levé. Un levé parmi tous ceux disponibles est choisi comme levé de référence (généralement le levé le plus récent) et les teneurs des autres levés sont ajustées (nivelées) sur la base de ce levé. Lors d'une étude similaire réalisée par le CONSOREM en 2005 (Trépanier, 2007), c'est le levé de sédiments de lac du Grand Nord qui a servi de levé de référence. Dans la présente étude, un ensemble d'environ 50 000 échantillons de sédiments de lac, provenant du Churchill et du Grenville, réanalysés par ICPMS par le MRNF en 2008-2009, ont été regroupés en un projet unique et utilisés comme ensemble de référence pour le nivellement des autres projets. Outre ce choix de levé référentiel, nos travaux diffèrent de ceux du CONSOREM par l'intégration à la base de données de 4 357 nouveaux échantillons prélevés en 2008 à l'est de Val d'Or (Labbé, 2009) ainsi que 336 nouveaux échantillons prélevés en 2008 dans les secteurs des lacs Amariton (22F/16) et Georgette (22G/13).

La procédure de nivellement respecte intégralement l'approche décrite par Trépanier (2007). Le lecteur est invité à consulter ce document pour une description complète de la procédure. Il explique notamment pourquoi certains éléments (Ag, Au,...etc) ne peuvent être nivelés par cette technique. Mentionnons, finalement que les teneurs ont été converties en logarithme naturel (teneurs Ln) avant le nivellement.

Traitement de régression spatiale multiple en fonction de groupes d'éléments choisis

La méthode générale de régression spatiale multiple permet d'évaluer le degré d'anomalie de la teneur pour un élément dans un échantillon donné. Dans la présente étude, tout comme dans celle de Trépanier (2007), 5 éléments (Cu, La, Ni, U et Zn) ont été testés par régression spatiale. Si un échantillon est prélevé à proximité d'un gîte minéralisé monoélémentaire contenant un de ces 5 éléments, celui-ci devrait théoriquement être enrichi pour cet élément par rapport à la contribution lithologique environnante.

Qu'en est-il toutefois dans les cas très courants de gîtes polymétalliques tels les sulfures massifs volcanogènes (SMV), les gîtes de Ni-Cu magmatique ou encore les gîtes de Cu-U-ÉTR¹⁶ de type IOCG¹⁷? Outre l'élément traité par la méthode générale, l'enrichissement d'un ou plusieurs autres éléments dans l'échantillon aura pour conséquence d'augmenter la valeur prédite de l'élément et, en corollaire, de diminuer son anomalie résiduelle. En soustrayant parmi les variables explicatives tous les éléments enrichis associés à certains types de gîtes, il est possible de calibrer le traitement pour rehausser le signal géochimique de certains éléments dans des contextes métallogéniques spécifiques.

Quatre différentes familles de contexte métallogénique ont été sélectionnées dans cette étude¹⁸, soit (tableau 10) :

1. les gîtes monoélémentaires
2. les gîtes de sulfures massifs volcanogènes (SMV);
3. les gîtes de Ni-Cu magmatique;
4. les gîtes de Cu-La-U de type IOCG.

Parmi les 18 éléments nivelés disponibles, certains éléments susceptibles d'être localement enrichis près d'une minéralisation ont donc été soustraits du traitement pour rehausser le signal géochimique d'un élément dans le cadre d'un contexte métallogénique spécifique (tableau 11). Ainsi par exemple les éléments Cu, Fe et Zn, dans le contexte des gîtes de type SMV où ces trois éléments sont susceptibles d'être simultanément enrichis dans l'échantillon traité, ont été soustraits du traitement calibré pour l'environnement SMV lors du calcul de la valeur résiduelle du Cu et du Zn.

TABLEAU 10 – Variables explicatives utilisées pour chaque élément traité par régression spatiale. Les éléments sont regroupés en quatre familles de contexte métallogénique.

Élément	Variables explicatives	Variables soustraites
Gîtes monoélémentaires		
Cu	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V, Zn	Cu
La	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V, Zn	La
Ni	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, P, Ti, U, V, Zn	Ni
U	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V, Zn	U
Zn	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V	Zn
Gîtes de Cu-Zn de type SMV		
Cu	Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Th, Ti, U, V	Cu, Fe, Zn
Zn		
Gîtes de Ni-Cu magmatique		
Ni	Al, Ba, Ca, Ce, K, La, Mn, P, Ti, U, V, Zn	Ni, Cu, Cr, Co, Fe, Mg
Cu		
Gîtes de Cu-U-ÉTR de type IOCG		
Cu	Al, Ba, Ca, Co, Cr, Mg, Mn, Ni, P, Ti, V, Zn	Ce, Cu, Fe, La, U
La		
U		

16- Abréviation de Éléments des terres rares

17- *Iron Oxides Copper Gold* : type de gisement qui regroupe des gîtes majeurs de fer, de cuivre, d'or et parfois d'uranium. Caractérisés par l'abondance en terres rares, phosphore, fluor et oxydes de fer.

18- Ces familles sont identiques à celles établies dans l'étude de Trépanier (2006).

Détermination des cibles et validation

Un des très importants avantages de cette méthode est d'éliminer les variations environnementales qui influencent la signature géochimique de certains éléments. En effet, Kerr et Davenport (1990) et Trépanier (2006) ont démontré que des variables comme la profondeur des lacs ou la perte au feu montrent une corrélation directe avec les teneurs en Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Ag, Mn, As, Mo et Fe (figures 11a et 11b). Si la profondeur des lacs ou la composition des sédiments (argile, matière organique) constituent des facteurs d'enrichissement de certains métaux économiques, la relation directe entre une élévation de teneur et la présence de minéralisation proximale peut être mise en doute. Toutefois, comme le montrent les figures 11c et 11d, le calcul de la valeur résiduelle ne montre aucune corrélation avec la profondeur des lacs ou la perte au feu (Trépanier, 2006). Par conséquent, les anomalies calculées par régression spatiale sont indépendantes des variables environnementales.

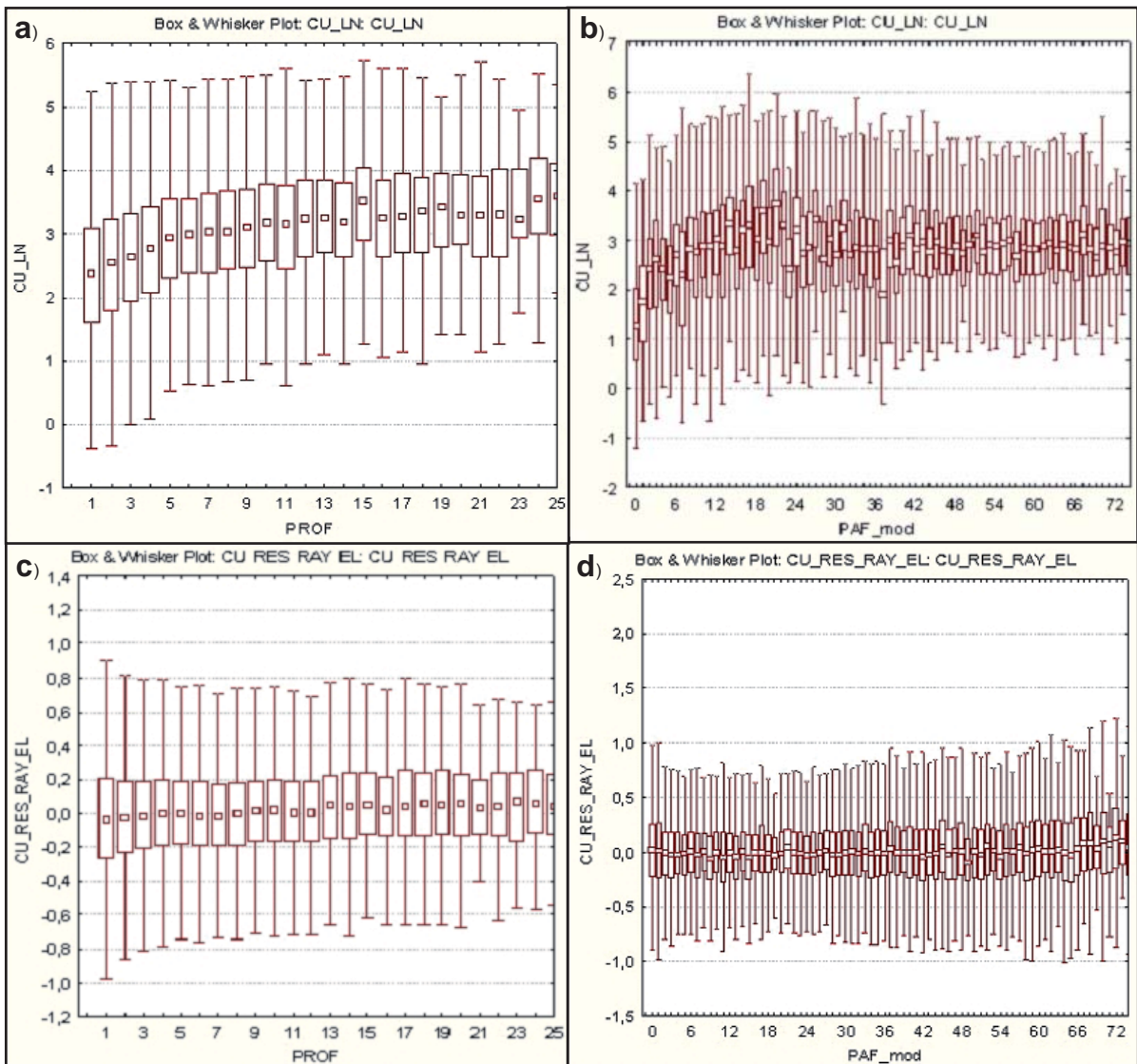


FIGURE 11 – Pour l'ensemble des levés de sédiments de lac du Québec : **a)** relation entre les valeurs brutes en cuivre (CU_LN) et la profondeur des lacs (PROF); **b)** relation entre les valeurs brutes en cuivre et la perte au feu (PAF_mod); **c)** relation entre les valeurs résiduelles en cuivre (CU_RES_RAY_EL) et la profondeur des lacs; et **d)** relation entre les valeurs résiduelles en cuivre et la perte au feu. (Trépanier, 2006)

Du fait de l'utilisation de teneurs converties en logarithme naturel, le traitement de régression spatiale peut générer des valeurs résiduelles élevées même si les teneurs mesurées pour l'élément dans les sédiments sont faibles. Ainsi dans la figure 12, certains échantillons contenant des teneurs en Cu inférieures à 5 ppm montrent des valeurs résiduelles qui se situent au-delà du 99^e centile de l'ensemble des valeurs résiduelles calculées pour les sédiments de lac du Québec. L'importance de

l'anomalie résiduelle n'est donc pas un facteur suffisant en soi pour définir une cible; il faut aussi déterminer un seuil de teneur mesurée pour l'élément qui présente un intérêt manifeste pour l'exploration. La définition de ces seuils doit répondre à deux critères afin de maintenir la crédibilité de l'étude: 1) le nombre de cibles proposées devrait rester dans des limites acceptables, soit de l'ordre de quelques centaines de cibles par ensemble métallogénique; et 2) la prédiction des résultats devrait être supérieure à celle d'une méthode standard de définition de cibles.

Pour satisfaire au premier des deux critères, seuls les échantillons dont la valeur résiduelle calculée se situe au-delà du 99^e centile sont d'abord sélectionnés, soit un ensemble de 909 échantillons (R_{99e}) pour chaque ensemble métallogénique. Pour répondre au deuxième critère, trois groupes sont créés à partir de chacun des 12 ensembles de traitement de régression spatiale (tableau 10):

1. un groupe formé des échantillons dont la teneur est égale ou plus grande que le moyenne calculée à partir des teneurs converties en logarithme naturel (teneurs Ln) pour tous les sédiments de lac ($R_{99e}+Moy$);
2. un groupe formé des échantillons dont la teneur est égale ou plus grande que un écart-type au-dessus de la moyenne, calculé à partir des teneurs Ln pour tous les sédiments de lac ($R_{99e}+1et$);
3. un groupe représentant une méthode standard de définition de cibles, comprenant 909 échantillons dont la teneur nivelée pour l'élément traité est supérieure au 99^e centile de la population des sédiments de lac ($EL_{niv_{99e}}$).

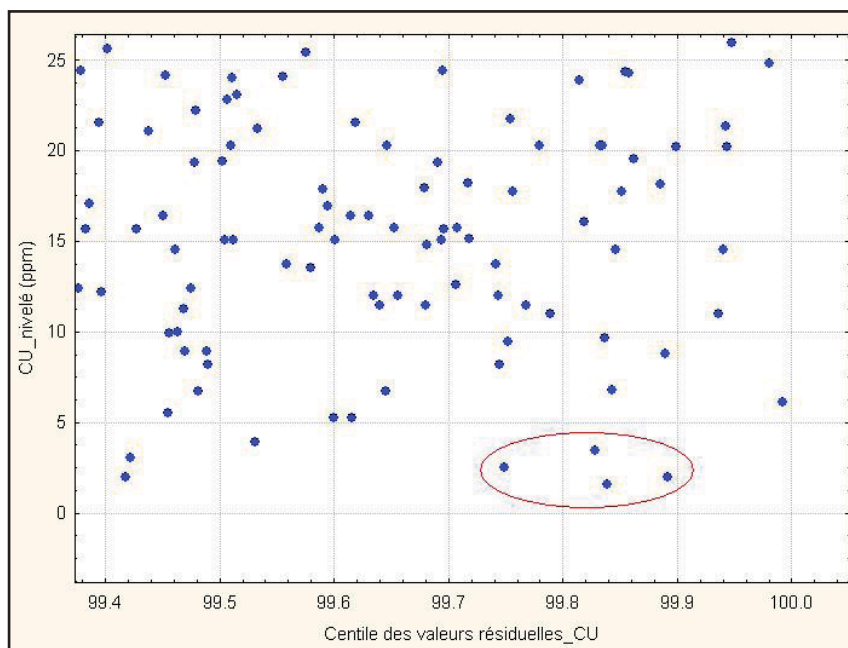


FIGURE 12 – Le traitement de régression spatiale peut générer des valeurs résiduelles élevées même si la teneur pour l'élément traité dans l'échantillon est faible. Dans cet exemple du cuivre, des teneurs inférieures à 5 ppm montrent tout de même des valeurs résiduelles qui se situent au-delà du 99^e centile de l'ensemble des valeurs résiduelles calculées pour les sédiments de lac du Québec.

La prédictivité de ces trois groupes de test a été calculée à l'aide de la méthode du poids de la preuve (voir la section « Détermination des seuils effectifs de prédiction »). Des zones tampons par multiples de 1000 m ont été générées autour des échantillons des trois groupes test. Pour chaque élément, un groupe de validation composé de gîtes appartenant au même contexte métallogénique a été constitué (tableau 11). Le contraste (voir la section « Détermination des seuils effectifs de prédictivité ») a été calculé par la méthode du poids de la preuve pour chaque zone tampon. Pour faciliter la compréhension de la méthode, seules les valeurs de contraste pour la première zone de 1000 m dans chacun des trois groupes sont présentées au tableau 11. Sauf très exceptionnellement, cette valeur est toujours la plus élevée et correspond à la meilleure indication de la prédictivité du groupe. Le tableau 11 montre, dans presque tous les cas, que les valeurs de prédictivité obtenues à partir du groupe test « $R_{99e}+1et$ », sont supérieures pour tous les éléments. La seule exception est le

zinc monoélément, où le groupe composé du 99^e centile des teneurs nivelées du zinc (EL_niv_{99e}) ? montre la meilleure valeur de contraste. Malgré plusieurs tests de sélection basés sur divers seuils de valeurs résiduelles combinés à différents seuils de teneurs en zinc, le groupe test EL_niv_{99e} offre la meilleure prédictivité. L'incapacité de la régression spatiale à cibler efficacement les gîtes de zinc monométalliques réside probablement dans le fait que l'environnement immédiat de ce type de gîte est enrichi en Cu et/ou en Fe. En effet, on peut démontrer que l'indice de corrélation avec le Zn double (0,21 à 0,43) pour ces deux éléments à moins de 20 km de distance des 482 gîtes utilisés dans l'étude. Cette augmentation systématique du Cu et du Fe dans les sédiments de lac autour des gîtes de Zn entraîne une valeur prédite surévaluée du Zn lors du calcul de la régression, ainsi qu'une valeur résiduelle sous-évaluée pour le Zn monoélémentaire.

Lorsque le nombre de gîtes est insuffisant pour réaliser les tests de prédictivité, le groupe test « R_{99e}+1et » a été assumé comme offrant la meilleure prédictivité et utilisé pour déterminer les cibles. Cette situation s'est produite notamment dans le cas du La (gîtes monoélémentaires) et dans les cas du Cu, La et U dans le contexte IOCG (tableau 11).

TABLEAU 11 – Éléments testés pour les quatre familles de contexte métallogénique. Pour chaque élément, le nombre de gîtes contenant cet élément et appartenant à la famille métallogénique étudiée est présenté. Les groupes tests présentant la meilleure prédictivité (en jaune) ont été sélectionnés pour déterminer les cibles. Lorsque le nombre de gîtes est insuffisant pour réaliser les tests de prédiction, celui formé par le 99e centile + un écart type a été utilisé.

Élément	Nombre de Gîtes	Valeur de contraste dans un rayon de 1000 m			Nombre de cibles
		EL_niv99e	R99e+Moy	R99e+1et	
Gîtes monoélémentaires					
Cu	420	2,11	2,76	3,11	498
La	Insuff.				286
Ni	113	2,28	3,23	3,86	297
U	185	2,24	2,56	2,81 ¹	516
Zn	482	2,3 ²	1,35	1,20	909
Gîtes de Cu-Zn de type SMV					
Cu	165	0,95	1,72	2,15	493
Zn		0,96	2,12	2,29	432
Gîtes de Ni-Cu magmatique					
Ni	453	2,95	2,81	3,29	459
Cu	324	2,60	2,40	2,93 ³	408
Gîtes de Cu-U-ÉTR de type IOCG					
Cu	Insuff.				568
La	Insuff.				527
U	Insuff.				575

Exemples de résultats pour quelques gîtes connus

Deux exemples sont présentés pour illustrer l'efficacité du rehaussement des teneurs d'éléments économiques par la méthode de régression spatiale multiple en fonction d'un contexte métallogénique donné.

Le premier exemple présente deux cibles superposées de régression spatiale de cuivre et de zinc pour le contexte métallogénique SMV dans le secteur du lac Heslin (SNRC 23L14). L'échantillon de sédiments de lac situé à 1 km au sud d'un groupe de 4 corps minéralisés composant le gisement de Coulon (3,675 Mt à 3,61% Zn, 1,27% Cu pour un tonnage indiqué ou 10,058 Mt à 3,92% Zn, 1,33% Cu de tonnage présumé¹⁹) contient 80 ppm en cuivre (teneur nivelée²⁰). Cette teneur place cet échantillon au 92,6^e centile des teneurs en cuivre pour l'ensemble des levés de sédiments de lac du Québec. La valeur résiduelle de +0,995 calculée suivant l'approche définie pour les gîtes de type SMV (voir la section « Traitement de régression spatiale multiple en fonction de groupes d'éléments choisis ») place cet échantillon au 99,7^e centile de l'ensemble des anomalies résiduelles calculées pour le cuivre dans le contexte SMV. Le traitement du zinc montre une différence moins marquée, passant du 99,3^e centile au 99,9^e centile, mais tout de même significative. Il faut noter que la valeur résiduelle pour le cuivre dans un contexte métallogénique monoélémentaire, donc sans soustraire parmi les variables explicatives le zinc et le fer (tableau 10), n'est que de +0,679, ce qui la place au 98,9^e centile et donc trop basse pour être une cible.

19- Communiqué de Mines d'Or Virginia, 4 avril 2009.

20- La teneur originale avant le nivellement est de 67 ppm.

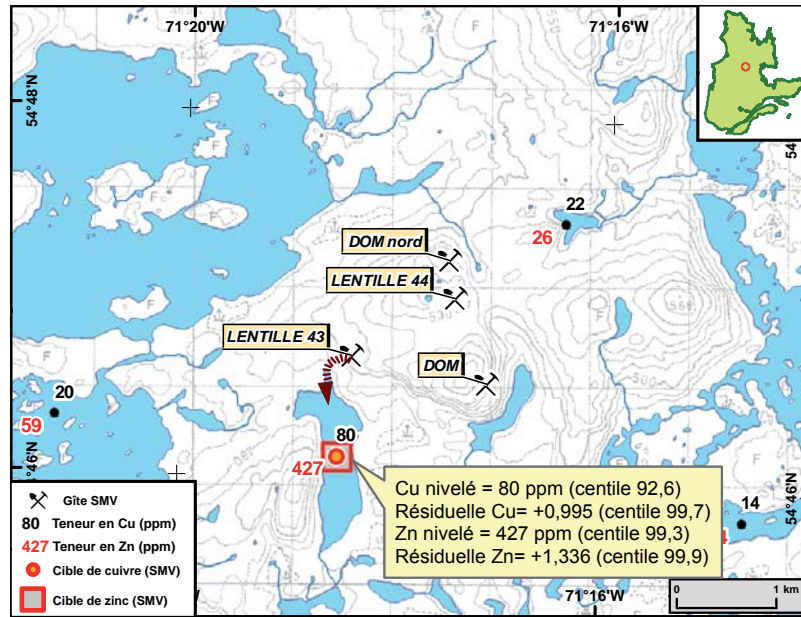


FIGURE 13 – Cibles de régression spatiale pour le cuivre et le zinc pour le contexte métallogénique SMV près du gisement Coulon.

Le deuxième exemple (figure 14) présente les indices et gîtes minéralisés de la propriété de Gayot²¹ dans le secteur du lac Chavamond (feuille 23M11). La teneur nivelée en nickel dans l'échantillon de sédiments de lac à 1 km au nord-est des gîtes est de 101 ppm²² (98,2^e centile). La valeur résiduelle du nickel dans le contexte des gîtes de type Ni-Cu magmatique est de +0,952 et représente un rehaussement à 99,5^e centile. Par contre, encore ici, dans un contexte de gîte monoélémentaire de nickel, donc sans soustraction du cuivre, du cobalt, du chrome, du fer et du magnésium (tableau 10), la valeur résiduelle n'est que de +0,333, ce qui la place au 95,3^e centile et donc trop basse pour être une cible. Mentionnons que dans le même secteur, à environ 7 km à l'ouest de la cible précédente, une nouvelle cible de cuivre a également été déterminée pour un contexte Ni-Cu magmatique, et pour laquelle aucune minéralisation proximale n'est connue.

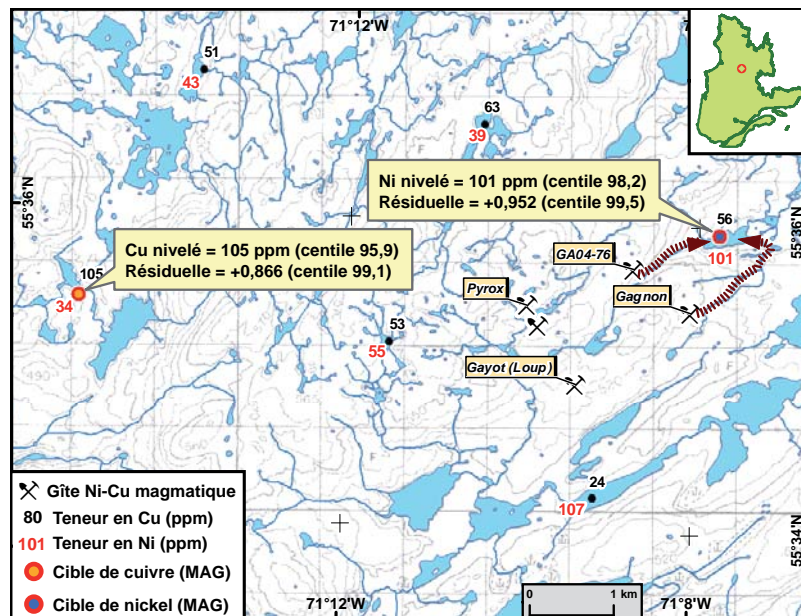


FIGURE 14 – Cibles de régression spatiale pour le nickel et le cuivre pour le contexte Ni-Cu magmatique (MAG) près de la propriété de Gayot.

21- Mines d'Or Virginia, communiqué du 23 août 2007 : 9,03 % Ni, 0,6 % Cu, 9 g/t Pd-Pt sur 2,55 m et 2,2 % Ni, 1,41 % Cu, 2,29 g/t Pd-Pt sur 11,4 m.
 22- Teneur originale avant le nivellement : 97 ppm.

CONCLUSION

Les cibles de sédiments de lac générées par le traitement de régression spatiale sont nettement plus prédictives que les cibles basées sur le centile des teneurs nivelées. Ces cibles sont de plus insensibles aux facteurs environnementaux qui ajoutent une incertitude concernant l'origine primaire ou secondaire des teneurs mesurées pour certains métaux dans un échantillon de sédiments de lac. Bien que moins prédictives, les cibles générées à l'aide du centile des teneurs restent malgré tout valides. Certaines de celles-ci toutefois, contrairement aux cibles générées par régression spatiale multiple, pourraient être le produit d'un enrichissement secondaire non lié à une source minéralisée.

La méthode de régression spatiale multiple a été mise au point à partir de l'étude de variogrammes montrant le comportement du zinc et du cuivre dans le levé de 1997 du MRNF, situé très majoritairement dans la péninsule de l'Ungava (Trépanier, 2006). Ces variogrammes ont permis d'établir qu'un rayon de 20 km autour des échantillons, sans orientation préférentielle, était à la fois suffisant pour inclure un nombre représentatif d'échantillons tout en étant insensible aux variations compositionnelles dues à la structure géologique régionale (voir section « Méthodologie »). Il est toutefois probable que des variogrammes réalisés pour ces mêmes éléments dans l'Orogène du Nouveau-Québec donneraient des résultats sensiblement différents, notamment à cause de l'important contrôle topographique et de la dominante structurale majeure principalement orientés NW-SE dans l'orogène.

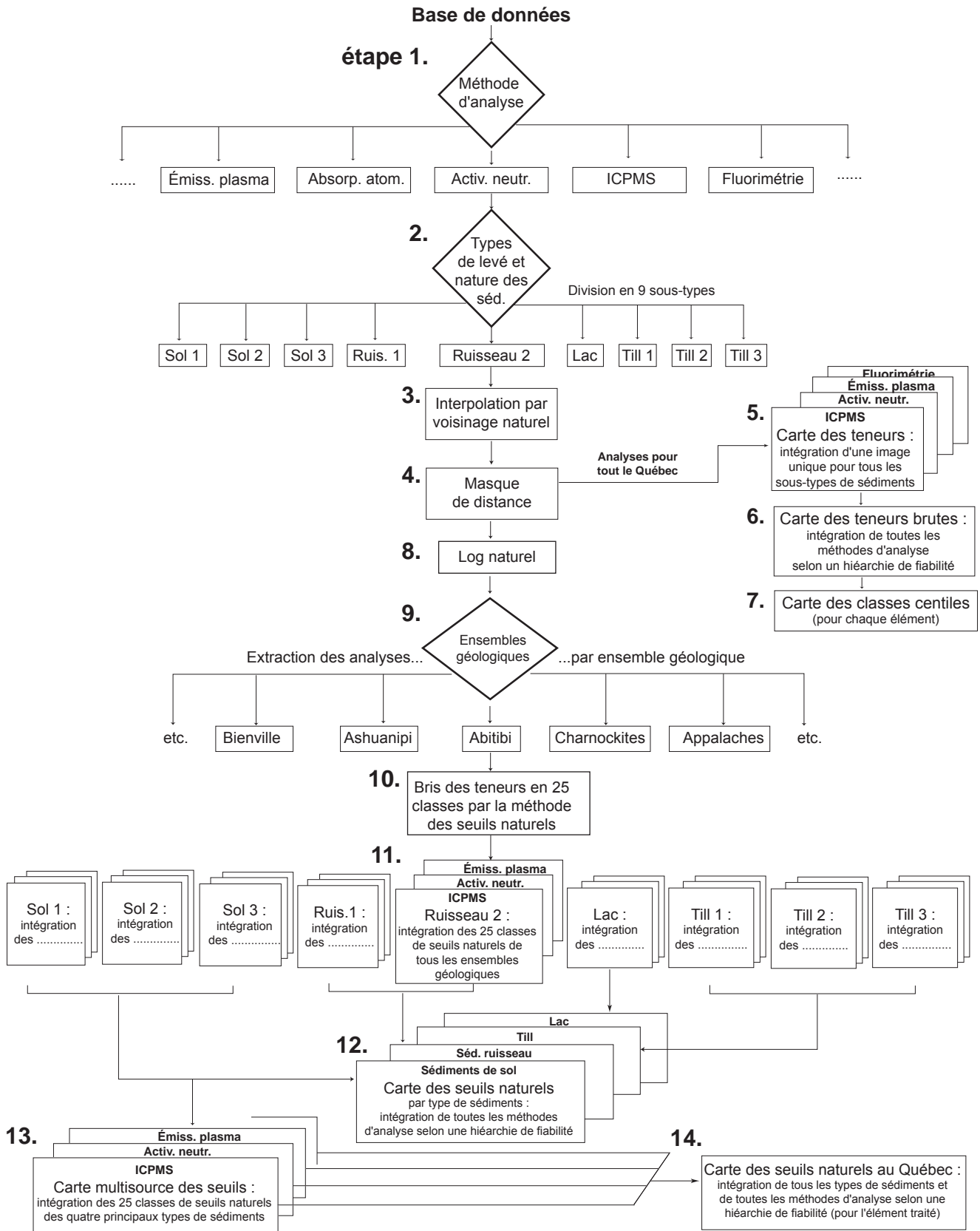
L'approche proposée dans cette section de l'étude présente un intérêt certain pour le milieu de l'exploration minière. D'autres contextes métallogéniques pourraient être utilisés pour déterminer de nouvelles cibles dans des secteurs comme l'Orogène du Nouveau-Québec (contexte de sulfures exhalatifs volcanogènes) ou la Baie-James (gîtes de Cu-Au-Mo d'origine porphyrique). En contrepartie, la nature ponctuelle des cibles rend leur utilisation difficile dans le contexte de la gestion du territoire. Une seule cible isolée ne sera probablement pas jugée suffisante pour considérer que cette portion du territoire recèle un potentiel économique.

RÉFÉRENCES

- BONHAM-CARTER, G.F. – AGTERBERG, F.P. – WRIGHT, D.F., 1988 – Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*; volume 54, no.77, pages 1585-1592.
- CAMERON, E.M., 1977. – Geochemical dispersion in lake waters and sediments from massive sulphide mineralization, Agricola lake area, Northwest Territories. *Journal of Geochemical Exploration*, volume 7, pages 301-326.
- DANESHFAR, B. – CAMERON, E. 1998 – Leveling geochemical data between map sheets. *Journal of Geochemical Exploration*, volume 63, pages 189-201.
- FOTHERINGHAM, A.S., BRUNDSON, C. ET CHARLTON, M., 2002 – Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships. Édité par John Wiley & sons, Ltd. 282 pages.
- JENKS, G.F., 1967 – The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*; volume 7, pages 186-190.
- KERR, A. – DAVENPORT, P.H. 1990 – Application of geochemical mapping techniques to a complex Precambrian shield area in Labrador, Canada. *Journal of Geochemistry Exploration*; volume 39, pages 225-247.
- LABBÉ, J.-Y., 2009 – Nouvelles données géochimiques de sédiments de lac dans la partie occidentale du Grenville québécois: Secteurs de Val d’Or, Chibougamau et La Tuque. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; PRO 2009-03, 8 pages.
- LAMOTHE, D., 2009 – Cartes géochimiques ModelBuilder et cibles anormales de l’environnement secondaire pour le Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; GM 64290, 33 cartes, données numériques.
- SPIEGELHALTER, D.J., 1986 – Uncertainty in expert systems. *In: Artificial Intelligence and Statistics* (Gale, W.A., editor). Addison-Wesley, Reading, Massachusetts; pages 17-25.
- TRÉPANIÉ, S., 2001 – 2001 hyperspectral follow-up, Labrador Through, Kuujuaq area. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; GM 60771, 84 pages.
- TRÉPANIÉ, S., 2006 – Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de lac – Phase 2. Document interne non publié, Consortium de Recherche en Exploration Minérale, Université du Québec à Chicoutimi, 79 pages.
- TRÉPANIÉ, S., 2007 – Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de lac. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; GM 62922, 95 pages.

ANNEXE 1

Organigramme présentant les étapes reliées à la création d'un traitement ModelBuilder adapté à chaque substance.



Ressources naturelles

et Faune

Québec

