
Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lacs

PROJET 2004-09

Par : SYLVAIN TRÉPANIÉ, M.Sc. géo.

JUN 2007



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. 2007. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lacs. Rapport du projet CONSOREM 2004-09, 88 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

Les levés régionaux de sédiments de lacs constituent un outil primordial pour l'exploration minérale dans les régions peu explorées du Nord du Québec. Toutefois, plusieurs problèmes se posent lors de leur utilisation. D'abord, les méthodes analytiques et les suites d'éléments analysés varient beaucoup d'un levé à l'autre, ce qui rend difficile l'intégration des données à l'échelle de la province. La détermination de seuils d'anomalies, cruciale pour la délimitation de cibles d'exploration, est également difficile lorsque l'on travaille sur de grands territoires. Des variations significatives des teneurs de fond en différents éléments contraignent l'utilisation de seuils d'anomalies uniques pour l'ensemble du Québec. Le territoire doit donc être réduit en plus petits domaines ayant un bruit de fond géochimique plus homogène et sur lesquels des statistiques de base peuvent être calculées.

Les levés maillés pour différents éléments à l'échelle du Québec et du Labrador montrent des décalages dans les valeurs de différents éléments entre des levés réalisés à des époques différentes. Ces décalages sont attribués aux changements de méthodes analytiques et de laboratoires d'analyse. Pour faire les corrections, un logiciel de nivellement a été élaboré en se basant sur une méthode connue. Considérant une couverture optimale, le nombre d'éléments et la qualité analytique, une suite de 18 éléments a été sélectionnée pour le territoire québécois et de 12 éléments pour le territoire Québec-Labrador combiné.

Une analyse multivariable factorielle a permis de délimiter les domaines géochimiques. Les variations géochimiques observées sont attribuées 1) aux changements lithologiques dans le bassin de drainage des différents lacs, 2) aux différents environnements lacustres et 3) aux effets environnementaux du bassin de drainage lui-même. Plusieurs facteurs peuvent être corrélés avec les grands ensembles géologiques connus ainsi qu'à la nature des lithologies dominantes. Les relations entre les valeurs des facteurs et les variables reliées à l'environnement lacustre (profondeur des lacs, % de matière organique, couleur des sédiments) indiquent une corrélation claire avec l'environnement secondaire. Ces corrélations sont visibles autant du point de vue statistique que du point de vue cartographique. Certains éléments sont corrélés presque uniquement avec la fraction clastique (ex. : Mg, K, Ti) alors que d'autres ont des affinités fortes avec la matière organique (ex. : Ca). En conséquence, l'abondance relative des différentes fractions, donc le type de sédiment, contrôle de façon étroite les teneurs des différents éléments, selon leur affinité géochimique. Ces variations doivent être considérées dans la détermination des seuils d'anomalies géochimiques pour l'exploration minérale.

La délimitation des domaines géochimiques a été faite à partir des principaux facteurs de l'analyse multivariable. Les domaines ont été délimités en superposant les grands ensembles formés à partir des principaux facteurs individuels. Ces domaines constituent ainsi des régions où les variations du bruit de fond géochimique sont moins importantes, et sur lesquelles des statistiques de base peuvent être calculées dans le but d'extraire des anomalies.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement.....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
1 Introduction et objectifs.....	1
2 Levés de sédiments de lacs du Québec et du Labrador	1
2.1 Levés du Québec.....	1
2.1.1 Méthodes analytiques et suites d'éléments analysés	1
2.2 Levés du Labrador	2
2.2.1 Méthodes analytiques et suites d'éléments analysés	2
2.3 Influence de la méthode d'analyse sur les résultats	3
3 Nivellement des données.....	4
3.1 Méthodologie de nivellement.....	4
3.1.1 Présentation de la méthode de nivellement.....	4
3.1.2 Paramètres du nivellement.....	5
3.1.3 Paramètres additionnels à considérer.....	6
3.1.4 Application de la méthode de nivellement aux levés du Québec et du Labrador.....	8
3.2 Logiciel de nivellement.....	9
3.3 Résultats.....	10
4 Nature de la sédimentation lacustre et influence de l'environnement secondaire sur la composition des sédiments	10
4.1 Sédimentation lacustre : concepts	10
4.1.1 Types de sédiments de lacs	10
4.1.2 Classification des lacs	11
4.1.3 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des lacs.....	12
4.1.4 Composition des sédiments de lacs.....	12
4.1.5 Source et sédimentation de quelques éléments chimiques dans les lacs.....	14
4.1.6 Conclusions	17
4.2 Influence de la profondeur du lac.....	18
4.3 Influence des valeurs en perte au feu.....	19
4.4 Relations entre la couleur de l'échantillon et les teneurs	20
4.5 Conclusions	21
5 Délimitation de domaines géochimiques.....	22
5.1 Objectifs.....	22
5.2 Méthodologie de l'analyse multivariable	23
5.2.1 Choix des éléments.....	23
5.2.2 Choix de la méthode multivariable et méthodologie d'analyse.....	23
5.3 Interprétation des résultats de l'analyse factorielle.....	24
5.3.1 Facteur 1 : Mg-K-Ti	25
5.3.2 Facteur 2 : La-Th-U.....	26
5.3.3 Facteur 3 : V-Ti-Al-P-Cr	26
5.3.4 Facteur 4 : Fe-Mn-Zn	28
5.3.5 Facteur 5 : Ni-Cu-Zn.....	28
5.3.6 Facteur 7 : Ca-Ba	29
5.3.7 Conclusions	29
5.4 Utilisation des facteurs comme outils de cartographie.....	30
5.5 Choix des facteurs pour les domaines géochimiques	30
5.6 Méthodologie de délimitation des domaines géochimiques.....	33
5.7 Limites.....	33
6 Conclusions et recommandations	34

7 Remerciements	34
Références	35
Références supplémentaires	36
Cahier des figures	38
Annexe I : Éléments analysés et méthodes d'analyses selon les levés	77
Annexe II : Spécifications des exigences logicielles du logiciel de nivellement	81
Annexe III : Conception architecturale de la solution de nivellement	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des levés de géochimie de sédiments de lacs du Québec.....	38
Figure 2. Localisation des levés de géochimie de sédiments de lacs du Labrador.	39
Figure 3. Valeurs en Cu dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la Baie-James.	39
Figure 4. Valeurs en K dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la Basse Côte-Nord.	40
Figure 5. Valeurs en Th dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la baie d'Ungava.	40
Figure 6. Méthode de nivellement utilisée pour des levés adjacents	41
Figure 7. Différents cas possibles (encerclés en rouge) de relations géologiques entre des levés adjacents.....	41
Figure 8. Exemples de droites de régression établies sur des bandes à la limite entre deux levés à niveler (figure modifiée de Daneshfar et Cameron, 1998).	42
Figure 9. Calcul de la statistique D permettant d'estimer la largeur optimale des bandes de nivellement.....	42
Figure 10. Tests de calcul de la statistique D pour le Grand-Nord à 60N et 60.5N, bande EW de 200 km de long centrée à 75W, largeurs de 5 à 40 km.....	43
Figure 11. Histogramme des valeurs en tungstène pour le levé du Grand Nord du Québec (1997520).....	43
Figure 12. Histogramme des valeurs en lanthane pour le levé du Grand Nord du Québec (1997520).....	44
Figure 13. Exemple synthétique du nivellement de deux levés à limites de détection élevées mais identiques.	44
Figure 14. Exemple synthétique du nivellement de deux levés à limites de détection élevées différentes.	45
Figure 15. Droite de régression calculée pour une même série d'échantillons fictifs analysés par deux méthodes ayant des limites de détection différentes.....	45
Figure 16. Exemple du nivellement de trois levés adjacents entre eux, avec deux parcours possibles laissant toujours une droite inutilisée (lignes pointillées).....	46
Figure 17. Graphe de connectivité illustrant un cas de nivellement en cascade complexe pour les levés où le zinc a été analysé.....	46
Figure 18. Exemple de plusieurs bandes de nivellement entre deux levés pour une limite de levés irrégulière.	47
Figure 19. Limites des bandes de nivellement entre deux levés se superposant.	47
Figure 20. Valeurs en cuivre nivelées pour le secteur de la Baie-James.	48
Figure 21. Valeurs en thorium nivelées pour le secteur de la Baie d'Ungava.	48
Figure 22. Valeurs en potassium nivelées pour le secteur de la Basse Côte-Nord.	49
Figure 23. Concentrations en aluminium dans un lac du Michigan.	49
Figure 24. Concentrations en cuivre dans un lac du Michigan.	50
Figure 25. Relation entre le contenu en matière organique et la perte au feu dans les sédiments de lacs.....	50
Figure 26. Variations verticales de la composition des sédiments du lac Hope Simpson, Labrador	51
Figure 27. Distribution de différents métaux dans trois lacs de l'Ontario.....	51
Figure 28. Profondeur des lacs selon leur taille, Labrador.	52

Figure 29. Profondeur des lacs selon le relief environnant, Labrador.	52
Figure 30. Relation entre la profondeur des lacs et la nature des dépôts de surface	53
Figure 31. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Québec.	54
Figure 32. Teneurs en manganèse selon la profondeur des lacs, Québec.	54
Figure 33. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et des teneurs en zinc (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec.	54
Figure 34. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et les teneurs en cuivre (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec.	55
Figure 35. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et les teneurs en lanthane (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec.	55
Figure 36. Relation entre les teneurs en zinc (fond contouré en couleur, élevé = mauve, bas = bleu) et les profondeurs des lacs individuels, NW de Kuujuaq.....	56
Figure 37. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, province du Supérieur, Grand Nord du Québec.	56
Figure 38. Teneurs en zinc selon la profondeur des lacs, province du Supérieur, Grand Nord du Québec.	56
Figure 39. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Basse Côte-Nord, province de Grenville, Québec.	57
Figure 40. Teneurs en lanthane selon la profondeur des lacs, Basse Côte-Nord, province de Grenville, Québec.	57
Figure 41. Teneurs en nickel selon la profondeur des lacs, Labrador	57
Figure 42. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Labrador.....	57
Figure 43. Teneurs en aluminium selon la profondeur des lacs, Québec.....	58
Figure 44. Teneurs en titane selon la profondeur des lacs, Québec.	58
Figure 45. Teneurs en calcium selon la profondeur des lacs, Québec.....	58
Figure 46. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, Québec.	58
Figure 47. Teneurs en fer selon la quantité de perte au feu, Québec.	59
Figure 48. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, Québec.....	59
Figure 49. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, Labrador.	59
Figure 50. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, Labrador.	59
Figure 51. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, province du Supérieur, Grand Nord du Québec.	60
Figure 52. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, province du Supérieur, Grand Nord du Québec.	60
Figure 53. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, levé 1982055, Labrador.....	60
Figure 54. Teneurs en aluminium selon la quantité de perte au feu, Québec.....	60
Figure 55. Teneurs en potassium selon la quantité de perte au feu, Québec.	61
Figure 56. Teneurs en chrome selon la quantité de perte au feu, Québec.	61
Figure 57. Teneurs en sodium selon la quantité de perte au feu, Labrador	61
Figure 58. Teneurs en scandium selon la quantité de perte au feu, Labrador	61
Figure 59. Teneurs en rubidium selon la quantité de perte au feu et la profondeur, Labrador.	62
Figure 60. Teneurs en scandium selon la quantité de perte au feu et la profondeur, Labrador.	62
Figure 61. Relation entre la couleur de l'échantillon et la perte au feu, levé 1997520	63
Figure 62. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en aluminium, levé 1997520	63
Figure 63. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en potassium, levé 1997520	64
Figure 64. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en cuivre, levé 1997520.	64
Figure 65. Facteurs 1 (Mg-K-Ti) et 2 (La-Th-U) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax)	65
Figure 66. Facteurs 2 (La-Th-U) et 3 (V-Ti-Al-P-Cr) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax).....	65
Figure 67. Facteurs 2 (La-Th-U) et 4 (Fe-Mn-Zn) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax).....	66
Figure 68. Facteurs 2 (La-Th-U) et 5 (Ni-Cu-Zn) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax).....	66
Figure 69. Facteurs 2 (La-Th-U) et 7 (Ca-Ba) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax).....	67
Figure 70. Relation entre le facteur 1 (Mg-K-Ti) et la profondeur des lacs, Québec	67
Figure 71. Relation entre le facteur 1 (Mg-K-Ti) et la perte au feu, Québec.....	67

Figure 72. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 1 (Mg-K-Ti) Québec.	68
Figure 73. Facteur 1 (Mg-K-Ti) pour le Québec (mauve = valeurs élevées, bleu = valeurs faibles).	68
Figure 74. Relation entre le facteur 2 (La-Th-U) et la profondeur des lacs, Québec.	68
Figure 75. Relation entre le facteur 2 (La-Th-U) et la perte au feu, Québec.	68
Figure 76. Facteur 2 (La-Th-U) pour le Québec (mauve = valeurs élevées; bleu = valeurs faibles).	69
Figure 77. Relation entre le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) et la profondeur des lacs, Québec.	69
Figure 78. Relation entre le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) et la perte au feu, Québec.	69
Figure 79. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr), Québec.	69
Figure 80. Facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) pour le Québec (mauve : valeurs élevées, bleu : valeurs faibles).	70
Figure 81. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn) et la profondeur des lacs, Québec.	70
Figure 82. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn) et la perte au feu, Québec.	70
Figure 83. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn), la perte au feu et la profondeur, Québec.	70
Figure 84. Facteur 4 (Fe-Mn-Zn) pour le Québec (mauve : valeurs élevées, bleu : valeurs faibles).	71
Figure 85. Très faible relation entre le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) et la profondeur des lacs, Québec.	71
Figure 86. Relation entre le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) et la perte au feu, Québec.	71
Figure 87. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr), Québec.	71
Figure 88. Facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) pour le Québec.	72
Figure 89. Relation entre le facteur 7 (Ca-Ba) et la profondeur des lacs, Québec.	72
Figure 90. Relation entre le facteur 7 (Ca-Ba) et la perte au feu, Québec.	72
Figure 91. Relation entre la profondeur des lacs, la perte au feu et le facteur 7 (Ca-Ba).	72
Figure 92. Facteur 7 (Ca-Ba) pour le Québec.	73
Figure 93. Géologie de la partie sud de la fosse du Labrador, Québec (MRNF, 2002).	73
Figure 94. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, sud de la fosse du Labrador.	73
Figure 95. Géologie du supergroupe de Wakeham, Québec (Davidson, 1998).	74
Figure 96. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, supergroupe de Wakeham.	74
Figure 97. Géologie de la région de Frotet-Troilus, Québec (MRNF, 2002).	75
Figure 98. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, secteur de Frotet-Troilus.	75
Figure 99. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies pour les trois régions test.	76
Figure 100. Domaines géochimiques du Québec.	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Paramètres utilisés pour le nivellement des données du Québec.	10
Tableau 2. Relation entre les couleurs des échantillons et les teneurs en éléments.	21
Tableau 3. Eigenvaleurs de l'analyse factorielle, 17 éléments pour le Québec.	24
Tableau 4. Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle.	24
Tableau 5. Évaluation semi quantitative de la correspondance entre les facteurs et les unités lithologiques.	31
Tableau 6. Relations entre les unités lithologiques et les facteurs.	32

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

La géochimie des sédiments de lacs est un outil fondamental pour l'exploration minérale dans le Bouclier Canadien au nord du Québec et au Labrador. Les levés réalisés depuis les années 1970 dans les deux provinces ont permis de couvrir la majeure partie du territoire avec une densité d'échantillons suffisante pour être utilisée efficacement dans les campagnes d'exploration à l'échelle régionale.

Toutefois, l'utilisation de la géochimie de lacs présente plusieurs défis. D'abord, les méthodes analytiques et les suites d'éléments analysés varient d'un levé à l'autre, et des décalages dans les teneurs de plusieurs éléments sont remarqués aux limites de levés. L'échelle même à laquelle les sédiments de lacs doivent être considérés pour la détermination d'anomalies, c'est-à-dire au moins plusieurs milliers de kilomètres carrés, amène également d'autres problèmes. À cette échelle, les variations lithologiques peuvent être considérables et, en conséquence, le bruit de fond géochimique enregistré dans le sédiment est également susceptible de changer. Ces variations peuvent avoir des conséquences importantes sur la détermination des seuils d'anomalies géochimiques. D'autre part, la composition des sédiments peut être influencée par les conditions environnementales et sédimentologiques des lacs. La taille, la profondeur et la productivité organique des lacs sont des exemples de facteurs qui sont susceptibles d'influencer la composition des sédiments et qui ne sont qu'au mieux indirectement reliés aux lithologies environnantes.

Cette étude a comme principal objectif de délimiter des domaines géochimiques qui représentent des secteurs où le bruit de fond géochimique dans les sédiments de lacs est assez constant. En parallèle, les différentes relations qui existent entre la composition des sédiments et les facteurs environnementaux externes seront aussi évaluées dans le but de déterminer si leur influence doit également être considérée dans le cadre d'une campagne d'exploration minérale.

2 LEVÉS DE SÉDIMENTS DE LACS DU QUÉBEC ET DU LABRADOR

2.1 Levés du Québec

Les levés régionaux de sédiments de lacs du Québec ont été réalisés entre 1973 et 1998. On compte un total de 25 levés, totalisant plus de 117 000 échantillons. Les levés couvrent surtout la moitié nord de la province, là où les lacs sont les plus abondants. Il est à noter que dans le cadre de cette étude, trois levés effectués dans les années 1970, couvrant chacun des secteurs qui sont géographiquement isolés, ont été ainsi séparés comme s'il s'agissait de levés différents pour faciliter leur nivellement (levés à suffixes a et b, [figure 1](#)). On trouve également quelques échantillons en Gaspésie qui n'ont pas été considérés. La banque de données que nous avons utilisée provient des données numériques du SIGÉOM extraite en juillet 2002.

La densité d'échantillonnage varie selon les levés. Pour la plupart des levés, elle est d'environ un échantillon par 13 km². Dans le cas des levés de la partie sud de la fosse du Labrador (levés 1983059 et 1984059), du Wakeham (levé 1983058) et de quelques levés de la Baie-James (levés 1957001-XX), la densité d'échantillonnage est nettement plus élevée, allant jusqu'à 1 échantillon au 3 km².

2.1.1 Méthodes analytiques et suites d'éléments analysés

Les suites d'éléments analysés ainsi que les méthodes analytiques employées varient considérablement d'un levé à l'autre ([annexe I](#)). De façon très générale, les échantillons prélevés avant 1980 étaient analysés par absorption atomique (A.A.) sur une suite d'éléments relativement

réduite comprenant Cu-Co-Zn-Pb-Ni-Fe-Mn et U par fluorimétrie. C'est le cas de la plupart des levés effectués par la SDBJ (Société de Développement de la Baie-James) dans le secteur de la Baie-James (levés 1957001-XX), et des levés effectués par SOQUEM sur la Côte-Nord (levés 1977XXX).

Dans le cas des levés de la SDBJ, une partie des échantillons initialement analysés par A.A. ont été réanalysés subséquentement par induction par couplage au plasma (I.C.P.) et activation neutronique (A.N.). Cependant, certains levés ont été complètement réanalysés et d'autres seulement partiellement. Dans certains cas, les analyses ont été refaites par I.C.P. et A.N., parfois par I.C.P. seulement (PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn), et parfois par A.N. seulement (As-Au-Br-Cs-Se-Tm-U-W). Par exemple, dans le levé 1957001-75, on trouve des échantillons analysés par : A.A. seulement, A.N. seulement, A.A. et I.C.P., A.A, I.C.P. et A.N., A.A. et A.N. Comme les suites d'éléments analysés sont différentes pour chaque méthode analytique, on se retrouve donc avec de très grandes hétérogénéités dans la couverture. Dans le cas des métaux usuels tels que Cu-Co-Zn-Pb-Ni-Fe-Mn et parfois As, on a dans plusieurs cas deux analyses dans de nombreux échantillons (I.C.P. et A.A.), ce qui permet d'apprécier les différences significatives dans les teneurs obtenues par l'une ou l'autre des méthodes (ex. : en moyenne 1.5 fois plus pour le Zn). Dans le cas de certains échantillons, les métaux de base (Cu, Zn, Ni, Pb) peuvent même être absents alors que d'autres éléments traces moins usuels (ex. : Cs, Se, Sb, Tm) s'y trouvent. Cette complexité a des conséquences importantes sur le nivellement des données et les analyses subséquentes.

Tous les levés plus récents comprennent des suites analytiques beaucoup plus étendues, avec des analyses par induction par couplage de plasma (I.C.P.) pour la plupart des éléments et par activation neutronique (A.N) pour quelques autres ([annexe I](#)). Dans ces levés plus récents, la couverture est beaucoup plus homogène.

Dans le cas d'analyses par I.C.P. ou par A.A, la méthode d'extraction chimique (c.-à-d. aqua regia, ou HNO₃ dilué seulement) devrait également être considérée, mais elle n'est pas rapportée dans la plupart des cas.

Pour les cas d'analyses faites par I.C.P., on rapporte également les valeurs de perte au feu (PAF) qui serviront à établir la quantité de matière organique dans le sédiment. Les valeurs de pH, prises dans l'échantillon, sont déterminées dans plusieurs cas. Dans la majorité des levés, sauf pour les levés de la Baie-James (levés 1957001-XX) et pour deux levés du Grand-Nord (levé 1983055 et partie nord de 1983050), la profondeur du lac est également notée.

2.2 Levés du Labrador

Les levés du Labrador considérés dans le cadre de cette étude ont été effectués entre 1977 et 1984 dans le cadre du programme « National Geochemical Reconnaissance » (NGR). Plus de 18000 échantillons de sédiments de lacs ont été recueillis durant cette période. La grande majorité du Labrador est couverte par ces levés, sauf la portion à l'extrême nord du Labrador, dans les Torngats ([figure 2](#)). La densité d'échantillons est d'environ 1 par 15 km².

2.2.1 Méthodes analytiques et suites d'éléments analysés

Dans le cas des levés du Labrador, les méthodes analytiques ont peu varié selon les levés ([annexe I](#)). Plusieurs éléments (Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn) ont été analysés par absorption atomique. Une panoplie d'autres éléments a aussi été analysée par activation neutronique (As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb). Notons que cette dernière liste comprend aussi certains métaux déjà analysés par A.A. (Co-Mo-Ni).

Des analyses de l'eau des lacs sont faites systématiquement pour connaître la quantité de fluor et d'uranium ainsi que le pH de l'eau à la surface du lac. La profondeur des lacs échantillonnés est également notée. Des informations qualitatives sur les sites d'échantillonnage telles que le relief, la taille du lac et la turbidité de l'eau, sont également incluses. La perte au feu y est également déterminée.

2.3 Influence de la méthode d'analyse sur les résultats

L'objectif principal des campagnes d'échantillonnage de lacs considérées dans cette étude, que ce soit celles du Québec ou du Labrador, est d'aider l'exploration minérale en fournissant des cibles d'exploration. Le choix des méthodes analytiques est directement influencé par cette idée. Les métaux présents en remplacement dans la structure des silicates ne sont pas intéressants pour l'exploration, puisqu'ils ne sont pas sous cette forme dans la majorité des gîtes minéraux, étant plutôt sous forme de sulfures ou d'oxydes. Les minéraux primaires de la minéralisation seront transportés et déposés dans les lacs sous formes d'ions adsorbés à des oxydes hydratés de fer et manganèse ou à des argiles, sous formes de complexes avec la matière organique, sous forme de sulfures secondaires transportés formés dans les sols ou carrément précipités en sulfures secondaires à partir de l'eau du lac. Ce sont donc ces phases qui doivent être analysées. C'est pourquoi des méthodes d'extraction partielles sont utilisées à partir d'acides qui sont relativement faibles, comme par exemple l'acide chlorhydrique et/ou l'acide nitrique. Ces acides permettent de dissoudre la majorité des substances d'intérêt (oxydes, hydroxydes, sulfures, matière organique, ions adsorbés à la surface des argiles) tout en laissant la majorité des silicates sous forme solide (Hall, 1998). Ceci permet d'obtenir les métaux qui sont présents sous une forme adéquate. Dans certains cas, c'est l'acide nitrique seul qui est utilisée (NGR au Labrador, certains levés du Québec) et dans d'autres cas on utilise une extraction aqua regia avec HNO_3 et HCl (1:3) (certains levés du Québec).

Toutefois, certains silicates passent très facilement en solution avec ces méthodes d'extraction par acides faibles. En particulier, la biotite et la chlorite sont très solubles même dans ces acides faibles, et sont extraites à presque 100%. De façon surprenante, la muscovite est très peu soluble (< 10%). Par contre, les feldspaths, que ce soit plagioclase ou potassiques, montrent des taux d'extraction inférieurs à 5% (Snäll et Liljefors., 2000). L'épidote et la hornblende sont des cas intermédiaires, montrant des taux d'extraction entre 15 et 30% pour des fractions fines.

De plus, certains oxydes qui sont importants pour l'exploration de certains types de gîtes ne sont presque pas dissous par ces méthodes partielles, et il est important de les considérer aussi. Par exemple, l'ilménite n'est pas dissoute par l'acide nitrique seule, mais l'est avec acide nitrique et chlorhydrique (aqua regia). La chromite, important minéral de chrome, est insoluble dans ces extractions (Church et al., 1987).

Tout ceci a des conséquences importantes sur les analyses rapportées pour les éléments essentiellement lithophiles. Dans le cas de la banque de données du Québec, une grande série d'éléments chimiques ont été analysés par ICP (induction par couplage de plasma). Ces analyses sont effectuées à partir d'une extraction partielle à acides faibles qui ne dissolvent pas la majorité des silicates. En conséquence, des minéraux qui contiennent plusieurs éléments importants (Mg, K, Ca, Al, REE, Th, Cr, etc.) sont extraits de façon sélective. Dans le cas du Labrador, les éléments autres que les métaux usuels sont analysés par activation neutronique (Th, REE, Cr), ce qui fait que dans ces cas, les analyses sont totales et incluent les fractions silicatées.

En définitive, les méthodes d'analyse utilisées pour les sédiments de fonds de lacs ont été ciblées vers l'exploration minière, et non vers la possibilité d'améliorer la compréhension de la géologie. L'extraction sélective des silicates rend plus complexe l'interprétation de l'organisation de plusieurs éléments, puisque les valeurs des analyses des éléments lithophiles et de quelques métaux tels que le chrome et le titane ne représentent pas nécessairement le contenu réel de ces éléments dans le sédiment.

Lorsque l'on considère la distribution d'un élément lithophile, il est donc important de se rappeler que les extractions, pour la banque de données du Québec, sont partielles. Par exemple, la biotite et la chlorite sont les minéraux de magnésium qui sont de loin les plus facilement extraits; comme ce sont deux éléments d'origine essentiellement allogène et clastique dans les lacs en secteur non carbonaté, comme l'est la majorité de l'Archéen, (voir section 4), on pourra dire que leur abondance reflète l'abondance de biotite-chlorite ou d'argiles à K-Mg telles que l'illite. De même, la biotite est le principal minéral de potassium dissous. Pour l'aluminium, la biotite et la chlorite, et dans une moindre mesure l'épidote, pourront être considérés comme des minéraux sources, ainsi que certaines argiles.

3 NIVELLEMENT DES DONNÉES

Les cartes maillées en couleur de différents éléments montrent, dans certains cas, des valeurs qui changent subitement à la limite des levés adjacents ([figure 3](#), [figure 4](#) et [figure 5](#)). Ces problèmes de nivellement entre levés peuvent être causés par des différences dans les méthodes analytiques, des différences dans les méthodes d'extraction pour les analyses partielles (I.C.P. ou A.A.) ou par des différences dans les méthodes d'échantillonnage.

Ces différences de nivellement entre levés peuvent causer des variations importantes et une interférence indésirable dans tous les traitements statistiques subséquents. Il est indispensable de les niveler pour arriver à un produit homogène.

3.1 Méthodologie de nivellement

3.1.1 Présentation de la méthode de nivellement

La méthode de nivellement qui a été retenue pour cette étude est présentée par Daneshfar et Cameron (1998). Elle consiste à sélectionner des échantillons à l'intérieur de bandes définies aux jonctions de levés adjacents ([figure 6](#), bandes a et b des levés A et B). Un pré-requis important dans le choix de ces bandes est que la géologie et la physiographie doivent être semblables dans les deux bandes sélectionnées, c.-à-d. qu'il faut que les unités lithologiques recoupent perpendiculairement la limite entre les deux levés ([figure 7](#), cas W). Si on a des changements géologiques/physiographiques trop grands ([figure 7](#), cas S et cas N), les différences observées pourraient être fortement influencées par ces changements. Faire le nivellement dans ces cas voudrait alors dire niveler les différences lithologiques, ce qui ne peut être fait afin de conserver ce signal.

Une fois les bandes sélectionnées, on calcule les percentiles pour l'élément montrant un décalage dans les bandes appartenant à chacun des levés et on les compare sur un graphique. Différentes situations peuvent apparaître selon le cas ([figure 8](#)). L'étape suivante consiste à calculer une droite de régression qui relie le mieux possible les différents percentiles. La droite de régression sert alors à faire les corrections nécessaires à tous les échantillons d'un des deux levés.

Avantages de la méthode de nivellement

La méthode de nivellement présentée ci-dessus est robuste puisqu'en considérant la géologie et la physiographie aux limites de levés, on s'assure que le décalage observé est bien dû à des différences analytiques et non pas à des différences naturelles. De plus, comme le nivellement utilise des droites de régression linéaires, les corrections effectuées sur les valeurs ne changent pas l'ordre des valeurs dans un même levé, c.-à-d. que la valeur la plus élevée d'un levé avant le nivellement restera la plus élevée dans ce même levé après le nivellement.

Désavantages de la méthodes et limites

La méthode de nivellement suppose qu'on a une jonction entre des levés. On ne pourra donc pas niveler un levé qui est géographiquement isolé des autres. C'est le cas de certains levés du Québec.

3.1.2 Paramètres du nivellement

Différents paramètres importants doivent être considérés pour faire ce type de nivellement. Certains sont énoncés spécifiquement par les auteurs, mais au cours de la mise en œuvre du nivellement, d'autres sont apparus évidents.

Largeur des bandes

D'abord, il faut déterminer quelle est la largeur des bandes utilisées pour calculer les relations de nivellement. Si on prend des bandes très minces, on n'aura pas beaucoup d'échantillons et les percentiles pourront être influencés par des concentrations anormales très locales pouvant s'y retrouver. Si on prend des bandes trop larges, on risque que la géologie finisse par être différente dans les échantillons les plus éloignés. Pour évaluer cette distance, Daneshfar et Cameron (1998), suggèrent de prendre deux bandes parallèles et perpendiculaires à la géologie, situées à l'intérieur même d'un levé. Comme ces bandes sont dans un même levé, elles ne devraient pas montrer de décalage, et on devrait avoir une droite $y = x$ en prenant les différents percentiles. En prenant différentes largeurs de bandes, il est possible de calculer une statistique D pour des bandes exploratoires de différentes largeurs (exemple pour le pH, [figure 9](#) de Daneshfar et Cameron, 1998).

$$D = \sum w_i [(q_i)_c - (q_i)_e]^2$$
 où w_i est le poids assigné au $i^{\text{ème}}$ quantile, $(q_i)_e$ est la valeur du $i^{\text{ème}}$ quantile sur la bande 1, et $(q_i)_c$ est la valeur du $i^{\text{ème}}$ quantile sur la bande 2.

Plusieurs expériences semblables ont été effectuées dans le cas de plusieurs levés du Québec. Des tests effectués sur le levé du Grand Nord (1997520) montrent les limites de la méthode de calcul de la statistique D ([figure 10](#)). D'abord, la largeur optimale varie grandement selon l'élément choisi dans le levé, et varie aussi pour un même levé selon l'endroit choisi pour les bandes exploratoires (ici on a varié la position centrale vers le nord de 50 km.). En général, on note une diminution entre 5 et 10 km, un creux général de 10 à 20 km et une augmentation par la suite.

L'approche qui a été utilisée pour obtenir une distance optimale pour tout le Québec a été de calculer la médiane de toutes les largeurs optimales par élément, et ce, pour tous les levés. La largeur calculée de cette façon est de 20km, ce qui est cohérent avec ce qui a été proposé par Daneshfar et Cameron (1998) pour la Colombie-Britannique (15 km dans leur cas).

Méthode de calcul de la droite de régression

Le choix de la méthode de calcul de la droite de régression à partir des percentiles est également un paramètre à considérer. Dans ce cas précis, il n'est pas vraiment possible de distinguer une variable indépendante d'une variable dépendante. En conséquence, la méthode classique de régression par la loi des moindres carrés ne peut s'appliquer et donnerait des résultats différents selon qu'on choisit l'un ou l'autre des levés comme variable indépendante. La méthode des *axes principaux* (Sinclair et Bentzen, 1998) a donc été utilisée car elle ne présuppose pas de choisir une variable indépendante.

Choix des percentiles pour la droite de régression

Daneshfar et Cameron (1998) suggèrent d'utiliser les percentiles entre 0,05 et 0,95, par incréments de 0,05. Toutefois, ces percentiles ont trop de chance de représenter des anomalies si bien que cette étude utilise les percentiles 0,1 à 0,9.

Transformations logarithmiques

Finalement, il est également recommandé de transformer toutes les valeurs en logarithmes, encore une fois pour minimiser l'effet des valeurs élevées. Les valeurs ont donc été transformées en logarithmes naturels avant de faire les calculs de nivellement, ceci à la toute fin du processus seulement.

3.1.3 Paramètres additionnels à considérer

Qualité analytique requise pour le nivellement

Il est important de considérer les limites de détection lorsqu'on examine le nivellement d'un élément entre deux levés adjacents. Pour de nombreux éléments, il arrive communément qu'un nombre significatif d'analyses montrent des valeurs sous la limite de détection analytique. Le cas du tungstène dans le levé du Grand-Nord du Québec (levé 1997520) est un bon exemple d'élément dont la majorité (dans ce cas-ci 65%) des valeurs sont sous la limite analytique. L'histogramme de répartition des valeurs ([figure 11](#)), ne montre que la partie droite de ce qui devrait être une répartition en cloche. On peut comparer avec les valeurs en lanthane ([figure 12](#)) dans ce même levé (0.1% des valeurs seulement sous la limite de détection) qui montrent une répartition complète. La question devient de savoir s'il est possible de niveler un cas comme celui du tungstène en dépit des contraintes énumérées plus haut.

Deux cas peuvent être considérés : une limite de détection semblable dans les deux levés, ou une limite de détection différente entre les deux levés. Une limite de détection identique entre deux levés permet une représentation idéalisée de forme log-normale ([figure 13](#)). La portion de la courbe sous la limite de détection ne pouvant être déterminée, le nivellement se fera à partir de la population de points au dessus de cette limite. Or, cette population est celle qui est communément remplie d'anomalies et donc la moins fiable pour établir des relations de nivellement. Cette conclusion est renforcée par le fait que les valeurs obtenues à des teneurs près de la limite de détection analytique, qui sont les percentiles les moins anomaliques et en principe les plus fiables, sont les plus imprécises. En conséquence, ces nombreuses valeurs près de la limite analytique, qui sont les plus nombreuses dans ces cas, ajouteront une grande incertitude au nivellement.

Un autre cas est celui de limites de détection différentes entre deux levés avec un nombre significatif d'échantillons sous la limite de détection. Dans ce cas, l'erreur qui sera causée par le nivellement peut être démontrée ([figure 14](#) et [figure 15](#)). Il est possible d'illustrer cette situation par un exemple synthétique constitué de deux levés qui auraient des valeurs réelles exactement semblables (mêmes percentiles), donc aucun nivellement à faire. Une simulation des analyses chimiques avec limites de détection différentes est réalisée en remplaçant une valeur sous la limite de détection par la moitié de la limite de détection. La [figure 15](#) montre les percentiles et la droite de régression obtenue qui est différente de la droite $y = x$, ce qui signifie qu'un nivellement entre ces deux levés n'est pas nécessaire car en réalité les valeurs sont les mêmes.

Pour éviter de faire de faux nivellements, des critères de qualité analytiques sont fixés pour entreprendre le nivellement d'un levé pour un élément donné. Deux critères ont été retenus pour qu'un élément donné dans un levé soit *nivelé* :

- Au moins 70% des analyses doivent être au-dessus ou égales à la limite de détection analytique
- Au maximum 30% des analyses doivent être exactement à la limite de détection

La conséquence directe de ce choix est que ce ne sont pas tous les éléments qui ont été nivelés dans tous les levés. Le terme d'élément « *nivelable* » est introduit pour désigner un élément analysé de bonne qualité analytique dans un levé donné.

Dans le calcul des percentiles sur les bandes de nivellement, on ne considère pas les valeurs sous la limite de détection. Le critère de 70% d'analyses au-dessus de la limite permet d'obtenir des percentiles représentatifs.

Nivellements en cascade de plusieurs levés

La méthode du nivellement en cascade s'applique très bien dans le cas où on a seulement deux levés adjacents à niveler. La séquence de nivellement devient plus compliquée lorsqu'on ajoute un troisième levé ([figure 16](#)). À partir d'un premier levé de base qui doit demeurer intact (en rouge sur la figure), il existe deux possibilités de parcours. On ne peut évidemment, dans aucun des deux cas, revenir sur le relevé de départ afin de ne pas le modifier. Dans une solution idéale, le nivellement successif devrait éliminer tout décalage avec le levé initial. Mais dans la réalité, le cumul des petites erreurs cause un problème de fermeture. Ce problème sera d'autant plus accentué que le nombre de levés sera élevé. Un exemple de cas de nivellement très complexe est illustré pour le Québec ([figure 17](#)) pour les levés dans lesquels le zinc est analysé et « *nivelable* ».

Une solution élégante à ce problème serait de ne faire que des nivellements partiels à chaque étape de la cascade de nivellements. On pourrait alors recommencer la cascade de nivellement de multiples fois (cycles de nivellement) en utilisant un parcours différent, idéalement déterminé de façon aléatoire selon la connectivité entre les levés. Cette solution de nivellements partiels itérative et cyclique permettrait donc de répartir de façon graduelle l'erreur sur toutes les jonctions de levés plutôt que sur la dernière.

Pour effectuer un nivellement partiel entre deux levés, il faut modifier progressivement les coefficients de la droite de régression. Un nouveau paramètre, le « taux de nivellement » est donc introduit. Il est proposé d'utiliser une correction linéaire en fonction de ce taux de nivellement. La valeur finale pour la pente (m) et l'ordonnée à l'origine (b) de la droite de régression d'un nivellement partiel est donnée par la formule suivante :

$$m_{\text{partiel}} = (m_{\text{initial}} - 1) * \text{taux de nivellement} + 1$$

$$b_{\text{partiel}} = b_{\text{initial}} * \text{taux de nivellement}$$

Avec un taux de nivellement = 1, $m_{\text{partiel}} = m_{\text{initial}}$ et $b_{\text{partiel}} = b_{\text{initial}}$ et on revient à un nivellement complet. Avec un taux de nivellement = 0, $m_{\text{partiel}} = 1$ et $b_{\text{partiel}} = 0$ et aucun nivellement n'est fait. Le choix du taux de nivellement permet donc de déterminer la vitesse avec laquelle les levés seront nivelés et la qualité de la solution finale. Avec un taux de nivellement bas, il faudra plus de cycles pour arriver à la solution finale, mais les erreurs seront très bien réparties. Pour un taux de nivellement plus élevé, un nombre de cycles plus bas permet d'arriver à une solution à l'équilibre mais moins satisfaisante. Il s'agit d'un équilibre entre la qualité du résultat final et le temps de traitement.

Zones de superposition entre levés et jonctions irrégulières de levés

Dans certains cas, des jonctions irrégulières entre des levés sont reconnues, c.-à-d. qu'il ne s'agit pas d'une seule ligne mais de plusieurs (ex. : entre 1983050 et 1983059). Pour ces cas, la méthode a été ajustée en prenant les échantillons compris dans plusieurs bandes ([figure 18](#)). Une ligne irrégulière a donc été tracée suivant la jonction des levés, et les échantillons tombant dans les rectangles formés par chacun des segments des lignes de largeur de 20km ont été prélevés. Comme il peut arriver alors qu'un même échantillon se trouve dans deux de ces rectangles, il faut s'assurer de ne le prendre qu'une seule fois dans les calculs de percentiles. Dans un tel cas, les percentiles seront calculés sur le total de tous les échantillons de toutes les bandes rectangulaires individuelles réunies.

Dans le cas de superposition géographique de deux levés, il faut ouvrir la possibilité d'avoir une ligne limite de jonction de levés qui soit différente pour les deux levés ([figure 19](#)). Cela veut dire en termes pratiques que, pour pouvoir traiter les cas de superposition, la jonction entre le levé A et B n'est pas nécessairement à la même position que la jonction entre B et A. Dans ce cas de superposition, les bandes formées se superposent alors.

3.1.4 Application de la méthode de nivellement aux levés du Québec et du Labrador

Les cartes monoélémentaires pour le Labrador montrent très peu de problèmes de décalage aux jonctions de levés. Il a été décidé de considérer ces levés nivelés dès le départ. Dans le cas des levés du Québec, plusieurs problèmes sont apparents. Il a donc été décidé de les niveler en détail selon la méthode présentée précédemment.

Hétérogénéité des levés de la SDBJ

Dès le départ, l'hétérogénéité des levés de la SDBJ (levés 1957001-XX) a causé des problèmes selon les éléments et la suite analytique dans lesquels ils se retrouvent. On peut distinguer les cas suivants et les décisions qui ont été prises dans chaque cas :

- Co-Cu-Fe-Mn-Pb-Zn : ces éléments ont été analysés initialement par A.A. et réanalysés par la suite par ICP pour environ la moitié des échantillons, le pourcentage de réanalyses variant selon les levés. Il aurait pu être souhaitable de garder les réanalyses plus récentes, mais un tel cas aurait mélangé dans un même levé des valeurs obtenues par ICP et d'autres par A.A. Il a donc été décidé de garder les valeurs par A.A. pour tous ces levés afin d'avoir une couverture uniforme.
- U : dans ces levés, les valeurs pour l'uranium sont celles analysées par absorption atomique dans les cas où cette méthode avait été utilisée pour les premières analyses. Toutefois, un nombre important d'échantillons n'a pas d'analyses d'uranium par A.A. mais plutôt par A.N., et ce, dans les mêmes levés. La conséquence est que dans un même levé, des valeurs d'uranium analysées par A.A. se retrouvent avec d'autres par A.N. De très importantes différences sont visibles selon la méthode utilisée. Pour régler ce problème qui fausserait tout le nivellement de l'uranium, il a été décidé *d'éliminer les valeurs en uranium des échantillons analysés seulement par A.N.*, soit pour environ 3000 échantillons. C'est un choix difficile, mais nécessaire pour obtenir des données fiables et consistantes.
- Éléments de la suite ICP (Al-Ba-K-La-Ce-...) et A.N (As-Cs-U-...) : ces éléments ont été réanalysés pour une partie des échantillons seulement et ne sont donc

pas analysés partout. Le calcul de la qualité analytique de ces éléments dans les levés *ne considère donc pas les échantillons pour lesquels les analyses n'ont pas été faites*. D'autre part, dans certains levés, les réanalyses ont été exécutées seulement dans certaines parties des levés. Avant de déterminer s'il est possible de niveler ces levés avec les levés adjacents, il a donc fallu s'assurer que suffisamment d'échantillons étaient réanalysés aux jonctions de levés pour construire les bandes de nivellement.

Choix des bandes de nivellement entre levés

Pour niveler les levés, des droites ont été tracées en considérant la carte géologique et un modèle d'élévation numérique. C'est à partir de ces droites qu'ont été construites les bandes de nivellement.

Choix du levé de départ

Le levé du Grand Nord (1997520), le plus récent et le plus grand, a été choisi comme levé de départ et conséquemment, les valeurs de ce levé ont donc été conservées intégralement.

Limites de détection des levés

Cette étude n'a pas permis de retrouver les rapports techniques indiquant les limites de détection analytiques pour plusieurs levés du Québec. Dans la banque de données du SIGEOM utilisée, une valeur sous la limite de détection est un blanc (valeur « NULL »). Cela cause un problème, puisque cette même valeur est utilisée pour tous les échantillons d'un levé lorsqu'un élément n'a pas été analysé dans un levé. Pour déterminer si une analyse en blanc (valeur NULL) pour un échantillon est sous la limite de détection ou simplement non analysée dans ce levé, il faut donc se référer aux autres échantillons du levé. La règle suivante a été suivie : *si au moins un échantillon du restant du levé a une valeur non nulle pour cet élément, alors il a été analysé dans ce levé et alors l'échantillon est vraiment sous la limite de détection pour cet élément*.

Le calcul des limites de détection pour les levés considère que cette limite est la valeur minimale de cet élément dans le levé.

Nivellement Québec-Labrador

Finalement, la banque du Québec traitée a été nivelée en un seul cycle avec la banque du Labrador.

3.2 Logiciel de nivellement

À cause de la complexité de la méthode de nivellement, un outil logiciel a été construit.

L'[annexe II](#) documente les spécifications du système de nivellement, basées de façon générale sur la norme IEEE-830 : spécifications fonctionnelles, modélisation objet UML, cas d'utilisation, spécification et exemples de l'interface utilisateur.

La solution choisie est divisée en 3 composantes distinctes et relativement indépendantes : une base de données MS-Access dans laquelle doivent se trouver les données sources à niveler, toutes les

tables intermédiaires, ainsi que les résultats. La logique applicative elle-même est programmée avec le paradigme de programmation objet en utilisant le langage Visual Basic.NET. L'interface graphique est également programmée en Visual Basic.NET et accède à la logique applicative par le biais de l'entité Projet.

Les paramètres indiqués au **tableau 1** ont été utilisés pour le nivellement des données du Québec :

Tableau 1. Paramètres utilisés pour le nivellement des données du Québec.

Taux de nivellement	0.3
Cycles de nivellement	50 (partiel)
% Minimal d'échantillons au-dessus de la limite de détection	70%
% Maximal d'échantillons exactement à la limite de détection	30%
Largeur des bandes de nivellement	20 km
<i>Utilisation des logarithmes des valeurs brutes pour le nivellement, transformation à la toute fin.</i>	

3.3 Résultats

Les problèmes de nivellement montrés précédemment ont été réglés de façon satisfaisante par la méthode de nivellement. Les [figures 20](#), [21](#) et [22](#) présentent des exemples de cartes produites à partir des valeurs nivelées selon la méthode définie ci-dessus. Toutes les analyses statistiques présentées dans les sections suivantes ont été effectuées sur les données nivelées.

4 NATURE DE LA SÉDIMENTATION LACUSTRE ET INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SECONDAIRE SUR LA COMPOSITION DES SÉDIMENTS

Avant d'aborder tout traitement statistique sur les données nivelées, il est important de considérer la nature même de la sédimentation lacustre en milieu nordique. Une meilleure compréhension des différents phénomènes à l'origine de l'accumulation de ces sédiments permettra de comprendre et d'interpréter les résultats des analyses statistiques.

4.1 Sédimentation lacustre : concepts

4.1.1 Types de sédiments de lacs

On reconnaît généralement trois principaux environnements sédimentaires lacustres (Cameron, 1994) :

- Deltaïque : particules grossières, sables ou silts à l'embouchure des ruisseaux se jetant dans le lac.
- Rivage : érosion du rivage. Normalement composé de particules grossières également parce que les fines sont lessivées par l'action des vagues.

- Profond : dans les parties centrales les plus profondes des lacs. Composé d'argiles ou silts fins amenés en suspension dans l'eau par les ruisseaux et provenant de précipités chimiques formés à partir de l'eau du lac ainsi que de matière organique.

Dans les campagnes de géochimie lacustre pour l'exploration, ce sont les sédiments de type profond qui sont échantillonnés. L'échantillon correspond normalement à une colonne d'environ 40 cm de sédiments riches en matière organique, qui représentent l'accumulation de plusieurs centaines d'années de sédiments (Davenport, 1990). De façon générale, les sédiments des parties centrales des lacs sont plus homogènes que les autres types de sédiments et représentent plus fidèlement la composition moyenne du bassin de drainage du lac. Les sédiments profonds contiennent également une portion beaucoup plus significative d'éléments précipités à partir de l'eau, donc de métaux (Cameron, 1994).

4.1.2 Classification des lacs

D'un point de vue limnologique, les lacs sont généralement classifiés de deux façons différentes : selon la productivité organique du lac et selon le processus de mélange des eaux du lac (Kevern et al., 1996).

A partir de la productivité organique, les lacs sont classés selon quatre catégories :

- Oligotrophes : faible concentration d'éléments nutritifs et productivité organique faible. Ils sont bien oxygénés de la surface jusqu'au fond. Ils sont souvent profonds, clairs, et avec une eau froide.
- Eutrophiques : riches en éléments nutritifs et donc forte productivité organique. Ils sont donc riches en matière organique. On y trouve de fortes quantités de matière organique s'accumulant sur le fond. Ce sont des lacs peu profonds et remplis d'algues.
- Mésotrophes : lacs intermédiaires aux deux catégories ci-dessus.
- Dystrophiques : se développent par l'accumulation de matière organique provenant de l'extérieur du lac. Il sont communément en terrain forestier marécageux ou de grandes quantités de matière humique sont produites et amenées dans le lac. Il sont plutôt acides, avec une eau colorée en brun-jaune mais claire et régulièrement petits et entourés de sphaigne.

Les lacs peuvent également être classés selon le processus de mélange entre les eaux de surface et les eaux profondes.

- Amicte – Ne se mélangent jamais; lacs couverts de glace des régions polaires.
- Méromicte – Se mélange partiellement seulement, une ou plusieurs fois par année.
- Holomicte – Mélange du lac entier.
- Oligomicte – Mélanges rares, irréguliers. Surtout des lacs tropicaux.
- Polymicte – Plusieurs périodes de mélanges annuelles.
- Monomicte – Une période de mélange par année.
- Dimicte – Deux mélanges par année, au printemps et à l'automne. La plupart des lacs des régions tempérées sont dans cette catégorie.

4.1.3 *Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des lacs*

La plupart des lacs des régions tempérées, comme le Québec, sont dimictes. Les processus de mélanges des lacs ont des conséquences sur la chimie de l'eau et ultimement sur la précipitation des métaux en solution.

Effets thermiques et de densité

En terrain nordique, les lacs se recouvrent de glace l'hiver. Après la fonte des glaces au printemps, la température de l'eau se retrouve très froide, vers 4°C, et normalement assez uniforme verticalement dans la colonne d'eau. À l'été, le réchauffement solaire fait augmenter la température de la couche de surface de l'eau (épilimnion). Avec ce réchauffement, l'épilimnion devient beaucoup moins dense et finit par cesser de se mélanger avec l'eau du fond du lac (hypolimnion), plus dense et plus froide. Le lac devient alors stratifié. Le fait qu'un lac devienne stratifié ou non dépend en partie de facteurs climatiques et topographiques, mais surtout de la profondeur du lac et de la force du vent. En effet, des vents intenses sur un lac favorisent le mélange des eaux de surface avec les eaux inférieures et permet d'augmenter la taille de l'épilimnion. On considère que les lacs peu profonds (< 4m) ne sont pas stratifiés, alors que les lacs de plus de 12 m de profondeur deviennent généralement eutrophiques en présence d'activité organique suffisante dans l'environnement (Cameron, 1994).

L'eau qui arrive des ruisseaux se jetant dans le lac peut parfois être plus légère que l'eau de la surface du lac, et ainsi se disperser à la surface du lac comme sous l'effet d'un panache. Les particules fines en suspension peuvent de cette façon être amenées plus facilement au centre du lac, ce qui constitue un mécanisme de sédimentation important pour les parties centrales des lacs.

Contenu en oxygène

La stratification d'un lac forme une barrière à l'échange d'oxygène entre l'hypolimnion et l'épilimnion, à cause de l'absence de mélange entre les deux (Cameron, 1994). Dans les lacs eutrophiques, c.-à-d. ceux qui ont un apport de matière organique important, l'oxydation de la matière organique dans l'eau diminue rapidement le contenu en oxygène durant les mois d'été, jusqu'à devenir épuisé. On peut donc se retrouver, dans des lacs stratifiés, avec des conditions anoxiques dans l'hypolimnion. Ces conditions ont des conséquences importantes sur la précipitation des métaux en solution. En effet, ces conditions peuvent mener à la formation de sulfures par réduction bactérienne des sulfates, ce qui est un mécanisme permettant la précipitation de métaux comme le cuivre, le zinc, la cadmium, le plomb et le mercure, puisque ces métaux forment des sulfures peu solubles. À l'opposé, des conditions réductrices peuvent mettre en solution les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse, les empêchant ainsi de précipiter.

pH

On considère généralement que le pH de l'eau des lacs est une bonne indication du type de substrat. Dans les régions de roches ou tills carbonatés, les pH sont généralement près ou supérieurs à 7, par rapport aux valeurs moyennes de 6.5 ailleurs. Le pH de l'eau influence les processus de précipitation des métaux.

4.1.4 *Composition des sédiments de lacs*

La composition des sédiments de lacs peut être examinées sous deux angles différents. D'abord, selon l'origine des matériaux qu'ils contiennent : soit transportés sous forme solide de l'extérieur du lac

et sédimentés par la suite dans le lac, soit sous forme de précipitation chimique ou biochimique à partir de l'environnement lacustre (incluant les restes organiques), ou soit formé à l'intérieur même du sédiment à partir des eaux superficielles. Les sédiments peuvent également être considérés selon la nature des fractions sans égard à leur origine : matière organique soluble, oxydes et hydroxydes, sulfures, matière organique insoluble, silicates, carbonates, etc.

Origine des matériaux

Les sédiments de lacs sont composés de trois types de matériaux distincts. La fraction dite allogène est celle transportée par les ruisseaux, par le vent ou par l'érosion des berges. Sa composition minéralogique reflète principalement la composition des berges, autant pour la matière de taille argileuse que plus grossière. La portion allogène des sédiments profonds est principalement composée d'argiles, de quartz et de feldspaths fins, ces deux derniers étant normalement dominants. La distribution de cette fraction dans le lac est contrôlée en grande partie par le système de drainage du lac (Cameron, 1994) et par les conditions d'érosion du bassin de drainage. De la matière organique allochtone peut également être amenée dans le lac par le bassin de drainage sous forme de particules ou en solution ; de façon stricte, cette matière organique est également allogène (Engstrom et Wright, 1984). Certains composés secondaires, tels que des oxydes de fer et manganèse, lorsque transportés par les ruisseaux ou les eaux souterraines jusque dans le lac, peuvent également être considérés allogènes.

La fraction dite endogène est celle qui est formée à l'intérieur même de la colonne d'eau et comprend la matière organique formée dans le lac, dite autochtone, et les précipitations et adsorptions chimiques ou biochimiques. La fraction endogène est contrôlée surtout par les conditions physiques et biochimiques de l'eau. Cette fraction comprend des carbonates précipités biochimiquement, des oxydes et hydroxydes de fer et manganèse, des sulfures secondaires, des phosphates secondaires et de la silice biogénique (Engstrom et Wright, 1984). Les argiles, la matière organique et les oxydes de fer et manganèse peuvent adsorber de nombreux éléments. Ces éléments adsorbés ou coprécipités font également partie de la matière endogène. On trouve des relations souvent intimes entre la fraction endogène et allogène. Par exemple, la matière organique, les argiles, les oxydes et hydroxydes de fer et manganèse et la matière organique ont des taux de sédimentation semblables (Cameron, 1994). De plus, les argiles, qui sont allogènes par définition, adsorbent très facilement des métaux en solution sur leur surface, qui eux sont alors endogènes, d'où cette relation souvent étroite entre les deux fractions. Le contenu en métaux des sédiments plus argileux est beaucoup plus élevé que celui des fractions plus grossières à cause des métaux adsorbés.

Enfin, la fraction authigène est celle formée directement dans le sédiment par interactions chimiques entre les solides organiques et inorganiques du sédiment, et les eaux interstitielles. Des gradients chimiques peuvent s'établir à l'intérieur même de la colonne de sédiments. On a démontré par exemple la présence d'une fine couche très enrichie en Fe-Mn dans les premiers centimètres des sédiments des lacs, et qui est due à la migration de ces éléments des portions réduites du sédiment (où Fe-Mn sont solubles) vers la portion oxydée en contact avec l'eau du lac (où Fe-Mn précipitent alors) (Engstrom et Wright, 1984). C'est pourquoi, lors des campagnes d'échantillonnage des lacs, les instruments d'échantillonnage sont conçus pour ne pas prélever les premiers centimètres de sédiments (Cameron, 1994).

Nature des matériaux

Plusieurs études ont démontré que les sédiments de lacs sont composés de différentes fractions qui peuvent être analysées séparément. Bendell-Young et al. (2002) ont proposé de séparer en quatre fractions les sédiments, pour une étude sur le mode d'occurrence des métaux : la partie organique, les oxydes de manganèse facilement réductibles, les oxydes de fer réductibles et la matière résiduelle (silicates, sulfures et autres). El Bilali et al. (2002) séparent les sédiments de lacs en cinq fractions : la

fraction de matière organique humique soluble, les oxydes de fer et de manganèse amorphes, les oxydes de fer et de manganèse cristallins, les sulfures et la matière organique insoluble, et finalement les silicates.

D'autre part, les sédiments sont normalement constitués de proportions variables de matériaux de la taille des sables, silts, et argiles. L'abondance relative de chacune des fractions joue un rôle très important dans la composition en éléments traces des sédiments. Les sédiments plus fins contiennent par exemple des proportions beaucoup plus importantes d'argiles (sens minéralogique) et d'oxydes métalliques. Ces fractions plus fines concentrent la plupart des éléments traces, soit par adsorption sur les surfaces des argiles ou sur les oxydes de fer et manganèse. On peut comprendre l'influence de la granulométrie sur les compositions par un exemple de carotte verticale prélevée dans un lac du Michigan ([figure 23](#) ; [figure 24](#)). Le sédiment de la carotte prélevée dans ce lac est argileux à sa base et sableux au sommet. On peut voir l'effet drastique du changement de la fraction granulométrique sur les teneurs en différents métaux. La portion argileuse y est en effet beaucoup plus riche en éléments traces.

Contenu en matière organique des sédiments profonds

La matière organique présente dans les sédiments de lacs peut provenir soit de la productivité organique même du lac (autochtone), ou venir du bassin de drainage sous forme de matière organique en suspension ou en solution (allochtone), qui peut par la suite se déposer.

Il a été démontré que la perte au feu mesurée lors de l'analyse chimique est une indication directe du contenu en matière organique du sédiment de lac ([figure 25](#)). Le contenu en matière organique varie bien évidemment selon la latitude, étant beaucoup moins abondant au nord de la limite des arbres que plus au sud. Cette diminution de la quantité de matière organique au nord a des implications importantes pour la fraction endogène. En effet, une quantité moindre de matière organique signifie que les lacs restent oxygénés, même dans le cas de lacs stratifiés. Cameron (1994) rapporte que le fer et le manganèse sont plus abondants au nord de la limite des arbres. Il faut ajouter que la perte au feu de l'échantillon est également reliée à la quantité d'eau contenue dans les minéraux argileux et les oxydes hydratés.

4.1.5 *Source et sédimentation de quelques éléments chimiques dans les lacs*

Plusieurs chercheurs se sont intéressés au mode de transport et de dépôt de certains éléments majeurs dans les lacs. Quelques exemples qui vont permettre de meilleures interprétations des résultats statistiques ultérieurs sont repris ici.

Potassium, magnésium, sodium et calcium

Le potassium, le magnésium et le sodium se retrouvent principalement dans les lacs sous formes de silicates clastiques allogènes érodés à partir des bassins versants (Engstrom et Wright., 1984). Sous forme ionique, ils sont relativement stables et ne se précipitent que très rarement à partir de solution dans des environnements d'eau douce. Étant donné que les silicates sont très peu solubles dans l'eau douce, ces éléments sont conservés de façon à peu près intacte sous forme clastique dans le sédiment. *On considère donc que leur abondance dans les lacs reflète principalement l'intensité et les conditions d'érosion des sols environnants* (Engstrom et Wright., 1984). Des études sur des colonnes verticales de sédiments dans différentes régions nordiques ont permis de relier de façon claire les teneurs en K, Mg et Na avec les changements des conditions d'érosion environnantes. Par exemple, une étude sur le lac Hakojarvi en Finlande a permis de relier la diminution des teneurs en K, Mg et Na à la fin de la dernière période glaciaire dans ce lac avec la transition entre la toundra aride et la

formation de la végétation post-glaciaire (Engstrom et Wright, 1984). Des observations similaires ont également été faites dans deux lacs du sud-est du Labrador, où la transition entre la toundra rocheuse et la forêt boréale est marquée par des diminutions drastiques du contenu allogène de ces lacs, et par conséquent des teneurs en K, Mg, Na ([figure 26](#)).

Le cas du calcium quant à lui est différent. En plus d'être amené sous forme clastique, il montre des affinités importantes avec la matière organique de type humique ou fulvique. On a démontré des associations claires entre le contenu en calcium et la matière organique dans certains cas (Engstrom et Wright, 1984).

Fer et manganèse

Dans les sédiments de lacs, le fer et le manganèse sont influencés à la fois par les conditions dans le bassin de drainage et par les conditions limnologiques. On les trouve à la fois dans les minéraux d'origine clastique (silicates ou oxydes peu solubles), sous forme d'oxydes, sulfures ou carbonates endogènes, et sous forme de complexes organiques dérivés de l'altération des sols (Engstrom et Wright, 1984 ; Cameron, 1994). Les formes endogènes de fer et manganèse sont abondantes et très mobiles dans les lacs, et l'accumulation ultime de ces métaux dépend autant de leur apport dans les lacs que des conditions de l'eau.

Les conditions environnementales dans le bassin de drainage d'un lac jouent un rôle important sur les teneurs finales en fer et manganèse des sédiments de lacs. Les matériaux humiques produits par la décomposition microbienne des plantes terrestres mobilisent le fer et le manganèse dans les sols situés dans le bassin de drainage des lacs. Cette mobilisation est visible jusque dans les eaux lacustres et plusieurs études ont démontré le lien très étroit entre le contenu en fer de l'eau des lacs et la quantité de matière humique dissoute dans les eaux de surface (Engstrom et Wright, 1984). Par exemple, la présence de forêts de conifères, qui produisent des horizons organiques très épais (la décomposition microbienne des conifères est lente), augmente la mobilité du fer et du manganèse. Dans certains cas, les conditions d'oxydo-réduction des sols peuvent également jouer un rôle important. Dans des conditions réductrices, les hydroxydes ou complexes organiques contenant du Fe et du Mn dans les sols peuvent être mobilisés puis amenés vers les lacs. C'est le cas des zones qui sont inondées ; des marécages par exemple. Donc leur apport brut dans les lacs est également fonction des conditions climatiques/hydrographiques/de la végétation du bassin de drainage. Ainsi, les variations dans les conditions hydrographiques et de végétation du bassin de drainage influencent considérablement les concentrations de Fe et Mn endogènes des lacs (Engstrom et Wright, 1984).

Les conditions limnologiques du lac ont également une influence importante sur la préservation des phases endogènes de fer et manganèse dans le sédiment et le rôle des conditions redox de l'eau est particulièrement important. Dans une eau oxydante, le fer et le manganèse sont surtout présents sous forme de suspensions d'oxydes hydratés ou liés à des composés organiques et très peu en solution. La présence de quantités très importantes de fer associées à de la matière organique humique a été confirmée par El Bilali et al. (2002) pour les sédiments de lacs du nord de l'Ontario. Cette dernière étude démontre que la majorité du fer et du manganèse s'y trouvent dans des phases autres que silicatées ([figure 27](#)), principalement avec la matière organique ou sous formes d'oxydes et hydroxydes hydratés. Dans des conditions réductrices, courantes dans l'hypolimnion, le fer et le manganèse sous ces formes se dissolvent facilement (Reid et al., 1999). Ces précipités de fer et manganèse sont généralement fins et peu denses, et sont préférentiellement transportés par l'action des vagues et des courants des dépôts grossiers vers les dépôts plus fins des régions plus profondes et plus protégées des lacs. Il y a également une tendance à voir augmenter les concentrations de fer et de manganèse avec l'augmentation de la profondeur de l'eau (Engstrom et Wright, 1984).

Aluminium et titane

L'aluminium dans la plupart des lacs est dominant sous forme alloène et est considéré comme un indicateur d'érosion. Le titane est considéré comme étant semblable. Toutefois, dans le cas de lacs dits dystrophiques, riches en humus, l'aluminium et le titane peuvent précipiter de façon importante à partir de l'eau avec la matière organique (Engstrom et Wright, 1984). Les lacs dystrophiques qui contiennent des quantités de matière organique importante, non pas dû à la production organique du lac mais à l'arrivée de matière humique des versants dans les forêts de conifères, sont communs dans les secteurs marécageux des forêts boréales. Dans le lac Diamond en Ontario, riche en matière organique, El Bilali et al. (2002) rapportent que près de 40% de l'aluminium du sédiment est associé à la matière organique humique (figure 27). Dans la même étude, deux lacs plus argileux sont plutôt caractérisés par de l'aluminium associé aux silicates.

Cuivre, nickel, zinc, plomb, cobalt, vanadium, chrome, molybdène, mercure

Les différents métaux ne montrent pas le même comportement chimique lors de leur altération à la source, à partir de sulfures formant la minéralisation. Durant l'oxydation d'un corps sulfuré, le plomb, l'argent et l'or sont plutôt immobiles et retenus dans les sols près de la minéralisation. Le fer, le cuivre et l'arsenic sont intermédiaires et déposés dans les parties proximales des systèmes de drainage. Le zinc est le plus mobile et est dispersé de façon très large (Cameron, 1977). La mobilité des métaux est en gros la suivante : $Zn > Cu > Ni > Mo > Ag > Pb > Au$ (Cameron, 1994). Des observations similaires ont été faites par l'auteur de ce rapport sur deux amas sulfurés à Zn-Cu-Pb-Ag-Au de la fosse du Labrador au Québec. Dans ce cas, le plomb, l'or et l'argent étaient retenus et hautement concentrés dans le chapeau de fer développé sur la minéralisation. Le cuivre et le zinc étaient plutôt fortement appauvris dans le chapeau de fer mais très fortement enrichis dans les silts d'un ruisseau adjacent à la minéralisation.

La mobilité des métaux est également fortement influencée par le pH des sols. En l'absence de carbonates près des sulfures, les eaux acides produites ne sont pas neutralisées et toute la roche mère est altérée, y compris d'autres éléments tels que l'aluminium et le titane. Ces eaux très acides favorisent beaucoup la dispersion de la plupart des métaux (sauf l'uranium et le molybdène). En environnement de carbonates, par exemple dans le cas de roches ou de tills carbonatés, la dispersion est beaucoup plus limitée. Il a été démontré que, par exemple, autour de la Baie d'Hudson, les tills carbonatés provenant des plateformes paléozoïques et qui viennent recouvrir les roches archéennes provoquent une atténuation de la dispersion des métaux (Cameron, 1994).

Les oxydes hydratés de fer et de manganèse sont des composés importants dans l'étude de l'accumulation secondaire des métaux. Les métaux de base ont une forte tendance à s'adsorber sur ces oxydes de Fe-Mn (Tessier et al., 1996 ; Cameron, 1994). Ces oxydes sont donc des « pompes » de métaux traces, et peuvent également devenir des sources significatives de métaux pour l'eau du lac lorsqu'ils sont dissous. L'adsorption des métaux de base varie selon les métaux et le pH. En général, le cuivre et le plomb peuvent s'adsorber plus facilement à des pH acides (autour de 5) alors que le zinc, le cobalt et le cadmium ne s'adsorbent qu'à des pH nettement supérieurs à 6 (Cameron, 1994). L'influence de ces différences est marquante pour la dispersion des métaux, et a été clairement démontrée par Cameron (1977) pour un amas sulfuré à Cu-Zn dans les Territoires du Nord Ouest, où l'on constate une ségrégation nette entre le cuivre et le zinc le long d'une chaîne de lacs drainant la minéralisation. Dans les premiers lacs très acides, seul le cuivre précipite et on a de fortes anomalies en cuivre et très peu de zinc dans le sédiment. Plus loin en aval du drainage, avec la dilution, le pH devient plus neutre et alors on trouve de très fortes anomalies en zinc dans le sédiment et peu de cuivre. Cette différence est due au fait que le zinc ne s'adsorbe pas aux oxydes de Fe-Mn au pH trop acide alors que le cuivre peut le faire. En général, les métaux qui ont la plus grande affinité à ces oxydes de fer et manganèse sont le cobalt, le nickel et le zinc.

De façon similaire, les argiles peuvent également servir de points d'adsorption pour les métaux en raison de leur potentiel d'adsorption élevé (Yohn et al., 2002), par exemple l'illite, qui adsorbe des métaux comme le vanadium, le nickel, le cobalt, le chrome, le zinc, le cuivre et le plomb, et la montmorillonite, qui adsorbe le titane, le vanadium, le chrome, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le cuivre, le zinc et le plomb (Siegel, 2002).

La matière organique a également une grande influence sur la précipitation et le transport des métaux de base vers les lacs. A pH acide, il a été démontré que c'est la matière organique humique qui sert de point d'adsorption pour les métaux plutôt que les oxydes de Fe-Mn ; la matière humique elle-même s'adsorbe sur les oxydes de fer et de manganèse (Tessier et al., 1996 ; Bendell-Young et al., 2002). On rapporte que l'ordre de liaison des métaux avec les acides humiques et fulviques est le suivant : U > Hg > Cu > Pb > Zn > Ni > Co (Cameron, 1994).

Dans les lacs dont l'hypolimnion est réducteur, la précipitation des métaux est dominée par la fixation par les composés organiques et la précipitation en sulfures. En effet, les oxydes et hydroxydes de Fe-Mn sont alors absents car solubles. Pour la formation en sulfures, l'ordre est le suivant : Cu > Pb > Co = Ni > Zn > Fe > Mn. Par exemple, Reid et al. (1999) ont montré que le cuivre précipite en sulfures durant les mois d'hiver au fond d'un lac à l'hypolimnion réducteur de Nouvelle-Zélande et que le zinc, le fer et le manganèse restaient en solution.

Différentes études antérieures ont été effectuées pour déterminer la distribution des différents métaux de base dans les différentes fractions des sédiments de lacs. Bendell-Young et al. (2002) ont démontré que plus de 70% du cuivre se trouvait lié à la matière organique dans 7 lacs différents étudiés en Ontario, alors que le zinc et le cadmium se trouvaient surtout associés aux oxydes hydratés de fer et manganèse. El Bilali et al. (2002) rapportent que dans des sédiments de trois lacs de l'Ontario, plus de 70% du zinc et du cuivre se trouvent associés à la matière organique et aux oxydes et hydroxydes de fer et manganèse et que moins de 20% de ces métaux se retrouvent dans la fraction silicatée ([figure 27](#)). Le plomb, de part sa mobilité faible dans l'environnement secondaire, y était plutôt concentré dans la fraction silicatée, à plus de 80%. Le chrome et le nickel sont intermédiaires ; 40%-70% se trouvaient dans la portion silicatée, le reste étant associé surtout aux oxydes et hydroxydes de fer et manganèse.

En général, 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). La considération des conditions limnologiques est donc primordiale pour comprendre l'accumulation des métaux dans les lacs.

4.1.6 Conclusions

Les différents éléments chimiques ont donc des comportements distincts dans les sédiments de lacs :

- K, Mg, Al, Ti sont plutôt associés aux fractions clastiques et silicatées des sédiments ;
- Fe, Mn, Zn, Co montrent des liens étroits avec les oxydes et hydroxydes secondaires ;
- Cu, Hg, U, P montrent des affinités fortes avec la matière organique ; et
- Ni, Cr ont des comportements intermédiaires.

Les recherches exposées précédemment effectuées sur les sédiments de lacs suggèrent que les processus secondaires ont une influence importante sur la composition des sédiments de lacs. Cette étude tentera de circonscrire cette influence à partir de la banque de données de sédiments de lacs en

utilisant les données accompagnant les analyses chimiques des sédiments, tel que la profondeur, la quantité de matière organique (donnée par la perte au feu) et le pH de l'eau.

4.2 Influence de la profondeur du lac

La profondeur d'un lac dépend de plusieurs facteurs. D'abord, en règle générale, plus un lac est grand, plus il est profond ([figure 28](#)). Également, les lacs tendent à être plus profonds dans des zones de plus fort relief ([figure 29](#)). Le relief d'une région est ultimement dépendant de la géologie du socle rocheux et de la nature et quantité de dépôts superficiels. La présence de grandes étendues de dépôts superficiels tend à aplanir les différences de relief du socle sous-jacent et les lacs tendent alors à être moins profonds ([figure 30](#)). La figure 30 présente des contours interpolés de la profondeur des lacs, superposés sur la carte des dépôts de surface. Celle-ci montre que, pour la région du Grand-Nord, les secteurs n'ayant aucun dépôt de surface (« Rock ») sont caractérisés par les lacs les plus profonds et que les secteurs ayant des dépôts de surface abondants, comme des couvertures épaisses de till (« till blanket »), des dépôts de mers post-glaciaires (« cM » ou « cL ») ou des complexes fluvio-glaciaires (« Gx » ou « Gm »), ont plutôt des lacs peu profonds. Des lacs plus profonds auront également tendance à se former dans des régions ayant des contrastes rhéologiques significatifs entre les roches, comme dans le cas de la fosse du Labrador où on trouve des roches ignées mafiques interstratifiées avec des shales.

Statistiquement, il est possible d'examiner la relation entre la profondeur des lacs et les valeurs en différents éléments, en utilisant des box-plots catégorisés selon la profondeur exprimée en mètres, rapportée lors de l'échantillonnage. Sur ces graphiques, la boîte rectangulaire représente l'intervalle entre le premier et le troisième quartile ; le petit carré central représente la médiane. Les lignes représentent l'intervalle des valeurs non anomaliques. Les relations positives entre la profondeur et les teneurs en différents métaux comme le fer, le manganèse, le zinc et le cuivre sont claires lorsqu'on regarde les box-plots de ces différents éléments ([figure 31](#); [figure 32](#)).

Ces relations peuvent également être vérifiées visuellement en plan. Si on superpose les contours du zinc et du cuivre sur des profondeurs des lacs et sur la carte des dépôts de surface pour la partie nord de la Province de Supérieur, on constate que les faibles valeurs en métaux sont fortement corrélées avec les zones de faibles profondeurs des lacs et de dépôts de surface importants ([figure 33](#); [figure 34](#); [figure 35](#)). Le même genre de relation se vérifie également à petite échelle au niveau des échantillons individuels ([figure 36](#)). On peut voir sur cette dernière figure que la présence d'un seul lac peu profond dans une région de lacs profonds provoque très souvent un creux bien visible sur les cartes contournées.

Ces relations, visibles à l'échelle du Québec, se confirment également au niveau statistique si on isole les données de la Province de Supérieur dans le Grand Nord (latitude > 56 et longitude < -71 ; [figure 37](#); [figure 38](#)), pour le Grenville de la Côte-Nord ([figure 39](#); [figure 40](#)), et pour le Labrador également ([figure 41](#); [figure 42](#)). Kerr et Davenport (1990) ont également noté des corrélations significatives entre la profondeur des lacs et les teneurs en Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Ag, Mn, As, Mo et Fe pour un secteur de la province de Makkovik au Labrador.

Pour définir l'origine de ces relations, une étude minéralogique des échantillons serait nécessaire. Toutefois, quelques hypothèses préliminaires peuvent être formulées. Il a été mentionné précédemment que les particules métalliques d'oxydes de Fe-Mn peuvent difficilement se déposer à faible profondeur d'eau en raison de leur fine taille et de l'action des vagues et du vent qui les gardent en suspension continuellement. La présence d'une partie profonde dans un lac (à plus de 3-4 mètres), à l'abri de ces perturbations, servirait de zone abritée où ces fines particules peuvent alors s'accumuler préférentiellement (Engstrom et Wright, 1984). Or, on sait que les oxydes hydratés de Fe-Mn servent de points d'adsorption et de précipitation pour de nombreux métaux montrant des affinités avec le fer et le manganèse, tels que le zinc, le nickel, le cobalt et le cuivre. Ce mécanisme sédimentologique pourrait expliquer comment les lacs profonds échantillonnés peuvent contenir de plus grandes

quantités de métaux, possiblement associés à ces oxydes. On peut également penser que l'abondance des argiles, sur lesquels les métaux s'adsorbent également, est contrôlée de la même façon par la profondeur, les argiles se déposant préférentiellement dans les portions calmes et abritées, généralement plus profondes.

Certains éléments qu'on croit être d'origine clastique principalement (voir section 4.1.4) dans les sédiments de lacs, comme le titane, le chrome et l'aluminium, et dans une moindre mesure, le potassium, montrent également des relations avec la profondeur ([figure 43](#); [figure 44](#)). Ceci supporte l'idée d'une ségrégation des particules argileuses vers les parties profondes des lacs, qui est semblable à ce qui est proposé pour les particules métalliques fines. Comme la surface des argiles a la capacité d'adsorber plusieurs métaux incluant le titane, le chrome et le vanadium (voir section 4.1.4), on peut penser que la plus grande quantité d'argile et donc la profondeur favorisera l'augmentation de leurs teneurs dans les sédiments.

Toutefois, certains éléments, comme Ca, ne montrent pas de relation avec la profondeur, ce qui indique une origine différente ([figure 45](#)).

Il a également été mentionné que les conditions limnologiques sont très différentes entre les lacs profonds et peu profonds. Les lacs profonds deviennent stratifiés à cause des différences de densité de l'eau alors que les lacs peu profonds ne le sont pas. La stratification des lacs influence de façon très évidente les conditions redox de l'eau, qui peut à son tour influencer la précipitation des métaux. Il n'est pas possible dans le cadre de la présente étude d'évaluer le rôle exact de cet aspect, mais il doit jouer un rôle significatif.

4.3 Influence des valeurs en perte au feu

La matière organique constitue une portion importante des sédiments des parties centrales et profondes des lacs (Cameron, 1994). Il a été mentionné dans la section 4.1 que la matière organique joue un rôle important dans la mobilisation des métaux à la source des sédiments, c.-à-d. dans les sols du bassin de drainage, ainsi que dans la précipitation des métaux dans les lacs. La teneur en argiles, qui est également souvent corrélée avec la quantité de matière organique, est également reflétée par les valeurs en perte au feu.

Les profils des métaux tels que le fer, le zinc, le manganèse, le cuivre et le nickel, pour tous les lacs du Québec, montrent des profils caractérisés par une corrélation positive PAF vs métal pour le début du profil, à des pertes au feu faibles, puis une faible corrélation négative ([figure 46](#); [figure 47](#); [figure 48](#)). Pour les données du Labrador ([figure 49](#); [figure 50](#)), le zinc et le cuivre montrent des relations évidentes avec la perte au feu; le fer montre plutôt une relation négative sur toutes les valeurs. Les mêmes relations sont évidentes lorsque, par exemple, on isole les lacs du nord de la Province de Supérieur ([figure 51](#); [figure 52](#)), les lacs de la fosse du Labrador, et les lacs de la partie sud-est de la Province de Churchill (levé 1982055; [figure 53](#)). Pour les lacs du Grenville, les relations sont beaucoup moins claires, et seul le fer montre le même lien avec la perte au feu, l'aluminium étant fortement corrélé avec la perte au feu.

Des relations entre le contenu en perte au feu des sédiments et les teneurs en métaux ont été notées par d'autres chercheurs pour les sédiments de lacs en Ontario dans le cas de l'uranium, du manganèse et du fer et pour la Saskatchewan, dans le cas du zinc et de l'uranium (Cameron, 1994). Les formes des relations observées par ces autres études sont très semblables à celles notées pour le Québec.

Il est intéressant de constater que les profils des lacs du Québec pour Al, K, Mg, Ti, V et Cr ne sont pas indépendants de la perte au feu ([figure 54](#); [figure 55](#); [figure 56](#)); or, ces éléments sont considérés comme étant d'origine principalement clastique dans les lacs, en particulier pour K et Mg. La première portion des profils est en fait assez semblable à ceux des métaux comme Fe, Mn, Cu et

Zn, avec des augmentations nettes des teneurs de 0 à 15% de perte au feu. La relation avec l'aluminium et le vanadium est particulièrement évidente. On peut remarquer toutefois que la partie décroissante de la courbe, à partir de 20% de perte au feu est différente pour le cuivre et de façon moins évidente pour le zinc et le fer par rapport aux autres éléments mentionnés précédemment, puisque les valeurs semblent rester plus constantes et décroître moins rapidement.

Il est difficile de penser que des éléments comme K et Mg puissent être vraiment reliés à la matière organique, puisque les études précédentes dans la littérature suggèrent qu'ils ne sont pas du tout reliés à la fraction organique des sédiments. En réalité, on s'attendrait donc plutôt à avoir un effet général de dilution entre la matière organique et clastique ; l'augmentation des valeurs de 0 à 15% est contraire à cette hypothèse.

L'augmentation des valeurs en perte au feu sur l'intervalle de 0-15% ne représente peut-être pas majoritairement l'augmentation de la teneur en matière organique mais plutôt l'augmentation de la quantité d'argiles dans le sédiment. Rappelons que les valeurs en perte au feu représentent à la fois la quantité de matière organique et la quantité d'argiles et d'oxydes hydratés dans le sédiment. Or, comme déjà mentionné, les argiles ont une forte propension à adsorber différents métaux sur leur surface, et que les sédiments argileux sont en conséquence plus riches en différents métaux que les sédiments plus grossiers (voir section 4.1.4). De cette façon, on pourrait expliquer la corrélation positive entre la perte au feu et la plupart des éléments pour la première partie du profil par une augmentation de la quantité d'argiles dans le sédiment; d'une part, le potassium, le magnésium et l'aluminium abondants dans la structure des argiles et, d'autre part, les autres métaux adsorbés sur leurs surfaces.

Dans le cas de la partie droite des profils, à des teneurs de plus de 20-25% de perte au feu, les teneurs en matière organique ont certainement plus d'influence sur les augmentations des valeurs de la perte au feu. En effet, les argiles ne contiennent normalement pas plus d'environ 20% de perte au feu ; des valeurs plus élevées en perte au feu doivent alors s'expliquer de façon obligatoire par une augmentation de la quantité de matière organique. On devrait alors voir, dans cette partie des profils, l'effet de dilution attendu entre la matière organique et la fraction clastique. Effectivement, les teneurs en éléments comme K, Al, Mg et Ti diminuent de façon constante pour des valeurs en perte au feu de plus de 20-25%. La forme des profils à plus de 20-25% de perte au feu représenterait alors véritablement l'affinité d'un élément avec la matière organique. Les profils moins négatifs pour le cuivre, le zinc, le fer et l'uranium pour les valeurs en perte au feu plus élevées pourraient alors souligner leur affinité plus forte avec la matière organique, ce qui est cohérent avec ce qui est mentionné à la section 4.

Les extractions partielles utilisées pour les analyses de la banque de données du Québec, qui peuvent attaquer les argiles et certains micas de façon préférentielle aux autres silicates, amplifient certainement la relation entre la perte au feu et les teneurs en Al, K et Mg.

On peut contraster ces profils corrélés positivement avec la perte au feu avec ceux du sodium et du scandium pour le Labrador ([figure 57](#); [figure 58](#); [figure 59](#); [figure 60](#)). Ces sédiments sont analysés par activation neutronique pour ces éléments et incluent donc les phases silicatées autres qu'argileuses ; les pentes fortement négatives contrastent d'ailleurs très nettement avec celles des métaux comme le zinc et le cuivre.

4.4 Relations entre la couleur de l'échantillon et les teneurs

Lors de l'échantillonnage, une certaine quantité d'information qualitative est également recueillie. La couleur de l'échantillon est une indication de la composition globale. En observant les relations entre la couleur et les teneurs en différents éléments, on peut extrapoler des informations sur le mode d'occurrence. Ces informations qualitatives sont subjectives et l'évaluation de la couleur est susceptible de varier entre des levés faits à des époques différentes. Pour obtenir une meilleure

uniformité des observations, seul le levé 1997520 (Grand Nord) a été utilisé dans ces analyses, ainsi que les couleurs qui sont représentées par plus de 1000 échantillons.

Les quatre couleurs les plus communes sont les suivantes : gris, brun pâle, brun et brun foncé. On peut penser qu'entre brun pâle et brun foncé, le contenu en matière organique augmente. De même, les sédiments gris devraient être en principe pauvres en matière organique et plus riches en matière minérale. Au niveau qualitatif, on peut donc constater que des variations de couleurs très importantes sont présentes entre différents échantillons, ce qui est symptomatique de sédiments fondamentalement différents.

L'analyse des caractéristiques indique que les sédiments gris sont plus riches en matière minérale que les autres, avec des valeurs en K, Mg, Ba, Ti nettement plus élevées et des valeurs en perte au feu très faibles ; ils sont également normalement plus profonds ([figure 61](#) ; [figure 62](#) ; [figure 63](#) ; [figure 64](#)). À l'inverse, les sédiments de couleur brun foncé sont plus riches en matière organique et en calcium. Les sédiments brun pâle et bruns sont intermédiaires. Il y a une distinction entre le comportement de Al, Cr, V et celui de K et de Mg. En effet, Al, Cr et V se trouvent nettement moins appauvris que Mg et K dans les sédiments bruns foncés, ce qui indique qu'ils gardent une certaine affinité avec ces sédiments. On peut penser que leur association avec des argiles, qui peuvent être présentes aussi bien dans les sédiments riches que pauvres en matière organique, pourrait expliquer cette situation. Notons que les terres rares (La, Ce) et U montrent des profils peu dépendants de la couleur.

Tableau 2. Relation entre les couleurs des échantillons et les teneurs en éléments.

Couleur	Très enrichis	Enrichis	Appauvris	Très appauvris
Gris	K, Mg, Ba, Ti, Ni plus profond	Cr, Cu, Zn, Th, Mn, Al		Ca, PAF
Brun pâle			PAF	
Brun		PAF		
Brun foncé	PAF	Fe	Al, Ba, Th, Cu, Cr	K, Mg, Ti, Ni, moins profond

4.5 Conclusions

Les précédentes discussions montrent bien les relations étroites qui existent entre les teneurs en métaux et les différents facteurs environnementaux influençant la sédimentation lacustre. Ces facteurs sont non négligeables, comme l'indiquent à la fois les résultats de cette étude sur les données du Québec et du Labrador et les observations faites par d'autres chercheurs intéressés au contenu en métaux des lacs, que ce soit pour l'exploration ou pour des études de contamination anthropiques.

L'environnement lacustre peut varier très rapidement d'un lac à l'autre. On n'a qu'à penser par exemple à un grand lac profond et pauvre en matière organique adjacent à un plus petit lac eutrophique. Ces variations de l'environnement lacustre mènent à des sédiments de nature fondamentalement différente d'un lac à l'autre. L'analyse faite à partir des données qualitatives de couleur confirme qu'on est en présence de variations très importantes dans la *nature même* des sédiments, qui se matérialisent par des différences très marquées dans les couleurs (blanc-gris à noir).

L'affinité des différents éléments chimiques pour les différentes fractions constituantes fondamentales des sédiments (matière organique, argile, matière clastique, etc.) varie beaucoup d'un élément à l'autre. Par exemple, certains éléments sont corrélés presque uniquement avec la fraction clastique (ex. : Mg, K) alors que d'autres ont des affinités fortes avec la matière organique (ex. : Ca). En conséquence, l'abondance relative des différentes fractions contrôle de façon étroite les teneurs des éléments, selon leur affinité géochimique.

Pour résumé, plusieurs facteurs interreliés influenceront la teneur des métaux dans les sédiments lacustres. Les conditions environnementales auront une incidence sur le pourcentage des fractions fondamentales (matière organique, argile, silt, sable et oxydes métalliques), ce qui produira des types de sédiments différents et induira des teneurs en éléments différentes selon l'affinité chimique des éléments pour chacune des fractions.

Il est donc primordial d'aborder la géochimie des lacs pour l'exploration de façon un peu plus systématique, en séparant par exemple les lacs en catégories selon les différences entre les types de sédiments. *Il faut ajuster les seuils anormaux en métaux pour tenir compte des différents types de sédiments lacustres.* De cette façon, on pourrait arriver à comparer des lacs semblables dont les variations des teneurs en métaux seraient alors beaucoup plus significatives en termes d'exploration.

5 DÉLIMITATION DE DOMAINES GÉOCHIMIQUES

5.1 Objectifs

Bien que la composition chimique des sédiments de lacs soit influencée par une série de facteurs reliés aux conditions limnologiques et sédimentologiques des lacs, la composition moyenne du substrat géologique (roche en place et dépôts quaternaires) est un facteur qui influence la composition des sédiments. Les cartes contournées de différents éléments montrent des variations à grande échelle qu'on peut dans plusieurs cas relier à des provinces ou domaines géologiques connus. Ces variations à grande échelle font varier le bruit de fond géochimique pour les différents éléments.

Il a été démontré l'importance de tenir compte des variations dues aux facteurs environnementaux lorsque vient le temps de déterminer des seuils d'anomalies pour les sédiments de lacs. Il est également primordial de tenir compte des variations dues aux grands ensembles lithologiques, et d'ajuster les seuils d'anomalies selon les régions, ces variations étant indésirables du point de vue de l'exploration minière.

Une solution possible au problème causé par ces grandes variations est de délimiter des régions (domaines géochimiques) dans lesquelles le bruit de fond géochimique est assez constant. Par la suite, les seuils d'anomalies pour chacune de ces régions sont calculés en utilisant des statistiques de base telles que des percentiles.

Pour délimiter de tels domaines géochimiques, il est préférable d'utiliser le plus grand nombre possible d'éléments chimiques pour pouvoir caractériser le plus fidèlement possible le bruit de fond. Il serait possible, mais fastidieux, de contourner la maille de chacun des éléments, puis de les regrouper pour former différents domaines basés sur les associations multi élémentaires.

Une façon alternative et plus rapide d'arriver à un résultat acceptable serait d'utiliser une approche permettant de réduire le nombre de variables tout en gardant la plus grande partie de l'information. Les méthodes d'analyse en composante principale et factorielle sont des méthodes appropriées pour arriver à un tel résultat. À partir d'une vingtaine de variables, qui sont les éléments chimiques analysés, on peut extraire les composantes principales qui représentent les grands axes de variations de la composition des sédiments. En gardant les premières composantes principales, qui sont les plus importantes en termes de variance, on conserve le gros de l'information tout en réduisant le nombre de variables de façon drastique.

L'association de différents éléments dans les facteurs ainsi que les relations entre ces facteurs et les variables secondaires telles que le pH, la profondeur des lacs et le contenu en matière organique permet également de mieux comprendre les grands phénomènes à l'origine de la variation de la

composition des sédiments. Ces relations sont importantes pour comprendre la géochimie des sédiments de lacs et seront abordées à la section 5.3.

5.2 Méthodologie de l'analyse multivariable

5.2.1 Choix des éléments

L'analyse multivariable est exécutée sur une suite d'éléments qui ont une bonne qualité analytique, telle que définie dans la section 3. En effet, un nombre élevé d'analyses sous la limite de détection cause des problèmes dans les méthodes statistiques à cause du fait que l'on doit remplacer les mesures sous la limite de détection par une valeur pour les calculs, qui sera la plupart du temps une surévaluation de la vraie valeur (Grunsky et Smee, 1999).

La base de données du Québec comprend une série d'éléments lithophiles majeurs qui n'est pas analysée pour le Labrador, tels que Al, K, Mg, Ca. Ces éléments jouent un rôle important pour comprendre la nature des différents facteurs extraits, puisque leur comportement dans les lacs a été étudié plus en détail que la plupart des éléments traces. C'est ce qui justifie la décision de faire l'analyse et les interprétations à partir de la base de données du Québec. L'analyse a ensuite été effectuée sur une banque combinée Labrador-Québec, en utilisant les éléments de bonne qualité analytique communs aux deux banques de données.

La suite d'éléments choisie pour le Québec (17) : Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, La, Mn, Mg, Ni, P, Ti, Th, V, U, Zn

La suite d'éléments choisie pour le Québec et le Labrador réunis (11) : Ba, Ce, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Ni, Th, U, Zn

5.2.2 Choix de la méthode multivariable et méthodologie d'analyse

Analyse factorielle vs analyse en composante principale

Deux méthodes d'analyse multivariable très semblables ont été considérées: l'analyse factorielle et l'analyse en composante principale. Les deux méthodes sont basées sur une eigen-décomposition d'une matrice de similarité (covariance ou corrélation) pour obtenir une série de facteurs ou composantes représentant les axes de variation principaux des données. L'analyse en composante principale se base sur le principe que toute la variance des données doit être incluse dans les facteurs ; par opposition, l'analyse factorielle laisse la possibilité qu'une partie de la variance soit laissée à l'extérieur du modèle. On considère que pour obtenir une réduction des données, on utilise l'analyse en composante principale, alors que l'analyse factorielle est préférable lorsque l'objectif est de comprendre la structure dans les données (Reimann et al., 2002). C'est plutôt ce deuxième aspect qui est particulièrement intéressant, d'où le choix de l'analyse factorielle pour la délimitation des domaines géochimiques et pour l'interprétation des domaines géologiques.

Paramètres de l'analyse factorielle

L'analyse factorielle a été effectuée dans le logiciel Minitab 14. La méthode d'extraction des facteurs choisie est « communalités, multiple r-square », à partir de la matrice des coefficients de corrélation (pour que toutes les variables aient le même poids). Une rotation varimax de base a été appliquée aux facteurs extraits pour mieux les séparer et sept facteurs ont été extraits.

Traitement des valeurs extrêmes

La présence de valeurs extrêmes peut fortement influencer et fausser une analyse multivariable. En effet, les valeurs extrêmes peuvent fausser les valeurs de la matrice de corrélation, qui est à la base de l'analyse. Pour déterminer quelles valeurs sont extrêmes, la méthode des distances mahalanobiennes a été utilisée, en utilisant cette fonction dans Minitab 14 (Reimann et al., 2002). Les échantillons ayant les distances mahalanobiennes les plus grandes (1%) ont été enlevés au départ de l'analyse, avant le calcul de la matrice de corrélation. Les analyses ont donc été effectuées sans ces valeurs. A la toute fin, les coefficients calculés pour chacun des facteurs ont été appliqués sur ces échantillons pour les inclure dans les données finales.

Pour diminuer l'effet des valeurs élevées, toutes les valeurs ont été transformées en logarithmes naturels après le calcul des distances mahalanobiennes.

5.3 Interprétation des résultats de l'analyse factorielle

Le **tableau 3** montre les eigenvaleurs obtenues de l'analyse factorielle, après la rotation Varimax. Les différents facteurs extraits sont représentés graphiquement ([figure 65](#); [figure 66](#); [figure 67](#); [figure 68](#); [figure 69](#)). Les caractéristiques principales des facteurs sont énumérées au **tableau 4**.

Tableau 3. Eigenvaleurs de l'analyse factorielle, 17 éléments pour le Québec.

Facteur	1	2	3	4	5	6	7
Variance expliquée	2,92	2,04	2,34	1,79	2,35	0,27	0,64
% du total	17.2%	12.0	13.8%	10.5%	13.8	1.6%	3.7%

Tableau 4. Caractéristiques des facteurs de l'analyse factorielle

Facteur / Corrélation	Bonne	Moyenne	Faible
1 : Mg-K-Ti	Mg, K, Ti	Cr, Ni, Mn, Fe, Ba, Cu, Zn, Al	Ca, P, U et La
2 : La-Th-U	La, Th, U		Cr, Ni, Mg
3 : V-Ti-Al-P-Cr	V, Ti, Al, P, Cr		Ca
4 : Fe-Mn-Zn	Fe, Mn	Zn, P	Cr, Ti, U
5 : Ni-Cu-Zn	Ni, Cu, Zn	Cr, Al	V, U, Th, La, P, Ti
6 : annulé			
7 : Ca-Ba	Ca, Ba	Cu, P, Zn, Mn	Cr, V

Il est important d'examiner chacun des facteurs de façon détaillée pour comprendre la nature des processus qui sont responsables des grands axes de variation de composition des sédiments qu'ils représentent. Dans les sections suivantes, chaque facteur sera examiné individuellement du point de vue de la suite d'éléments qui le définit, sa relation avec la profondeur des lacs et la perte au feu, et finalement sa relation avec la géologie à l'échelle du Québec.

5.3.1 Facteur 1 : Mg-K-Ti

Affinité de la suite d'éléments

Le magnésium et le potassium sont les deux éléments les plus corrélés du facteur 1. Il a déjà été mentionné qu'ils sont tous les deux principalement sous forme de silicates d'origine clastique dans les sédiments de lacs, et ils ont été interprétés par d'autres comme indiquant le degré d'érosion du bassin de drainage et la proportion d'apport clastique dans le sédiment (voir section 4.1.4). D'autres études ont également montré la forte corrélation entre ces deux éléments (Engstrom et Wright, 1984). Bien sûr, cette signature n'est probablement pas typique d'un type de roche en particulier, puisque le magnésium et le potassium ont des comportements géochimiques normalement très différents dans la majorité des roches ignées. Le titane est également un élément qui est majoritairement d'origine clastique. Sur la base de la suite d'éléments, en particulier le magnésium et le potassium, ce facteur semble représenter la proportion d'apport clastique dans le sédiment.

On sait que les extractions partielles par acide nitrique et/ou chlorhydrique ne dissolvent que certains silicates. Pour le potassium et le magnésium, on peut s'attendre à ce que ce soit principalement la biotite, la chlorite ou certaines argiles comme l'illite qui contribuent aux teneurs, puisque les autres silicates de magnésium ou de potassium sont insolubles dans les acides faibles.

Il est à noter également que la très grande majorité des éléments montrent des corrélations importantes avec ce facteur, excepté le calcium, le phosphore, l'uranium et le lanthane. Ceci indique que la plupart des éléments sont assez fortement corrélés avec la portion clastique terrigène des sédiments.

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

Le facteur 1 est peu influencé par la profondeur des lacs, sauf dans le cas des lacs à fortes valeurs en perte au feu où une corrélation positive s'observe ([figure 70](#)). Il est toutefois corrélé négativement de façon claire avec la perte au feu ([figure 71](#); [figure 72](#)). Ceci est cohérent avec l'interprétation qui veut que ce facteur représente la portion clastique, qui a alors une relation essentiellement de dilution avec la matière organique ; en général, plus on a de matière organique moins on a de portion clastique et inversement.

L'absence de relation avec la profondeur des lacs suggère que ce facteur ne se corrèle pas avec les fractions les plus fines des sédiments s'accumulant préférentiellement dans les portions plus profondes des lacs, contrairement au facteur 3 (voir section 5.3.3).

Finalement, les valeurs du facteur 1 sont nettement plus élevées dans les sédiments gris que dans ceux qui sont plus foncés, ce qui supporte l'interprétation de la nature clastique de ce facteur. On remarque une diminution marquée à mesure que le sédiment devient plus foncé.

On interprète ce facteur comme étant le résultat de la dilution entre la matière organique et clastique.

Relation avec la géologie

En comparant avec la carte géologique, on trouve que ce facteur est élevé dans la partie est de la fosse du Labrador, dans les Torngats ([figure 73](#)), qui sont des secteurs à relief accentué. On trouve également des valeurs élevées sur le bord du Saint-Laurent sur la Côte-Nord, et sur le pourtour de la Baie d'Hudson. Ces secteurs semblent correspondre à la limite des mers post-glaciaires ; dans ces cas, des apports clastiques importants pourraient être reliés à la présence de grandes quantités de sédiments meubles facilement érodés plutôt qu'à de forts reliefs. On ne peut pas corréler ce facteur

avec un type de roche en particulier ; il est plutôt corrélé avec les secteurs à apport clastique important.

5.3.2 Facteur 2 : La-Th-U

Affinité de la suite d'éléments

Le lanthane, le thorium et l'uranium sont des éléments très incompatibles qui sont enrichis particulièrement dans les roches granitiques et alcalines. Cette suite d'éléments semble prometteuse pour avoir une relation avec la géologie.

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

La relation de ce facteur avec la perte au feu et la profondeur est assez claire. Il montre une corrélation positive à la fois avec la perte au feu et avec la profondeur pour la majorité des échantillons, c.-à-d. pour des PAF de moins de 50% et des profondeurs de moins de 15m ([figure 74](#); [figure 75](#)). Avec une proportion de perte au feu très élevée, il devient toutefois négativement corrélé avec cette dernière. Cette association avec la perte au feu et la profondeur semble exclure une origine clastique pour ce facteur. La présence d'uranium dans ce facteur, reconnu comme étant très soluble et mobile en environnement oxydant de surface, tend à supporter cette hypothèse.

Le facteur 2 ne montre pas de relation avec la couleur des sédiments.

Relation avec la géologie et interprétation

La relation du facteur 2 avec la géologie est nette ([figure 76](#)). D'abord, on remarque des valeurs très élevées sur les ensembles granitiques paléoprotérozoïques de l'est de la fosse du Labrador. On peut noter en particulier des valeurs extrêmes sur le batholite de Mistassin, un granite alcalin du Mésoprotérozoïque. Dans ce cas, ce facteur permet de cartographier très précisément les contours de l'intrusion. Des valeurs élevées sont également observées dans les ensembles granitiques du Grenville, ainsi qu'associées aux tonalites des suites de la Province de Supérieur. On peut aussi noter des valeurs individuelles élevées associées à de petites intrusions alcalines à fluorine dans le secteur de l'Ashuanipi. Les valeurs les plus faibles sont localisées sur les ensembles mafiques et (méta)-sédimentaires des Torngats, de la fosse du Labrador, de l'Ashuanipi ainsi que sur les intrusions anorthositiques de la Côte-Nord.

5.3.3 Facteur 3 : V-Ti-Al-P-Cr

Affinité de la suite d'éléments

Les éléments V, Ti, Al, P, Cr ont en commun d'être enrichis dans les roches ignées mafiques à intermédiaires, tels que gabbros et anorthosites, sauf pour le cas de l'aluminium. Le titane, l'aluminium, le chrome et le vanadium se trouvent normalement en majorité, mais pas totalement, dans les fractions clastiques des sédiments sauf dans le cas du phosphore (Engstrom et Wright, 1984 ; El Bilali et al., 2002).

Dans les roches sources, ces métaux se trouvent principalement sous forme d'oxydes ou de silicates.

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

La relation entre le facteur 3 et la profondeur des lacs est nette, particulièrement pour les lacs de profondeur de moins de 10 mètres, qui sont les plus abondants, et ce, peu importe la perte au feu. La relation avec la perte au feu est moins claire dans la majorité des cas (lacs de profondeur de moins de 5 mètres) mais on note une corrélation positive pour les lacs plus profonds ([figure 77](#); [figure 78](#); [figure 79](#)). Il n'y a pas de relation claire entre la couleur des sédiments et ce facteur, ce qui suggère qu'il ne représente pas un contrôle de dilution entre la matière organique et la matière clastique.

Si on accepte que ces éléments soient d'origine plutôt clastique, alors leur abondance plus grande dans les lacs plus profonds pourrait s'expliquer par leur association avec les fractions fines et argileuses du sédiment. Une telle association avec du matériel clastique argileux pourrait expliquer qu'ils s'accumulent préférentiellement dans les parties profondes et calmes des lacs. L'association de ces métaux avec les fractions argileuses des sédiments aux dépens des fractions plus sableuses a été notée par Yohn et al. (2002) sur un profil vertical des sédiments du lac Hubbard au Michigan. On y note des concentrations de magnésium, aluminium, titane, vanadium et chrome qui sont nettement plus élevées dans les niveaux argileux des sédiments que dans les niveaux de sable fin ; par exemple les teneurs en aluminium augmentent d'un facteur de 4. Ces chercheurs ont expliqué cette relation par le fait que les surfaces des argiles sont réactives et tendent à avoir des métaux fixés sur elles. On peut également penser que les portions profondes et plus argileuses des lacs contiennent possiblement moins de quartz de la taille des silts ou sables fins, qui est susceptible de diluer le contenu en autres éléments du sédiment.

Une association positive avec la matière organique pour les lacs de moyenne et grande profondeur suggère aussi une influence des processus hydromorphiques, mais il est difficile de le conclure hors de tout doute. Il est donc probable que ce facteur soit fortement influencé par la quantité de matériel argileux fin dans le sédiment, matériel qui s'accumulera normalement préférentiellement dans les parties profondes des lacs.

Relation avec la géologie et interprétation

On retrouve les valeurs les plus élevées du facteur 3 sur les roches métasédimentaires de faciès métamorphiques élevés de l'Ashuanipi, de l'Opinaca à la Baie-James, et des Torngats ([figure 80](#)). Les contours de l'Ashuanipi peuvent d'ailleurs être définis de façon assez directe à l'aide de ce facteur. Des valeurs élevées sont également observées sur les massifs anorthositiques de la Côte-Nord, ce qui est cohérent avec la suite d'éléments qui est communément très enrichie dans les anorthosites, en particulier V-Ti-P. Les valeurs les plus faibles se retrouvent sur la fosse du Labrador et sur le littoral de la Côte-Nord.

La relation du facteur 3 avec des ensembles lithologiques précis est claire, et il est probable que sa variation soit principalement contrôlée par la géologie, mais fortement modulée par la profondeur des lacs. Toutefois, il est difficile d'expliquer pourquoi les roches métasédimentaires ont des valeurs très élevées alors que les roches sédimentaires non métamorphisées montrent des valeurs très basses (comme par exemple la fosse du Labrador). Il est possible que cette différence soit due au mode d'occurrence de ces métaux dans les roches métamorphisées plutôt que de l'abondance absolue de leur concentration dans les roches mères. Le mode d'occurrence des éléments peut influencer leur érosion et leur transport vers les lacs. Le type de minéral dans lequel se retrouve ces éléments peut également modifier leur taux d'extraction par les agents chimiques utilisés pour l'analyse et donc la concentration finale rapportée par le laboratoire.

5.3.4 Facteur 4 : Fe-Mn-Zn

Affinité de la suite d'éléments

Les éléments Fe, Mn et Zn ont en commun d'avoir une très forte tendance à former des oxydes et hydroxydes hydratés dans les eaux de surface oxydantes. Dans les lacs, on les trouve d'ailleurs tous les trois principalement sous cette forme (voir section 4.1.4). Dans les roches sources, ils peuvent se trouver dans des oxydes (sauf Zn), silicates, carbonates ou sulfures (sauf Mn).

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

Le facteur 4 montre une forte corrélation positive avec la profondeur, et une relation sous forme de cloche avec la perte au feu avec un maximum à 20% de perte au feu ([figure 81](#); [figure 82](#); [figure 83](#)). Ces relations très nettes ne sont pas surprenantes, puisque l'on sait que l'accumulation du fer et du manganèse dans les lacs est très dépendante des conditions redox de l'eau, qui sont elles-mêmes influencées par la profondeur et la productivité organique du lac. On a mentionné également que les oxydes et hydroxydes de manganèse, présents en très fines particules métalliques, ont une forte tendance à se déposer préférentiellement dans les parties profondes et calmes des lacs (Engstrom et Wright, 1984). Ce facteur est relativement plus enrichi dans les sédiments plus foncés. On constate aussi que les sédiments plus foncés montrent une variabilité beaucoup plus grande des valeurs de ce facteur.

Ces dernières observations suggèrent fortement que le facteur 4 représente principalement l'accumulation d'oxydes et d'hydroxydes de fer et de manganèse, qui est fortement influencée par les conditions limnologiques et sédimentologiques des lacs.

Relation avec la géologie

Des valeurs élevées du facteur 4 permettent de définir clairement les contours de la fosse du Labrador ([figure 84](#)). Pour le reste du Québec, il est plus difficile de relier les valeurs à des ensembles géologiques distincts. Dans l'ensemble, ce facteur se corrèle assez faiblement avec la géologie.

5.3.5 Facteur 5 : Ni-Cu-Zn

Affinité de la suite d'éléments

Les éléments Ni, Cu et Zn sont des métaux associés la plupart du temps avec des roches ignées mafiques, souvent sous forme de sulfures ou parfois dans les silicates. Ils sont également très mobiles dans l'environnement secondaire, et se retrouvent communément dans les lacs sous forme de complexes avec la matière organique, adsorbés sur des oxydes ou hydroxydes de fer et manganèse, ou plus rarement sous forme de sulfures endogènes dans les lacs stratifiés.

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

Le facteur 5 montre une relation faible avec la profondeur des lacs ([figure 85](#)). Une corrélation positive nette avec la perte au feu est toutefois observée, sous forme de cloche avec une pente positive entre 0 et 25% de PAF, et négative à partir de 75% ([figure 86](#); [figure 87](#)). Ceci pourrait signifier une affinité à la fois avec les argiles et la matière organique, puisque la pente est à peu près constante à plus de 20-

25% de perte au feu, jusqu'à des valeurs extrêmes de 75%. Aucune relation avec la couleur n'est notée ; les valeurs sont toutes aussi fortes dans les sédiments pâles que foncés.

Relation avec la géologie

Des valeurs élevées de ce facteur sont apparentes sur les roches ignées mafiques de la fosse du Labrador, dans la partie sud et nord-est de l'Ashuanipi contenant des roches métavolcaniques et métasédimentaires, sur certains secteurs du nord de la Province de Supérieur, et sur certaines ceintures de roches vertes de la Baie-James ([figure 88](#)). De façon générale, ce facteur semble enrichi sur les séquences volcanosédimentaires à dominance mafique (sauf pour le cas du nord du Supérieur). Il pourrait être en partie relié, par endroits, à la présence de faible minéralisation disséminée à l'échelle régionale, comme c'est le cas dans les gabbros et basaltes de la partie est de la fosse du Labrador.

5.3.6 Facteur 7 : Ca-Ba

Relation avec la profondeur, la perte au feu et la couleur

Ce facteur montre une faible corrélation positive avec la profondeur des lacs, mais une corrélation positive très nette avec la perte au feu, jusqu'à des valeurs de perte au feu très élevées ([figure 89](#); [figure 90](#); [figure 91](#)). Il est bien connu que la productivité organique influence la quantité de CO₂ dissous dans l'eau et ultimement la précipitation de carbonates dans le lac. Des teneurs en carbonates élevées font également augmenter la perte au feu. Le baryum peut également précipiter dans ces conditions (Yohn et al., 2002). On remarque également que ce facteur est fortement corrélé avec le pH de l'eau, ce qui suggère aussi une relation avec un substrat carbonaté et/ou un contrôle chimique. Les valeurs de ce facteur sont légèrement plus élevées dans les sédiments foncés.

Relation avec la géologie

On remarque que les valeurs les plus fortes pour ce facteur se trouvent sur la fosse du Labrador et dans le Grenville, deux secteurs de roches protérozoïques susceptibles de contenir des carbonates. Des valeurs fortes sont obtenues également sur certaines ceintures de roches vertes peu métamorphisées du Moyen et du Grand Nord, telles que les ceintures de Vénus, de Frotet-Troilus et d'Eastmain ([figure 92](#)). Enfin, le champ de lamprophyres du lac Aigneau, dans le Grand Nord, est marqué par des valeurs fortes de ce facteur.

5.3.7 Conclusions

Les résultats de l'analyse factorielle indiquent que les variables secondaires telles que la profondeur de l'eau et la perte au feu influencent ensemble ou individuellement les différents facteurs. C'est donc dire que les facteurs extraits, en plus d'être contrôlés par la nature des unités géologiques environnantes, sont également contrôlés par les conditions limnologiques et sédimentologiques des lacs. Cette conclusion n'est pas surprenante à la lumière de toutes les études précédentes qui ont été faites sur le sujet (voir la section 4) et qui démontrent que la composition chimique des sédiments des lacs est fortement reliée à ces conditions environnementales.

5.4 Utilisation des facteurs comme outils de cartographie

Les sédiments de lacs peuvent être utilisés comme outils pour améliorer la cartographie de certains secteurs. Pour illustrer ceci, trois secteurs déjà bien cartographiés ont été sélectionnés. Il s'agit de voir si l'on peut faire la différence entre les sédiments de lacs situés sur des lithologies très différentes dans une même région, en considérant les valeurs des facteurs issus de l'analyse factorielle.

La première région choisie est la Fosse du Labrador ([figure 93](#)). On a choisi des unités de composition très différentes ; les basaltes de l'est de la région, les shales situés au centre et les dolomies et formations de fer de la partie ouest. On a donc extrait à partir de la base de données et de la carte géologique du Québec les échantillons se situant sur chacun de ces faciès. Sur la figure suivante ([figure 94](#)), on a placé les percentiles 10 (la ligne inférieure) et 90 (la ligne supérieure) des échantillons situés sur chacune des lithologies, et pour chacun des facteurs. Les profils résultants sont très semblables d'une lithologie à l'autre. On remarque des valeurs plus élevées pour les facteurs 5 (Ni-Cu-Zn) et 3 (V-Ti-Al-P-Cr) dans le cas des basaltes, mais la superposition de l'intervalle reste très importante avec les profils des autres lithologies. Ces différences, quoique insuffisantes pour être discriminantes, sont cohérentes avec la nature de ces basaltes qui sont plus riches en métaux de base (plusieurs minéralisations à Cu-Zn et Ni-Cu leurs sont associées dans ce secteur) et en éléments plus compatibles tels que Ti, V et Cr.

La seconde région choisie est celle du Supergroupe de Wakeham sur la Basse Côte-Nord ([figure 95](#)). Les gabbros, syénites et roches volcaniques felsiques ont été sélectionnées comme lithologies. Encore une fois, les trois profils sont très semblables ([figure 96](#)). On remarque un certain décalage entre les valeurs du facteur 2 (La-Th-U) des gabbros qui ont de faibles valeurs, vers les volcanites felsiques qui ont des valeurs plus élevées. Cette dernière observation est cohérente avec le fait que ces volcanites felsiques sont plus différenciées et plus riches en éléments incompatibles que les gabbros. Toutefois, même pour le facteur 2, la superposition entre les différents profils est trop grande pour que ce soit vraiment discriminant.

La dernière région sélectionnée est la région de Frotet-Troilus ([figure 97](#)), pour tenter de discriminer les échantillons se trouvant sur la ceinture de roches vertes de ceux qui sont situés sur les granitoïdes et les paragneiss entourant la ceinture. Les profils des trois lithologies sont très similaires, sauf pour les valeurs du facteur 5 (Ni-Cu-Zn) qui sont nettement plus élevées sur la ceinture de roches vertes ; cette ceinture contient d'ailleurs un grand nombre de minéralisations à Cu-Zn et à Ni-Cu ([figure 98](#)).

Quand on compare les profils des différentes régions sur un même graphique ([figure 99](#)) on remarque immédiatement des formes très typiques caractérisant chaque région. Il y a beaucoup plus de similarités entre des lithologies très différentes d'une même région que des lithologies semblables d'une région à l'autre. *À toutes fins pratiques, on doit donc conclure que les facteurs ne permettent pas de discriminer efficacement différentes lithologies sous-jacentes pourtant très différentes dans une même région.* Il semble y avoir plutôt des signatures régionales typiques qui sont légèrement modulées par les différences lithologiques. Les facteurs ne sont donc discriminants qu'à l'échelle des très grands ensembles géologiques, et non à l'échelle des lithologies individuelles d'une même région.

Seules les lithologies aux compositions extrêmes sont susceptibles d'être reconnues hors de tout doute. On peut penser par exemple aux roches alcalines felsiques qui auront des teneurs en La-Th-U très élevées, et aux ceintures volcaniques mafiques minéralisées qui auront des teneurs en Ni-Cu-Zn fortes.

5.5 Choix des facteurs pour les domaines géochimiques

Pour délimiter les domaines géochimiques, il est important de choisir les facteurs qui semblent montrer la meilleure correspondance avec la géologie, et qui sont peu influencés par des variables plus

indésirables telles que la profondeur des lacs et la perte au feu (représentant la proportion de matière argileuse et la quantité de matière organique).

On peut chercher à quantifier l'importance du signal lithologique par rapport au bruit de fond causé par les facteurs secondaires. Pour ce faire, des statistiques de base ont été compilées sur toutes les unités lithologiques importantes de la carte géologique du Québec. On a donc calculé la valeur médiane pour chacune des unités sur laquelle on trouve au minimum 250 échantillons de lacs. Puis, on a sélectionné les unités qui montrent les valeurs les plus élevées et les plus basses. Le **tableau 5** et le **tableau 6** montrent les unités lithologiques sur lesquelles les valeurs les plus fortes et les plus faibles sont retrouvées.

Pour chaque facteur, on prend la médiane, la plus haute valeur et la plus basse. La différence est l'amplitude du signal lithologique montré par ce facteur. On a également calculé, pour chaque facteur, l'amplitude de sa variation due au changement de profondeur des lacs ou à la quantité de matière organique, en gardant l'amplitude maximale entre les deux (**tableau 6**). Cette dernière amplitude est celle du bruit. En calculant le ratio signal/bruit, on obtient alors une évaluation semi-quantitative de l'information lithologique contenue dans le facteur.

Les meilleurs facteurs selon cette évaluation sont les facteurs 1, 2, 3 et 5. Comme déjà observé en examinant les cartes des facteurs, les facteurs 4 et 7 semblent contenir peu d'information lithologique et sont plutôt reliés aux processus secondaires.

Tableau 5. Évaluation semi quantitative de la correspondance entre les facteurs et les unités lithologiques

	Facteur1 Mg, K, Ti	Facteur2 U, Th, La	Facteur3 V, Ti, Al, P, Cr	Facteur4 Fe, Mn, Zn	Facteur5 Cu, Ni, Zn	Facteur7 Ca, Ba
Médiane maximale dans unités lithologiques	1	1.5	0.8	0.9	1.4	0.6
Médiane minimale dans unités lithologiques	-1	0.7	-1.4	-0.6	-0.9	-0.5
Max – Min unités lithologiques (Amplitude du Signal)	2	2.2	2.2	1.5	2.3	1.1
Prof ou PAF médiane Max	0,45 (PAF 10-15%)	0.25 (PAF 40-45%)	0.6 (PROF = 16)	1 (PROF = 19)	0.2 (PAF 35-40%)	0.55 (PAF 55-60%)
PROF ou PAF médiane Min	-0,50 (PAF 45-50%)	-0.45 (PAF 0-5%)	-0.6 (PROF = 1)	-0.2 (PROF = 1)	-0.7 (PAF 0-5%)	-0.6 (PAF 0-5%)
Max – Min de PROF-PAF (Amplitude du bruit)	0.95	0.7	1.2	1.2	0.9	1.15
Signal / Bruit	2.1	3.1	1.8	1.25	2.5	0.9

Tableau 6. Relations entre les unités lithologiques et les facteurs.

	Facteur 1 : Mg-K-Ti	Facteur 2 : La-Th-U	Facteur 3 : V-Ti-Al-P-Cr	Facteur 4 : Fe-Mn-Zn	Facteur 5 : Ni-Cu-Zn	Facteur 7 : Ca-Ba
Valeurs maximales dans les unités lithologiques:	<p><u>Archéen et/ou Paléoproterozoïque</u> Granitoïdes à orthopyroxène : orthogneiss granulitique</p> <p><u>Paléoproterozoïque</u> Roches sédimentaires de milieu fluviatile et de plate-forme marine</p> <p>Roches intrusives mafiques : gabbro, diorite, gabbroonorite et anorthosite</p>	<p><u>Mésoproterozoïque</u> Granite, monzonite quartzifère et syénite (Batholite de Mistastin)</p> <p><u>Protérozoïque</u> Basalte, rhyolite, tuf et porphyre (alcalin)</p> <p><u>Paléoproterozoïque</u> Granitoïdes (principalement granitiques) syn- à tardi-hudsoniens : granite, granodiorite, diorite quartzifère et tonalite; granitoïdes à orthopyroxène non subdivisés</p>	<p><u>Archéen</u> Granitoïdes diatexitiques syn- à tarditectoniques</p> <p>Roches méta-sédimentaires : paragneiss et schiste à biotite, grenat, orthopyroxène</p> <p><u>Mésoproterozoïque</u> Anorthosite et gabbroonorite</p> <p><u>Protérozoïque</u> Paragneiss, quartzite et amphibolite</p>	<p><u>Paléoproterozoïque</u> Roches sédimentaires de milieu fluviatile et de plate-forme marine</p> <p>Roches intrusives mafiques : gabbro, diorite, gabbroonorite et anorthosite</p> <p>Formation de fer et arénite; quantité mineure de chert, de conglomérat et de mudrock</p> <p>Dolomie stromatolitique, grès et siltstone dolomitiques</p>	<p><u>Paléoproterozoïque</u> Roches volcaniques mafiques : basalte et roches pyroclastiques</p> <p>Roches intrusives mafiques : gabbro, diorite, gabbroonorite et anorthosite</p> <p>Roches sédimentaires de milieu fluviatile et de plate-forme marine</p> <p>Dolomie stromatolitique, grès et siltstone dolomitiques</p>	<p><u>Archéen et/ou Protérozoïque</u> Gneiss charnockitique et granitoïdes à orthopyroxène</p> <p><u>Protérozoïque</u> Quartzite et schiste</p> <p>Marbre, quartzite et schiste</p> <p><u>Mésoproterozoïque</u> Anorthosite et gabbroonorite</p>
Valeurs minimales dans les unités lithologiques:	<p><u>Cambrien</u> Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène</p> <p><u>Protérozoïque</u> Basalte, rhyolite, tuf et porphyre (alcalin)</p> <p>Anorthosite et gabbroonorite</p>	<p><u>Archéen et/ou Protérozoïque</u> Gneiss charnockitique et granitoïdes à orthopyroxène</p> <p><u>Paléoproterozoïque</u> Roches volcaniques mafiques : basalte et roches pyroclastiques</p> <p>Roches intrusives mafiques : gabbro, diorite, gabbroonorite et anorthosite</p>	<p><u>Paléoproterozoïque</u> Roches sédimentaires de milieu marin distal</p> <p>Dolomie stromatolitique, grès et siltstone dolomitiques et brèche de chert; quantité mineure de marbre dolomitique</p> <p>Formation de fer et arénite; quantité mineure de chert, de conglomérat et de mudrock</p>	<p><u>Archéen</u> Roches métasédimentaires paragneiss et schiste à biotite</p> <p>Roches volcaniques mafiques et intermédiaires: basalte, andésite et roches pyroclastiques</p> <p><u>Protérozoïque</u> Formation de fer à jaspilite (Groupe de Mistassini)</p>	<p><u>Archéen et/ou Protérozoïque</u> Gneiss granodioritique et granitique; granitoïdes foliés ou migmatisés</p> <p><u>Mésoproterozoïque</u> Syénite, monzonite, granodiorite et diorite</p> <p>Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène</p>	<p><u>Archéen</u> Roches métasédimentaires : paragneiss et schiste à biotite,</p> <p>Granitoïdes pré- à syntectoniques : gneiss tonalitique et trondhjémitique; gneiss non subdivisé; quantité mineure de diorite</p> <p>Roches volcaniques mafiques et intermédiaires : basalte, andésite et roches pyroclastiques</p>

5.6 Méthodologie de délimitation des domaines géochimiques

Suite à la discussion précédente, les facteurs 2 (La-Th-U), 3 (V-Ti-Al-P-Cr) et 5 (Ni-Cu-Zn) ont été choisis pour élaborer les provinces géochimiques. Voici en détails la méthodologie qui a été utilisée :

1. Création de cartes matricielles des facteurs par la fonction « Inverse Distance Weighting » du logiciel Vertical Mapper, en utilisant des cellules de 2km, un rayon de recherche de 20km, un rayon d'affichage de 10km et un nombre d'échantillons maximal de 25.
2. Création de cartes de régions à partir des cartes matricielles ; les contours choisis correspondent aux percentiles 10-25-75-90 pour le facteur 2 et 25-75 pour les facteurs 3 et 5.
3. Élimination des régions trop petites de chaque carte ($< 1000 \text{ km}^2$) en les regroupant avec la région dominante adjacente.
4. Combinaison des trois cartes de régions pour obtenir une carte préliminaire des provinces géochimiques; chacune des régions a une valeur pour chacun des facteurs.
5. Élimination des régions trop petites sur la carte des provinces ($< 500 \text{ km}^2$) en les regroupant avec la région dominante adjacente.

5.7 Limites

Le tracé des domaines géochimiques ([figure 100](#)) a plusieurs limitations, entre autres :

- Aucun facteur n'est indépendant des variables secondaires (profondeur, perte au feu), donc la carte des provinces géochimiques est également influencée par ces variables secondaires.
- Les limites fixées à l'intérieur de chacun des facteurs sont arbitraires.
- Les histogrammes de répartition des valeurs pour les facteurs sont continus et ne montrent pas d'inflexions, sauf dans les valeurs extrêmes.
- Le nombre de régions contournées par facteur est arbitraire (2, 3, 4..?).
- Un changement dans la définition arbitraire des limites peut changer la position des provinces de façon sensible.
- La façon de faire le maillage (type d'interpolation – Krigeage vs IDW – rayon de recherche) influence aussi les cartes contournées.
- Le tout dépend de la taille à laquelle on veut les avoir et de l'échelle à laquelle on veut les considérer.

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La géochimie des sédiments de lacs constitue un outil puissant pour l'exploration régionale au Québec, en particulier pour la moitié nord de la province. Mais, comme il a été démontré, son utilisation efficace en exploration est délicate et nécessite une mise en contexte de l'environnement lacustre. On ne doit pas comparer directement les teneurs obtenues dans des lacs de nature très différente, même dans le cas de lacs adjacents. L'étude statistique multivariable effectuée dans le cadre de cette étude a permis de mettre au jour des relations très nettes entre les teneurs en différents éléments et différentes variables qui reflètent les conditions environnementales lacustres.

Les domaines géochimiques qui ont été délimités à partir de l'analyse multivariable définissent des secteurs dans lesquels le bruit de fond géochimique dans les lacs est relativement constant. Ces domaines peuvent être utilisés pour délimiter des anomalies à partir de statistiques de base. Toutefois, il faut être conscient que, même à l'intérieur de ces domaines, des variations assez importantes des teneurs peuvent exister à cause de conditions lacustres variables. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour arriver à une approche plus satisfaisante à ce niveau.

Les travaux concernant les liens qui existent entre les conditions environnementales lacustres et les compositions chimiques des sédiments devraient être poursuivis sous deux aspects. D'abord, des méthodes statistiques devraient être élaborées pour permettre de franchir l'obstacle majeur que représente la présence de sédiments de lacs de nature très diverse dans la banque de données. Dans une optique de recherche un peu plus fondamentale, il serait également très intéressant de comparer les résultats statistiques avec une étude sur la minéralogie/sédimentologie des sédiments; une telle étude permettrait de comprendre quel est le lien entre les résultats statistiques, la minéralogie/sédimentologie et les conditions lacustres.

7 REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pas pu être possible sans la participation étroite de plusieurs géologues : François Thibert de Noranda-Falconbridge qui a été le principal initiateur de ce projet au Consorem, qui a suggéré la méthode de nivellement ainsi que plusieurs références pertinentes et qui a participé de façon très active à la mise au point de la méthode de délimitation des domaines géochimiques ; Vincent Jourdain, de SOQUEM, qui a, entre autres, suggéré la méthode des axes majeurs pour le calcul des droites de régression ; et, finalement, Marc Baumier, du Ministère des Ressources Naturelles qui a bien voulu participer à plusieurs rencontres dans lesquelles son expérience considérable de la géochimie lacustre a pu être mise à profit.

RÉFÉRENCES

- Bendell-Young, L.I., Thomas, C.A., Stecko, J.R.P. 2002. Contrasting the geochemistry of oxic sediments across ecosystems : a synthesis. *Applied geochemistry* 17: 1563-1582.
- 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: 301-326.
- Cameron, E. M. 1994. Lake sediment sampling in mineral exploration. In : *Drainage Geochemistry*. Édité par M. Hale et J.A. Plant, *Handbook of Exploration Geochemistry*, Vol. 6.
- 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: 207-233.
- Daneshfar, B., Cameron, E. 1998. Leveling geochemical data between map sheets. *Journal of Geochemical Exploration*, 63: 189-201.
- Davenport, P.E. 1990. A comparaison of regional geochemical data from lakes and streams in northern Labrador; implications for mixed-media geochemical mapping. *Journal of Geochemistry Exploration*, 39: 117-151.
- Davidson, A. 1998. Carte géologique de la province de Grenville, Canada et parties adjacentes des États-Unis d'Amérique. Commission géologique du Canada, cartes série "A" , no. 1947A.
- El Bilali, L., Rasmussen, P.E., Hall, G.E.M., Fortin, D. 2002. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments. *Applied Geochemistry*, 17: 1171-1181.
- Engstrom, D.R., Wright, H.E, Jr. 1984. Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change. In : *Lake Sediments and Environmental History*. Édité par Haworth, E.Y. et Lund, J.W.G.
- Grunsky, E.C., Smee, B.W. 1999. The differentiation of soil types and mineralization from multi-element geochemistry using multivariate methods and digital topography. *Journal of Geochemical Exploration*, 67: 287-299
- Hall, G.E.M. 1998. Analytical perspective on trace element species of interest in exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 61: 1-19.
- Kerr, A., Davenport, P.H. 1990. Application of geochemical mapping techniques to a complex Precambrian shield area in Labrador, Canada. *Journal of Geochemistry Exploration*, 39: 225-247.
- Kevern, N. R. , King, D.L. Ring. R. *Lake Classification Systems. Part I. The Michigan Riparian*, Février 1996.
- MRNF, 2002 - Carte géologique du Québec. Édition 2002. Ministère des Ressources naturelles; DV 2002-06, échelle 1:2 000 000.
- Reid, M.R., Kim, J.P., Hunter, K.A. 1999 Trace metals and major ion concentrations in Lakes Hayes and Manapouri. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. Vol. 29, numero 3: 245-255.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G. 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data; problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, vol. 17, issue 3 : 185-206.

- Siegel, F.R. Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals. 2002. Springer, Heidelberg.
- Sinclair, A.J., Bentzen, A. 1998. Evaluation of errors in paired analytical data by a linear model. Explor.Mining.Geol., vol. 7, nos. 1 and 2, pp. 167-173.
- Snäll, S., Liljefors, T. 2000. Leachability of major elements from minerals in strong acids. Journal of Geochemical Exploration, 71: 1-12.
- Tessier, A., Fortin, D., Belzile, N., Devitre, R.R., Leppard, G.G. 1996. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter : narrowing the gap between field and laboratory measurements. Geochimi. Cosmochim. Acta 60: 387-404.
- Yohn, S.S., Parsons, M.J., Long, D.T., Giesy, J.P., Scholle, L.K., Patino, L.C. 2002-2003. Inland Lakes sediment trends : sediment analysis results for six Michigan Lakes. Department of Geological Sciences, Michigan State University, yearly report.

RÉFÉRENCES SUPPLÉMENTAIRES

- Bounessah, M., Atkin, B.P. 2003. An application of exploratory data analysis (EDA) as a robust non-parametric technique for geochemical mapping in a semi-arid climate. Applied Geochemistry, 18: 1185-1195.
- Chen, M., Lena, Q.M. 2001. Comparaison of three aqua regia digestion methods for twenty florida soils. Soil. Sci. Soc. Am. J. 65: 499-510.
- Cook, S.J. 2000. Distribution and dispersion of molybdenum in lake sediments adjacent to porphyry molybdenum mineralization, central British Columbia. Journal of Geochemical Exploration, 71: 13-50.
- Davenport, P.H., Christopher, T.K., Vardy, S., Nolan, L.W. 1993. Geochemical mapping in Newfoundland and Labrador: its role an establishing geochemical baseline for the measurement of environmental change. Journal of Geochemistry Exploration, 49: 177-200.
- Davenport, P.H., Friske, P.W.B., Beaumier, M. 1997. The Application of Lake Sediment Geochemistry to Mineral Exploration : Recent Advances and Examples From Canada. Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration : p.261-270.
- Dredge, L.A. 2002. Current Research : Surficial materials, central Baffin Island, Nunavut. Geological Survey of Canada. 8 pages.
- Garret, R.G., Banville, R.M.P., Adcook, S.W. 1990. Regional geochemical data compilation and map preparation, Labrador, Canada. Journal of Geochemistry Exploration, 39: 91-116.
- Grunsky, E.C. 2001. A program for computing RQ-mode principal components analysis for S-PLUS and R. Computers & Geosciences, 27: 229-235.
- Heiskary, S. 1996. Lake sediment contaminant levels in Minnesota: Part of a series on Minnesota lake water quality assessment. Monitoring and Assessment Section, Water quality division, Minnesota pollution control agency
- Hollyer, G.M., Minton, T., Daniels, A. Integrated presentation and interpretation of geochemical data and multi-disciplinary information : regional and local-scale approaches. Anglo American, www.Geosoft.com.

- Horowitz, A.J., Elrick, K.A., Robbins, J.A., Cook, R.B. 1995. A summary of the effects of mining and related activities on the sediment-trace element geochemistry of Lake Coeur d'Alene, Idaho, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 52: 135-144.
- Klassen, A.K. 1999. The application of glacial dispersal models to the interpretation of till geochemistry in Labrador, Canada. *Journal of Geochemistry Exploration*, 67: 245-269.
- Linnik, P.M., Zubenko, I.B. 2000. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes & Research and Management*, 5: 11-21.
- Malcolm, R.R., Jonathan, P.K., Keith, A.H. 1999. Trace metal and major ion concentrations in Lakes Hayes and Manapouri. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, v.29, no.3 : p.245-255.
- McConnel, J.W., Finch, C., Hall, G.E.M., Davenport, P.H. 1993. Geochemical mapping employing active and overbank stream-sediment, lake sediment and lake water in two areas of Newfoundland. *Journal of Geochemistry Exploration*, 49: 123-143.
- Parent, M., Paradis, S.J., Doiron, A. 1996. Palimpsest glacial dispersal trains and their significance for drift prospecting. *Journal of Geochemical Exploration* , 56: 123-140.
- Percival, J.B., Hunt, P., Wyggers, M. 2001. Mineralogical investigations of Canadian till and lake and stream-sediment reference materials : part1. Standardized X-ray diffraction and scanning electron microscope methods. *Geological Survey of Canada, Current Research 2001-E9*, 11p
- Pereira, H.G., Renca, S., Saraiva, J. 2003. A case study on geochemical anomaly identification through principal components analysis supplementary projection. *Applied Geochemistry*, 18: 37-44.
- Reinmann, C., Melezhik, V.2001. Metallogenic provinces, geochemical provinces and regional geology – what causes large-scale patterns in low density geochemical maps of the C-horizon of podzols in Arctic Europe? *Applied Geochemistry*, 16: 963-983
- Reis, A.P., Sousa, A.J., Cardoso, E., Fonseca, E.C. 2003. Application of geostatistical methods in gold geochemical anomalies identification (Montemor-O-Novo, Portugal). *Journal of Geochemical Exploration*, 77: 45-63.
- Shang, J., Morris, B., Howarth, P. 2001. Using airborne magnetic and electromagnetic data to monitor mine tailings. *CIM bulletin*, vol. 94, no 1056: 73-80.
- Yusta, I., Velasco, F., Herrero, J.M. 1998. Anomaly threshold estimation and data normalization using EDA statistics : application to lithochemical exploration in Lower Cretaceous Zn-Pb carbonate-hosted deposits, Northern Spain. *Applied Geochemistry*, Vol.,13, no., 4: 421-439.
- Zhang, C., Selinus, O. 1998. Statistics and GIS in environmental geochemistry – some problems and solutions. *Journal of Geochemical Exploration*, 64: 339-354.

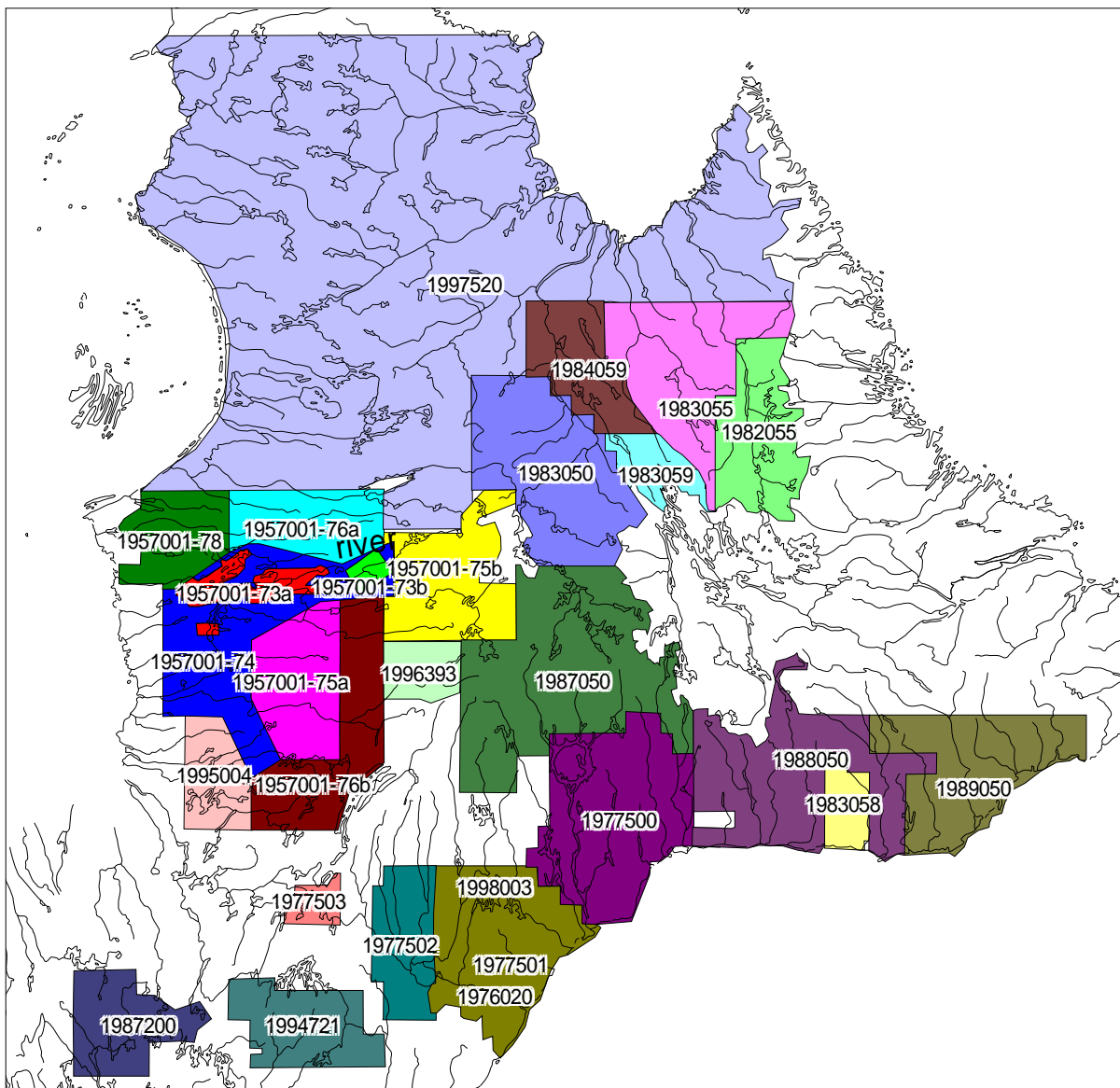


Figure 1. Localisation des levés de géochimie de sédiments de lacs du Québec. [Retour au texte](#)

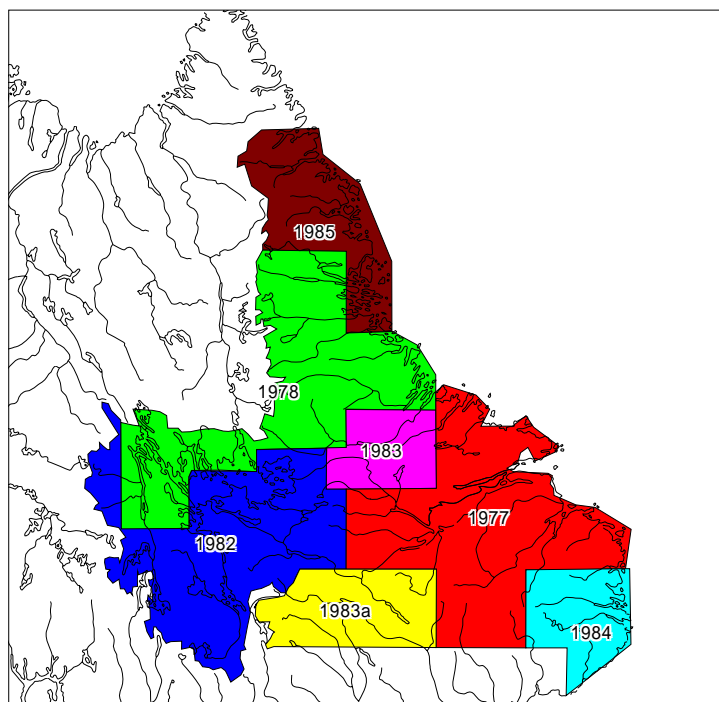


Figure 2. Localisation des levés de géochimie de sédiments de lacs du Labrador. [Retour au texte](#)

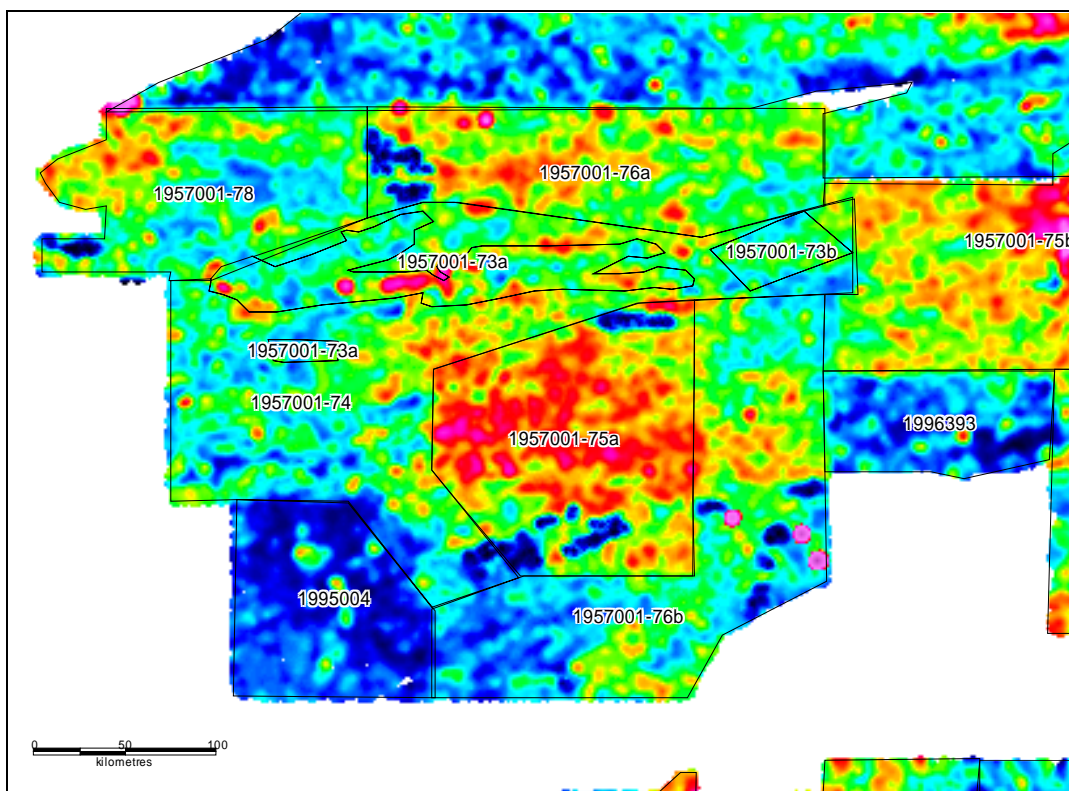


Figure 3. Valeurs en Cu dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la Baie-James. À remarquer les variations importantes et subites des valeurs pour des levés adjacents. Ce problème de nivellement est noté pour la plupart des métaux. D'autres exemples sont présentés aux figures 4 et 5 suivantes. [Retour au texte](#)

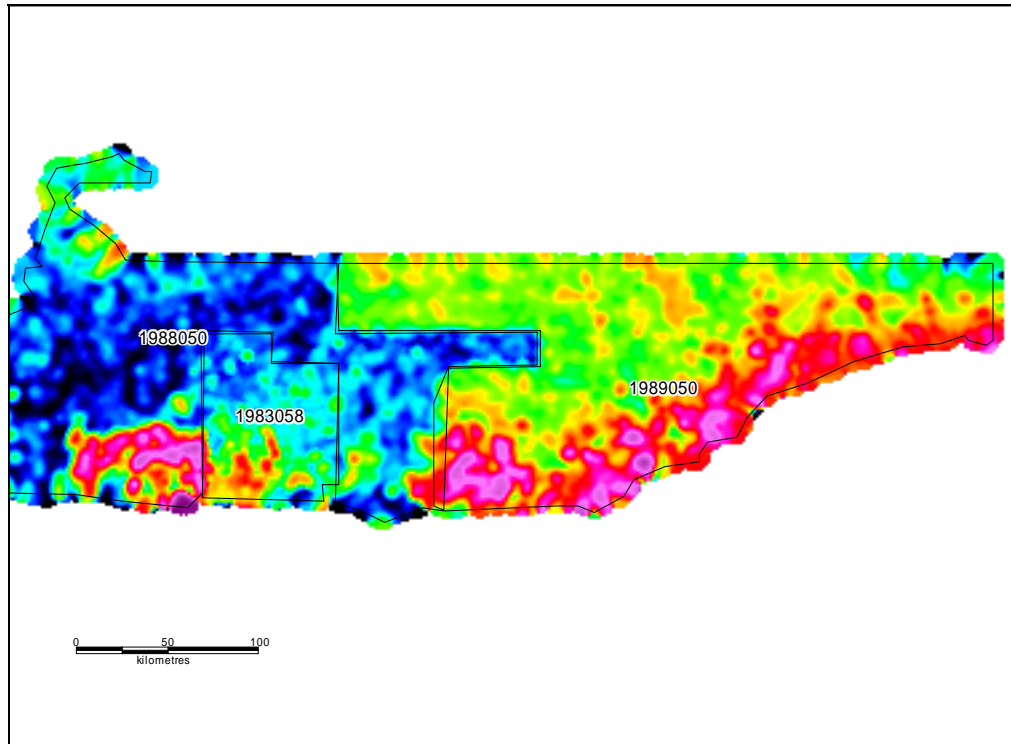


Figure 4. Valeurs en K dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la Basse Côte-Nord. [Retour au texte](#)

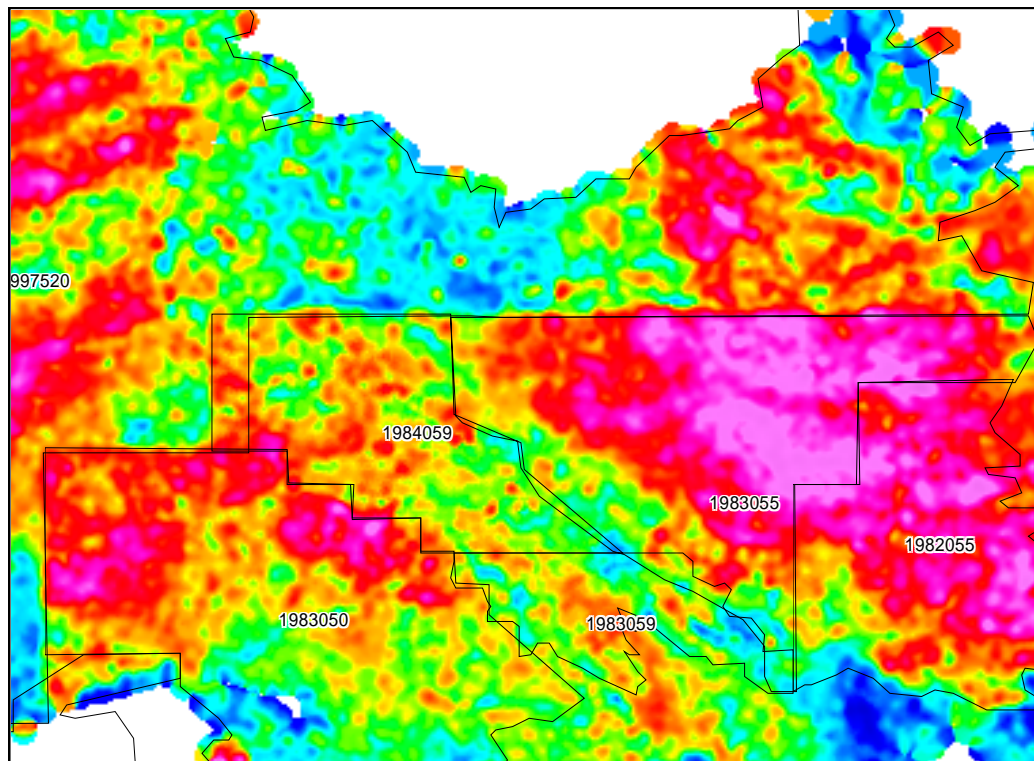


Figure 5. Valeurs en Th dans les sédiments de lacs, interpolées par IDW, secteur de la baie d'Ungava. [Retour au texte](#)

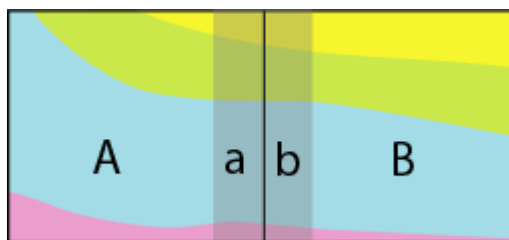


Figure 6. Méthode de nivellement utilisée pour des levés adjacents, dans le cas d'une géologie et d'une physiographie semblable à la limite des levés : des échantillons sont sélectionnés dans deux bandes de nivellement « a » et « b » dans deux levés « A » et « B » adjacents (figure modifiée de Daneshfar et Cameron, 1998). [Retour au texte](#)

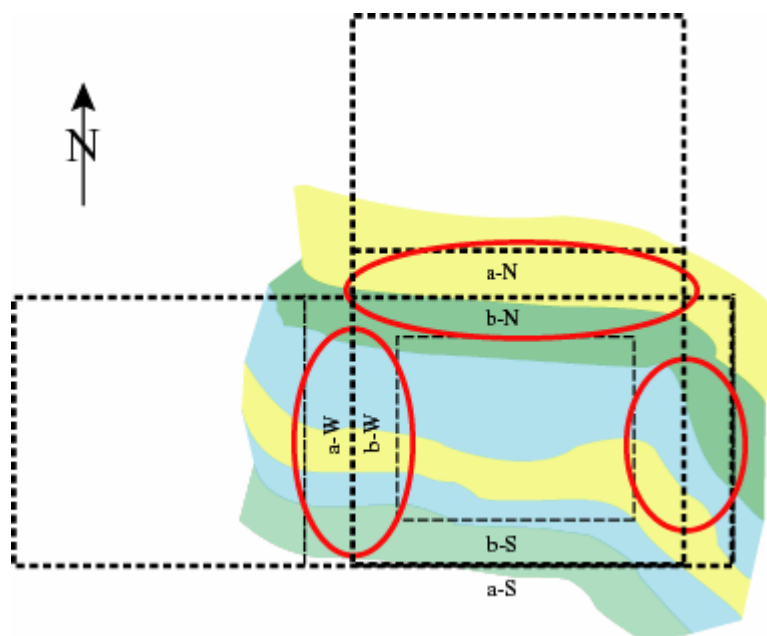


Figure 7. Différents cas possibles (encadrés en rouge) de relations géologiques entre des levés adjacents (figure modifiée de Daneshfar et Cameron, 1998). Le meilleur cas pour faire le nivellement est la limite W du levé « B », où les lithologies recoupent perpendiculairement les bandes « a » et « b ». La méthode de nivellement n'est pas appropriée aux limites N et S puisque le nivellement mettrait en relief les différences lithologiques. [Retour au texte](#)

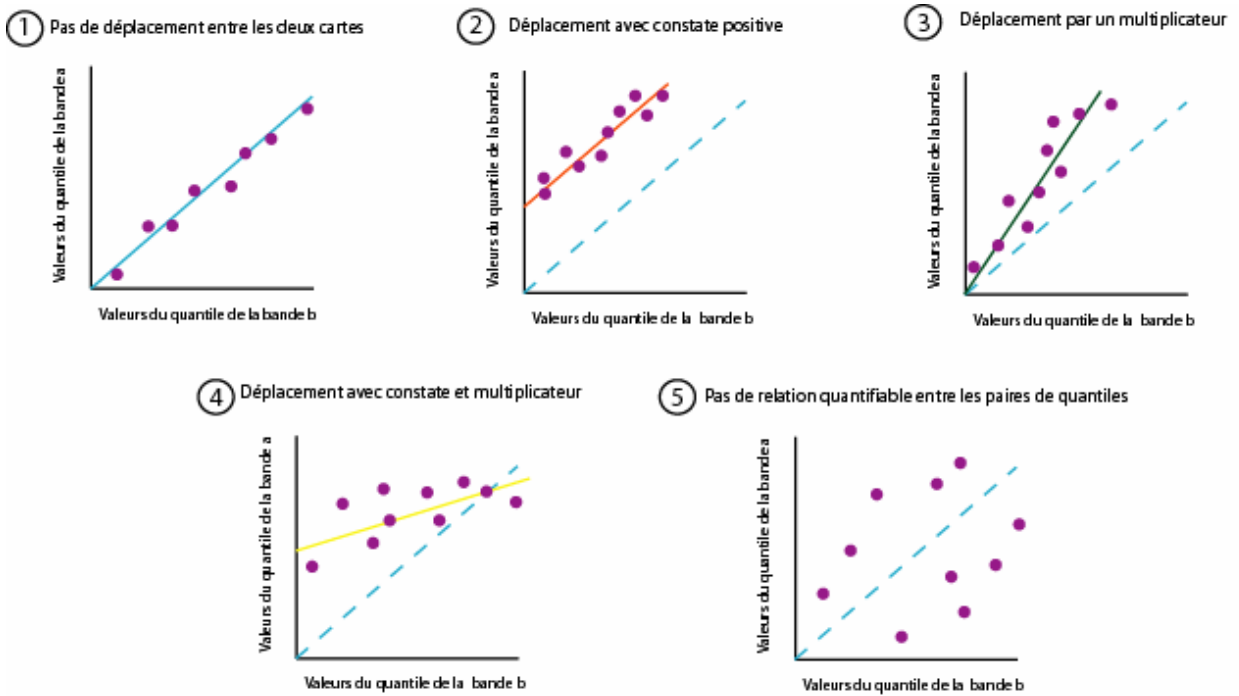


Figure 8. Exemples de droites de régression établies sur des bandes à la limite entre deux levés à niveler (figure modifiée de Daneshfar et Cameron, 1998). [Retour au texte](#)

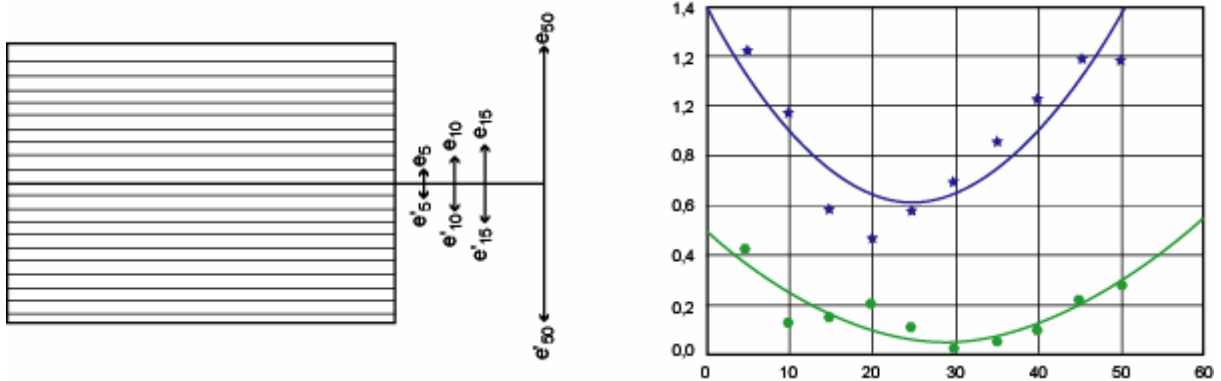


Figure 9. Calcul de la statistique D permettant d'estimer la largeur optimale des bandes de nivellement (d'après Daneshfar et Cameron, 1998). [Retour au texte](#)

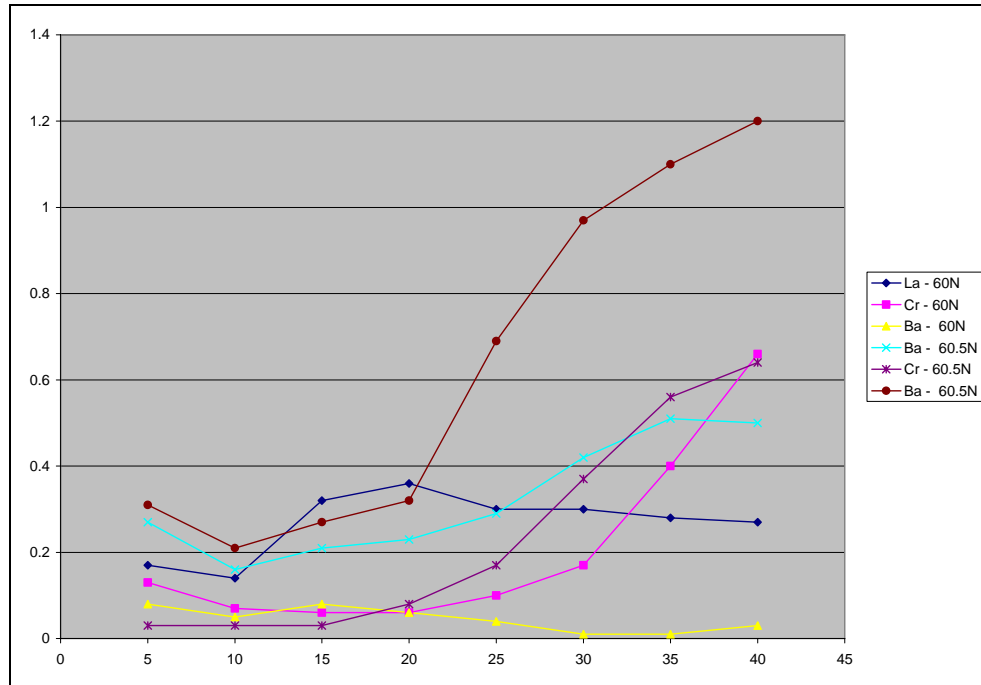


Figure 10. Tests de calcul de la statistique D pour le Grand-Nord à 60N et 60.5N, bande EW de 200 km de long centrée à 75W, largeurs de 5 à 40 km. Cet exemple montre les limites de la méthode de calcul de la statistique D, puisque la largeur optimale varie selon l'élément choisi et selon l'endroit choisi pour les bandes exploratoires (60N vs 60.5N). [Retour au texte](#)

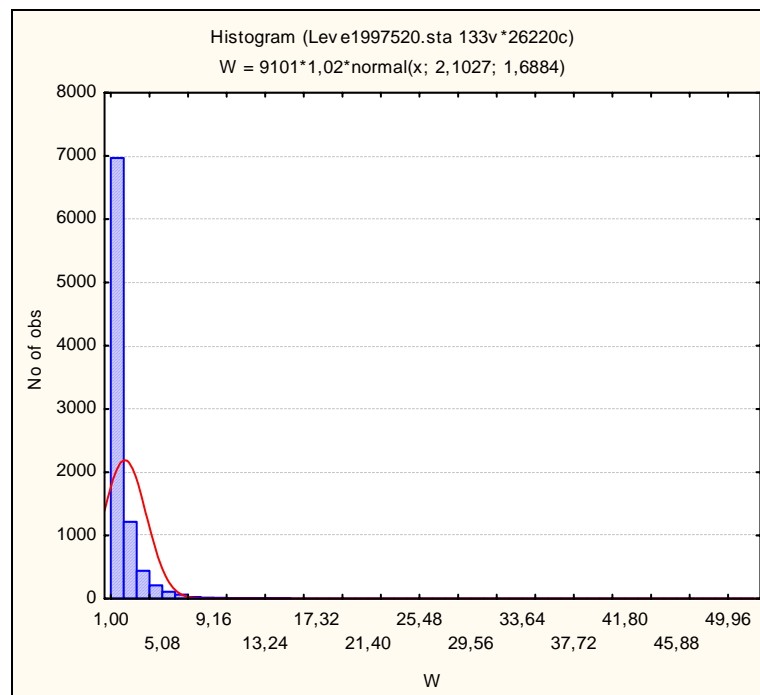


Figure 11. Histogramme des valeurs en tungstène pour le levé du Grand Nord du Québec (1997520). À noter la distribution tronquée à gauche qui est causée par 65% des valeurs sous la limite de détection. [Retour au texte](#)

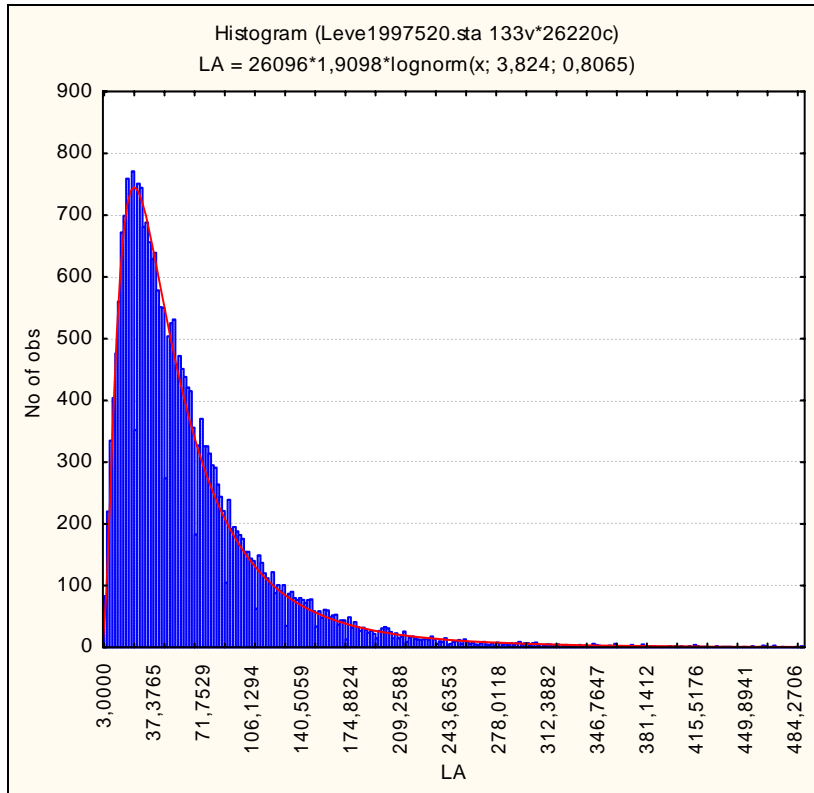


Figure 12. Histogramme des valeurs en lanthane pour le levé du Grand Nord du Québec (1997520). Dans ce cas, on a une distribution log-normale complète et non-tronquée avec seulement 0.1% des valeurs sous la limite de détection. [Retour au texte](#)

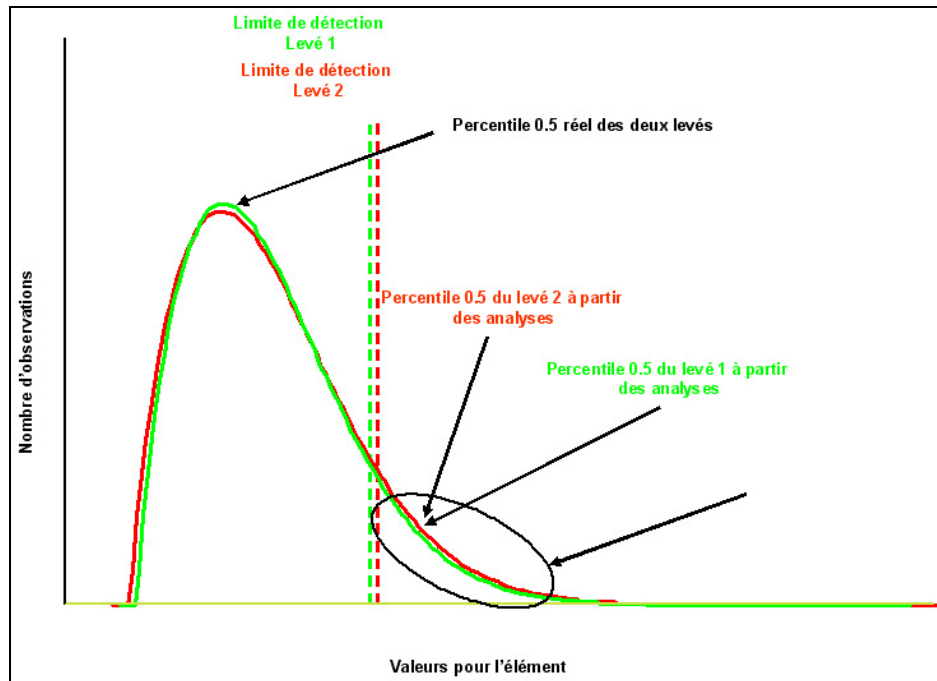


Figure 13. Exemple synthétique du nivellement de deux levés à limites de détection élevées mais identiques. [Retour au texte.](#)

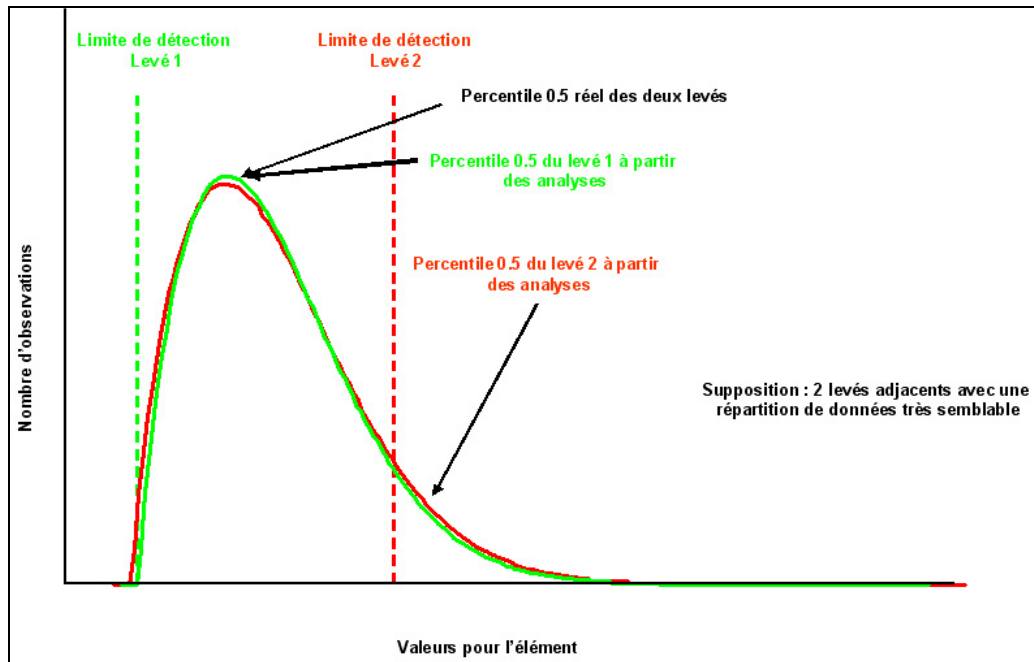


Figure 14. Exemple synthétique du nivellement de deux levés à limites de détection élevées différentes. [Retour au texte.](#)

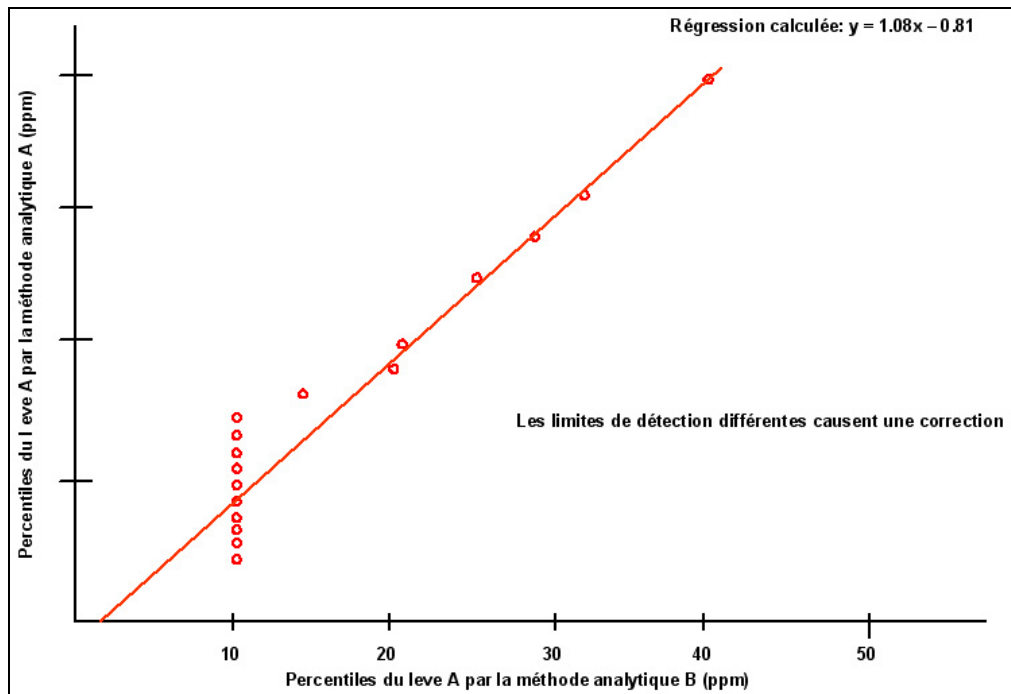


Figure 15. Droite de régression calculée pour une même série d'échantillons fictifs analysés par deux méthodes ayant des limites de détection différentes. [Retour au texte.](#)

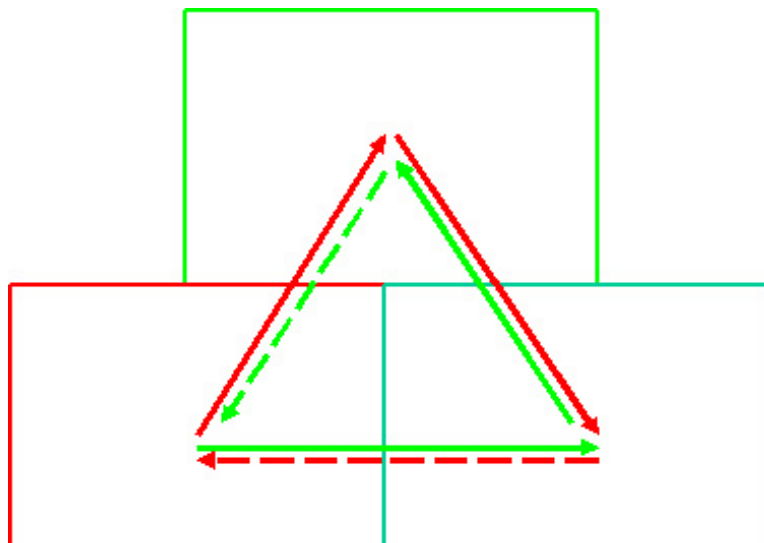


Figure 16. Exemple du nivellement de trois levés adjacents entre eux, avec deux parcours possibles laissant toujours une droite inutilisée (lignes pointillées). Le levé de départ (ici en rouge) doit demeurer intact. [Retour au texte.](#)

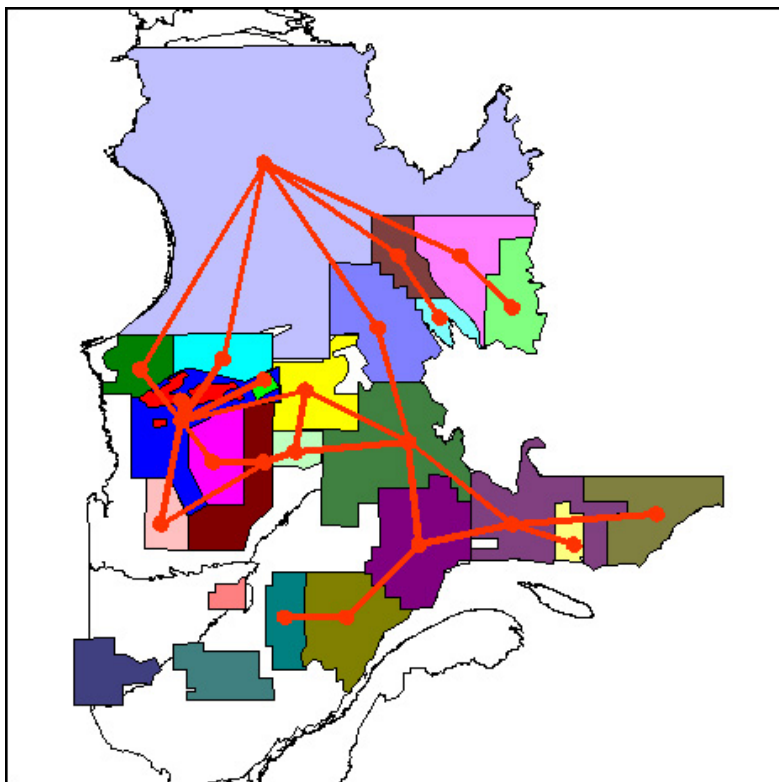


Figure 17. Graphe de connectivité illustrant un cas de nivellement en cascade complexe pour les levés où le zinc a été analysé. À noter la multitude de parcours possibles pour visiter chaque levé une seule fois lors du nivellement. [Retour au texte](#)

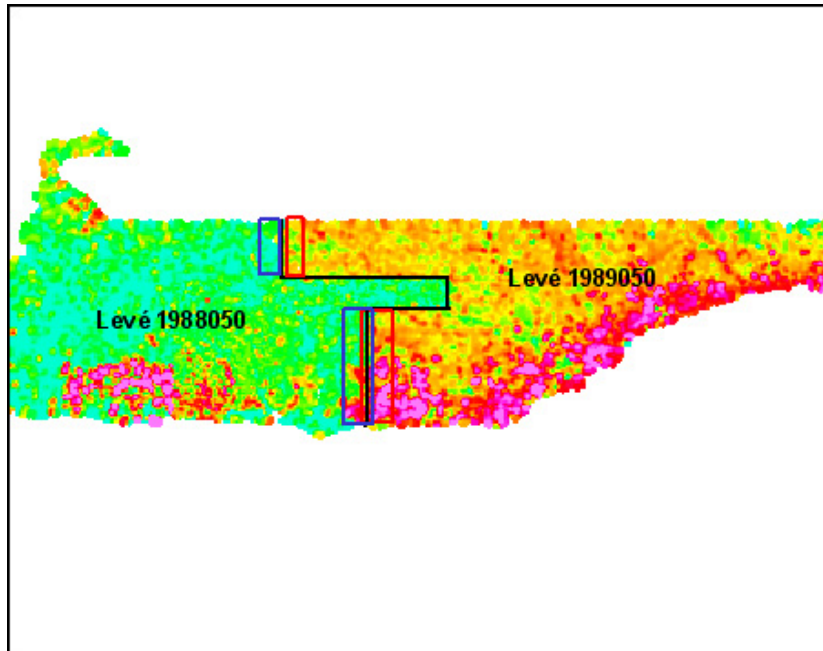


Figure 18. Exemple de plusieurs bandes de nivellement entre deux levés pour une limite de levés irrégulière. [Retour au texte](#)

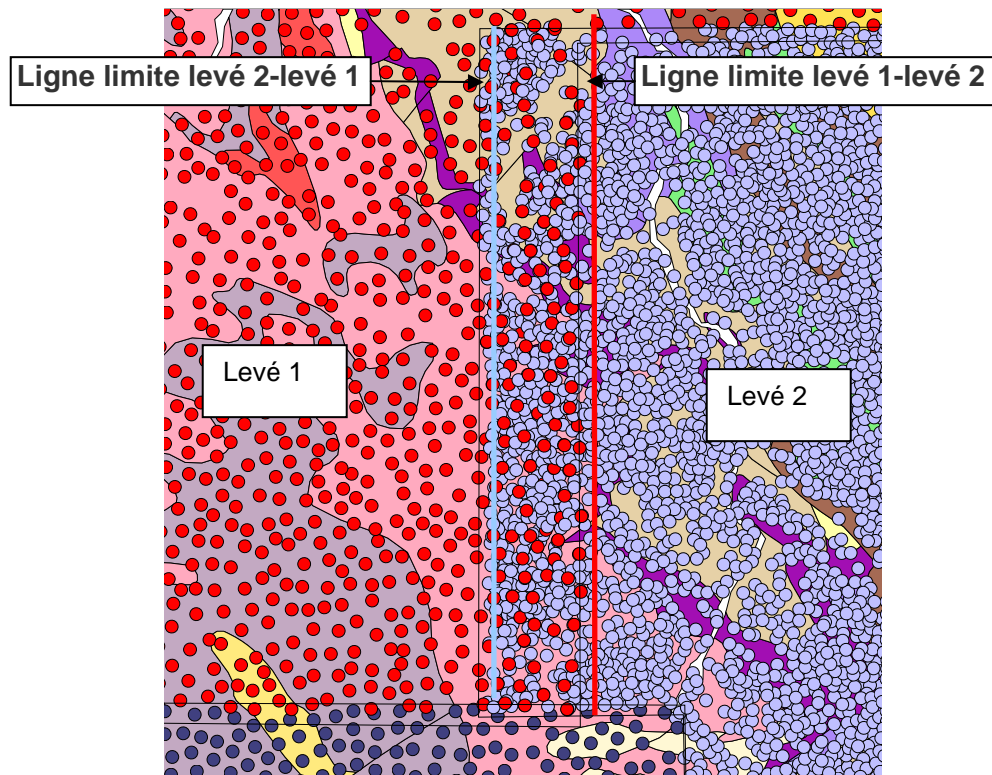


Figure 19. Limites des bandes de nivellement entre deux levés se superposant. À noter que la limite n'est alors pas au même endroit pour les deux levés et que les bandes de nivellement se superposent. [Retour au texte](#)

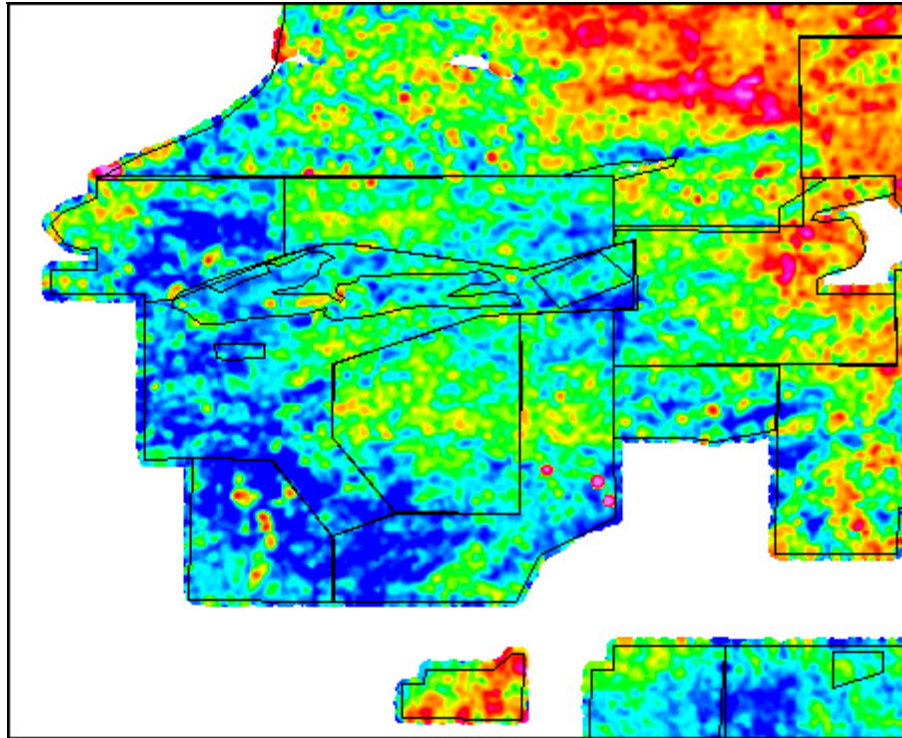


Figure 20. Valeurs en cuivre nivelées pour le secteur de la Baie-James. [Retour au texte](#)

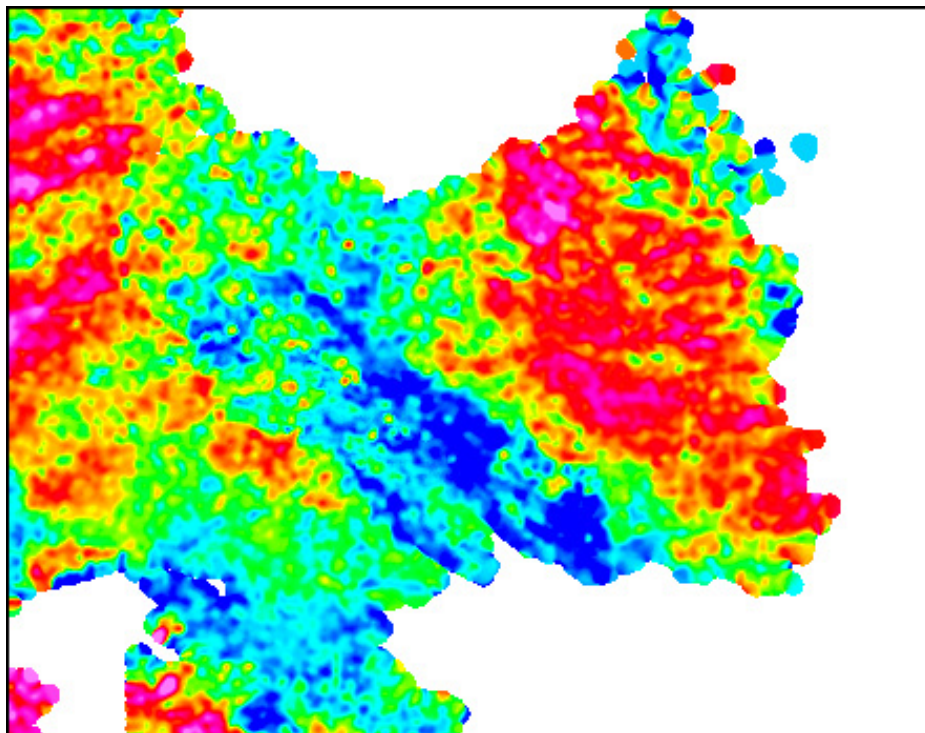


Figure 21. Valeurs en thorium nivelées pour le secteur de la Baie d'Ungava. [Retour au texte](#)

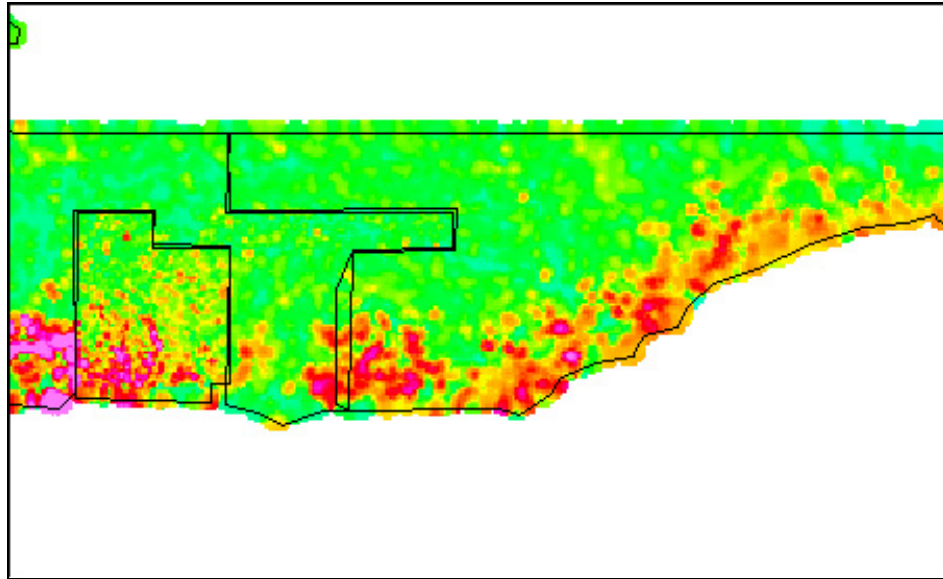


Figure 22. Valeurs en potassium nivelées pour le secteur de la Basse Côte-Nord. [Retour au texte](#)

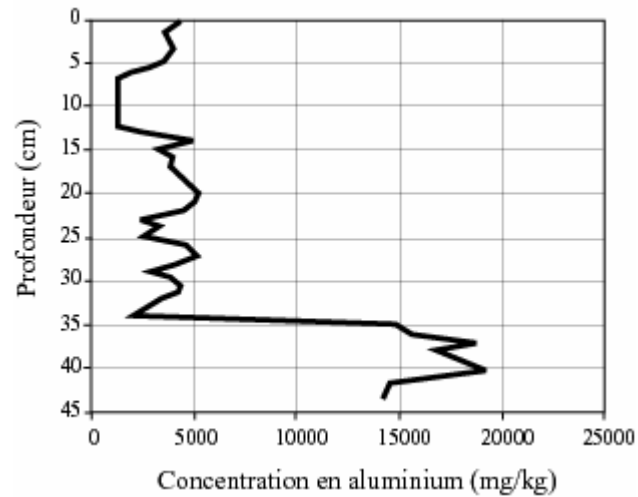


Figure 23. Concentrations en aluminium dans un lac du Michigan. À noter l'influence du changement de la granulométrie de sable à argile à 35 cm (figure modifiée de Yohn et al., 2002). De façon générale, la portion argileuse est beaucoup plus riche en éléments traces. [Retour au texte](#)

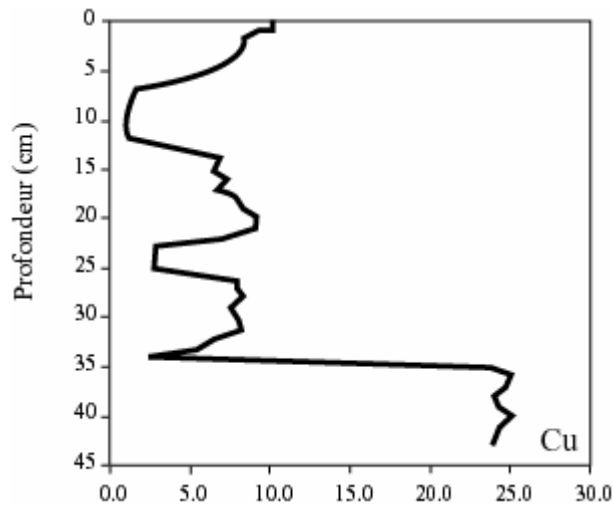


Figure 24 Concentrations en cuivre dans un lac du Michigan. À noter l'influence du changement de la granulométrie de sable à argile à 35 cm (figure modifiée de Yohn et al., 2002). De façon générale, la portion argileuse est beaucoup plus riche en éléments traces. [Retour au texte](#)

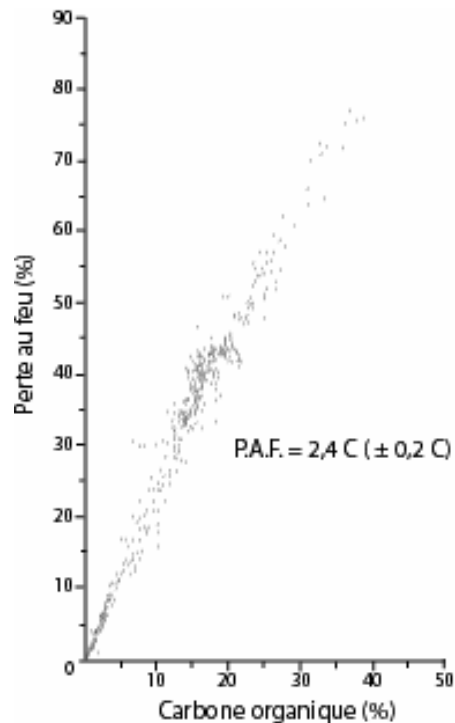


Figure 25. Relation entre le contenu en matière organique et la perte au feu dans les sédiments de lacs (figure modifiée de Cameron, 1994). Ainsi, la perte au feu mesurée lors de l'analyse chimique est une indication directe du contenu en matière organique du sédiment de lac. [Retour au texte](#)

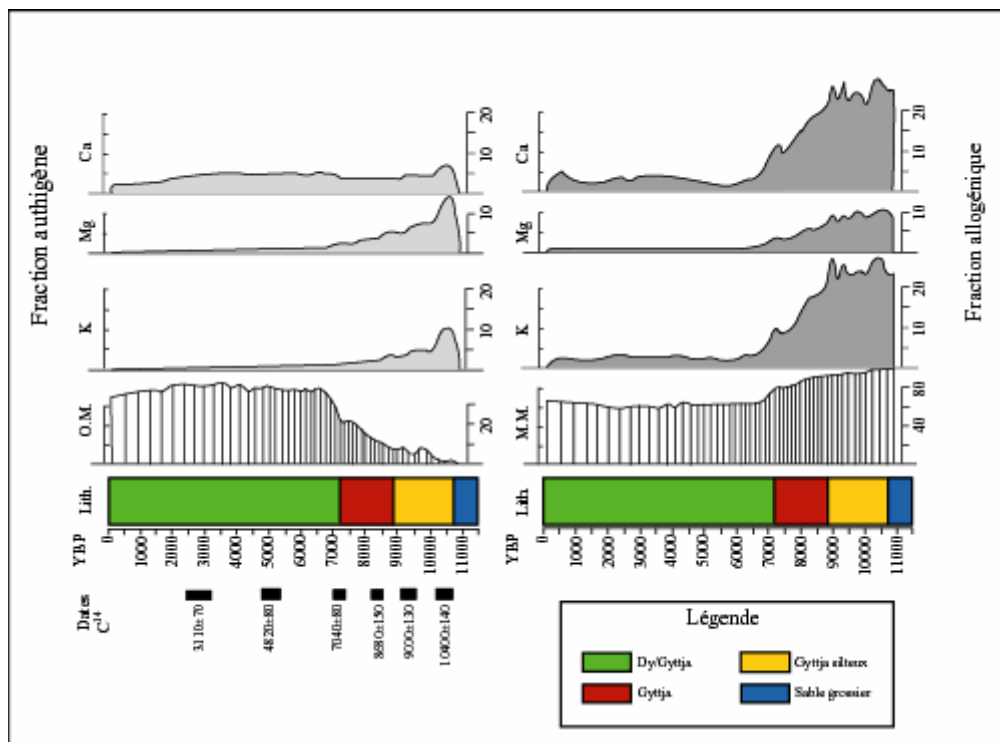


Figure 26. Variations verticales de la composition des sédiments du lac Hope Simpson, Labrador (figure modifiée de Engstrom et Wright, 1984). La transition entre la toundra rocheuse et la forêt boréale est marquée par des diminutions drastiques du contenu allogène, et par conséquent des teneurs en K, Mg, Na. [Retour au texte](#)

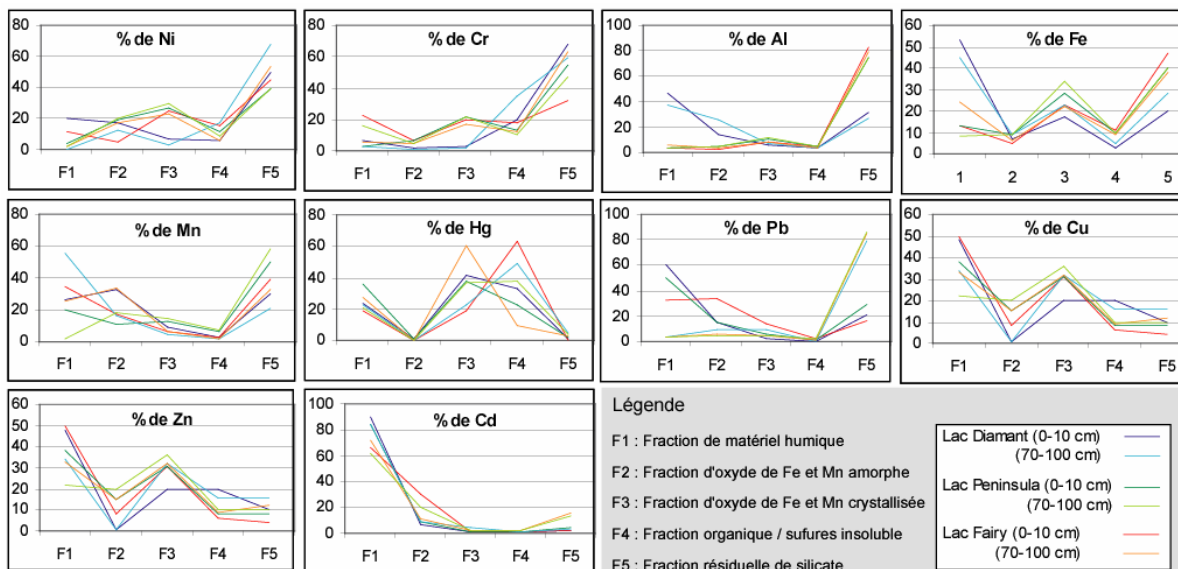


Figure 27. Distribution de différents métaux dans trois lacs de l'Ontario. Diamond Lake est riche en matière organique, Peninsula Lake est riche en argiles et Fairy Lake est intermédiaire (d'après les données de Bilali et al., 2002). [Retour au texte](#)

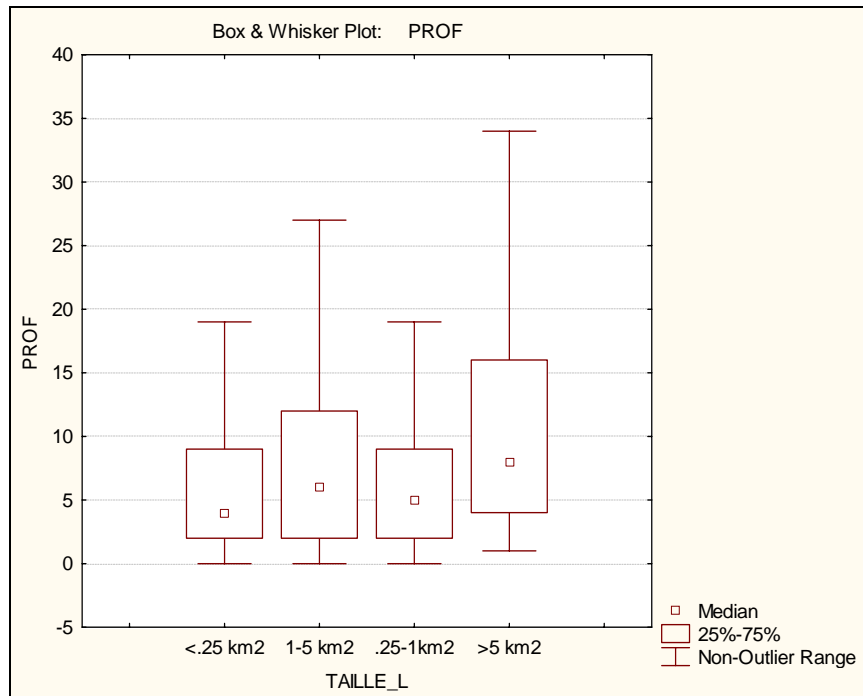


Figure 28. Profondeur des lacs selon leur taille, Labrador. [Retour au texte](#)

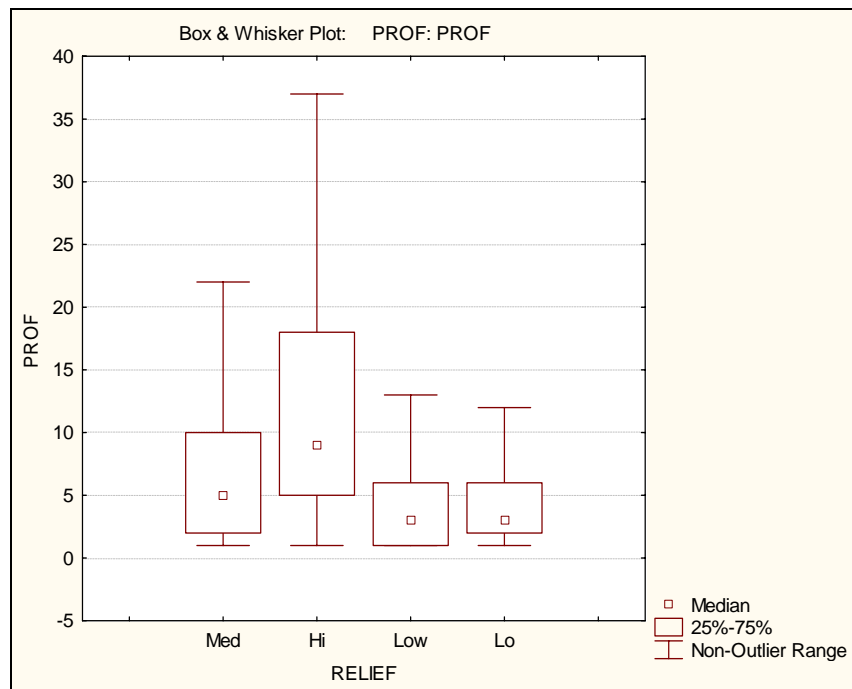


Figure 29. Profondeur des lacs selon le relief environnant, Labrador. [Retour au texte](#)

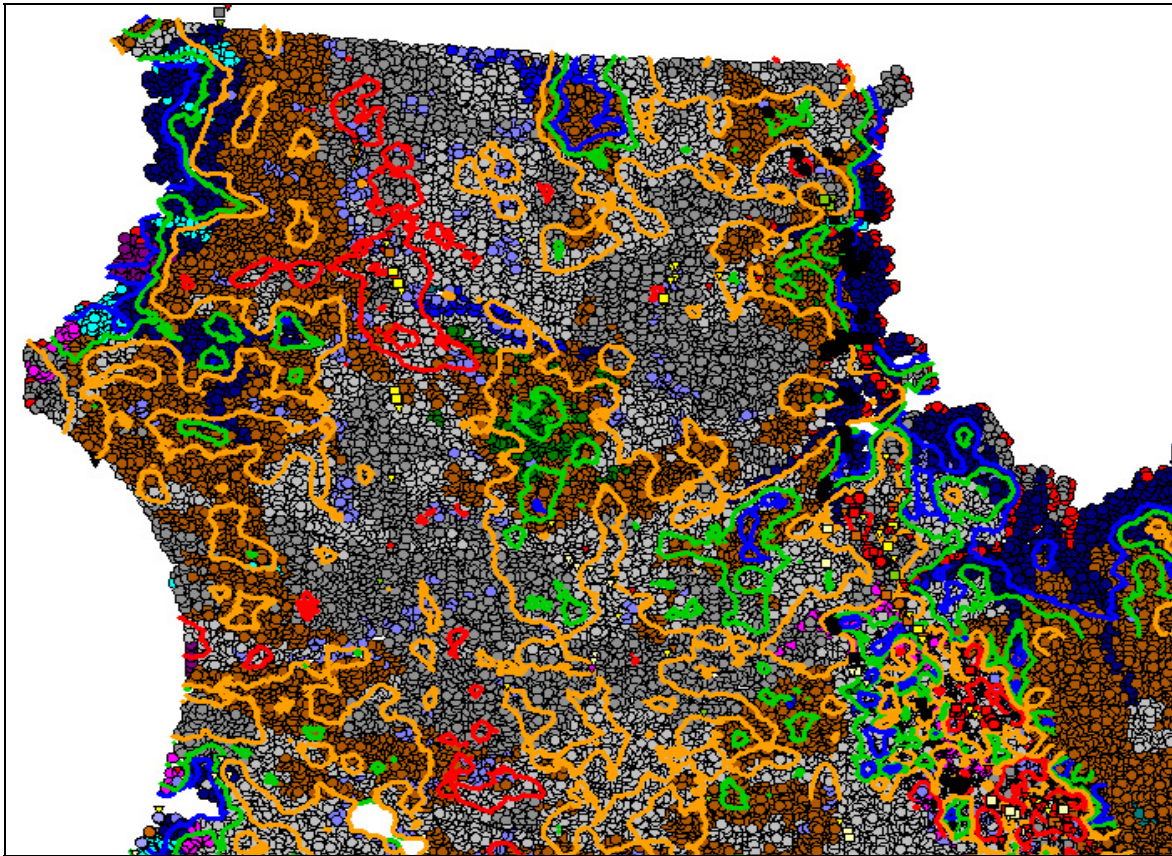
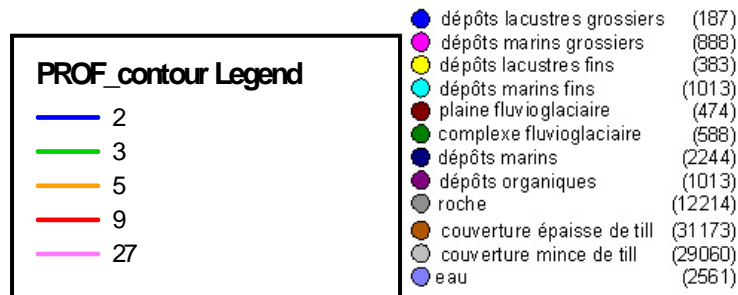


Figure 30. Relation entre la profondeur des lacs et la nature des dépôts de surface. Les lacs tendent à être moins profonds en présence de grands étendus de dépôts superficiels. [Retour au texte.](#)



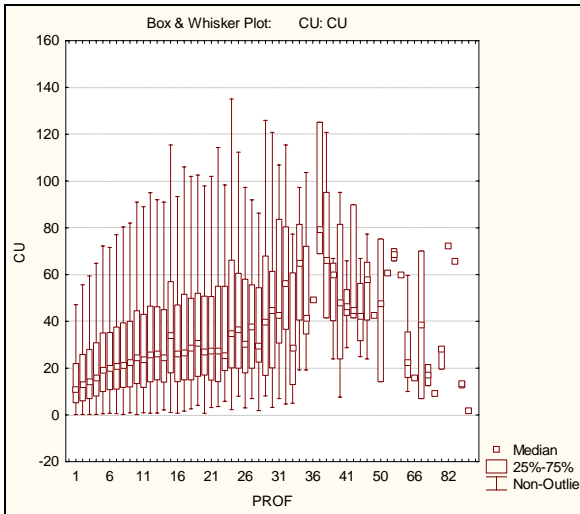


Figure 31. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Québec. À noter la relation positive entre la profondeur et les teneurs. [Retour au texte](#)

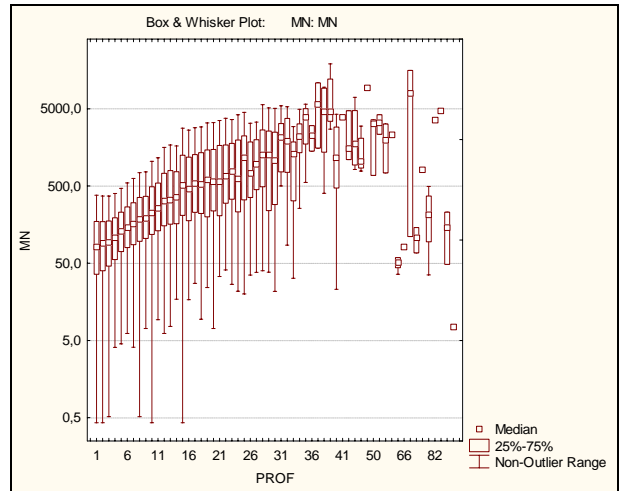


Figure 32. Teneurs en manganèse selon la profondeur des lacs, Québec. À noter la relation positive entre la profondeur et les teneurs. [Retour au texte](#)

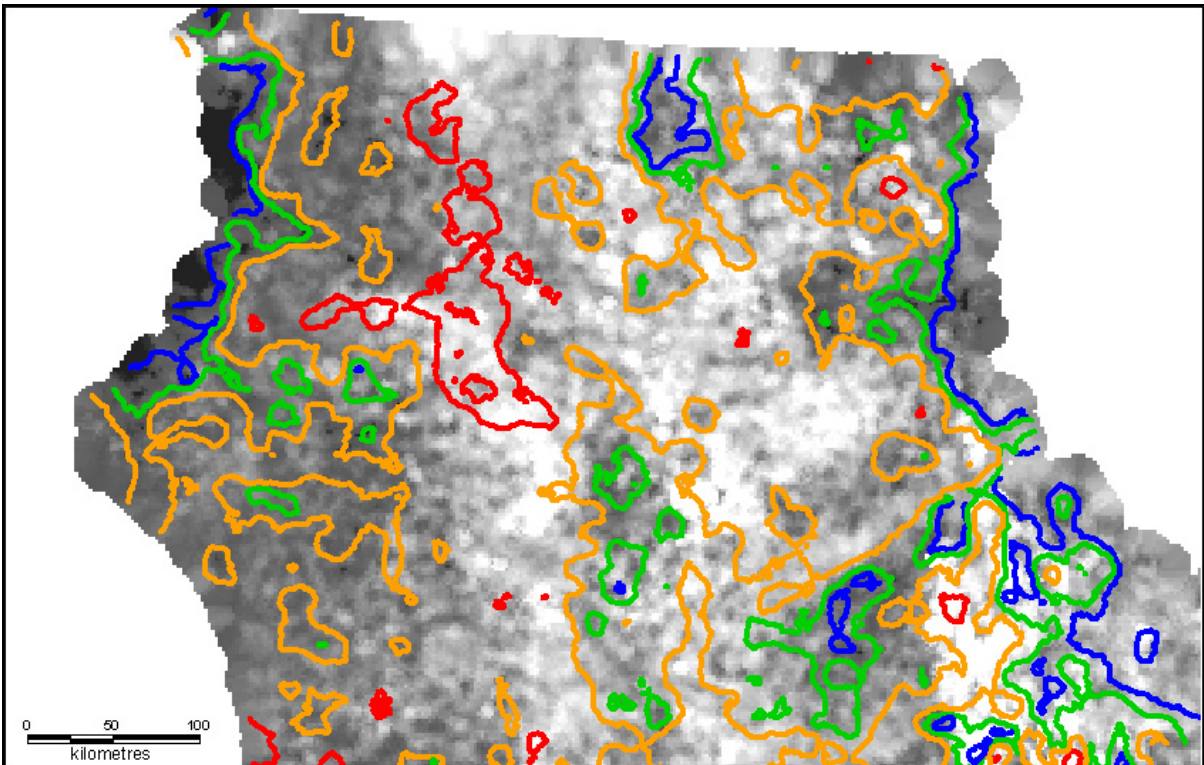


Figure 33. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et des teneurs en zinc (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec. Les faibles valeurs coïncident avec les zones de faible profondeur des lacs. [Retour au texte](#)

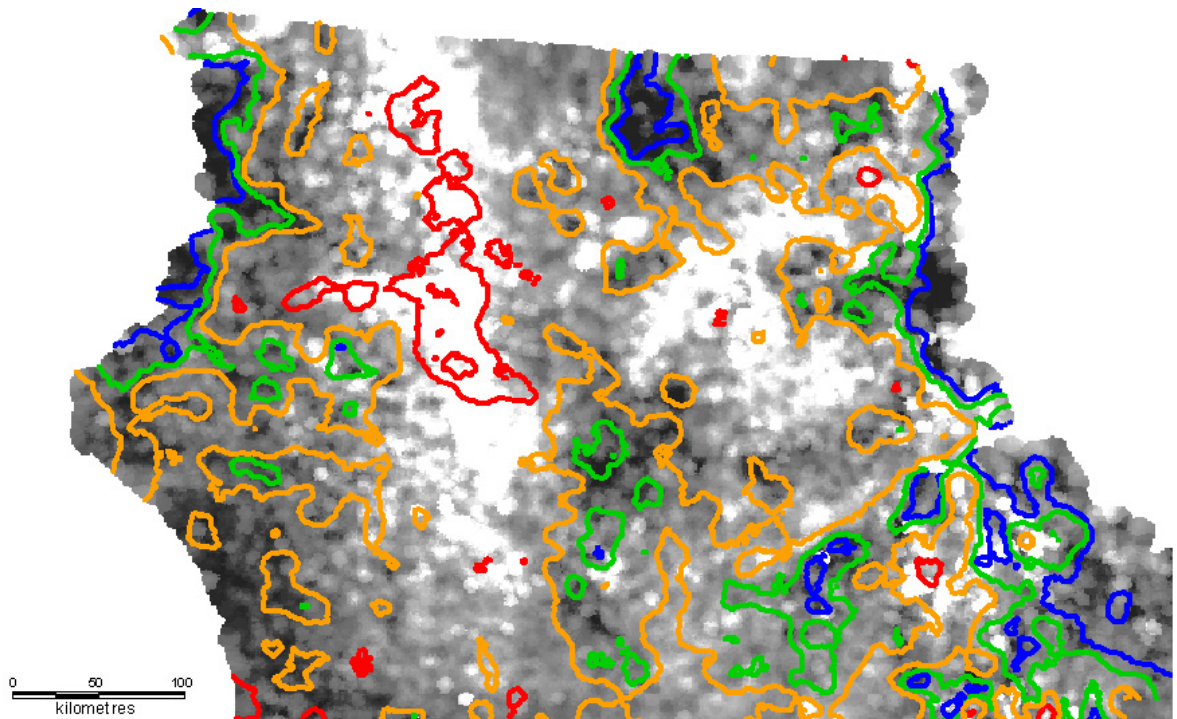


Figure 34. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et les teneurs en cuivre (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec. Les faibles valeurs coïncident avec les zones de faible profondeur des lacs. [Retour au texte](#)

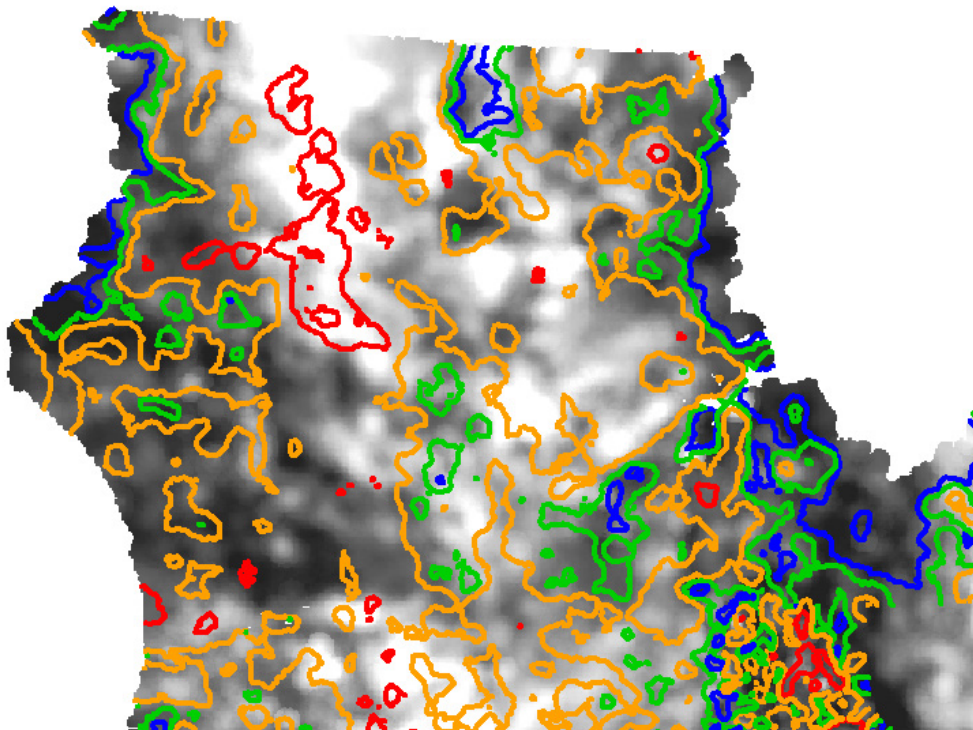


Figure 35. Relation entre les isocontours de la profondeur des lacs et les teneurs en lanthane (blanc = élevé, noir = bas) pour le Grand-Nord du Québec. Les faibles valeurs coïncident avec les zones de faible profondeur des lacs. [Retour au texte](#)

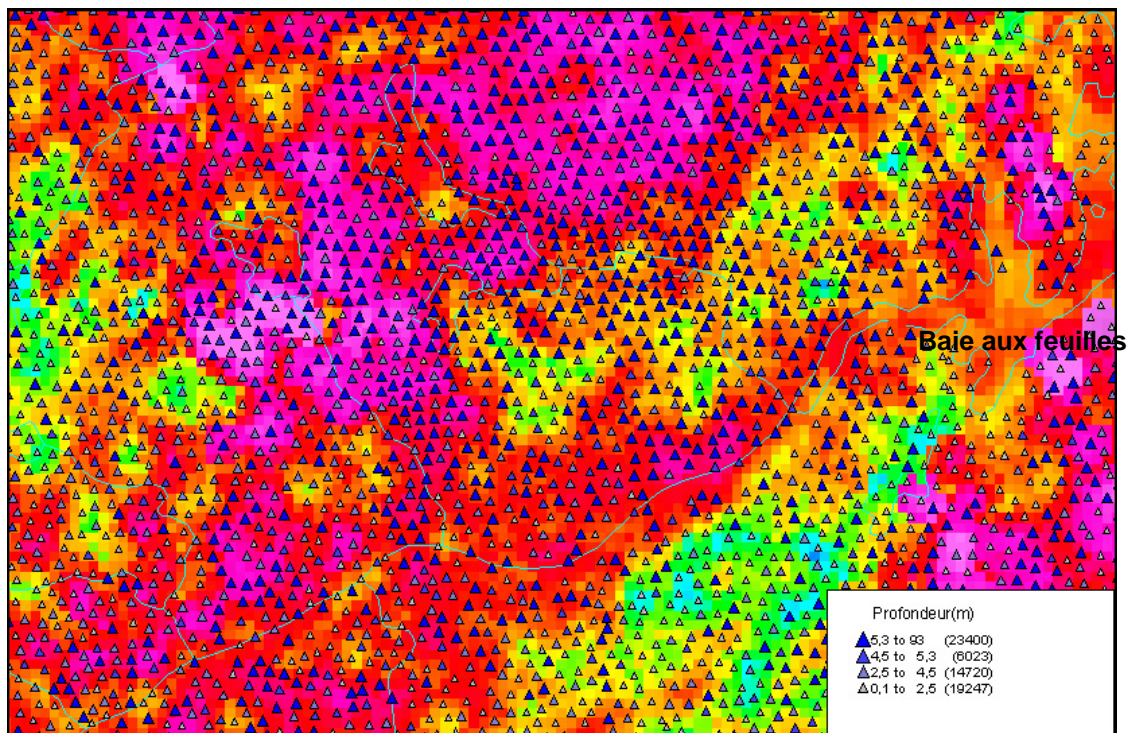


Figure 36. Relation entre les teneurs en zinc (fond contouré en couleur, élevé = mauve, bas = bleu) et les profondeurs des lacs individuels, NW de Kuujjuaq. La même relation positive entre la teneur en métal et la profondeur des lacs s'observe. [Retour au texte.](#)

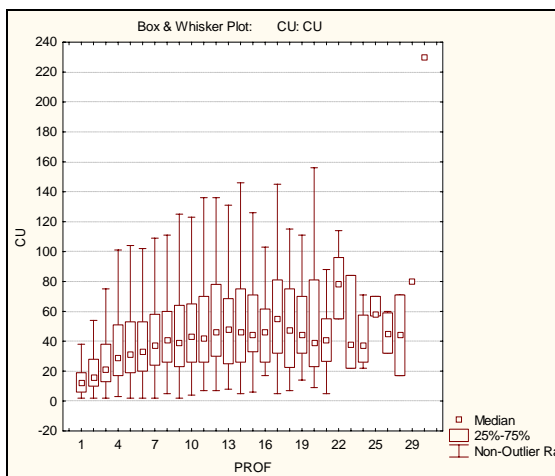


Figure 37. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, province du Supérieur, Grand Nord du Québec. [Retour au texte](#)

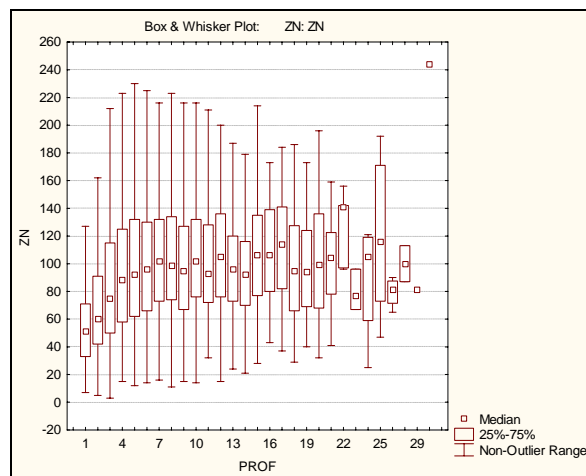


Figure 38. Teneurs en zinc selon la profondeur des lacs, province du Supérieur, Grand Nord du Québec. [Retour au texte](#)

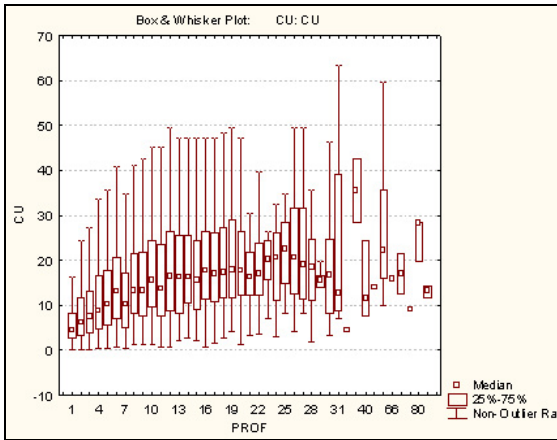


Figure 39. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Basse Côte-Nord, province de Grenville, Québec. [Retour au texte](#)

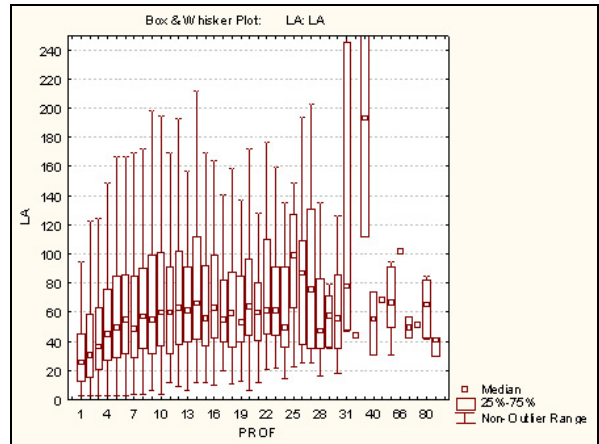


Figure 40. Teneurs en lanthane selon la profondeur des lacs, Basse Côte-Nord, province de Grenville, Québec. [Retour au texte](#)

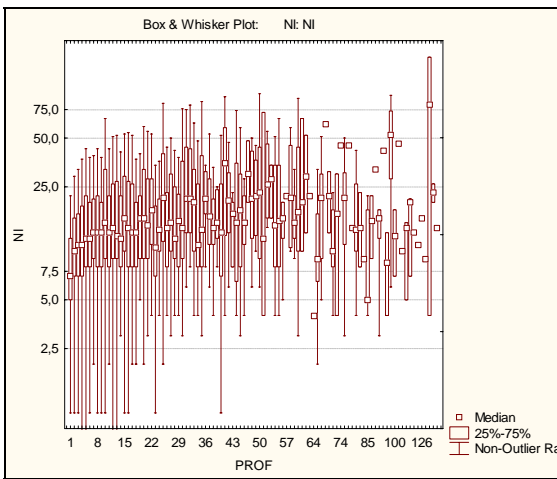


Figure 41. Teneurs en nickel selon la profondeur des lacs, Labrador. [Retour au texte](#)

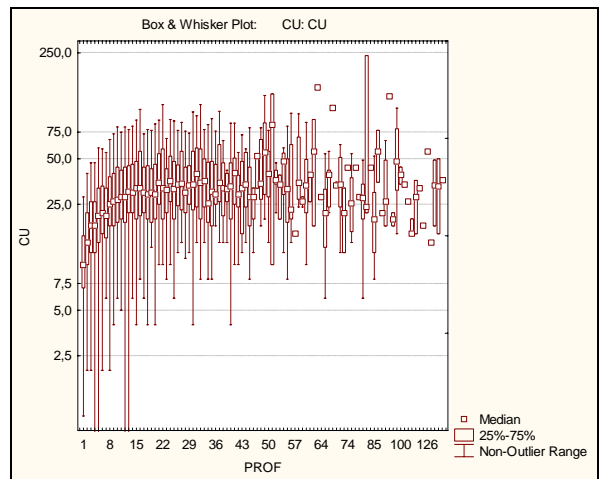


Figure 42. Teneurs en cuivre selon la profondeur des lacs, Labrador. [Retour au texte](#)

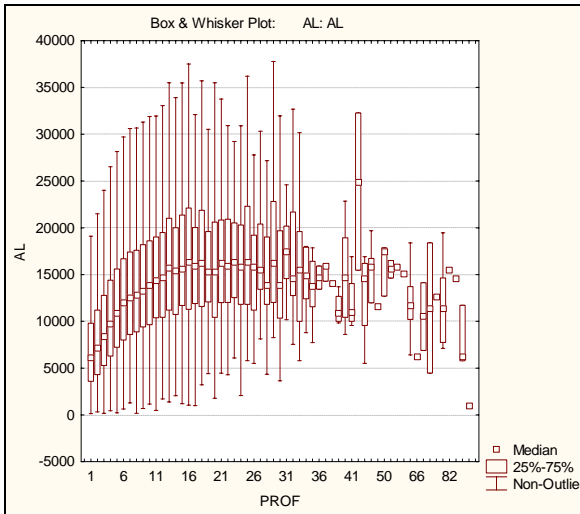


Figure 43. Teneurs en aluminium selon la profondeur des lacs, Québec. L'aluminium, principalement d'origine clastique, montre aussi une relation positive entre la teneur et la profondeur. [Retour au texte](#)

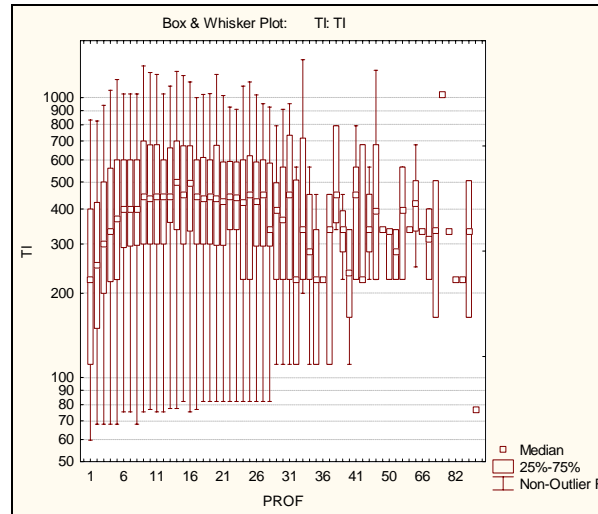


Figure 44. Teneurs en titane selon la profondeur des lacs, Québec. Le titane, principalement d'origine clastique, montre également une relation positive entre la teneur et la profondeur. [Retour au texte](#)

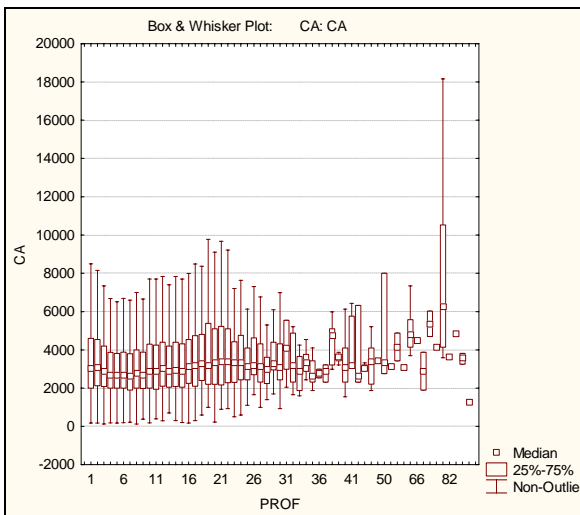


Figure 45. Teneurs en calcium selon la profondeur des lacs, Québec. Ici, il ne semble pas y avoir de relation entre la teneur du calcium et la profondeur. [Retour au texte](#)

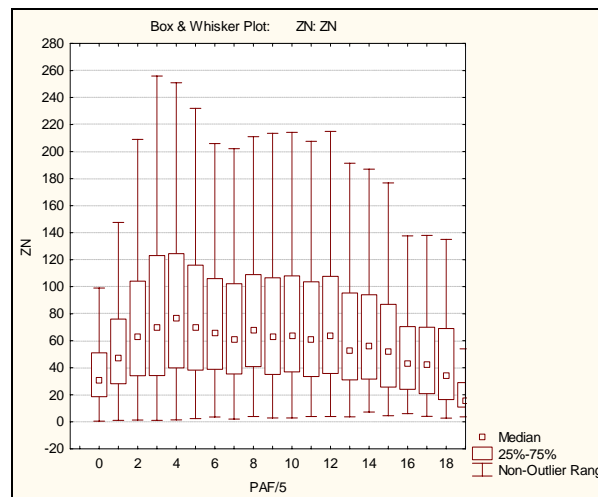


Figure 46. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, Québec. À noter que la PAF représente à la fois la quantité de matière organique et la quantité d'argiles et d'oxydes hydratés dans le sédiment. [Retour au texte](#)

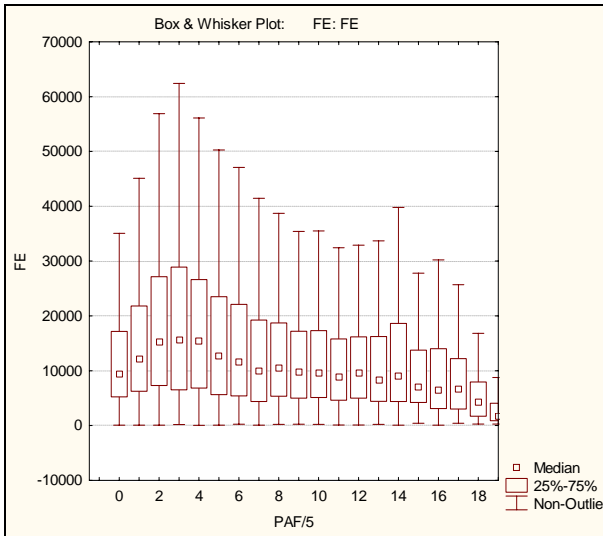


Figure 47. Teneurs en fer selon la quantité de perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

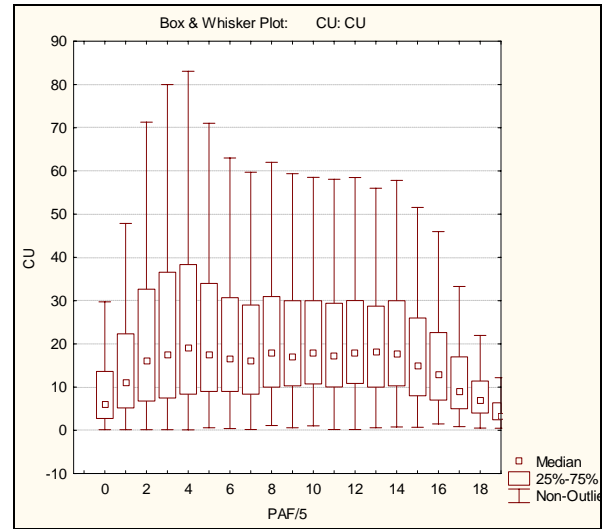


Figure 48. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

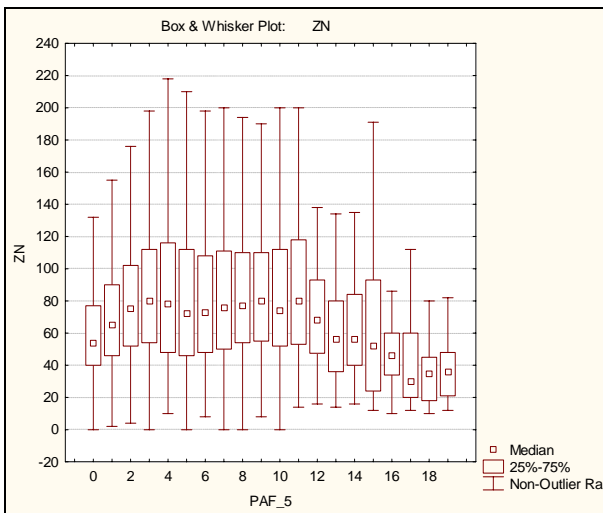


Figure 49. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, Labrador. [Retour au texte](#)

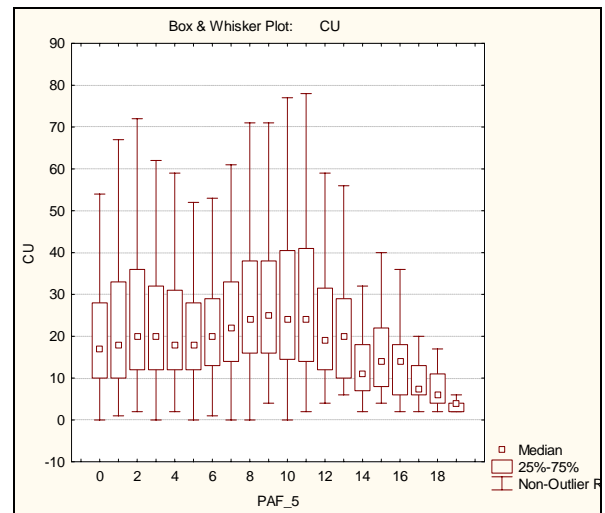


Figure 50. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, Labrador. [Retour au texte](#)

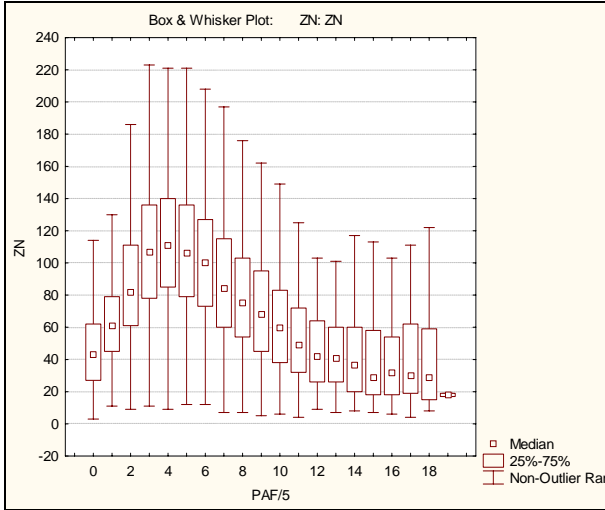


Figure 51. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, province du Supérieur, Grand Nord du Québec. [Retour au texte](#)

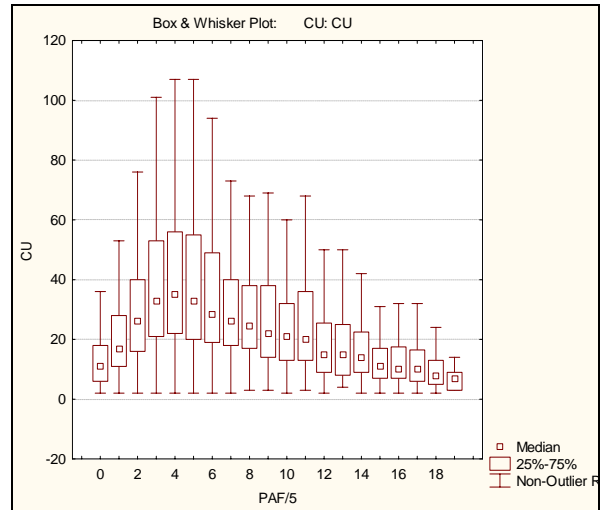


Figure 52. Teneurs en cuivre selon la quantité de perte au feu, province du Supérieur, Grand Nord du Québec. [Retour au texte](#)

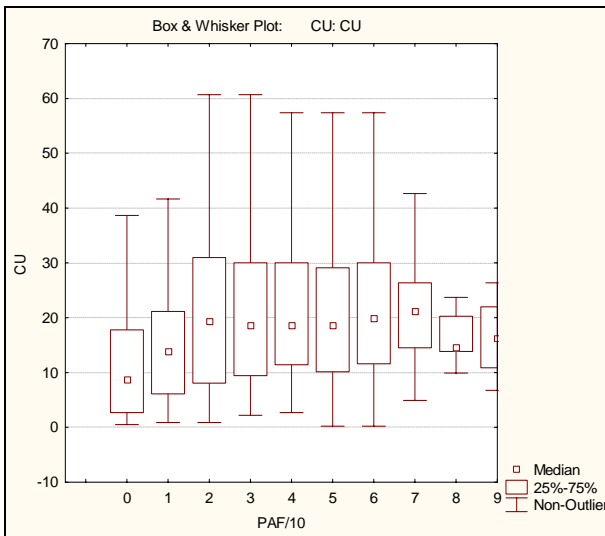


Figure 53. Teneurs en zinc selon la quantité de perte au feu, levé 1982055, Labrador. [Retour au texte](#)

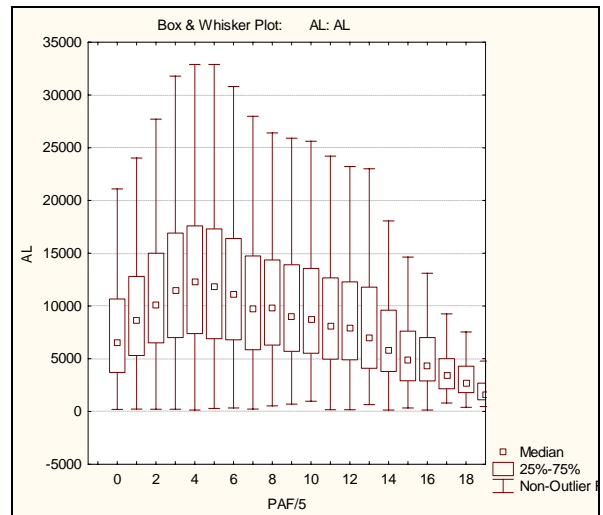


Figure 54. Teneurs en aluminium selon la quantité de perte au feu, Québec. [Retour au texte.](#)

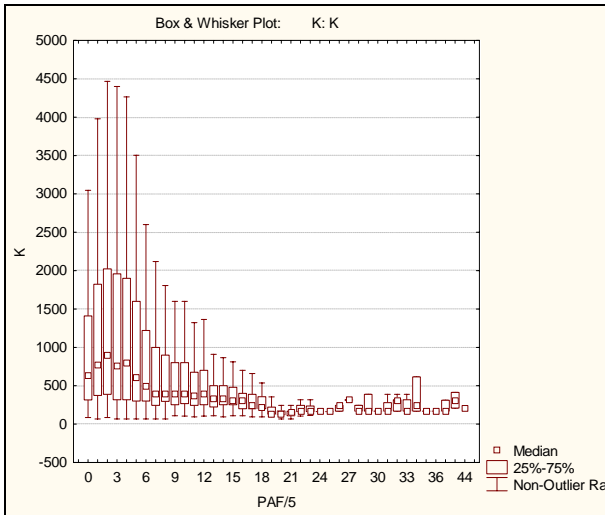


Figure 55. Teneurs en potassium selon la quantité de perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

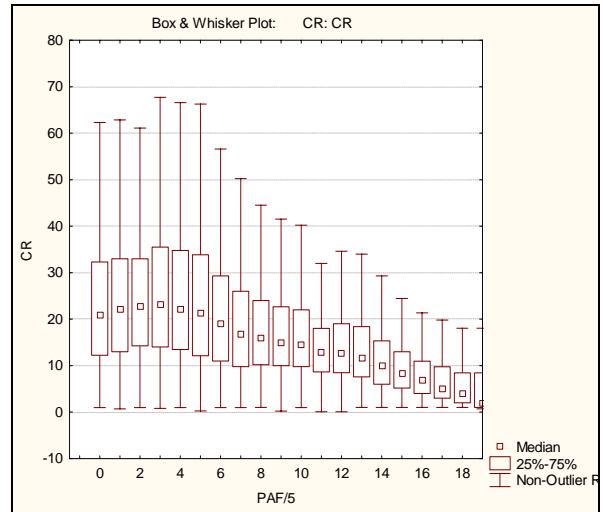


Figure 56. Teneurs en chrome selon la quantité de perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

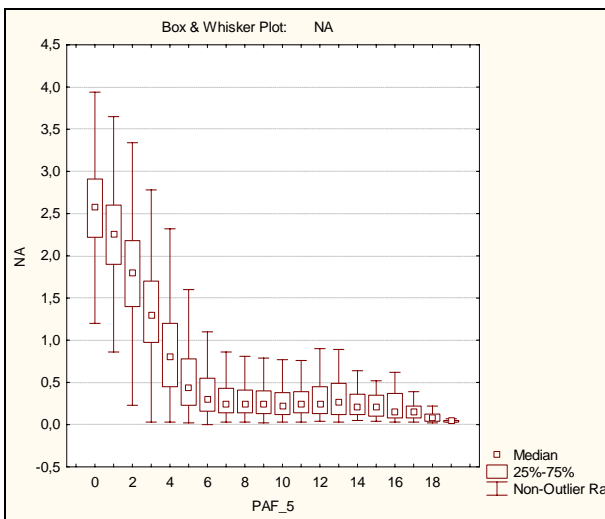


Figure 57. Teneurs en sodium selon la quantité de perte au feu, Labrador. Cette fois, la relation est fortement négative entre la teneur et la PAF. [Retour au texte](#)

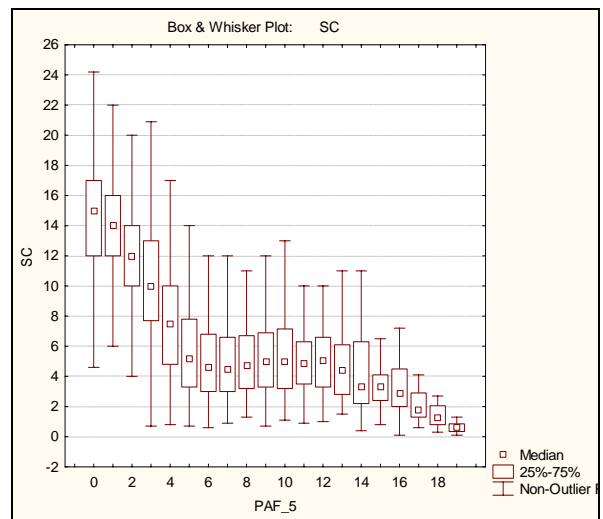


Figure 58. Teneurs en scandium selon la quantité de perte au feu, Labrador. À noter la relation fortement négative entre la teneur et la PAF. [Retour au texte](#)

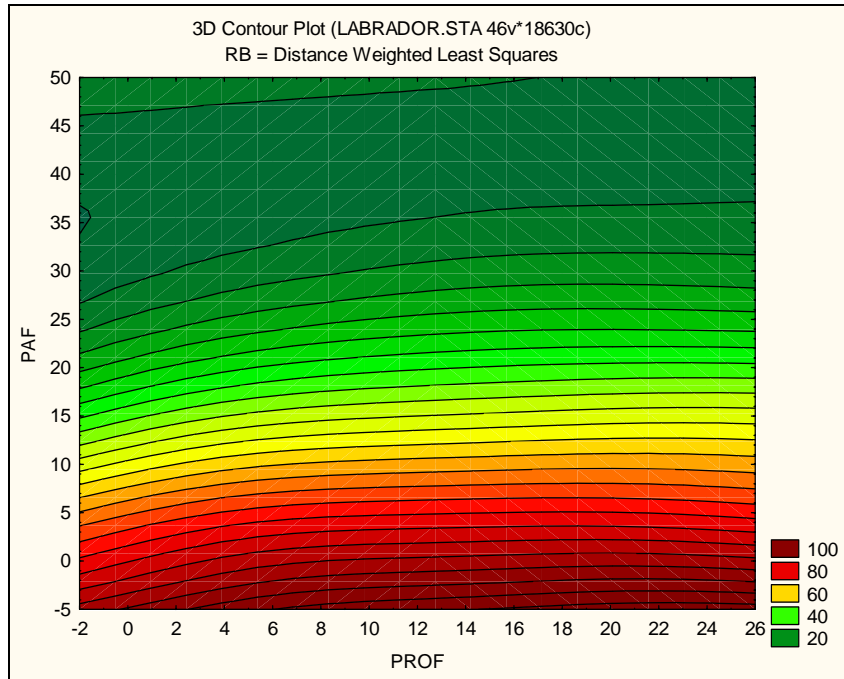


Figure 59. Teneurs en rubidium selon la quantité de perte au feu et la profondeur, Labrador. À noter la relation fortement négative entre la teneur et la PAF. [Retour au texte](#)

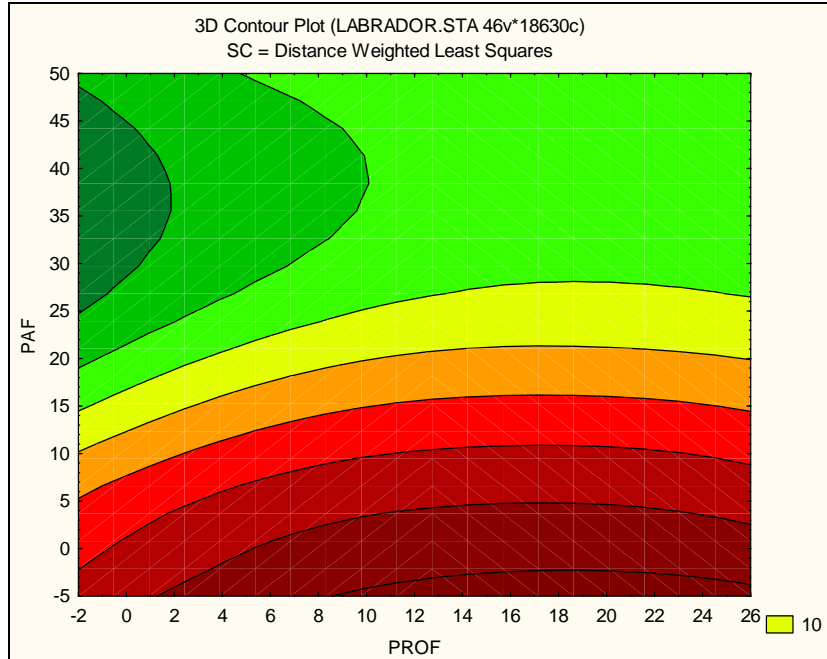


Figure 60. Teneurs en scandium selon la quantité de perte au feu et la profondeur, Labrador. À noter la relation fortement négative entre la teneur et la PAF. [Retour au texte](#)

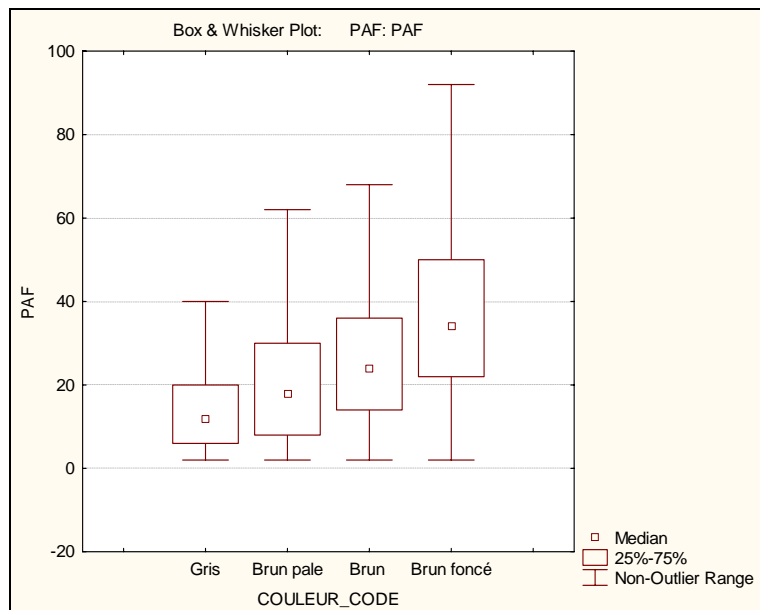


Figure 61. Relation entre la couleur de l'échantillon et la perte au feu, levé 1997520. Généralement, les sédiments gris sont plus riches en matière minérale alors qu'une couleur brun foncé est indicatrice de matière organique plus abondante. [Retour au texte](#).

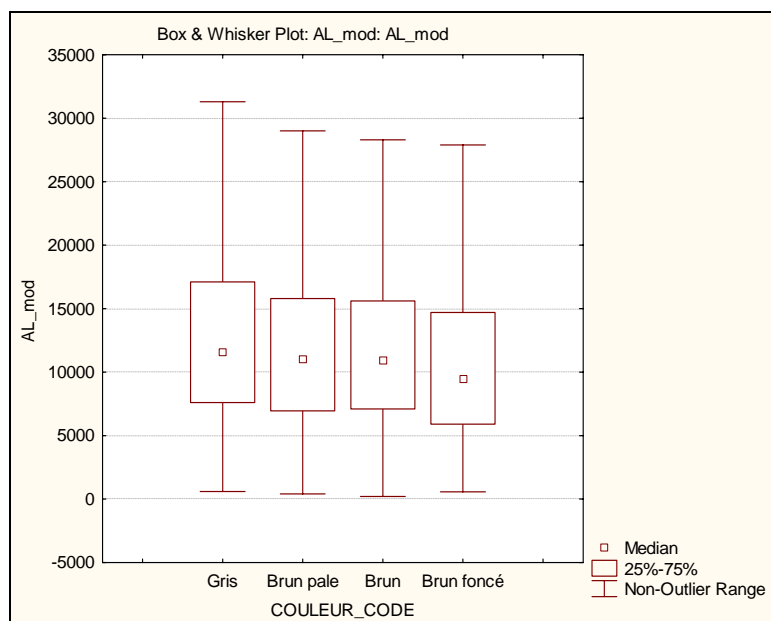


Figure 62. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en aluminium, levé 1997520. Le faible appauvrissement de l'aluminium dans les sédiments brun foncé serait le reflet d'une association de l'aluminium avec les argiles. L'aluminium peut ainsi être abondant dans les sédiments riches ou pauvres en matière organique. [Retour au texte](#).

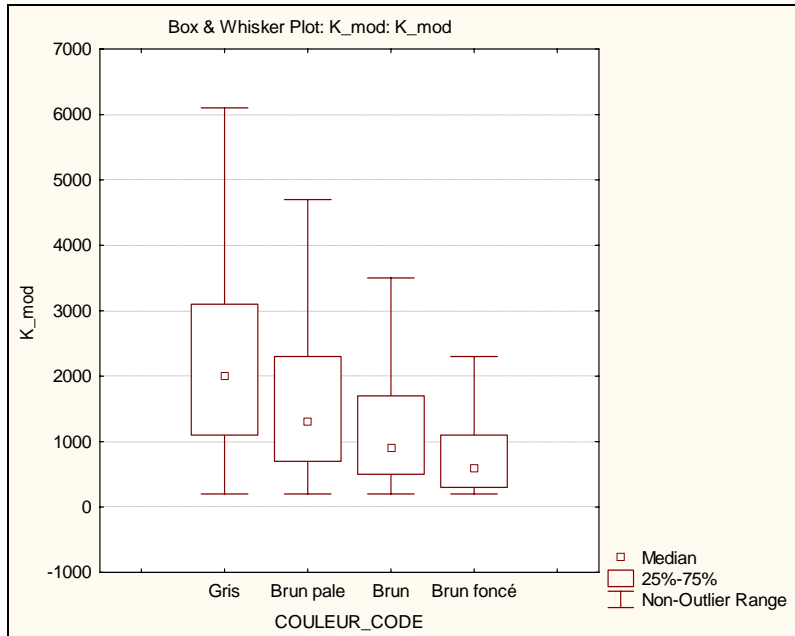


Figure 63. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en potassium, levé 1997520. Le potassium est davantage associé aux sédiments clastiques et à la matière minérale, donc plus abondant dans les sédiments plus pauvres en matière organique (de couleur grise). [Retour au texte](#)

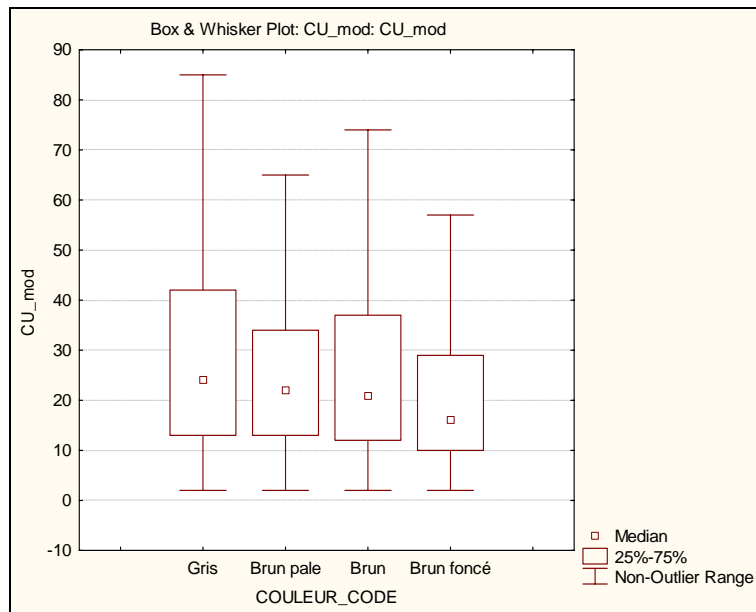


Figure 64. Relation entre la couleur de l'échantillon et les teneurs en cuivre, levé 1997520. [Retour au texte.](#)

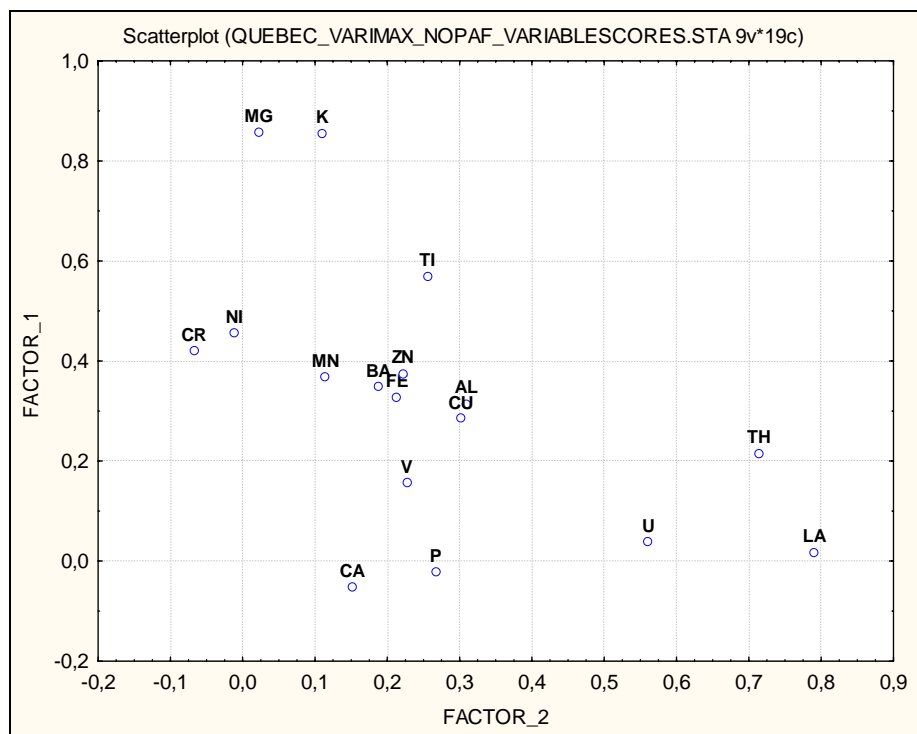


Figure 65. Facteurs 1 (Mg-K-Ti) et 2 (La-Th-U) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax). Le facteur 1 est associé à la portion d'apport clastique (Mg-K-Ti proviennent de l'érosion des silicates) et le facteur 2 montre une relation plus directe avec la géologie (éléments incompatibles et enrichis dans les granites et les roches alcalines). [Retour au texte](#)

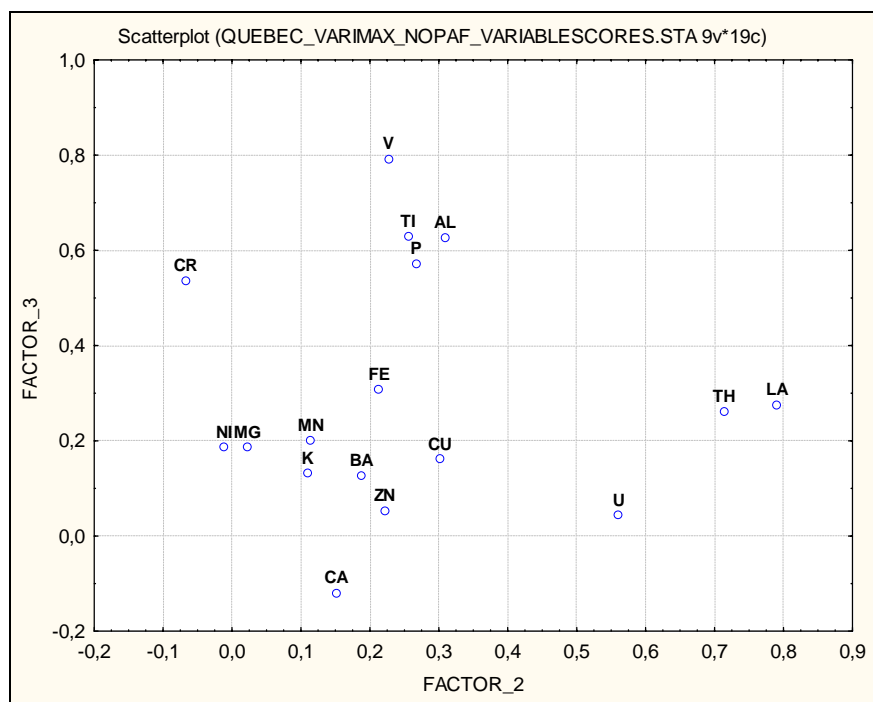


Figure 66. Facteurs 2 (La-Th-U) et 3 (V-Ti-Al-P-Cr) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax). Le facteur 3 montre une relation avec la géologie et représente l'apport en sédiments clastiques (érosion des silicates et oxydes dans les roches ignées mafiques à intermédiaires). [Retour au texte](#)

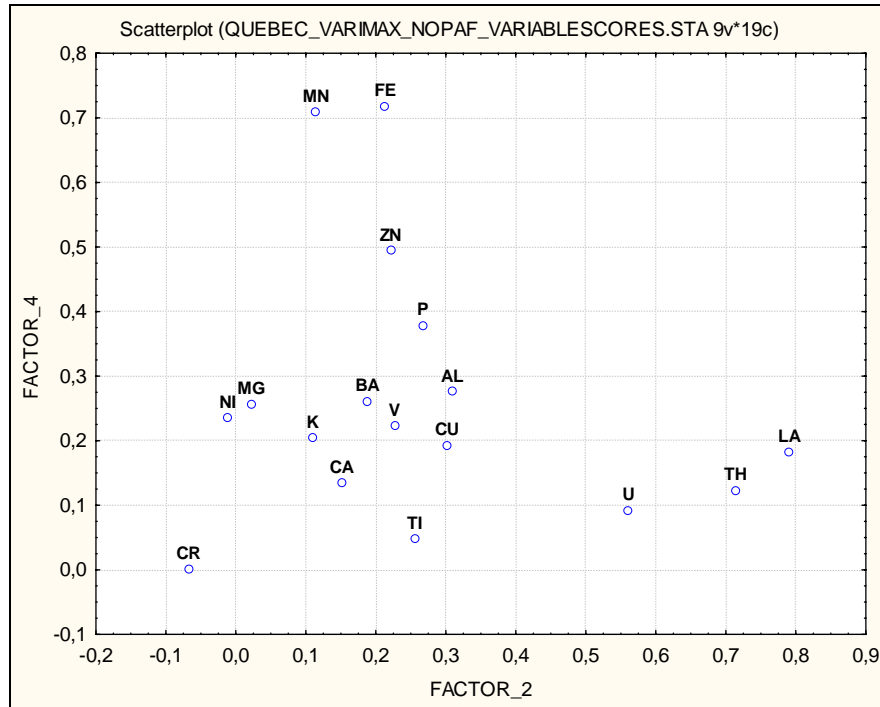


Figure 67. Facteurs 2 (La-Th-U) et 4 (Fe-Mn-Zn) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax). Le facteur 4 représente principalement l'accumulation d'oxydes et d'hydroxydes de fer et de manganèse dans les lacs (fortement contrôlée par la profondeur et l'activité organique). [Retour au texte](#)

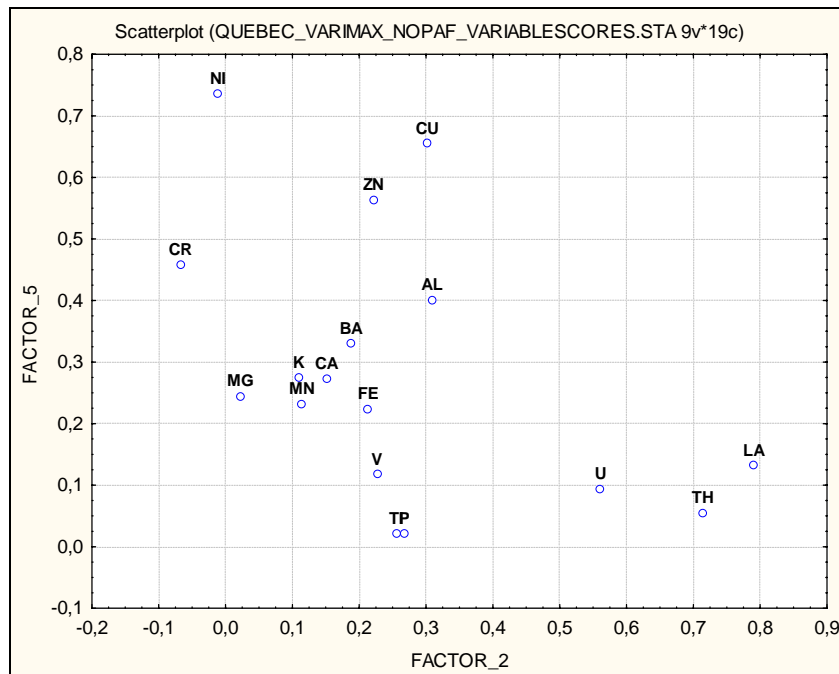


Figure 68. Facteurs 2 (La-Th-U) et 5 (Ni-Cu-Zn) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax). Le facteur 5 regroupe des éléments provenant de roches ignées mafiques, contenus surtout dans des sulfures et qui sont très mobiles dans l'environnement secondaire. Ces éléments forment des complexes avec la matière organique et précipitent sous forme de sulfures endogènes. [Retour au texte](#)

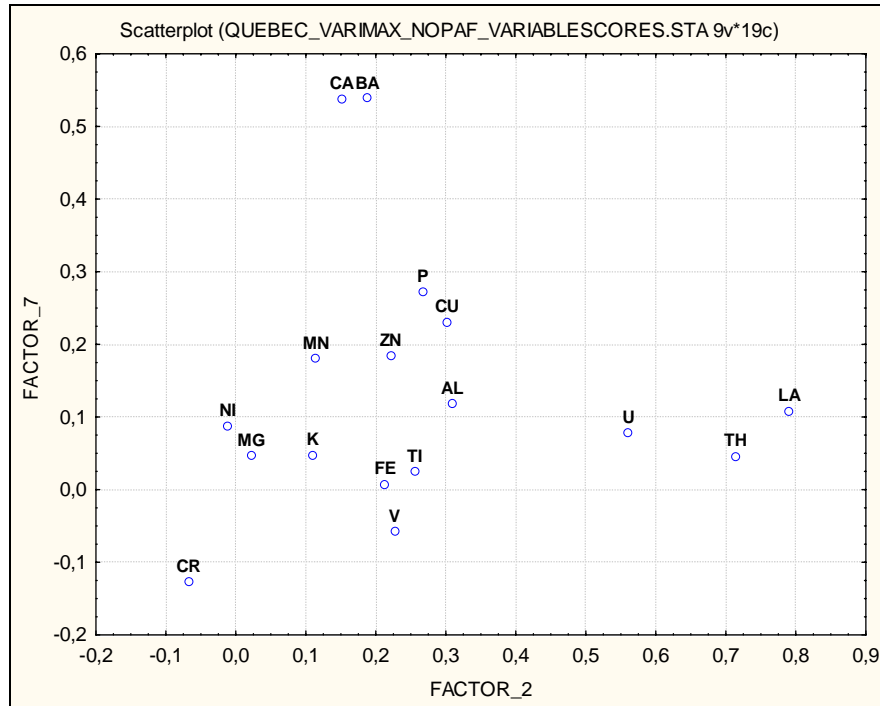


Figure 69. Facteurs 2 (La-Th-U) et 7 (Ca-Ba) de l'analyse factorielle, Québec (rotation Varimax). Le facteur 7 représente l'apport en carbonates dans les sédiments de fond de lacs. [Retour au texte](#)

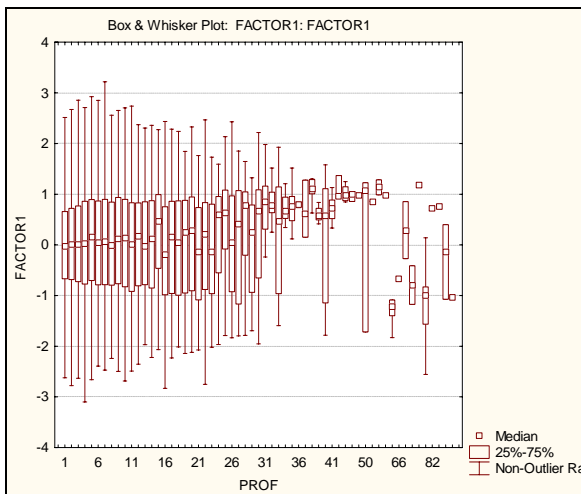


Figure 70. Relation entre le facteur 1 (Mg-K-Ti) et la profondeur des lacs, Québec. À noter que la profondeur a peu d'influence sur ce facteur. [Retour au texte](#)

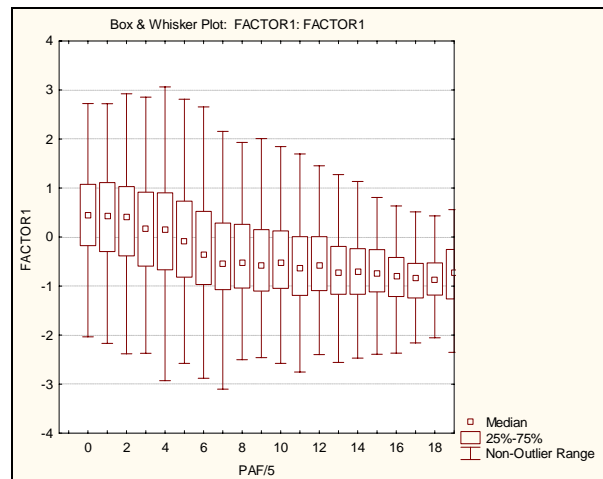


Figure 71. Relation entre le facteur 1 (Mg-K-Ti) et la perte au feu, Québec. On remarque une corrélation négative ; le facteur 1 correspondant à l'apport de sédiments clastiques et la perte au feu représentant plutôt la quantité de matière organique. Ce facteur est interprété comme étant le résultat de la dilution entre la matière organique et la matière clastique. [Retour au texte](#)

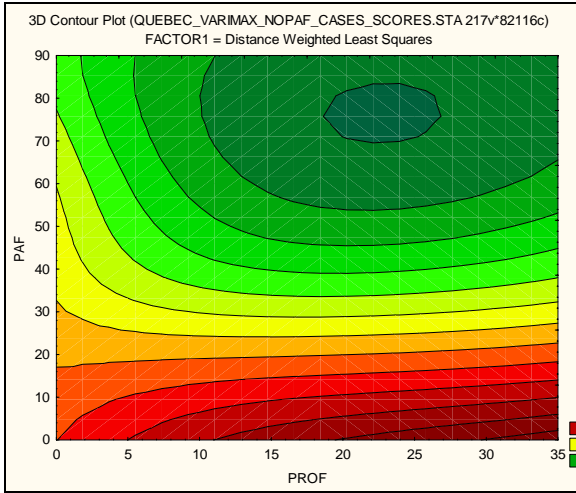


Figure 72. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 1 (Mg-K-Ti) Québec. Encore une fois on remarque le peu d'influence de la profondeur sur ce facteur et une corrélation négative avec la perte au feu. [Retour au texte](#)

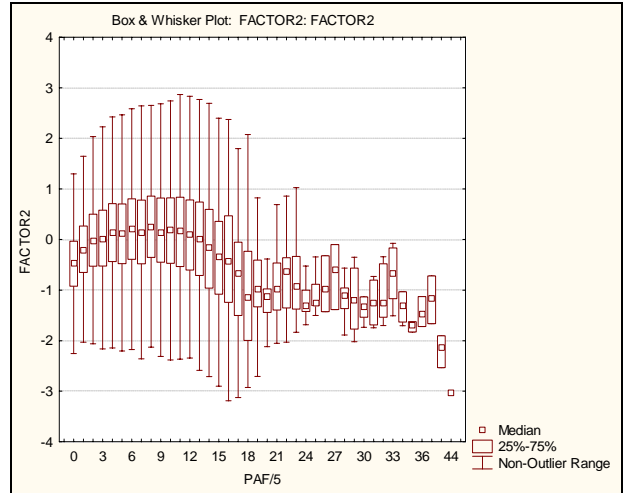


Figure 74. Relation entre le facteur 2 (La-Th-U) et la profondeur des lacs, Québec. [Retour au texte](#)

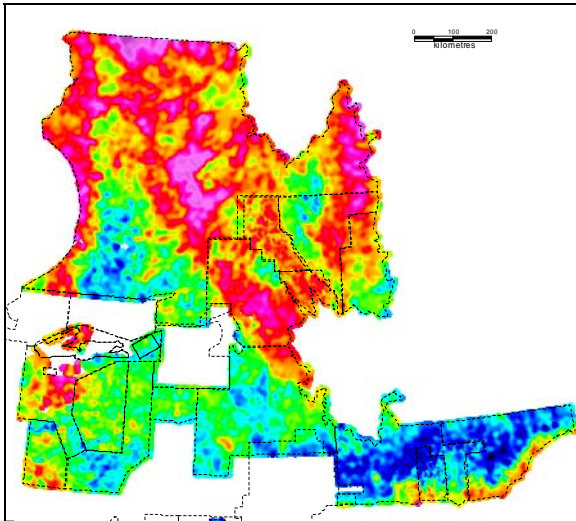


Figure 73. Facteur 1 (Mg-K-Ti) pour le Québec (mauve = valeurs élevées, bleu = valeurs faibles). Les secteurs aux fortes valeurs, comme la partie est des Torngats et la Basse-Côte-Nord en bordures du St-Laurent, correspondent à des régions où l'apport clastique est important (présence de grandes quantités de sédiments meubles). [Retour au texte](#)

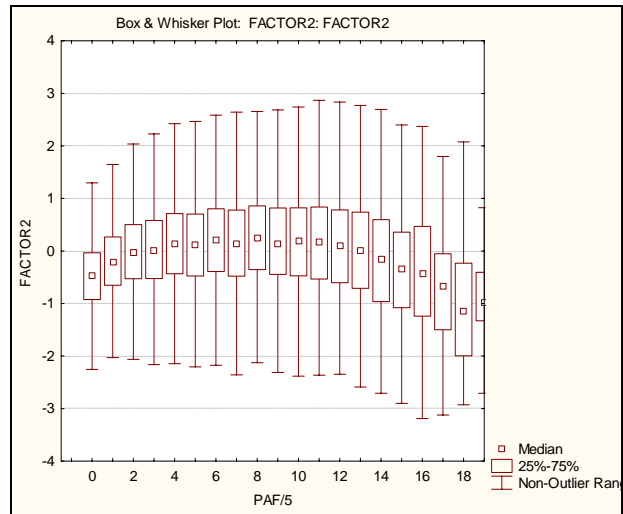


Figure 75. Relation entre le facteur 2 (La-Th-U) et la perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

La corrélation positive pour ce facteur avec la profondeur et la perte au feu représente le comportement très soluble et mobile de l'U en environnement oxydant de surface et non l'apport en matière clastique ou organique.

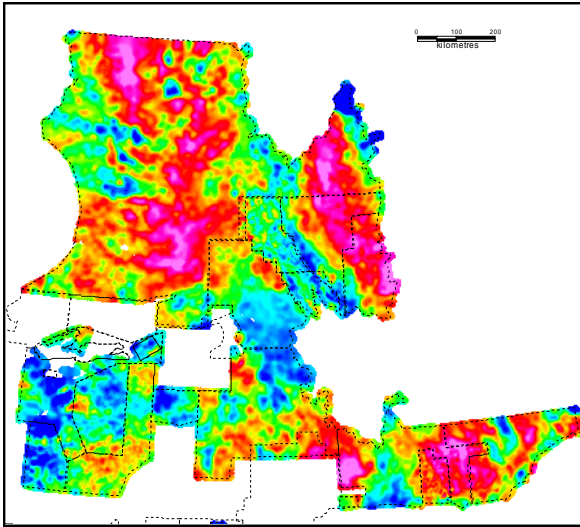


Figure 76. Facteur 2 (La-Th-U) pour le Québec (mauve = valeurs élevées; bleu = valeurs faibles). La relation avec la géologie est fortement suggérée pour ce facteur puisque les régions aux valeurs élevées coïncident avec les secteurs de roches granitiques ou alcalines. [Retour au texte](#)

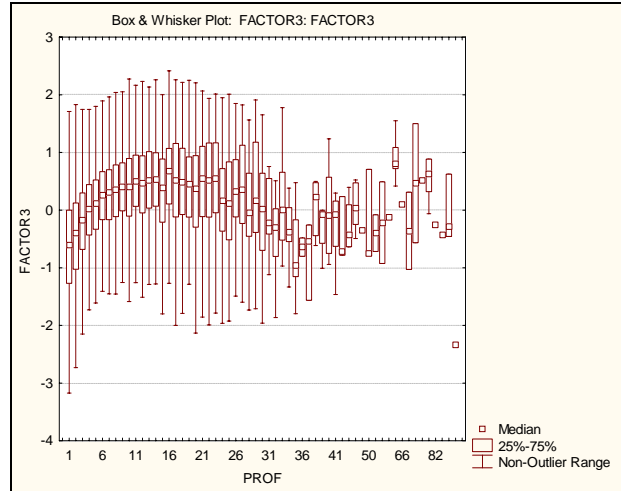


Figure 77. Relation entre le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) et la profondeur des lacs, Québec. La corrélation positive pourrait s'expliquer par l'association de ces éléments avec les fractions fines et argileuses des sédiments clastiques, qui s'accumulent davantage dans la partie profonde et calme des lacs. [Retour au texte](#)

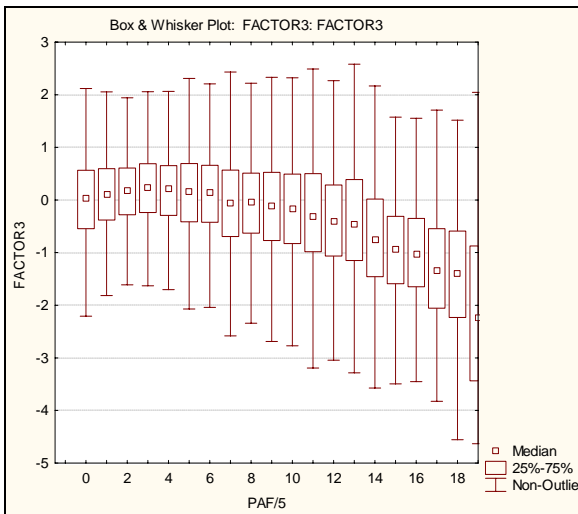


Figure 78. Relation entre le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) et la perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

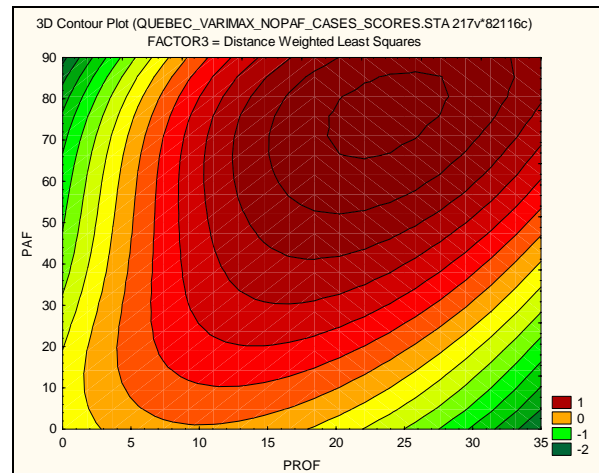


Figure 79. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr), Québec. [Retour au texte](#)

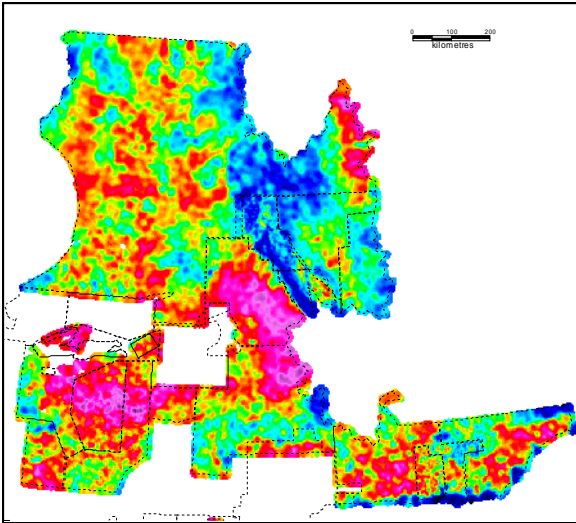


Figure 80. Facteur 3 (V-Ti-Al-P-Cr) pour le Québec (mauve : valeurs élevées, bleu : valeurs faibles). Les régions de fortes valeurs correspondent aux massifs anorthositiques de la Côte-Nord et aux roches métasédimentaires de haut grade métamorphique. [Retour au texte](#)

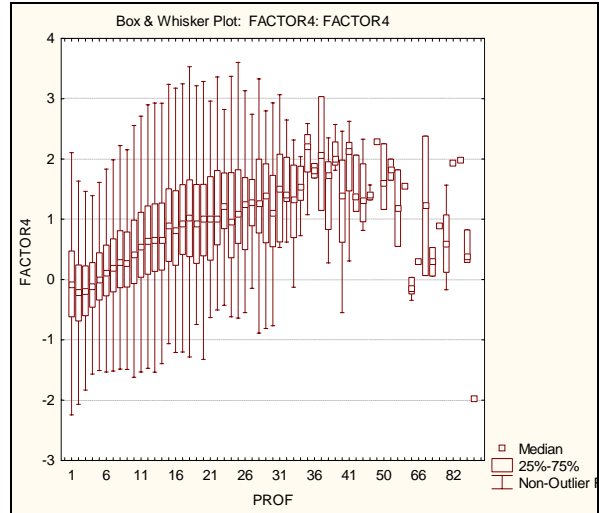


Figure 81. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn) et la profondeur des lacs, Québec. [Retour au texte](#)

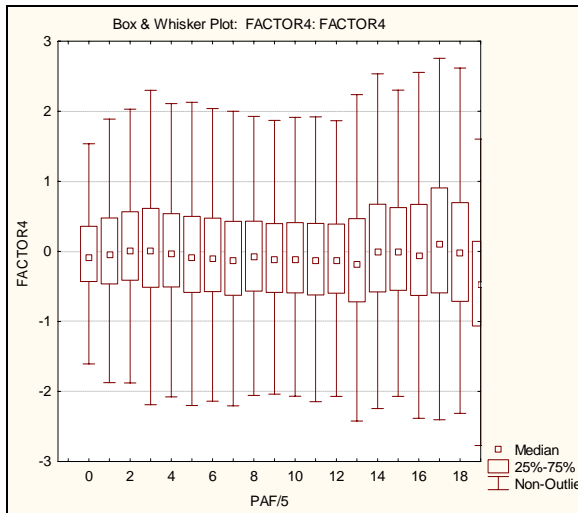


Figure 82. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn) et la perte au feu, Québec. [Retour au texte](#)

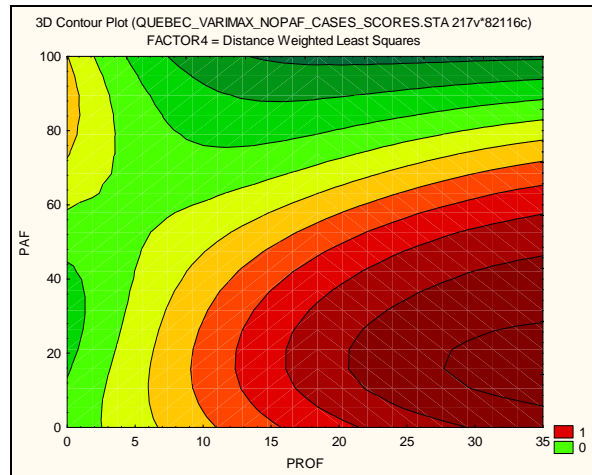


Figure 83. Relation entre le facteur 4 (Fe-Mn-Zn), la perte au feu et la profondeur, Québec. [Retour au texte](#)

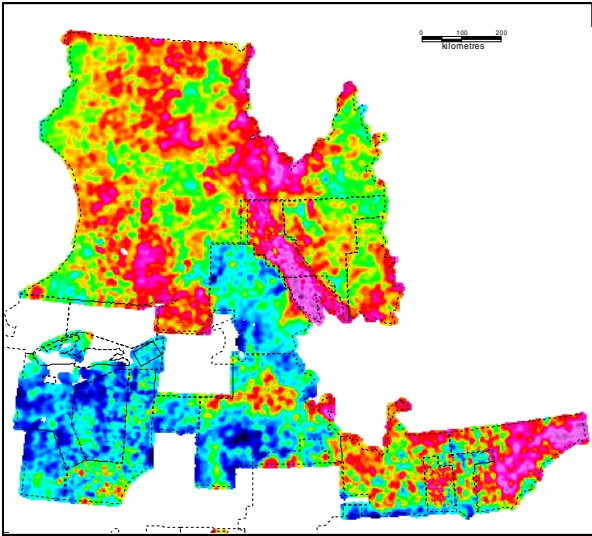


Figure 84. Facteur 4 (Fe-Mn-Zn) pour le Québec (mauve : valeurs élevées, bleu : valeurs faibles). Dans l'ensemble, ce facteur se corrèle assez faiblement avec la géologie. Seule la fosse du Labrador est bien définie par des valeurs élevées. [Retour au texte](#)

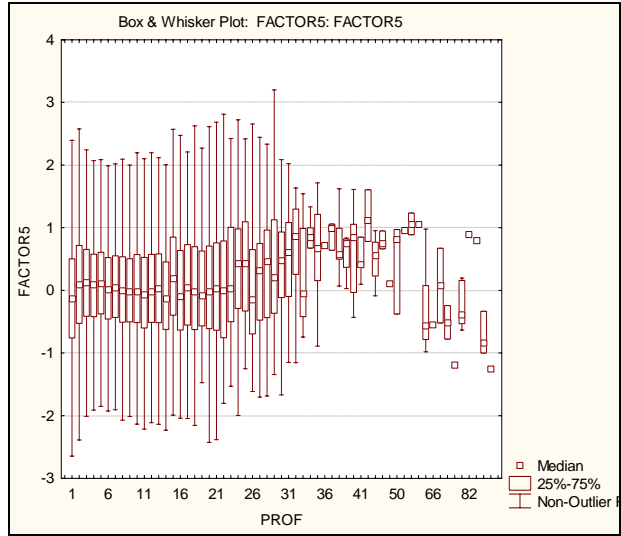


Figure 85. Très faible relation entre le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) et la profondeur des lacs, Québec. [Retour au texte](#)

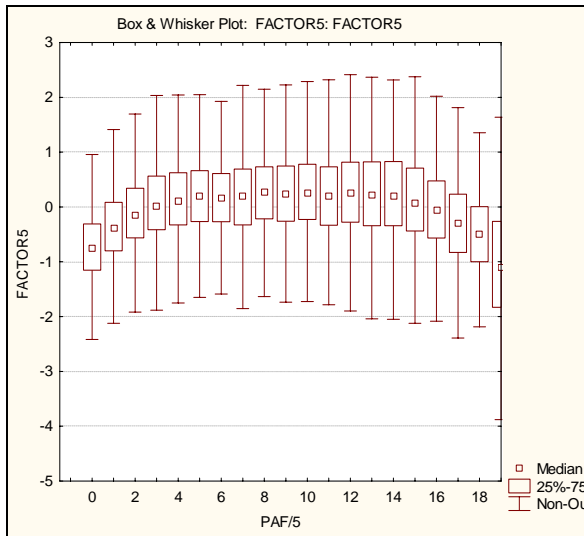


Figure 86. Relation entre le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) et la perte au feu, Québec. À noter la corrélation positive dans la partie gauche et centrale du graphique. [Retour au texte](#).

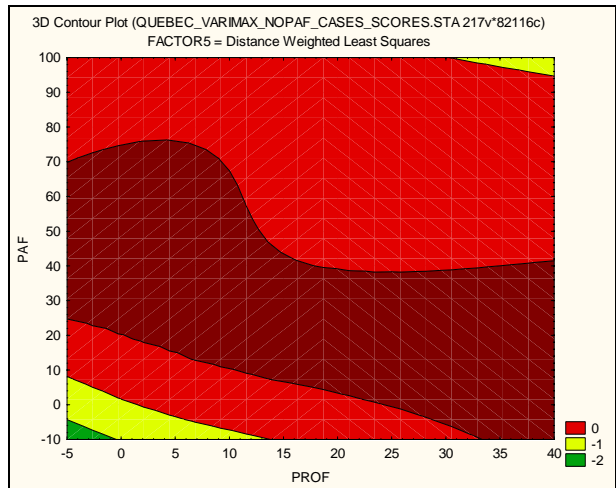


Figure 87. Relation entre la profondeur, la perte au feu et le facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr), Québec. [Retour au texte](#)

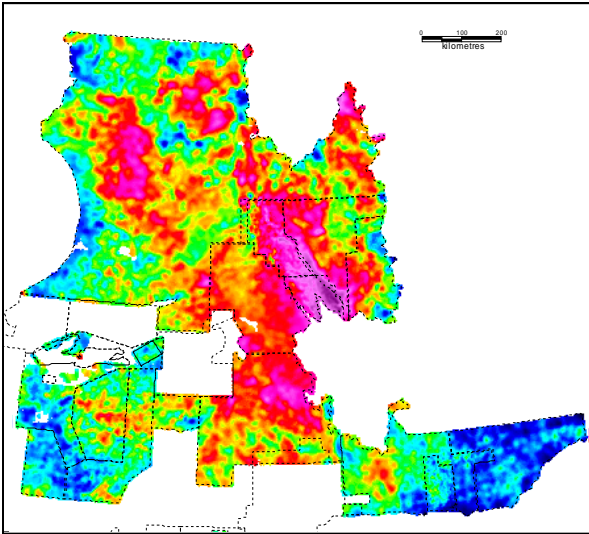


Figure 88. Facteur 5 (Ni-Cu-Zn-Cr) pour le Québec. Ce facteur est principalement enrichi où l'on trouve des roches ignées mafiques, dans les séquences volcanosédimentaires à dominance mafique et pourrait indiquer la présence d'une faible minéralisation disséminée à l'échelle régionale. [Retour au texte](#)

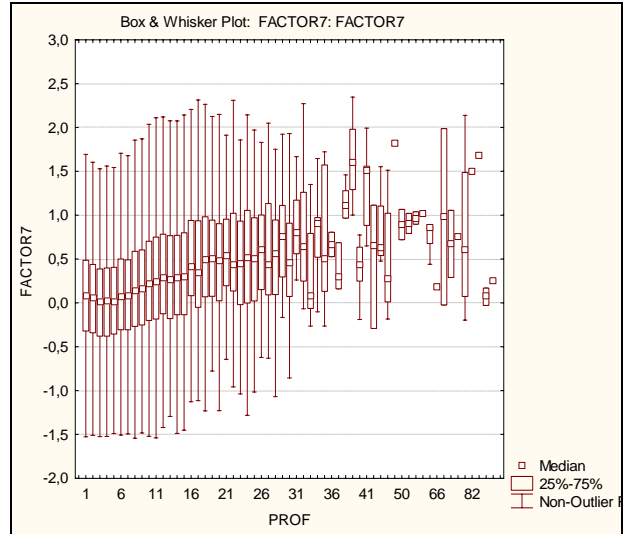


Figure 89. Relation entre le facteur 7 (Ca-Ba) et la profondeur des lacs, Québec. [Retour au texte](#)

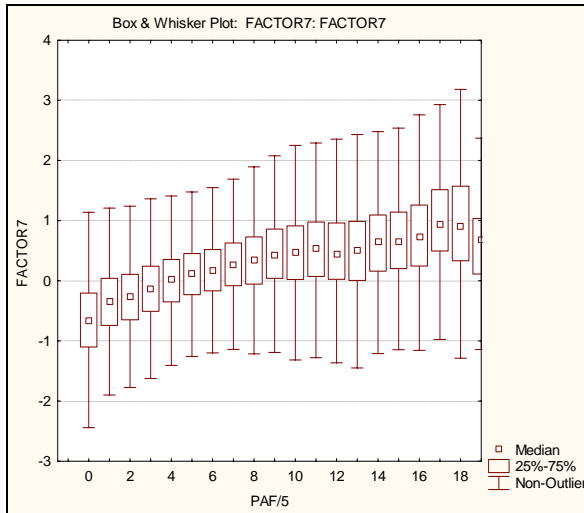


Figure 90. Relation entre le facteur 7 (Ca-Ba) et la perte au feu, Québec. La corrélation positive avec la PAF est en lien avec l'activité organique qui fait augmenter la quantité de CO₂ dans l'eau et ainsi la précipitation de carbonates. De plus, la PAF augmente avec la quantité de carbonates. [Retour au texte](#)

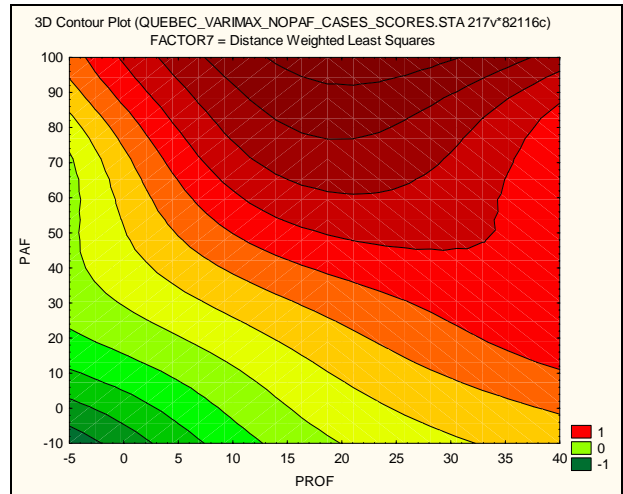


Figure 91. Relation entre la profondeur des lacs, la perte au feu et le facteur 7 (Ca-Ba). [Retour au texte](#)

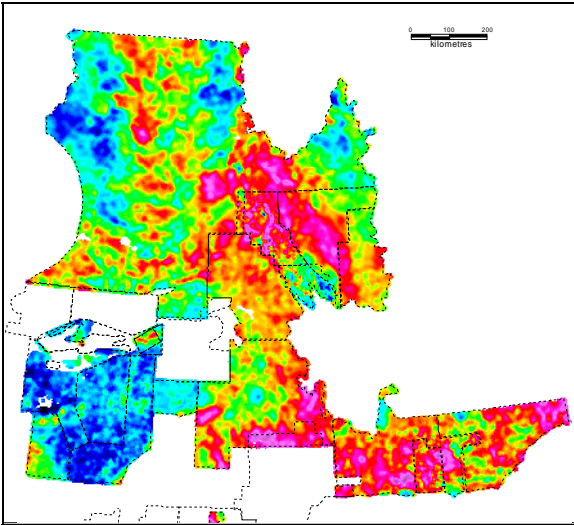


Figure 92. Facteur 7 (Ca-Ba) pour le Québec. Les fortes valeurs correspondent aux secteurs de roches protérozoïques plus propices à contenir des carbonates (ex. fosse du Labrador et Genville). [Retour au texte](#)

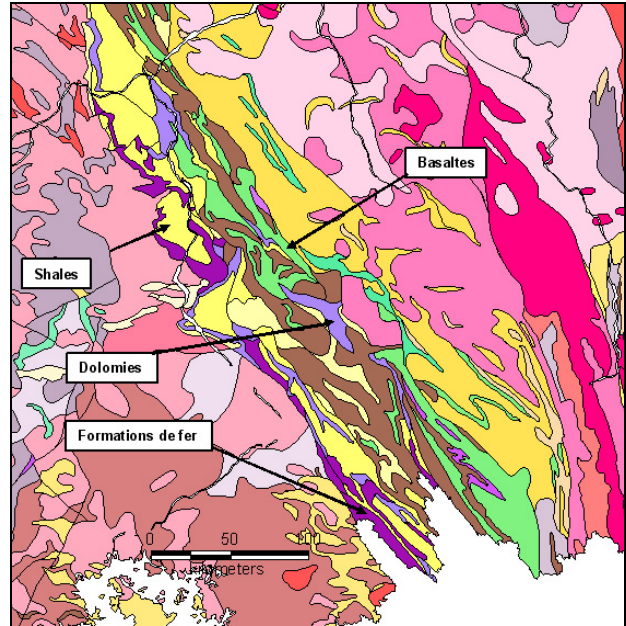


Figure 93. Géologie de la partie sud de la fosse du Labrador, Québec (MRNF, 2002). Ce secteur, où la géologie est bien connue, sert à tester l'utilisation des sédiments de fond lacs comme aide à la cartographie. [Retour au texte](#)

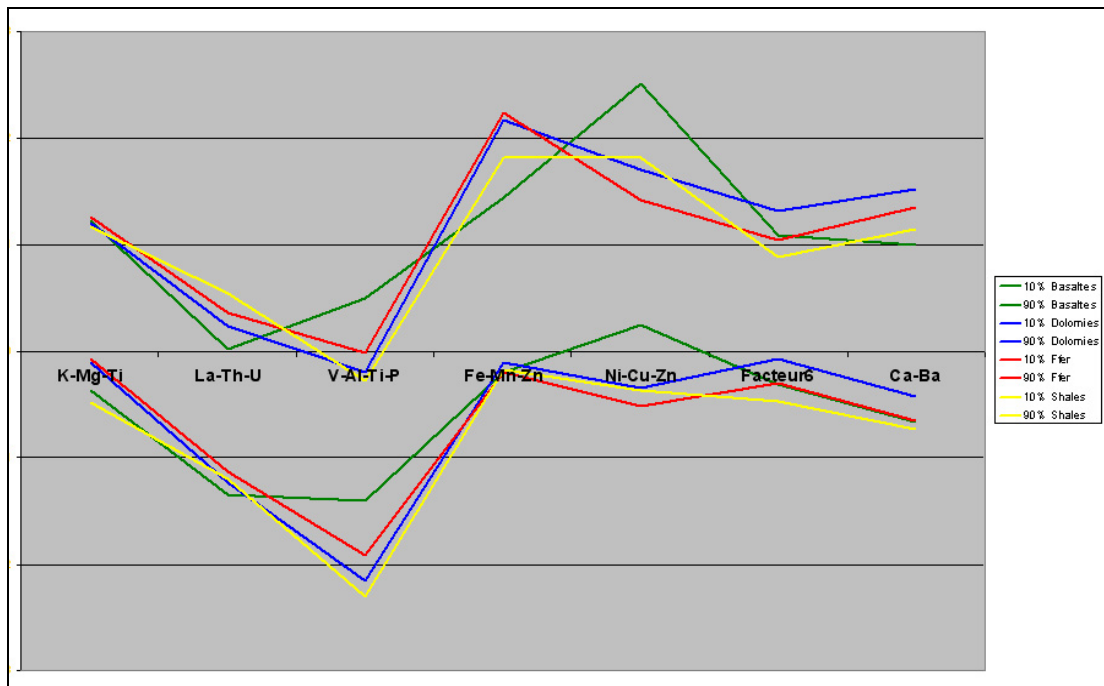


Figure 94. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, sud de la fosse du Labrador. Les profils résultants sont très semblables d'une lithologie à l'autre. Les facteurs sont donc peu discriminants, malgré les valeurs légèrement plus élevées des facteurs 3 et 5 dans les basaltes. [Retour au texte](#)

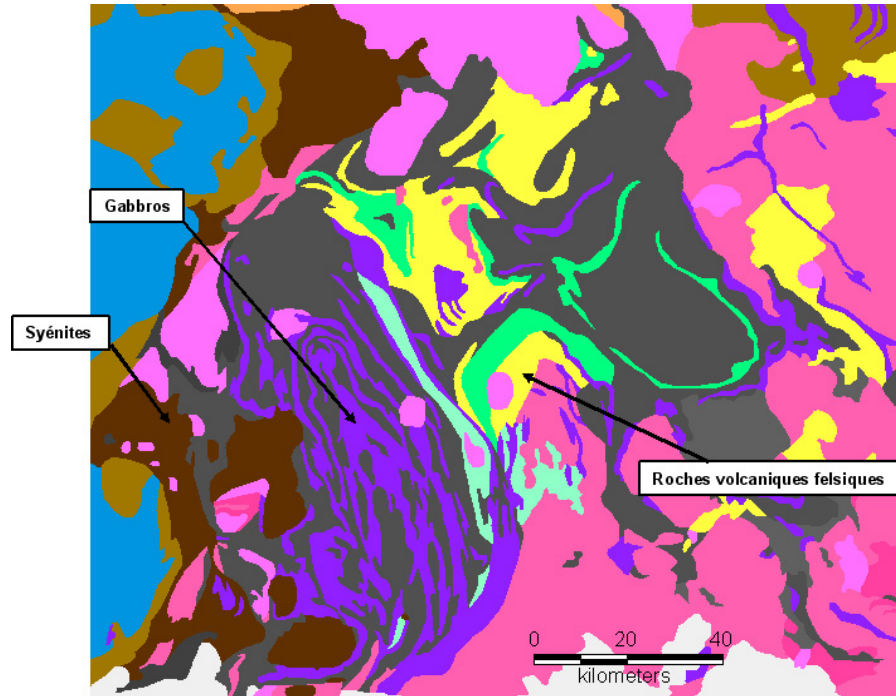


Figure 95. Géologie du supergroupe de Wakeham, Québec (Davidson, 1998). Ici encore, on teste l'utilisation des facteurs comme outils de cartographie à l'aide d'une région où la carte géologique est bien détaillée. [Retour au texte](#)

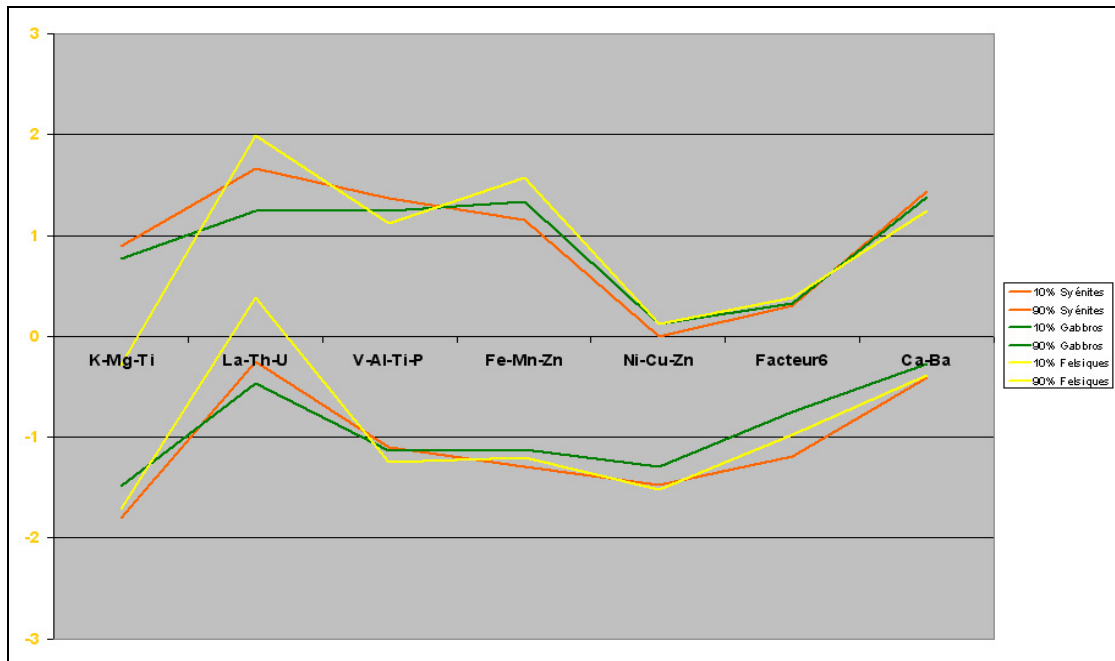


Figure 96. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, supergroupe de Wakeham. Même pour le facteur 2, qui montre des valeurs plus élevées pour les roches felsiques et plus faibles pour les gabbros, la superposition entre les différents profils est trop grande pour que les facteurs soient vraiment discriminants. [Retour au texte](#)

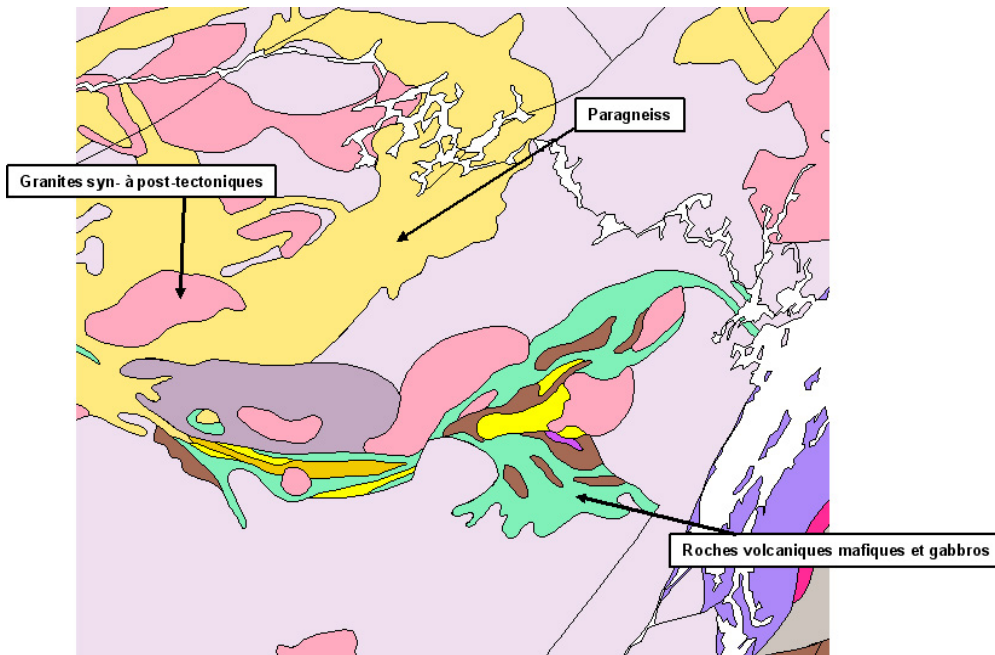


Figure 97. Géologie de la région de Frotet-Troilus, Québec (MRNF, 2002). Il s'agit du troisième et dernier secteur sélectionné pour tester l'utilisation des facteurs comme outils de cartographie. [Retour au texte](#)

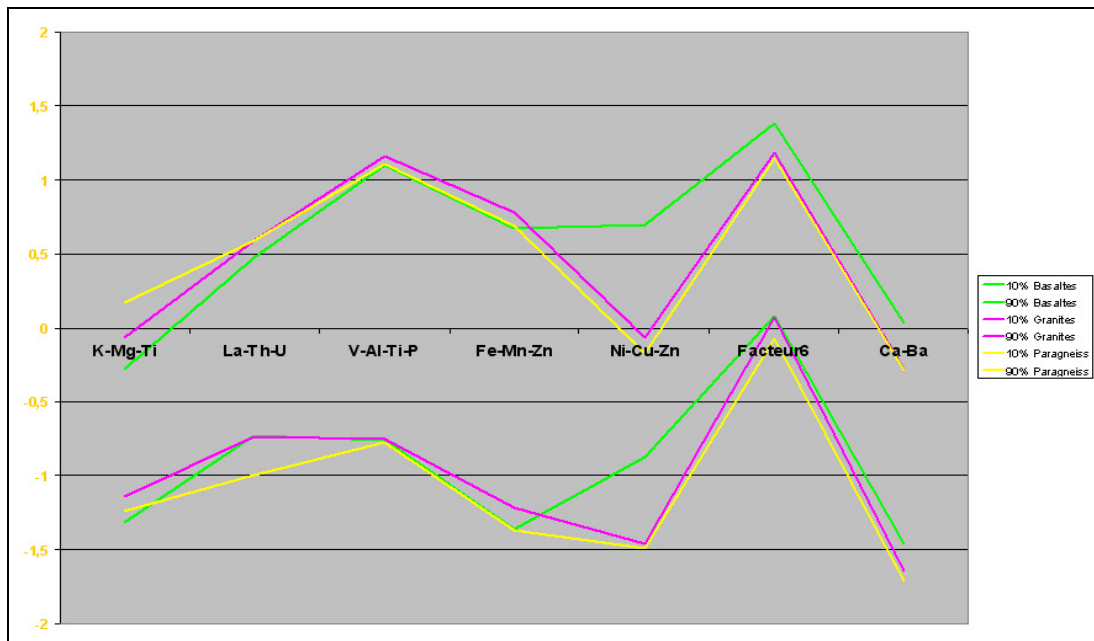


Figure 98. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies, secteur de Frotet-Troilus. Encore une fois, les profils sont très similaires d'une lithologie à l'autre. [Retour au texte](#)

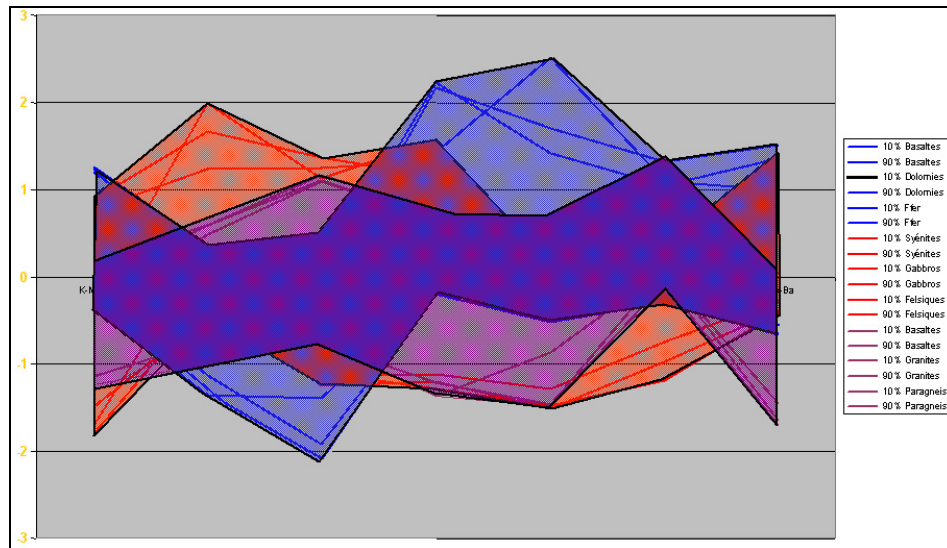


Figure 99. Intervalles des percentiles 10 et 90% pour des échantillons prélevés sur différentes lithologies pour les trois régions test. À noter qu'il y a beaucoup plus de similarités entre des lithologies très différentes d'une même région que des lithologies semblables d'une région à l'autre. Les facteurs ne sont donc discriminants qu'à l'échelle des très grands ensembles géologiques, et non à l'échelle des lithologies individuelles d'une même région. [Retour au texte](#)

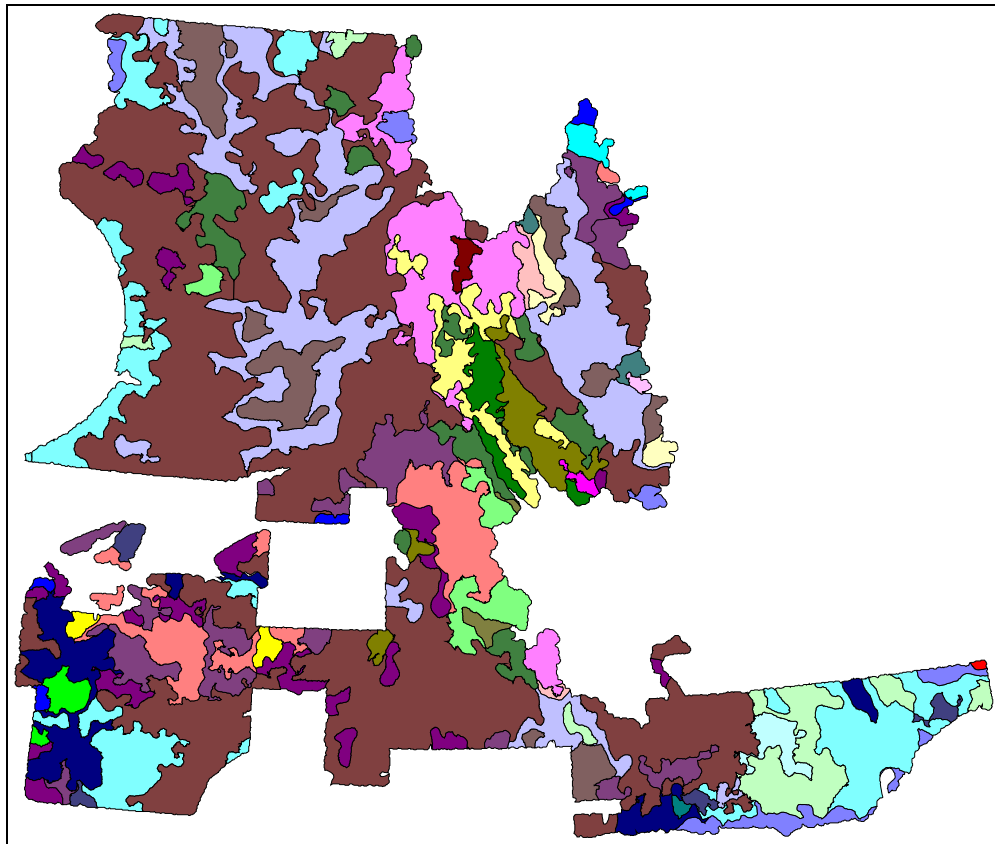


Figure 100. Domaines géochimiques du Québec. [Retour au texte](#)

ANNEXE I : ÉLÉMENTS ANALYSÉS ET MÉTHODES D'ANALYSES SELON LES LEVÉS

Levé	Nombre d'échantillons	ICP	AA	AN	FL	CM	ES	PY
Québec								
1957001-73a	696		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U					
1957001-73a	845		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-73a	111	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-73b	135		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U					
1957001-73b	106	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U					
1957001-73b	281	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-74	1963	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-74	190	PAF-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Cr-Eu-K-La-Li-Mg-Mo-P-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y		As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-74	954	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn					
1957001-74	2134		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-74	2665		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn					
1957001-75a	1171		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn					
1957001-75a	2280		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-75a	373	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn					
1957001-75a	3093	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				

Levé	Nombre d'échantillons	ICP	AA	AN	FL	CM	ES	PY
Québec								
			Zn					
1957001-75a	929	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn		As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-75a	182			As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-75b	585		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U					
1957001-75b	2266		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-75b	886	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-76a	3854		Ag-As-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-76a	785			As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-76b	5760	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	Ag-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-76b	518	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn		As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-78	3379		Ag-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn-U	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1957001-78	261			As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1976020	205		PAF-Ag-Ba-Co-Cu-Fe-Li-Mn-Ni-Pn-Zn			U		
1977500	4841		Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn		U			
1977501	3634		Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn		U			
1977502	1436		Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn		U			
1977503	792		Ag-As-Cd-Co-Cu-Fe-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn		U			
1982055	1902	PAF-Ag-Al-As-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	As-Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W	U			

Levé	Nombre d'échantillons	ICP	AA	AN	FL	CM	ES	PY
Québec								
1983050	3828	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-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-Zn	As-Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W	U		F	
1983055	3030	PAF-Ag-Al-As-B-Ba-Be-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mg-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sm-Sr-Th-Ti-V-Y-Zn	As-Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W	U		F	
1983059	3556	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-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-Zn	As-Hg-Sn		U			Au
1984059	6875	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-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-Zn	As-Hg-Sn		U			Au
1987050	6642	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn	Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1987200	1513		Ag-As-Cu-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn					
1988050	5338	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn	Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1983058	3371	PAF-Ag-Al-B-Ba-Be-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-Zn	As-Hg-Sn	As-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W	U		F	
1989050	3532	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn	Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1994721	2640	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn	Hg	As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1997520	26220	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn		As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
1998003	105	PAF-Ag-Al-B-Ba-Ba-Ca-Cd-Ce-Co-Cr-Cu-Eu-Fe-K-La-Li-Mn-Mn-Mo-Na-Ni-P-Pb-Sc-Sm-Sr-Th-Ti-V-W-Y-Zn		As-Au-Br-Cs-Sb-Se-Tm-U-W				
ICP : induction par couplage de plasma								
AA : absorption atomique								
AN : activation neutronique								
FL : fluorimétrie								
CM : colorimétrie								
ES : électrode sélective								
PY : pyroanalyse								

Levé	Nombre d'échantillons	ICP	AA	AN	FL	CM	ES	PY
Labrador								
1977	4255		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
1978	4688		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
1982	4488		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
1983	2936		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
1984	915		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
1985	1358		Ag-Cd-Co-Cu-Fe-Hg-Mn-Mo-Ni-Pb-Zn	As-Au-Ba-Br-Ce-Co-Cr-Cs-Eu-Fe-Hf-La-Lu-Mo-Na-Ni-Rb-Sb-Sc-Sm-Ta-Tb-Th-U-W-Yb			F	
ICP : induction par couplage de plasma								
AA : absorption atomique								
AN : activation neutronique								
FL : fluorimétrie								
CM : colorimétrie								
ES : électrode sélective								
PY : pyroanalyse								

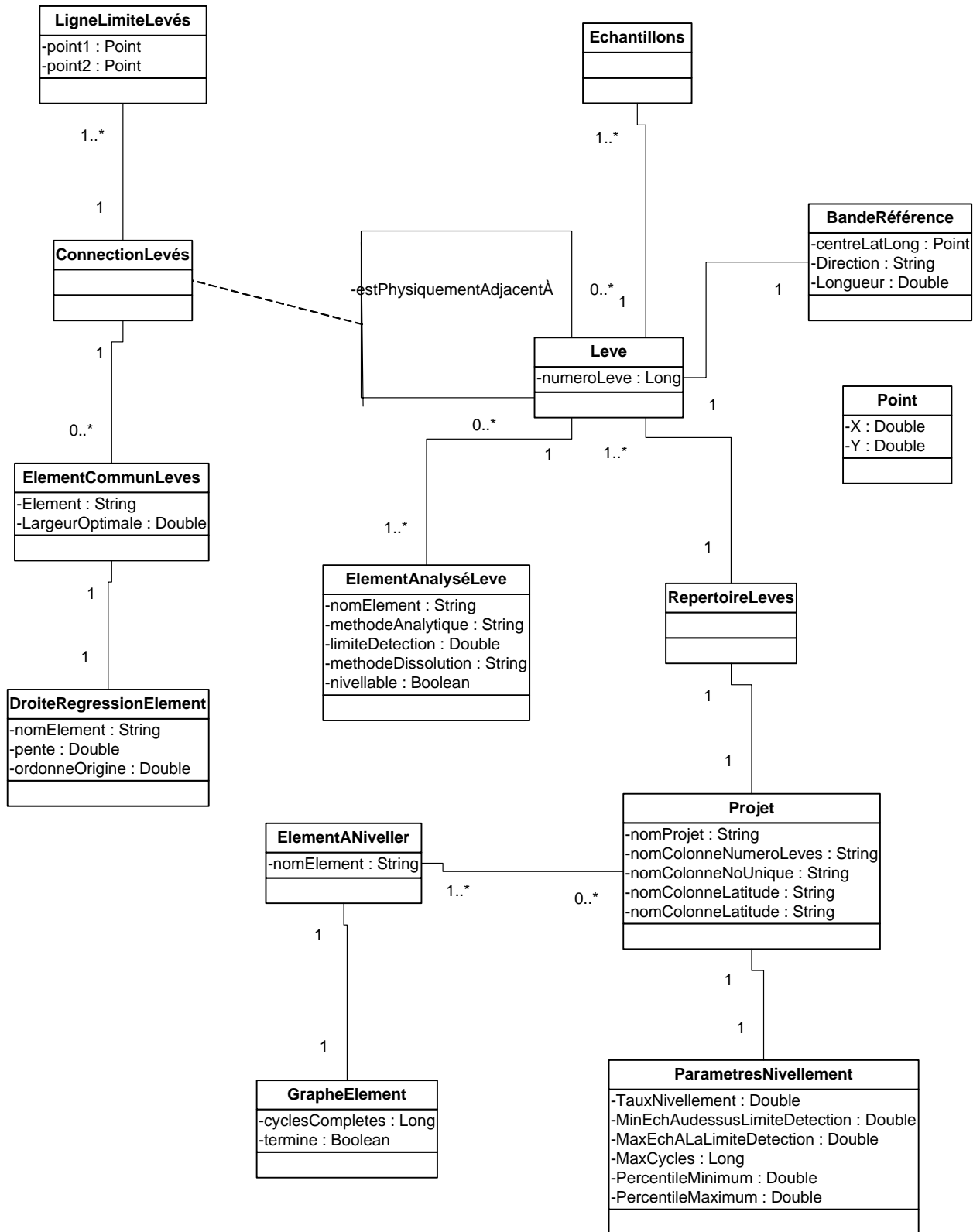
ANNEXE II : SPÉCIFICATIONS DES EXIGENCES LOGICIELLES DU LOGICIEL DE NIVELLEMENT

L'outil logiciel de nivellement doit, de façon *générale*, remplir les tâches suivantes :

- Permettre à l'utilisateur de choisir la banque de données contenant ses données sources.
- Permettre à l'utilisateur de choisir le nombre de cycles de nivellement et le taux de nivellement.
- Permettre à l'utilisateur de créer un projet de nivellement. Le projet de nivellement représente le nivellement de plusieurs éléments d'un jeu de données sources. On veut laisser ainsi la possibilité de faire plusieurs essais de nivellement indépendants à partir d'une même table de données sources (ex : avec des paramètres de nivellement différents). Pour chaque projet, une table de résultats nivelés est créée et cette table porte le nom du projet.
- Pour chaque projet de nivellement, le logiciel devra créer des tables dans la base de données contenant (voir aussi le modèle objet) :
 - la liste des éléments analysés et nivelables du projet,
 - la liste des levés du projet,
 - la liste des droites qui formeront les bandes de nivellement entre les levés,
 - la liste des connections entre les levés et
 - la liste des éléments communs et nivelables entre les levés.
- Permettre à l'utilisateur de choisir la table de la banque de données qui contient les données sources.
- Permettre à l'utilisateur d'entrer les coordonnées des droites séparant les levés et qui formeront les bandes de nivellement.
- Permettre à l'utilisateur de choisir les colonnes de la table contenant les données requises, pour chaque échantillon :
 - numéro du levé,
 - numéro d'échantillon unique,
 - longitude (en degrés décimaux) et
 - latitude (en degrés décimaux).
- La table de résultats contient, pour chaque échantillon, les quatre informations du point précédent, en plus des valeurs nivelées pour chaque élément.
- Donner des informations sur les opérations de nivellement en cours (quel levé est en train d'être nivelé, nombre de cycles de nivellement complété, etc).
- Donner le choix entre un nivellement simple à un cycle ou de multiples cycles de nivellement partiel.
- Contrôler la vitesse de réalisation du nivellement en pouvant arrêter après chaque cycle, après chaque cinq cycles ou après un nombre de cycles défini.
- Nivelier un élément à la fois (en arrêtant après chacun) ou nivelier tous les éléments successivement sans pause.
- Donner une mesure de la qualité du nivellement après chaque cycle.
- Déterminer la connectivité physique des levés à partir des droites limites entre deux levés qui comprennent : *id* du levé source, *id* du levé destination, coordonnées de l'origine de la ligne et coordonnées de la destination de la ligne.
- Avoir la possibilité d'avoir plus d'une droite déterminant la limite entre deux levés, et donc plusieurs bandes de nivellement rectangulaires entre deux levés (pour les cas de limites de levés irrégulières).
- Calculer une droite de régression par la méthode des axes principaux, à partir d'une liste de points (x,y).
- Calculer n'importe quel percentile à partir d'une liste de valeurs.
- Transformer une liste de valeurs à l'aide de l'équation d'une droite de transformation linéaire $y = mx + b$ et les stocker pour utilisation ultérieure.
- Sélectionner quels échantillons se trouvent à l'intérieur d'un polygone quelconque dont les coordonnées sont données en longitude, latitude.

- S'assurer de ne sélectionner qu'une seule fois un échantillon dans le cas de plusieurs bandes de nivellement pour une même jonction de levés.
- Construire un rectangle à partir d'une ligne, d'une largeur, et d'une direction de construction (gauche ou droite).
- Déterminer si un élément a été analysé dans un levé (au moins une valeur non-nulle pour cet élément dans ce levé).
- Déterminer la limite de détection d'un élément dans un levé (en prenant pour acquis qu'il s'agit de la valeur la plus basse pour cet élément dans ce levé).
- Déterminer pour chaque levé quels sont les éléments nivelables à partir de deux variables paramétrables, choisies par l'utilisateur : pourcentage minimal d'analyses au-dessus de la limite de détection et pourcentage maximal d'analyses exactement à la limite de détection.
- Construire un graphe de connectivité de levés nivelables pour chaque élément à partir de la connectivité physique entre les levés et du caractère nivelable ou non pour chaque élément (graphe de connectivité des levés nivelables pour un élément).
- Parcourir un graphe par un parcours en largeur récursif.
- Parcourir un graphe de façon aléatoire à partir d'un point de départ fixe.

Les différents concepts pertinents au système de nivellement sont schématisés dans un diagramme objet d'analyse UML :



Dictionnaire des concepts

Projet : nivellement fait à partir d'un jeu de données sources précis (ex : une table source) et donnant un résultat de nivellement unique pour chaque élément analysé dans chaque échantillon.

- Nom projet : nom donné au projet. Les objets dérivés du projet devraient utiliser ce nom pour identifier leur appartenance au projet.
- NomColonneNumeroLeve : nom de la colonne du jeu de données sources contenant le numéro unique identifiant un levé.
- NomColonneNumeroUnique : nom de la colonne du jeu de données sources contenant un identificateur unique d'échantillon.
- NomColonneLatitude : nom de la colonne du jeu de données sources contenant la latitude de l'échantillon.
- NomColonneLongitude : nom de la colonne du jeu de données sources contenant la longitude de l'échantillon.

Levé : ensemble d'échantillons prélevés dans un secteur donné dans une période de temps précise dans un Projet précis.

- Levé : identificateur unique de levé.

Répertoire Levé : ensemble des différents levés contenus dans un jeu de données sources du projet.

Bande référence : position du point central délimitant deux bandes rectangulaires à l'intérieur d'un même levé, servant à calculer la statistique D sur la largeur optimale des bandes.

- CentreLatLong : point représentant la partie centrale à partir de laquelle deux bandes de nivellement exploratoires intra-levé rectangulaires seront construites.
- Direction : direction dans laquelle les deux bandes sont construites : E-W ou N-S (normalement cette direction devrait être environ perpendiculaire à la géologie).
- Longueur : longueur des bandes totales (ex : 200 km N-S fait 100 km vers le nord et 100 km vers le sud).

ElementAnalyseLeve : élément (ou autre attribut) dont au moins une valeur est différente de nulle pour un échantillon d'un levé précis.

- NomElement : nom de l'élément comme tel, il doit être un des éléments de la liste ElementsANiveller du projet.
- LimiteDetection : la limite de détection de cet élément dans ce levé, calculée à partir des analyses du levé comme la valeur la plus faible (autre que nulle) pour cet élément dans ce levé.
- Nivelable : détermine si un élément peut être nivelé selon les critères de qualité analytique qui seront entrés par l'utilisateur.

ElementANiveller : représente, à partir des colonnes du jeu de données sources, la liste des variables devant être nivelées.

GrapheElement : pseudo-graphe qui contient tous les levés pour lequel un élément précis est analysé et nivelable.

- Cycles : nombre de cycles complétés pour le nivellement de cet élément.
- Terminé : indique si le nivellement est terminé selon des critères de qualité de nivellement déterminés.

LigneLimiteLevés : ligne placée à la limite entre deux levés (définies par l'utilisateur) qui représente l'endroit où on doit construire une bande de nivellement pour le levé source. L'ordre entre le point source de la ligne et le point destination est important ; en se plaçant sur le point source et en regardant vers le point destination, on construira la bande de nivellement du côté gauche de la ligne, avec une largeur définie par la largeur optimale des bandes de nivellement.

ConnectionLevés : représente la connexion physique entre deux levés, c.-à-d. leur contiguïté. Cette contiguïté est définie sur la base de la présence d'au moins une LigneLimiteLevés entre ces deux levés; ces lignes sont définies par l'utilisateur.

ElementCommunLevés : élément qui est analysé et nivelable pour les deux levés définissant une ConnectionLevés.

DroiteRegressionElement : droite de régression calculée pour un élément entre deux levés.

Point : localisation définie par une coordonnée longitude-latitude.

Architecture schématique du système

Pour assurer une bonne indépendance des composantes, pour avoir la possibilité de réutiliser ou modifier des parties du système, pour détecter plus facilement les erreurs et pour rendre le logiciel plus facilement maintenable et modifiable, une architecture 3-tiers a été utilisée.

Architecture de l'application

Modélisation de la conception

L'application est réalisée en calquant de façon assez fidèle le modèle objet de l'analyse, en le transformant en modèle objet de conception. Il est à noter que les liens entre les objets sont réalisés par des collections VB dans le cas de liens un à plusieurs, et de variables objet dans le cas de liens un à un ou plusieurs à un.

La classe Projet sert d'interface dans la couche application du système. Toutes les fonctions utilisables de l'extérieur de la couche application sont incluses dans la classe Projet qui sert donc d'aiguilleur (design pattern façade).

Persistence des objets de la couche application

Certaines informations entrées par l'utilisateur sur un projet doivent être conservées pour qu'il n'ait pas à les rentrer à chaque fois qu'il démarre le logiciel. Également, certains calculs effectués par le logiciel (ex : la détermination des éléments analysés dans tous les levés, ou la détermination des seuils de détection) peuvent être assez longs à compléter pour une base de données de dizaines de milliers d'échantillons. C'est pourquoi il a été décidé de stocker ces informations dans la base de données pour ne pas avoir à les refaire à chaque fois qu'un projet est fermé puis rouvert. Certains objets de la couche application sont donc « *persistés* » sous forme de lignes dans des tables de travail. Les objets suivants sont « *persistés* » dans des tables de la base de données :

- ElementAnalyseLeve
- Projet
- Leve
- ElementCommunLeve
- DroiteRegressionElement
- ElementANiveller
- ConnectionLeves

Noter que les autres classes non mentionnées ici ne sont pas « *persistées* » et sont créées au besoin par l'application.

Au chargement d'un projet, une structure d'objets représentant les différents concepts du système est créée à partir des informations contenues dans les tables MS-Access de la base de données. De façon générale, l'initialisation commence par la classe Projet, et descend de façon hiérarchique vers toutes les classes inférieures.

Certaines classes de la logique applicative communiquent directement avec la base de données. La classe Projet, c.-à-d. la classe maîtresse du système, le fait. C'est aussi le cas pour certaines classes « conteneurs », c.-à-d. les classes possédant une collection d'objets « *persistables* » (liens un à

plusieurs). Ces classes sont responsables de la communication avec la base de données pour la récupération des informations nécessaires à la création des objets lors de l'initialisation du système de nivellement. C'est le cas des classes suivantes (outre Projet):

- RepertoireLeve : pour les Leve et les ElementsANiveller
- Leve : pour les ElementAnalysesLeve, les ConnectionLeve et les Échantillon
- ConnectionLeve : pour les ElementCommunLeve
- ElementCommunLeve : pour les DroiteRegressionLeve

Dans ces mêmes classes, on trouve également des méthodes « créer » qui elles contiennent la logique nécessaire pour créer ces mêmes objets inférieurs à partir d'autres classes du système. Il faut noter que plusieurs conditions préalables strictes peuvent s'appliquer lors de la création, tel que la création ou l'initialisation préalable d'autres objets.

Finalement, ces classes contiennent aussi des méthodes semblables, à préfixe « persister », qui elles sont responsables d'assurer la persistance des données contenues dans les objets dans la table appropriée. Le mécanisme triple initialiser-crée-persister permet donc de couvrir toutes les situations nécessaires à la vie des objets.

Communication de l'état de l'application à l'interface par programmation événementielle

Les spécifications du logiciel demandent que l'on puisse indiquer à l'utilisateur l'état actuel de l'application (statut du nivellement par exemple). Pour réaliser cette spécification, nous avons décidé d'utiliser une approche de programmation événementielle qui utilise le design pattern « observer ». Ainsi, chaque classe dont l'état est susceptible d'être connu a une méthode « Abonner » qui permet à d'autres classe de s'abonner pour recevoir des notifications de changement de l'état de la classe. Quand un changement à une des variables d'état d'un objet est causées par l'une de ses propres méthodes, l'objet utilise une méthode « notifier » qu'elle possède pour appeler une méthode « update » chez les classes abonnées, devant être présentes dans toutes les classes abonnées. La classe abonnée peut alors vérifier l'état de la classe observée et faire les traitements ou changements appropriés (tel qu'afficher le nouvel état de la classe observée). Pour l'abonnement, on passe par la classe Projet qui abonne automatiquement tous les objets.

Architecture de la base de données Access

Pour réaliser le nivellement, on doit avoir une base de données MS-Access contenant au moins une table ; cette table doit être la table de données sources contenant toutes les analyses. Les colonnes qui doivent être incluses dans la table de données sources sont détaillées dans l'annexe III.

Lorsqu'un premier projet est créé à partir d'une base de données Access, une série de tables contenant les informations reliées au nivellement sont créées (ex : une table contenant les numéros de levés existant dans ce projet, une table contenant la liste des éléments analysés pour chacun des levés, etc). Une seule table de chaque type existe dans une base de données à la fois et est partagée par tous les projets créés à partir de tables sources de cette base de données. Un identificateur de projet (le nom du projet) indique dans chaque table à quel projet la ligne fait référence. Lorsqu'on crée un projet et que les tables existent déjà, elles ne sont pas créées et le projet utilise les tables existantes. Le préfixe « INT_ » a été ajouté à toutes les tables créées pour bien les distinguer des autres tables de la base de données.

Le diagramme suivant détaille les tables qui sont créées lors de la création du premier projet à partir d'une BD Access :

