
OPTIMISATION DES DONNEES DE TILL POUR L'EXPLORATION

Projet 2010-05

PAR : SYLVAIN TREPANIER

AVRIL 2011



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

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

Ce projet est une revue des techniques et méthodes concernant le traitement des données de till pour l'exploration minière au Québec. Bien que ce matériel de surface soit commun au Québec, plusieurs questions se posent lors de son utilisation en exploration. Par exemple, quelle fraction du till et quel type d'analyse devrait être réalisée selon le contexte et le type de minéralisation? Quelle est la performance réelle des différents types de données pour détecter les minéralisations? Comment traiter les données pour délimiter de meilleures anomalies? Ce rapport présente donc des pistes permettant de répondre à ces questions dans le but de mieux traiter les données de till de levés existants ainsi que de mieux planifier des levés futurs. Il comprend trois parties principales comprenant tout d'abord des généralités sur les tills et leur utilisation en exploration, suivi de leurs usages pour l'exploration des métaux de base ainsi que pour l'exploration aurifère.

La première partie montre l'importance d'analyser la composition lithologique des cailloux du till et de les comparer avec la géologie locale. L'objectif est de qualifier la nature locale ou exotique du till échantillonné. La présence de till exotique indique que le till ne représente pas bien le socle local et qu'il peut être non anomalique même si des minéralisations sont présentes. Ce volet a également mis en lumière l'importance de bien identifier le caractère oxydé vs non-oxydé du till par une qualification de sa couleur. Les tills oxydés perdent les sulfures (et métaux) présents dans les concentrés de minéraux lourds qui sont transférés vers la fraction fine. Lorsque le till est échantillonné près de la surface, il faut donc considérer analyser la fraction fine plutôt que les concentrés de minéraux lourds pour les métaux présents en sulfures (Cu, Zn, As, Ni).

La deuxième partie porte principalement sur l'utilisation des données de fractions fines pour l'exploration des gisements de métaux de base. La compilation de la littérature ainsi que l'examen de différents levés indiquent que les teneurs en métaux de base de fraction fine des tills sont fortement corrélées avec la quantité de matériel de taille des argiles dans les échantillons. Dans le passé, certains auteurs ont proposé des corrections simples qui consistent à diviser les teneurs brutes par l'aluminium ou le magnésium. Toutefois, ces corrections n'ont jamais été testées sur des cas avec minéralisations connues. De façon alternative, un modèle de prédiction des valeurs en métaux des tills par réseaux neuronaux a été développé. L'évaluation quantitative de la performance des données dans trois levés différents (Timmins, Abitibi québécois et Manitouwadge) a permis de montrer que ces corrections améliorent de façon significative la détection des minéralisations de métaux de base.

La troisième partie permet de comparer les avantages, inconvénients et limites des principales mesures d'analyse de l'or dans les tills (fraction fine, minéraux lourds, caractérisation des grains). Chaque méthode a ses avantages et inconvénients et ceux-ci doivent être considérés soigneusement avant la planification de campagnes d'échantillonnage. Le projet a permis de montrer également que les analyses géochimiques directes de l'or dans les tills (autant fines que lourds) sont en général peu répétables (fort effet pépite) et qu'il faut si possible augmenter la quantité de matériel analysés réellement en laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
1 Introduction	1
2 Données de till en exploration: généralités	1
2.1 Till: définitions	1
2.2 Processus de dispersion glaciaire et implications pour l'exploration	2
2.2.1 Introduction	2
2.2.2 Tills de la mine d'or Pamour #5, Timmins.....	7
2.2.3 Tills de la mine Zn-Cu de Nama Creek, ceinture Manitouwadge, Ontario.	12
2.2.4 Sommaire de la section.....	16
2.3 Oxydation post-glaciaire des tills et implications pour l'exploration	16
2.3.1 Généralités	16
2.3.2 Tills des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson, Abitibi (Ontario)	23
3 Données de till pour l'exploration aurifère.....	24
3.1 Reproductibilité des échantillons de till pour les mesures directes de l'or	24
3.2 Fractions et méthodes analytiques typiques.....	28
3.2.1 Fraction fine	29
3.2.2 Géochimie des minéraux lourds non-magnétiques.....	32
3.2.3 Minéralogie des concentrés de minéraux lourds (or et autres minéraux) ..	45
3.3 Synthèse des méthodes d'analyses du till pour l'exploration aurifère	49
3.4 Récurrence des anomalies selon différentes méthodes	50
4 Données de till pour l'exploration des métaux de base (Cu, Zn, Ni).....	51
4.1 Fractions et méthodes analytiques typiques.....	51
4.1.1 Fraction fine	51
4.1.2 Géochimie des minéraux lourds.....	58
4.1.3 Minéraux indicateurs	58
4.2 Méthodes de correction des valeurs des fractions fines	60
4.2.1 Ratios métal sur élément.....	60
4.2.2 Réseaux neuronaux	60
4.2.3 Test de l'efficacité des corrections.....	66
5 Conclusions de l'étude	67
Liste des références.....	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Modèles mathématiques de dispersion glaciaire d'indicateurs. Le modèle (a) représente une décroissance exponentielle à partir de la source alors que le modèle (b) représente une décroissance linéaire. Tiré de Klassen, 2001.	3
Figure 2. Classification des trains de dispersion selon l'histoire glaciaire (tiré de Parent et al., 1996).....	4
Figure 3. Stratigraphie quaternaire du secteur de la mine Owl Creek, Ontario (tiré de Bird et Cocker, 1987).	5
Figure 4. Influence de la topographie sur la dispersion glaciaire dans différents niveaux de tills.	6
Figure 5. Anomalies en or dans les minéraux lourds selon l'horizon de till, secteur de la mine Owl Creek, Ontario. Tiré de McClenaghan, 2001.	6
Figure 6. Géologie, minéralisations et échantillons de till du secteur de Timmins, Ontario. Géologie du MRD-186 (OGS); levé de till du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).....	7
Figure 7. Échantillons de till de la fosse Pamour #5 (photo de McClenaghan, 1999).....	8
Figure 8. Or dans la fraction fine, section de till de la fosse Pamour #5.	9
Figure 9. Nombre de grains d'or dans le concentré de minéraux lourds par 10kg de till, section de till de la fosse Pamour #5.	10
Figure 10. Pourcentage des cailloux de différentes lithologies dans la fraction grossière du till (>6 mm), section de till de la fosse Pamour #5.	11
Figure 11. Localisation des échantillons de till du secteur de Nama Creek (tiré de Kettles et al., 1998).	12
Figure 12. Zinc (ppm) dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.	13
Figure 13. Cuivre (ppm) dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.	13
Figure 14. Ratios Zn/Cu dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.	15
Figure 15. Teneurs en calcium (%) de la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek.	15
Figure 16. Calcium dans la fraction fine du till (ppm) vs % de cailloux de carbonates paléozoïque, secteur Manitouwadge (données Dossier Public 2616, CGC; Kettles, 1993).....	16
Figure 17. Profil géochimique d'un till non-carbonaté. Analyses de la fraction < 2 microns par aqua-regia (tiré de McMartin et McClenaghan, 2001).	17
Figure 18. Géochimie de la fraction fine et des minéraux lourds d'un till selon la profondeur. Tiré de Shaw, 1988.	18

Figure 19. Or dans différentes fractions granulométriques du till oxydé vs non-oxydé, secteur du gisement aurifère de Owl Creek, Ontario. Tiré de DiLabio, 1995.....	19
Figure 20. Ratio entre la concentration en or dans les sables fin et les silts/argiles, selon l'oxydation du till (n=30). Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).....	19
Figure 21. Section de till du secteur de Beardmore-Geraldton en Ontario (tiré de Thorleifson et Kristjansson, 1990).....	20
Figure 22. Effet de l'oxydation du till sur les teneurs en zinc dans les minéraux lourds non-magnétiques (d>3,2), levé du Dossier Public 3675, CGC (Secteur Timmins, n=134).....	21
Figure 23. Ratios Cu dans les minéraux lourds sur Cu dans fraction fine selon l'oxydation du till, levé de Matheson (tiré de Bloom et Steele, 1989).	21
Figure 24. Or dans les minéraux lourds selon l'oxydation du till, levé de Matheson (tiré de Bloom et Steele, 1989).	22
Figure 25. Teneurs en or dans le concentré de minéraux lourds non-magnétique selon l'oxydation du till (données du Dossier Public 2266 de la CGC; Thorleifson et Kristjansson, 1990).....	22
Figure 26. Localisation des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson, nord-est de l'Ontario.....	23
Figure 27. Taille des grains d'or dans l'encaissant altéré de la mine Hollinger, Ontario. Tiré de Nichol et al., 1992.....	27
Figure 28. Concentration en or selon la fraction granulométrique, tills aurifères du secteur Beardmore-Geraldton. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).	29
Figure 29. Teneurs analysées dans 36 réanalyses des mêmes échantillons de fraction fine de till. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).....	30
Figure 30. Méthodologie de traitement des échantillons de till de la CGC. (A) Indicateur du traitement des minéraux, (B) Géochimie du till, (C) Archives et (D) Analyses des minéraux indicateurs. Tiré de McMartin et McClenaghan, 2001.	33
Figure 31. Concentrations en minéraux lourds selon le type de till, secteur de Timmins (données du Dossier Public 3675, CGC).	34
Figure 32. Concentration en minéraux lourds, propriété La Grande Sud. Données de Mines d'Or Virginia.....	35
Figure 33. Comparaisons de concentrés de minéraux lourds préparés par sept laboratoires différents. Tiré de Nichol et al., 1992.	36
Figure 34. Taux de récupération de l'or dans les concentrés de minéraux lourds selon la méthode de traitement. Tiré de Nichol et al., 1992.	37
Figure 35. Comparaison de l'or entre le concentré de minéraux lourds et l'échantillon total. Tiré de Nichol et Shelp, 1985.	37
Figure 36. Distribution de l'or selon la fraction granulométrique et selon le type d'échantillon. Tiré de Nichol et Shelp, 1985.....	38
Figure 37. Proportion de l'or récupéré dans le concentré de minéraux lourds, levé Black River-Matheson, Ontario. Tiré de Nichol et al., 1992.....	38

Figure 38. Comparaison de la concentration en or dans le till total vs le concentré non-magnétique de minéraux lourds. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).....	39
Figure 39. Variations de la concentration d'or dans les minéraux lourds lors de la réanalyse de 4 sous-échantillons de concentrés provenant des mêmes échantillons. Données du Dossier Public 2266, CGC.	41
Figure 40. Diamètres effectifs des grains d'or en forme de disques d'épaisseur cinq fois plus petite que le diamètre. Voir le texte pour la liste des données utilisées.	42
Figure 41. Variations régionales du nombre de grains d'or dans le till en Abitibi (tiré de McClenaghan, 2001).....	46
Figure 42. Morphologie des grains d'or typiques selon la distance de transport. Tiré de Averill, 2001.	46
Figure 43. Exemples de trains de dispersion identifiés par les grains d'or dans le till (tiré de Averill, 2001).....	47
Figure 44. Teneurs en cuivre dans la fraction < 63 microns et < 2 microns. Données du Dossier Public 2616 (Kettles, 1993).	52
Figure 45. Teneurs en zinc dans la fraction < 63 microns et < 2 microns. Données du Dossier Public 2616 (Kettles, 1993).	53
Figure 46. Teneurs en zinc de la fraction < 63 microns vs la proportion d'argile dans la fraction < 63 microns.	54
Figure 47. Quartz normatif NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).	55
Figure 48. Albite normative NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).	55
Figure 49. Séricite normative NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).	56
Figure 50. Relation entre l'entraînement de débris, le transport, et la composition de la fraction fine du till. (A) L'entraînement des débris de la base est effective, la distance du transport est courte et, les concentrations en Co, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn ainsi que la proportion de micas et d'amphiboles est élevée. (B) Situation inverse.	57
Figure 51. Minéraux lourds indicateurs utiles pour l'exploration des amas de sulfures métamorphisés en contexte volcanosédimentaire (terrains glaciaire). Tiré de Averill, 2001.	59
Figure 52. Minéraux lourds indicateurs utiles pour l'exploration des amas de sulfures de Ni-Cu magmatique (terrains glaciaire). Tiré de Averill, 2001.....	60
Figure 53. Localisation des échantillons utilisés pour modéliser la composition de la fraction fine du till par réseaux neuronaux.	62
Figure 54. Distribution des valeurs résiduelles en zinc, modélisation par réseaux neuronaux de la fraction <63 microns du till, analyses ICP avec extraction aqua-regia.	63

Figure 55. Teneur en zinc et pourcentage d'argiles dans la fraction <63 microns. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).	64
Figure 56. Résiduelles en zinc par réseaux neuronaux et proportion d'argiles dans la fraction <63 microns. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).	65
Figure 57. Résiduelles en zinc par réseaux neuronaux et oxydation du till. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeurs recalculées en centiles pour les échantillons à proximité des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).	24
Tableau 2. Tailles d'échantillons à analyser pour obtenir 20 particules d'or en forme de disques de taille 5:1, selon la taille effective des grains et la concentration en or. Les poids sont en grammes sauf là où indiqué.....	26
Tableau 3. Nombre de grains d'or pour 30 g de matériel analysé, pour des grains en forme de disques aplatis 5:1, selon le diamètre effectif des grains et la concentration en or.....	26
Tableau 4. Coefficients de variation pour la distribution de Poisson, selon la valeur attendue lambda (calculs réalisés sur Ms-Excel).....	28
Tableau 5. Nombre et taille des grains d'or calculés pour des échantillons de fraction fine ayant été analysés 36 fois. La valeur la plus élevée et la plus basse ont été enlevées de chaque série de réanalyses pour diminuer l'effet des anomalies. Données du Dossier Public 2266, CGC.	31
Tableau 6. Nombre et diamètre des grains d'or calculés pour 4 sous-échantillons de concentrés de minéraux lourds par échantillon. Données du Dossier Public 2266, CGC.	40
Tableau 7. Nombre de grains d'or pour 10 kg de matériel traité pour les minéraux lourds, pour des grains en forme de disques aplatis 5:1, pour un diamètre effectif de 90 microns des disques. Les concentrations en or doivent être normalisées.....	42
Tableau 8. Comparaison du calcul du nombre de grains effectifs dans le concentré de minéraux lourds pour la méthode granulométrique et par réanalyses. Tous les calculs supposent des grains en forme de disques dont le diamètre est cinq fois l'épaisseur. Données du Dossier Public 2266, CGC.....	43
Tableau 9. Comparaison du nombre de grains attendu dans les minéraux lourds et les fractions fines. Données du Dossier Public 2266, CGC.	44

Tableau 10.	Comparaison du nombre de grains effectifs attendu dans le concentré de minéraux lourds, dans les fractions fines et du nombre de grains réels observés. Données du Dossier Public 2266, CGC. Les cellules en jaunes sont celles qui dépassent le seuil de 20 particules.....	48
Tableau 11.	Principaux avantages et inconvénients des principales méthodes d'analyse du till pour l'exploration aurifère.	49
Tableau 12.	Récurrence des anomalies en Au dans la fraction <63 microns, dans les concentrés de minéraux lourds normalisés et dans les nombres de grains d'or par 10 kg.	51
Tableau 13.	Teneurs en métaux de différents minéraux de roches métamorphiques. Les lignes en jaune indiquent les minéraux les plus enrichis en métaux dans chaque roche.	56
Tableau 14.	Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, till <63 microns, analyses ICP avec extraction aqua-regia.	62
Tableau 15.	Seuils d'anomalies globaux sur les valeurs résiduelles en métaux. Modèle par réseaux neuronaux, till <63 microns, analyses ICP avec extraction aqua-regia.	63
Tableau 16.	Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, modèle <63 microns avec analyses ICP avec et extraction aqua-regia, levé test de Timmins (Dossier Public 3675, CGC).	64
Tableau 17.	Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, till <177 microns, extraction HNO ₃	66
Tableau 18.	Valeurs recalculées en centiles pour les échantillons à proximité des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).	67

1 INTRODUCTION

Le till est un matériau qui est utilisé depuis plusieurs décennies en exploration minière afin de retracer la source de minéralisation. De nombreuses méthodes de traitement et d'analyse des tills existent : séparation et analyse de différentes fractions granulométriques, séparation, compte et/ou analyse de minéraux spécifiques, compte de cailloux, caractérisation de la couleur, etc. Les différentes méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients, et il devient difficile pour les géologues d'exploration de choisir la ou les méthodes d'analyse qui sont appropriées selon le contexte.

Ce rapport présente une revue de plusieurs aspects importants à considérer lors de l'utilisation des données de till en exploration, en particulier pour l'or et les métaux de base. On y traite des éléments suivants : classification des tills, dispersions glaciaires et méthodes analytiques. Différentes études de cas d'utilisation des tills en exploration sont présentées pour montrer l'utilité des méthodes et l'interprétation des résultats.

2 DONNEES DE TILL EN EXPLORATION: GENERALITES

2.1 Till: définitions

Pour bien situer la portée de la présente étude, il importe de bien définir ce qu'est le till. On peut définir le till selon ses caractéristiques texturales et génétiques.

Définition texturale

Au niveau textural, le till est un diamicton (Dreimanis, 1989) qui se définit comme un sédiment ou une roche sédimentaire terrigène formée de particules de taille très variable.

Définition génétique

Une définition génétique est donnée par les travaux de l'INQUA (Dreimanis, 1989) : "le till est un sédiment ayant été transporté et déposé par, ou à partir, de la glace de glacier, avec peu ou pas de tri par l'eau".

Il faut bien noter que ces définitions excluent les sédiments de l'environnement glaciaire déposés par l'eau. Ceci exclue donc les sédiments fluvioglaciaires (ex: graviers, sables des eskers), glacio-lacustres et glacio-marins (argiles, sables littoraux). Ces sédiments sont donc exclus de ce projet.

2.2 Processus de dispersion glaciaire et implications pour l'exploration

2.2.1 Introduction

La dispersion des matériaux par les processus glaciaires est un sujet qui a été étudié par de nombreux auteurs (ex: Klassen, 2001; Parent et al., 1996; Shilts, 1976).

Modélisations de l'abondance des indicateurs

Lorsque le glacier passe sur une source de fragments, cette source se retrouve incluse dans le till selon une relation exponentielle croissante. La concentration d'indicateurs minéralogiques ou géochimiques dans le till diminue par la suite en aval glaciaire à partir de la source (**Figure 1**; Klassen, 2001). Cette diminution est exponentielle lorsque le matériau est transporté à la base ou près de la base de la glace soit l'endroit où l'abrasion et la réduction de la taille des débris glaciaires est la plus intense. Lorsque les débris sont transportés à l'intérieur de la glace, on peut alors obtenir une diminution linéaire de la concentration. Ce mécanisme est, par exemple, à la source des débris de carbonates provenant des Basses-Terres de la Baie-d'Hudson que l'on retrouve en Abitibi. Plusieurs facteurs régionaux et locaux expliquent la présence d'un ou l'autre des modes de transports dans différents secteurs (Klassen, 2001).

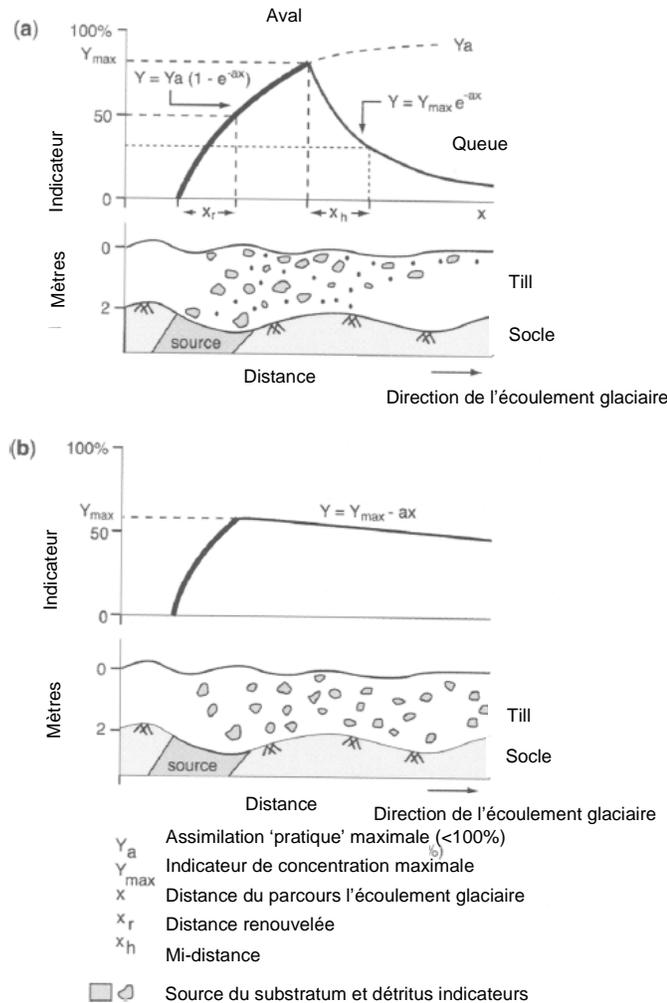


Figure 1. Modèles mathématiques de dispersion glaciaire d'indicateurs. Le modèle (a) représente une décroissance exponentielle à partir de la source alors que le modèle (b) représente une décroissance linéaire. Tiré de Klassen, 2001.

Si on considère les dispersions en coupe verticale, on constate généralement qu'en s'éloignant d'une source, le matériel provenant de cette source se retrouve à une position de plus en plus élevée dans le till (**Figure 1**). Ceci est dû au fait que du matériel supplémentaire provenant d'autres sources en aval est constamment ajouté à la base du till.

Forme des trains de dispersion

Les trains de dispersion glaciaire ont typiquement trois formes: 1) en rubans, 2) en cônes, ou 3) amiboïdes (Klassen, 2001; Parent et al., 1996; **Figure 2**). Une dispersion en rubans survient lorsqu'un seul mouvement glaciaire affecte un secteur. Le ruban a alors la même largeur que la source. La présence de plusieurs directions glaciaires provoque plutôt une dispersion en forme de cône, dont la largeur augmente en aval

glaciaire. Les marges extérieures du cône sont parallèles aux directions les plus divergentes de la dispersion qui définissent alors la zone de dispersion probable. Près des lignes de partage des glaces, la dispersion peut également être de type amiboïde.

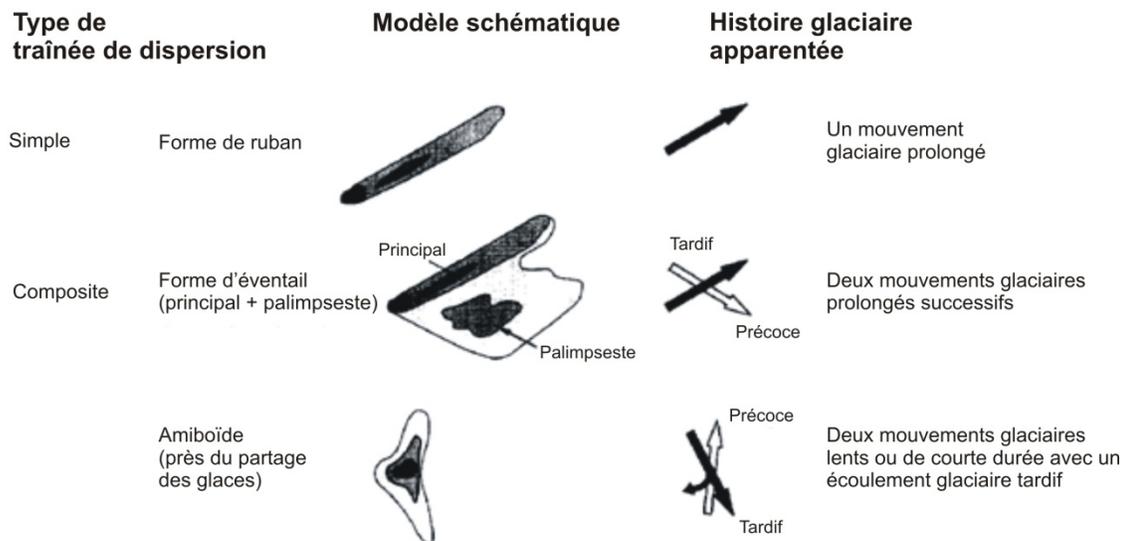


Figure 2. Classification des trains de dispersion selon l'histoire glaciaire (tiré de Parent et al., 1996).

Multiples épisodes glaciaires

Plusieurs régions du Québec et de l'Ontario ont subi de multiples épisodes glaciaires quaternaires séparés par des phases de déglaciation. Ces multiples phases de glaciation ont formé des tills distincts. La **Figure 3** montre l'exemple de la stratigraphie quaternaire du secteur de Owl Creek en Ontario. Chaque épisode comprend des séquences de sédiments qui sont typiquement de la base vers le sommet:

- Sédiments glaciolacustres ou marins (sommet);
- Sédiments fluvioglaciaires;
- Till de fusion supraglaciaire;
- Till de fond sous-glaciaire (base).

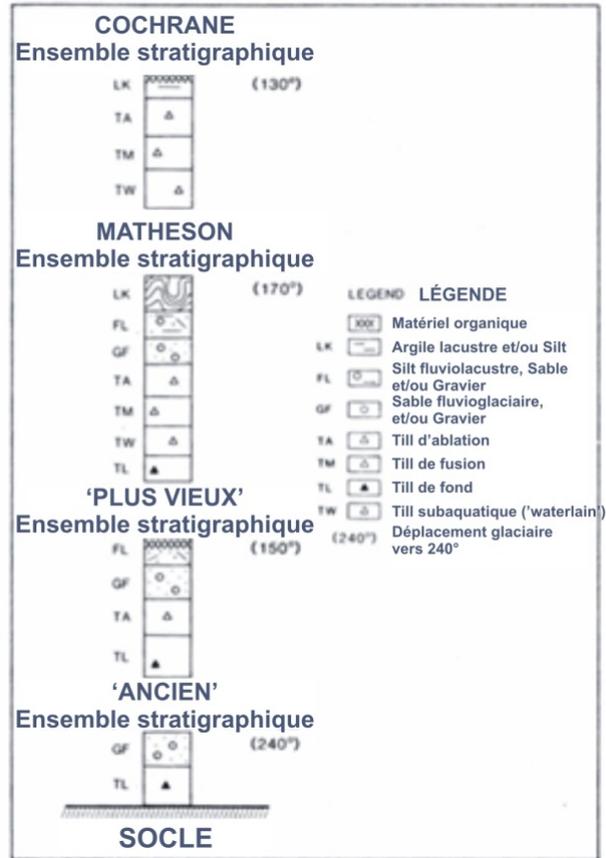


Figure 3. Stratigraphie quaternaire du secteur de la mine Owl Creek, Ontario (tiré de Bird et Cocker, 1987).

Dans le cas de plusieurs épisodes glaciaires, les tills inférieurs, qui sont plus près du socle, sont d'origine plus locale. À l'inverse, les tills supérieurs représentent normalement un signal plus régional. Dans un même épisode glaciaire, le till sous-glaciaire est également en règle générale d'origine plus locale que le till supraglaciaire. Les tills inférieurs ont un accès plus direct au socle sous-jacent alors que les tills supérieurs érodent les tills inférieurs qui eux-mêmes représentent déjà une dispersion. La conséquence est que les anomalies observées dans les tills supérieurs tendent à être plus diffuses. Cependant, cette règle n'est pas absolue, les variations topographiques du socle peuvent faire en sorte que dans certains cas, ce sont les tills supérieurs qui enregistrent les anomalies (**Figure 4**).

Un exemple intéressant de la superposition de différents épisodes glaciaires sur la dispersion des métaux est celui du gisement de Owl Creek dans la partie ontarienne de l'Abitibi (**Figure 5**). Dans ce secteur, les anomalies en or dans le till sont localisées beaucoup plus près de la minéralisation dans le cas du till inférieur ("Older") par rapport au till sus-jacent ("Matheson").

Les processus de dispersion glaciaire ont donc des conséquences importantes sur l'interprétation des anomalies ou de l'absence d'anomalies reliées aux minéralisations.

Deux exemples plus détaillés provenant des levés étudiés dans le cadre du projet sont présentés ici.

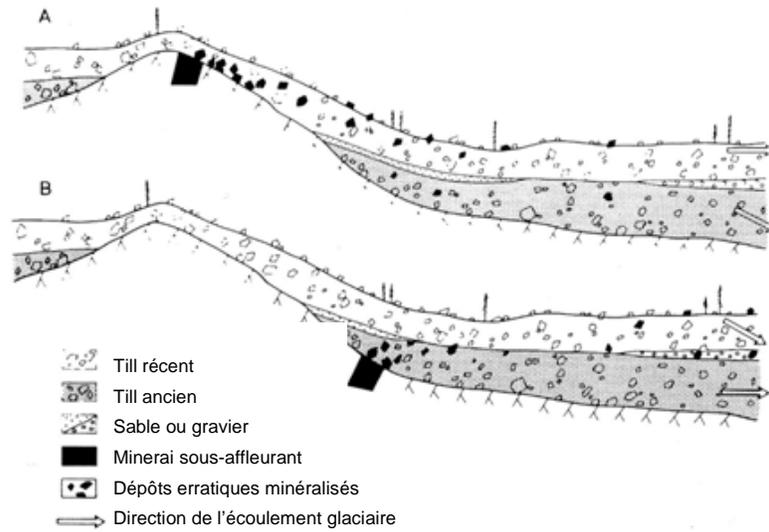


Figure 4. Influence de la topographie sur la dispersion glaciaire dans différents niveaux de tills.

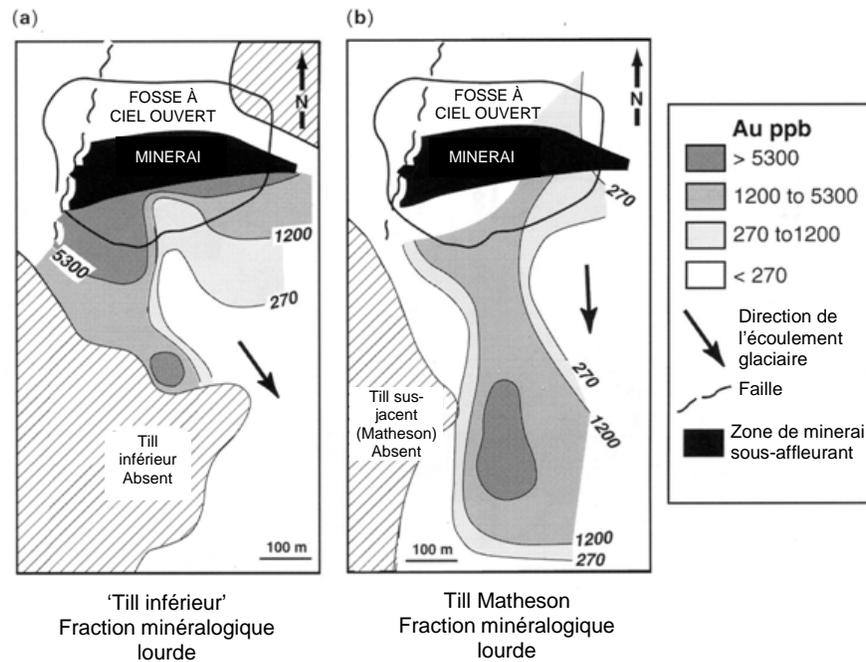


Figure 5. Anomalies en or dans les minéraux lourds selon l'horizon de till, secteur de la mine Owl Creek, Ontario. Tiré de McClenaghan, 2001.

2.2.2 Tills de la mine d'or Pamour #5, Timmins

La mine Pamour est située à Timmins en Ontario. Il s'agit d'une minéralisation aurifère à quartz-carbonates de type orogénique. La minéralisation est associée à la discordance entre les roches sédimentaires du Timiskaming au sud et des volcanites mafiques/ultramafiques au nord (McClenaghan, 1999; **Figure 6**).

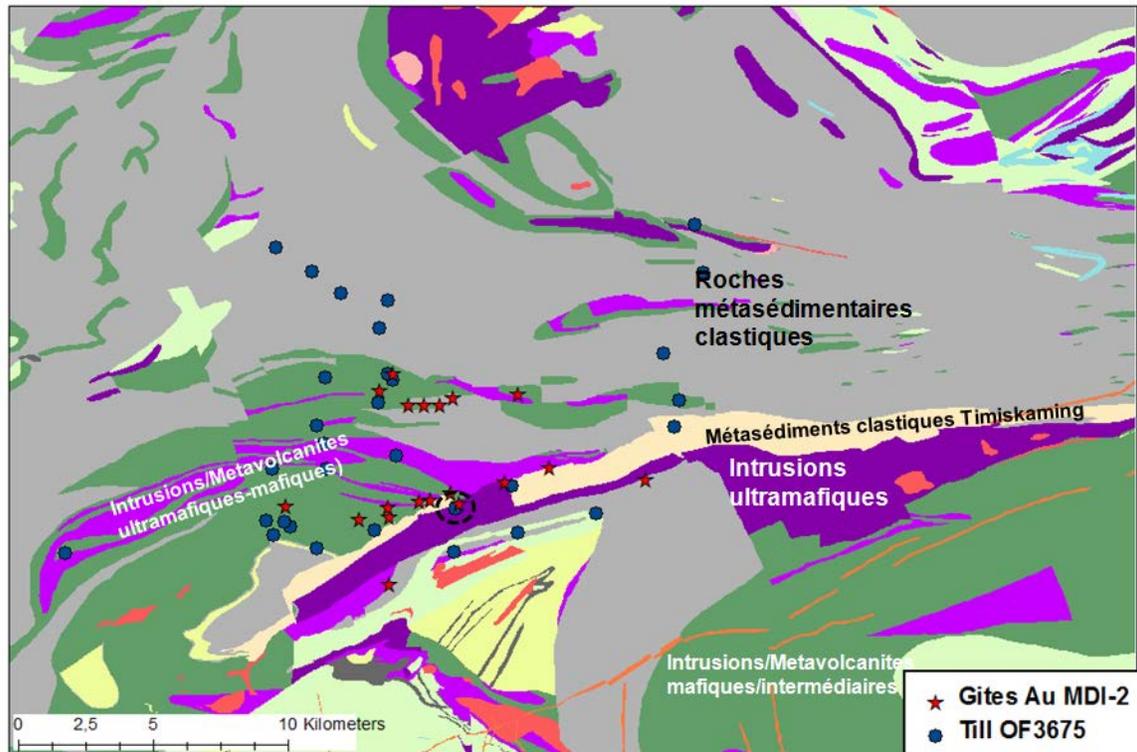


Figure 6. Géologie, minéralisations et échantillons de till du secteur de Timmins, Ontario. Géologie du MRD-186 (OGS); levé de till du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

Quatorze échantillons de till ont été recueillis d'une section de till de la fosse #5 de la mine Pamour (**Figure 7**). Les analyses ont été publiées dans le dossier public 3675 de la CGC (McClenaghan et al., 1998).



Figure 7. Échantillons de till de la fosse Pamour #5 (photo de McClenaghan, 1999).

Or dans la fraction fine

La fraction fine du till montre des teneurs en or qui augmentent assez graduellement du sommet vers la base de la section de till (**Figure 8**). Étant donné le seuil de 5 ppb suggéré par McClenaghan (1999) pour l'or dans la fraction fine du till de la région, on peut considérer que la partie supérieure de la section de till (0 à 12 m) n'est pas anormale alors que la partie inférieure (12 à 20 m) l'est. L'anomalie la plus forte se trouve dans l'échantillon à la base.

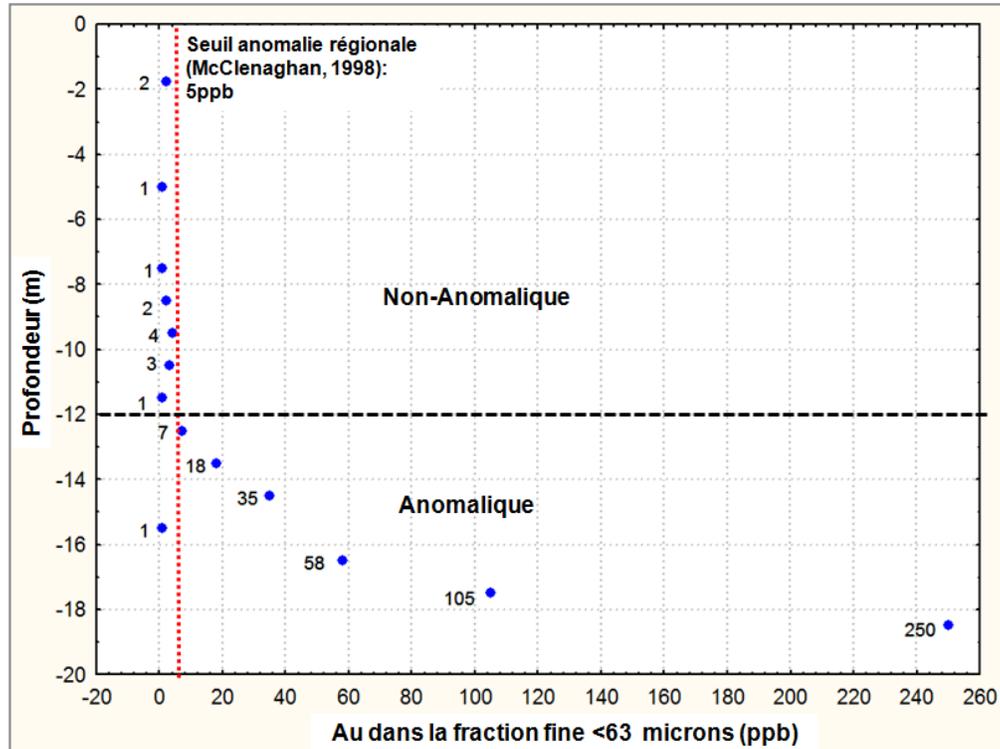


Figure 8. Or dans la fraction fine, section de till de la fosse Pamour #5.

Grains d'or du till

Le nombre de grains d'or du concentré de minéraux lourds par 10 kg de till a également été calculé pour ces échantillons (**Figure 9**). Le seuil d'anomalie régionale est de 5 grains par 10 kg de till (McClenaghan, 1999). Suivant ce seuil, seul le premier échantillon n'est pas une anomalie. Cependant, le nombre de grains de la partie moyenne de la section reste assez faible alors qu'il augmente de façon spectaculaire vers la base de la section. Le dernier échantillon montre 880 grains par 10 kg, dont 100 % de ces grains sont d'une morphologie délicate («pristine»), indiquant un transport très limité de ces grains dans le till (McClenaghan et al., 1998). Les anomalies aurifères sont donc progressivement diluées et deviennent carrément absentes dans la partie supérieure de ce till.

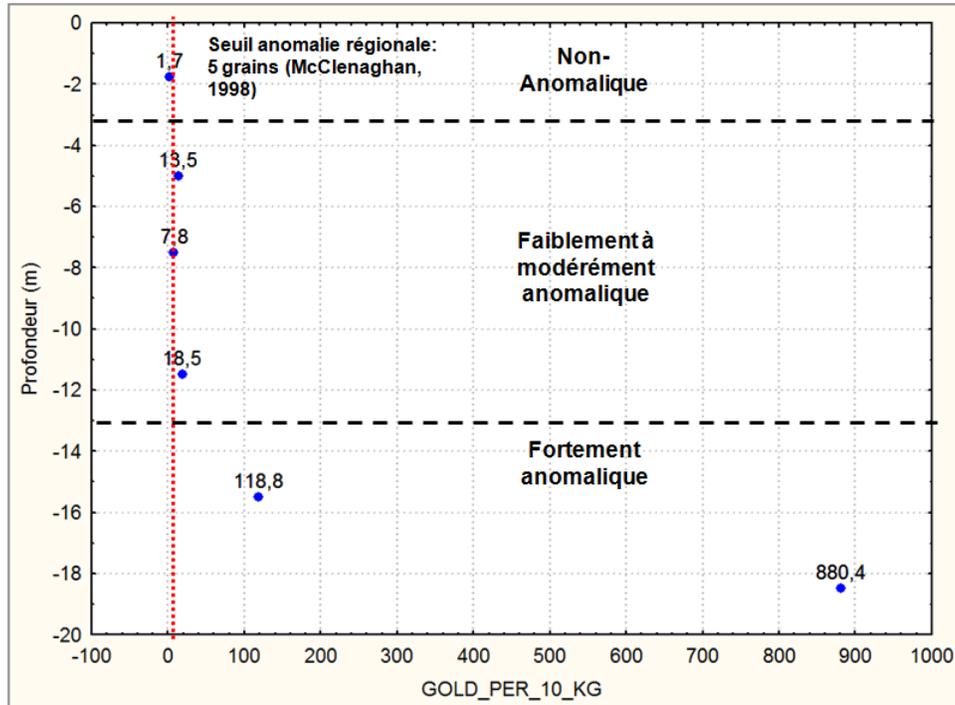


Figure 9. Nombre de grains d'or dans le concentré de minéraux lourds par 10kg de till, section de till de la fosse Pamour #5.

Pétrographie des cailloux du till

La composition des cailloux du till permet de comprendre l'absence ou la faible signature aurifère de la partie supérieure du till (**Figure 10**). La partie supérieure est dominée par des lithologies qui sont considérées exotiques au secteur (environ 60 % exotique; McClenaghan, 1999). En effet, les intrusions felsiques à intermédiaires dominent les cailloux du till entre 0 et 13 m. La proportion de cailloux de carbonates paléozoïques des Basses-Terres de la Baie d'Hudson y est également élevée (environ 15 %).

À l'inverse, la partie inférieure du till, de 13 à 20 m, est dominée par les roches sédimentaires, qui sont des lithologies d'origine potentiellement plus locale (McClenaghan, 1999). Les proportions d'intrusions felsiques et de carbonates paléozoïques diminuent graduellement vers la base. La seconde lithologie la plus abondante de l'échantillon de la base sont les veines de quartz. Le till y est donc beaucoup plus local (environ 70 % local, McClenaghan, 1999).

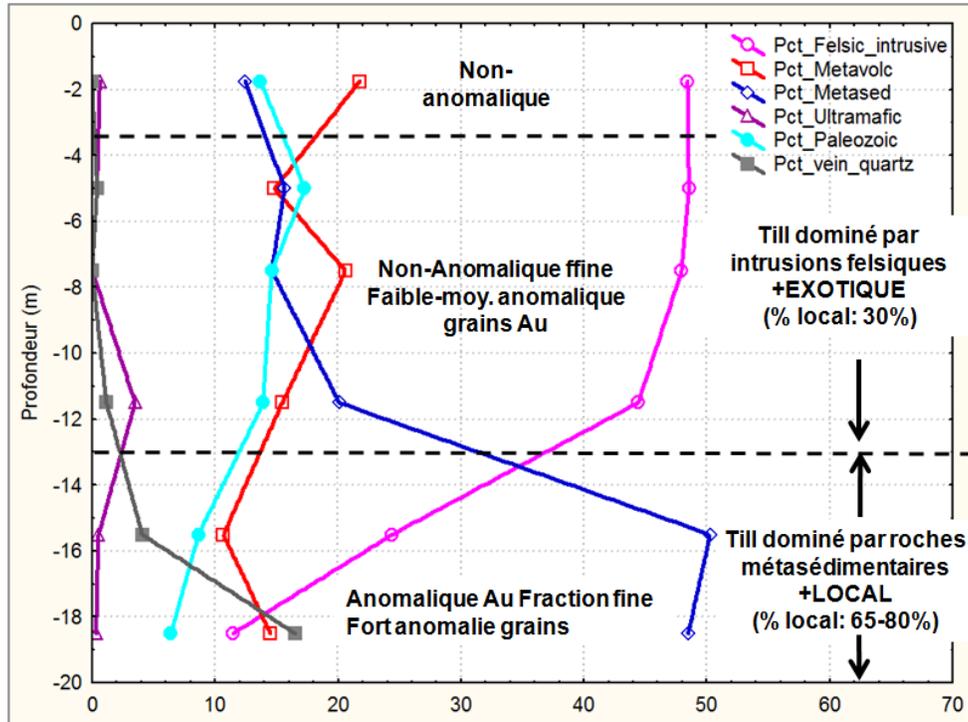


Figure 10. Pourcentage des cailloux de différentes lithologies dans la fraction grossière du till (>6 mm), section de till de la fosse Pamour #5.

Sommaire pour le cas de la mine d'or Pamour #5, Timmins

Suite à cette étude de cas et l'étude d'autres cas de mines d'or du secteur de Timmins couverts par le même levé (Pamour #2, #3, Bell Creek, Davidson-Tisdale, Hislop, Night Hawk), McClenaghan (1999) conclue que:

- Les gisements avec de fortes signatures en grains d'or/géochimiques contiennent aussi de forts pourcentages de lithologies locales.
- Les tills avec de faibles signatures en grains d'or ou géochimiques, (ex: Davidson-Tisdale et la mine Pamour #3), contiennent aussi de forts pourcentages de lithologies exotiques, comme les carbonates paléozoïques et les intrusions felsiques à intermédiaires.

De façon plus générale, la même étude conclue que:

- L'absence de réponses géochimiques ou des grains d'or du till d'une propriété n'indique pas toujours l'absence de minéralisation.
- Cela peut indiquer que le till ne reflète pas le socle local, qui n'a donc pas été érodé par le glacier.
- Les composantes locales vs exotiques du till devraient toujours être considérées dans l'évaluation de la présence ou de l'absence d'anomalies du till (géochimiques et grains d'or).

- L'examen des cailloux du till fournit une estimation simple et visuelle de la quantité de débris locaux vs exotiques dans le till

2.2.3 Tills de la mine Zn-Cu de Nama Creek, ceinture Manitouwadge, Ontario

La mine Nama Creek se trouve dans la ceinture de Manitouwadge en Ontario. Il s'agit d'une minéralisation de type SMV à Zn-Cu dans des roches métamorphisées au faciès des amphibolites.

Des échantillons de till ont été prélevés sur 70 sites séparés en deux lignes orientées parallèlement à la dispersion glaciaire principale (**Figure 11**). Sur chaque site, plusieurs échantillons ont été recueillis sur la colonne de till, pour un total de 281 échantillons. Ces échantillons avaient été prélevés en 1968 (avant l'exploitation de la mine) et réanalysés par la suite par Kettles et al. (1998). Les sections présentées ici sont celles de la ligne #2 de la **Figure 11**.

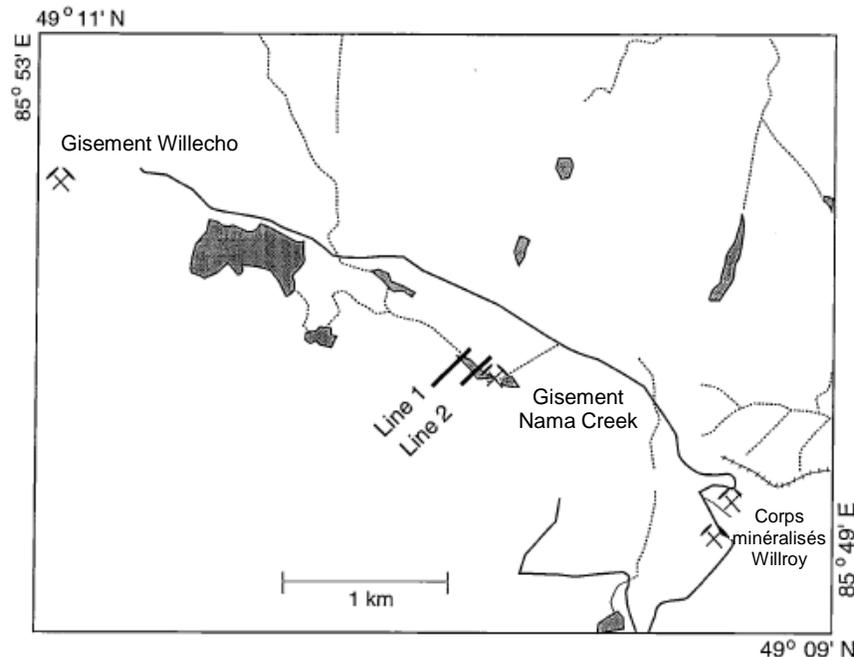


Figure 11. Localisation des échantillons de till du secteur de Nama Creek (tiré de Kettles et al., 1998).

Les teneurs en zinc et cuivre de la ligne #2 sont présentées aux **Figures 12** et **13**. Sur les graphiques, les points ont été colorés selon la teneur; les points pleins représentent des valeurs qui sont approximativement supérieures au 95^e centile des levés régionaux du secteur de Manitouwadge (Dossiers Publics 2616, 3562 et 2933 de la CGC). Le seuil est de 75 ppm pour le zinc et 50 ppm pour le cuivre. Les points vides sont des valeurs inférieures à ce même seuil.

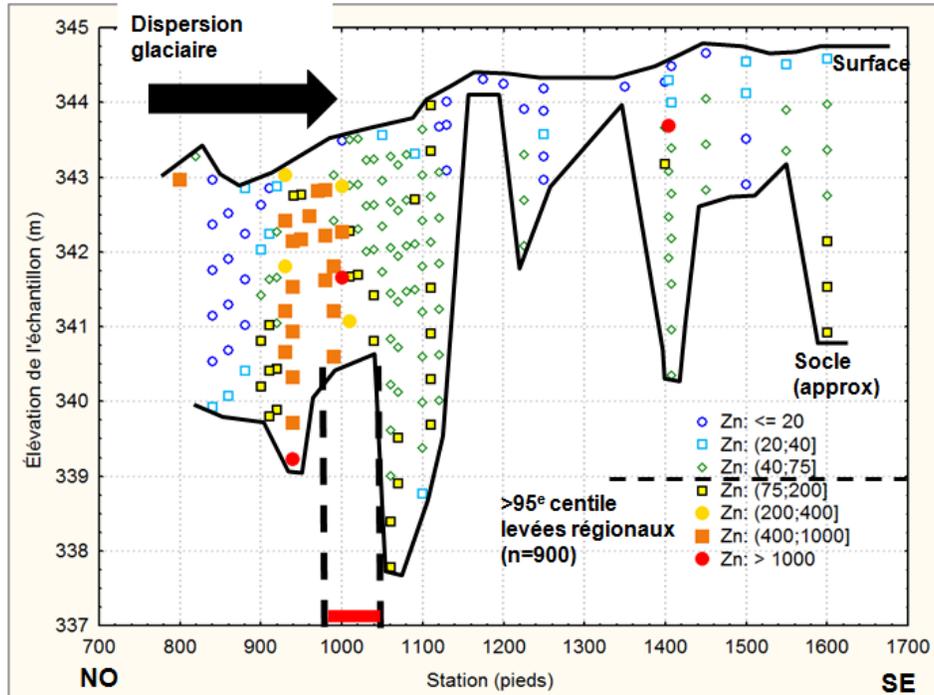


Figure 12. Zinc (ppm) dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.

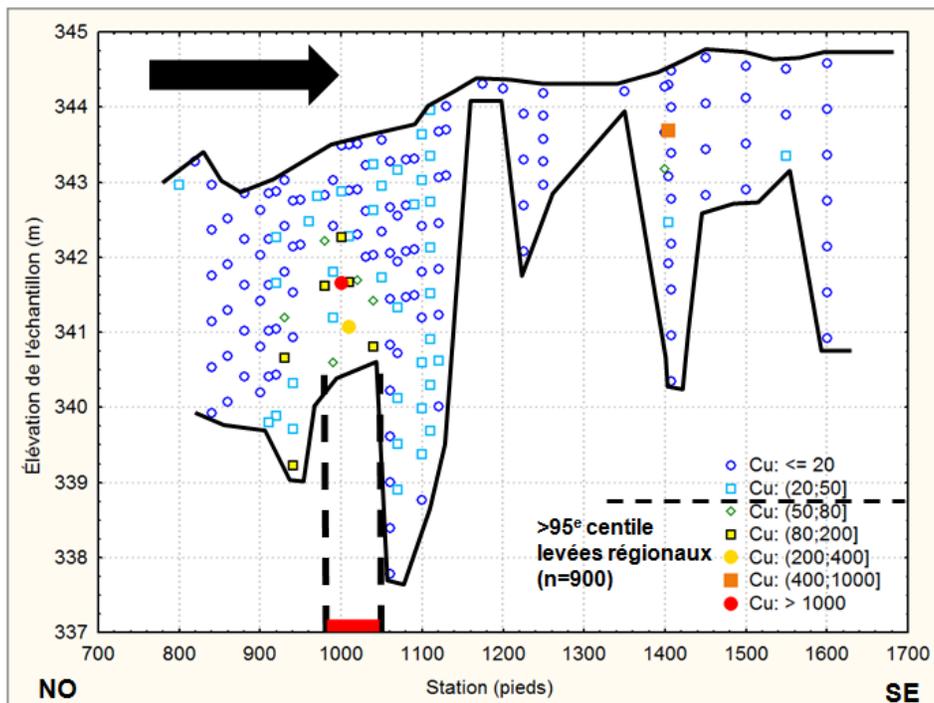


Figure 13. Cuivre (ppm) dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.

On note d'abord que les anomalies en zinc sont les plus intenses et principalement concentrées au-dessus et en amont glaciaire de la minéralisation. L'amont glaciaire correspond également au bas de la pente de la topographie locale. Les anomalies en cuivre sont beaucoup plus limitées en étendue et concentrées directement au-dessus de la minéralisation. Des anomalies plus sporadiques et relativement faibles apparaissent en zinc et en cuivre en aval glaciaire de la minéralisation.

Les anomalies les plus fortes en zinc, décalées vers l'amont glaciaire, ne sont pas compatibles avec une dispersion clastique à partir de la minéralisation. Cette dispersion est plutôt typique des dispersions hydromorphiques. L'examen des ratios Zn/Cu supporte cette interprétation (**Figure 14**). En effet, les anomalies en Zn les plus décalées en amont glaciaire sont fortement enrichies en zinc par rapport au cuivre. Ce type de fractionnement chimique extrême s'explique par la mobilité plus grande du zinc. Les anomalies plus sporadiques et nettement plus faibles en aval glaciaire ont des ratios Zn/Cu beaucoup moins extrêmes, qui correspondent mieux au ratio Zn/Cu de la minéralisation (environ 5). Kettles et al., (1998), ont également proposé une dispersion hydromorphique pour expliquer le décalage de ces anomalies en zinc vers l'amont glaciaire.

L'examen des teneurs en calcium du till de ce secteur permet d'expliquer les faibles anomalies clastiques observées. En effet, les teneurs en calcium de la fraction fine du till sont dans l'ensemble supérieures à 8 %, sauf en surface, là où le till est oxydé (dissolution des carbonates en surface) (**Figure 15**). Régionalement, des teneurs en calcium supérieures à 8 % correspondent à un till carbonaté contenant un fort pourcentage (~70 %) de cailloux de carbonates paléozoïques (**Figure 16**). Le till couvrant la minéralisation de Nama Creek est donc essentiellement d'origine exotique ce qui explique le caractère faible et sporadique des anomalies clastiques présentes en aval de la minéralisation.

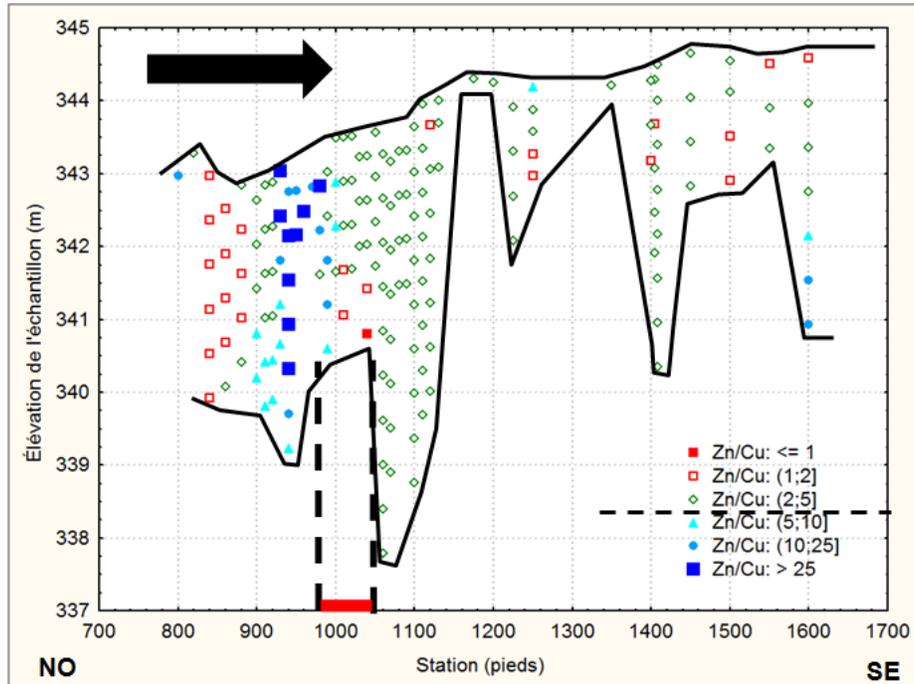


Figure 14. Ratios Zn/Cu dans la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek. La position de la zone minéralisée sub-affleurante est représentée en rouge sur le bas de la section.

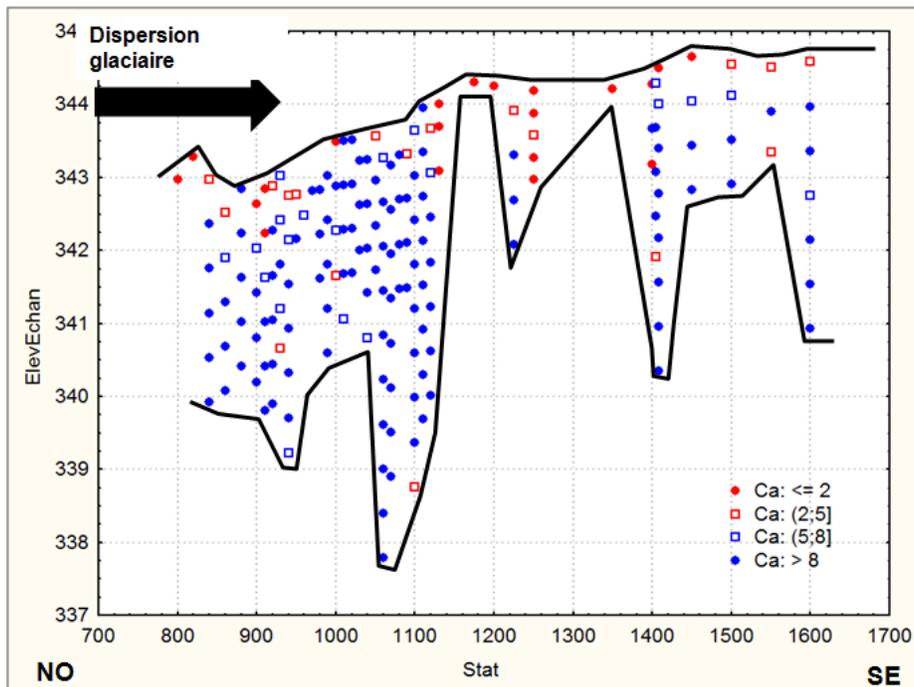


Figure 15. Teneurs en calcium (%) de la fraction fine du till, ligne #2, Nama Creek.

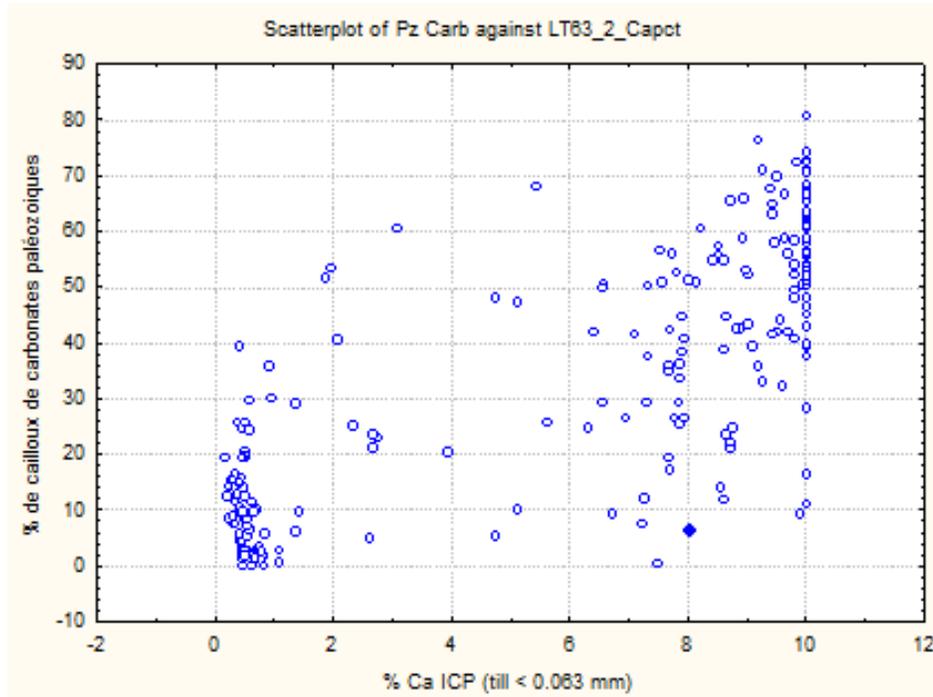


Figure 16. Calcium dans la fraction fine du till (ppm) vs % de cailloux de carbonates paléozoïque, secteur Manitouwadge (données Dossier Public 2616, CGC; Kettles, 1993).

2.2.4 Sommaire de la section

Les exemples précédents soulignent l'importance de bien qualifier la provenance du till (locale vs exotique) pour bien interpréter la présence et surtout l'absence d'anomalies dans un secteur donné. Le meilleur outil semble être la comparaison des cailloux du till avec les lithologies locales du socle (McClenaghan, 1999). La géochimie de la matrice peut également être utile dans certains cas (ex: tills carbonatés comme à Nama Creek; tills de Matheson, McClenaghan et al., 1992).

2.3 Oxydation post-glaciaire des tills et implications pour l'exploration

2.3.1 Généralités

Les tills sont susceptibles d'être affectés par la météorisation chimique post-glaciaire. L'effet sur la géochimie et la minéralogie est particulièrement important dans la zone d'oxydation située au-dessus du niveau de la nappe phréatique (McMartin et McClenaghan, 2001).

On peut reconnaître l'oxydation par la couleur brunâtre que prend le till une fois oxydé; le till frais est normalement plutôt grisâtre. Thorleifson et Kristjansson (1990) identifient deux degrés d'oxydation différents dans les tills. L'oxydation la plus intense transforme le till en des bruns/rouges assez marqués, qui correspond à l'horizon pédologique B.

Cette zone montre des lessivages des carbonates et des sulfures. L'horizon B s'étend sur une profondeur moyenne de 30-100 cm sous la surface dans les zones forestières boréales (McMartin et McClenaghan, 2001). Une oxydation moins intense se poursuit plus bas dans l'horizon C. Cette oxydation ne dissout pas les carbonates mais les sulfures sont tout de même détruits. Les couleurs y sont moins brunâtres; les tills sont alors bruns grisâtres. Cette destruction des sulfures dans l'horizon C se poursuit jusqu'à des profondeurs de quelques mètres dans des cas typiques. Par exemple, dans 16 profils de tills échantillonnés dans le secteur de Beardmore-Geraldton, la profondeur à laquelle les sulfures sont détruits varie de 3,5 à 7 mètres. Il semble toutefois que certains sulfures soient plus résistants que d'autres à l'oxydation (ex: chalcopryrite, loellingite; Averill, 2001).

Ces variations causées par l'oxydation peuvent masquer les variations dues aux lithologies du socle ainsi que les anomalies géochimiques causées par la minéralisation (McMartin et McClenaghan, 2001). Certains des éléments ainsi libérés peuvent être reprécipités ou adsorbés immédiatement sur différentes phases (en particulier oxydes de fer ou phyllosilicates des fractions fines) alors que d'autres peuvent être expulsés du till par le biais de l'eau de pluie.

Fractions fines

En général, les fractions fines de la zone oxydée sont enrichies en Fe, Mn, Al et appauvries en Ca, Mg (**Figure 17**). Pour les métaux de base (Zn, Cu, Ni, As...), les enrichissements dans les fractions fines dans la zone oxydée sont plus variables (**Figure 16**; **Figure 18**).

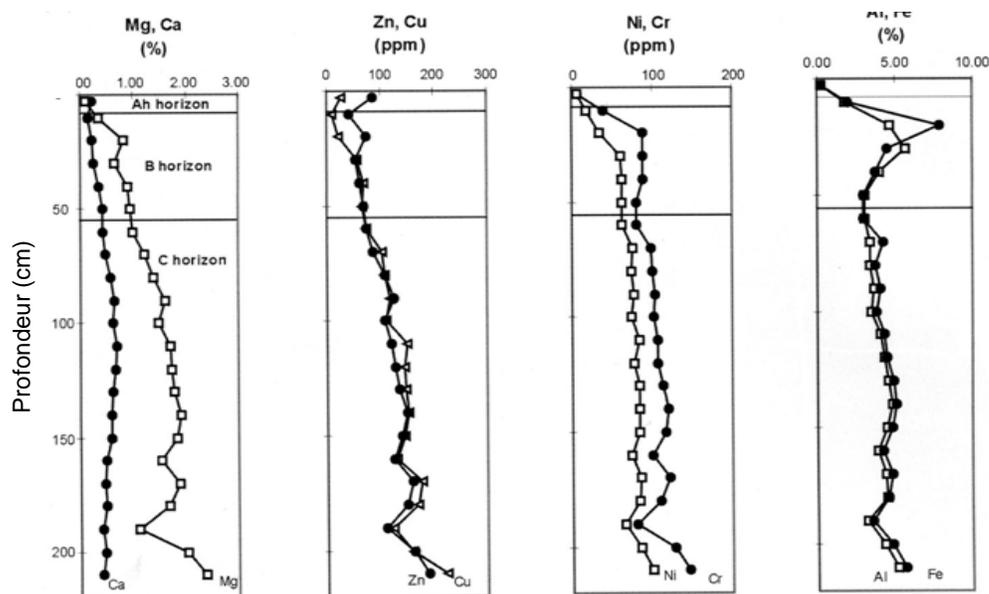


Figure 17. Profil géochimique d'un till non-carbonaté. Analyses de la fraction < 2 microns par aqua-regia (tiré de McMartin et McClenaghan, 2001).

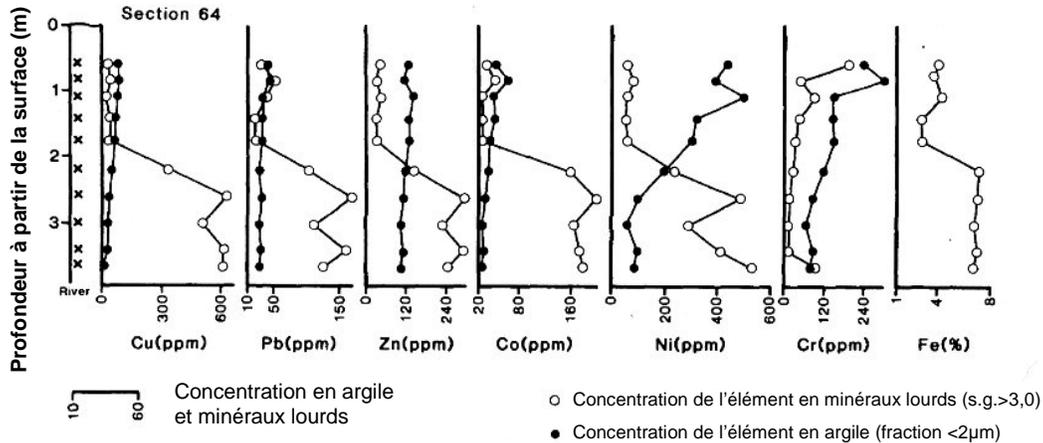


Figure 18. Géochimie de la fraction fine et des minéraux lourds d'un till selon la profondeur. Tiré de Shaw, 1988.

Le cas de l'or, un métal beaucoup moins mobile dans l'environnement de surface, est moins clair. DiLabio (1995) rapporte une certaine remobilisation de l'or durant l'oxydation du till pour le gisement Cu-Au-Ag de Anoman River en Ontario. À Owl Creek, le même auteur rapporte des lentilles de till oxydé en contact avec du till frais montrant des enrichissements nets en or dans toutes les fractions mais en particulier dans les fractions sables-silt (**Figure 19**), qui ne peuvent s'expliquer uniquement par des pertes de volume lors de l'oxydation. L'oxydation semble causer un certain enrichissement en or des fractions fines de taille des silts (DiLabio, 1995). On observe également de plus fortes teneurs en or dans la fraction silt/argile pour les tills oxydés du secteur de Beardmore-Geraldton (**Figure 20**), ce qui indique une redistribution de l'or lors de l'oxydation (peut-être la libération de l'or fin inclus dans des sulfures détruits par l'oxydation?).

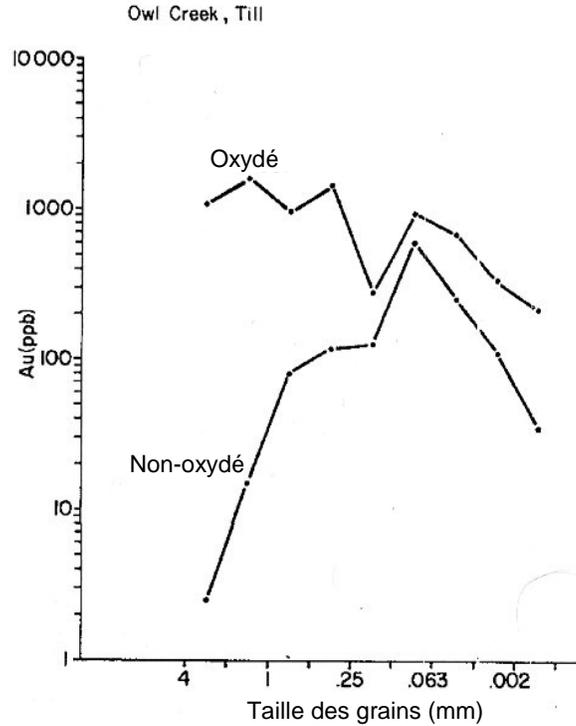


Figure 19. Or dans différentes fractions granulométriques du till oxydé vs non-oxydé, secteur du gisement aurifère de Owl Creek, Ontario. Tiré de DiLabio, 1995.

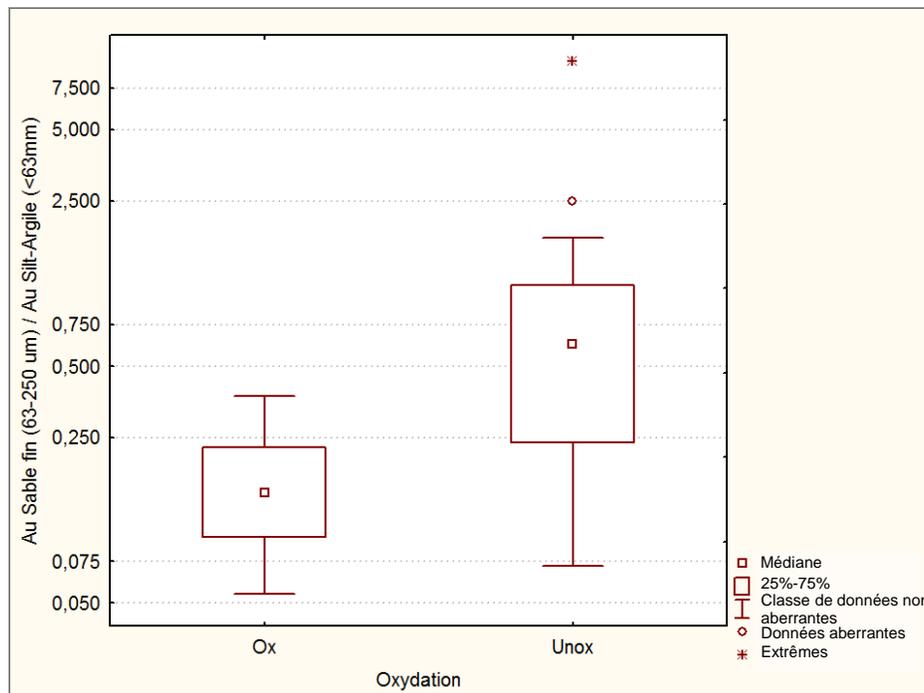


Figure 20. Ratio entre la concentration en or dans les sables fin et les silts/argiles, selon l'oxydation du till (n=30). Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Minéraux lourds

L'oxydation du till produit un effet très net sur les teneurs en métaux de base (Zn, Cu, Ni, As...) dans les minéraux lourds. Ceci est dû à la dissolution des sulfures dans le till. L'effet de l'oxydation se voit clairement sur des sections de till échantillonnées (**Figure 18; Figure 21**). Le degré d'oxydation sur des échantillons de levés régionaux peut également être évalué par la couleur des échantillons (**Figure 22**). En comparant les teneurs en cuivre des minéraux lourds par rapport à la fraction < 0,064 mm du levé de Matheson (n=643), Bloom et Steele (1989) notent également que les échantillons oxydés, prélevés près de la surface sont nettement appauvris en métaux dans les minéraux lourds par rapport à ceux prélevés par forage et non-oxydés (**Figure 23**). Ces auteurs interprètent cette différence par la décomposition des sulfures lors de l'oxydation et l'adsorption subséquente des métaux sur les phyllosilicates et sur les minéraux secondaires du till oxydé.

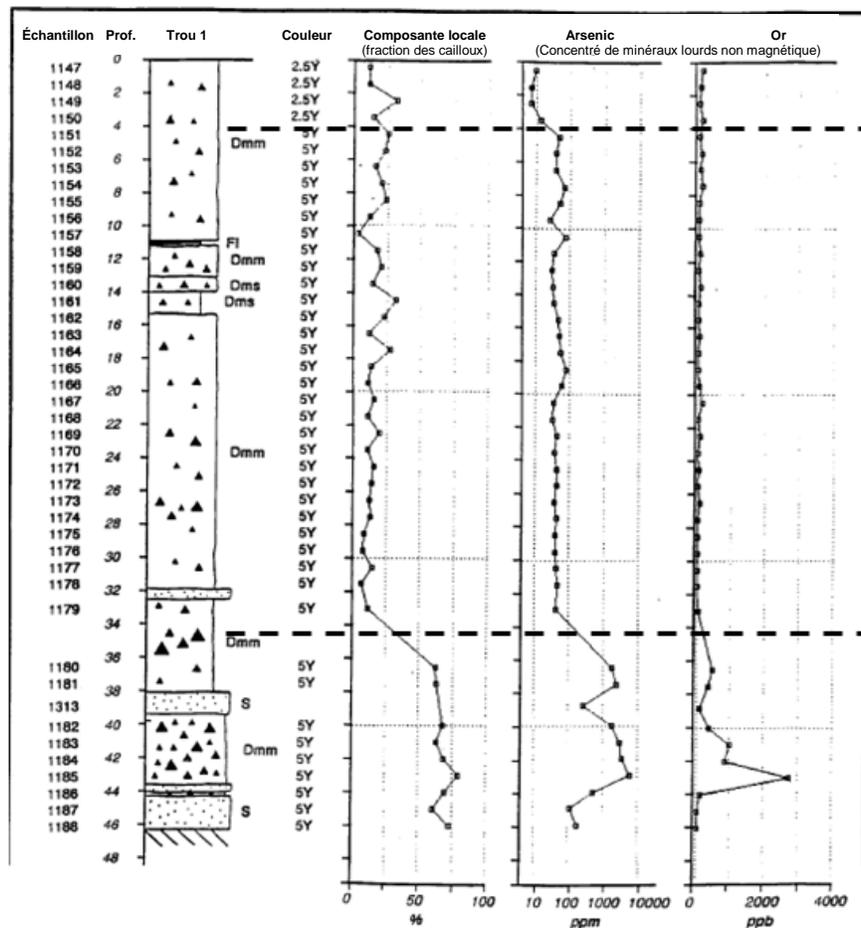


Figure 21. Section de till du secteur de Beardmore-Geraldton en Ontario (tiré de Thorleifson et Kristanjsson, 1990).

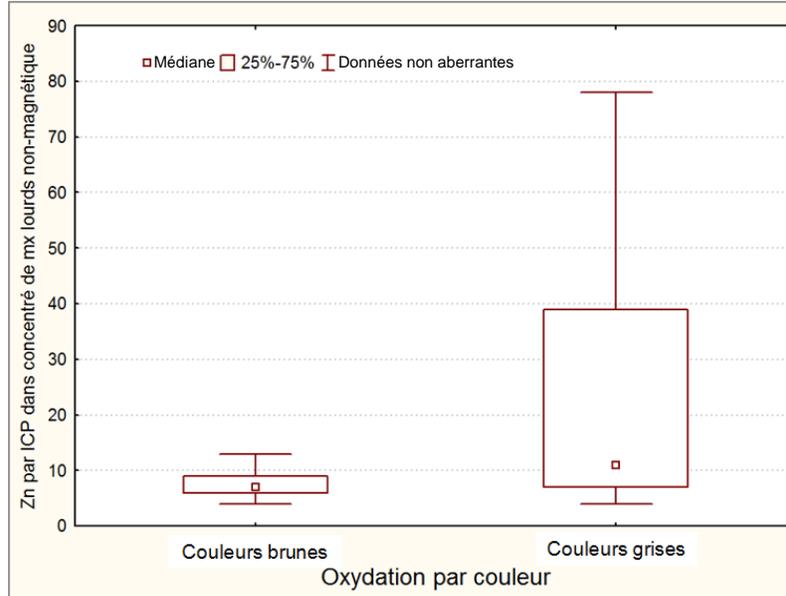


Figure 22. Effet de l'oxydation du till sur les teneurs en zinc dans les minéraux lourds non-magnétiques ($d > 3,2$), levé du Dossier Public 3675, CGC (Secteur Timmins, $n=134$).

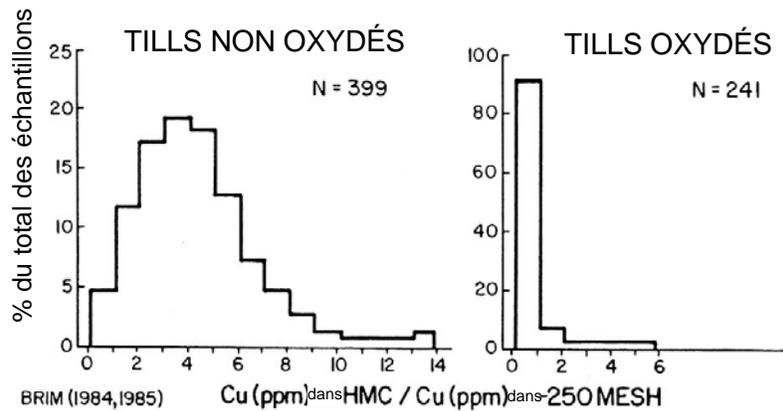


Figure 23. Ratios Cu dans les minéraux lourds sur Cu dans fraction fine selon l'oxydation du till, levé de Matheson (tiré de Bloom et Steele, 1989).

Bloom et Steele (1989) ont comparé dans le cadre de leur étude les teneurs en or des concentrés de minéraux lourds dans les tills oxydés vs les tills frais. La distribution des valeurs est très semblable pour les deux types (**Figure 24**), ce qui semble indiquer un effet limité de l'oxydation sur les teneurs en or dans les concentrés de minéraux lourds. On observe également une répartition assez similaire des teneurs dans le cas du levé 2266 de la CGC (Beardmore-Geraldton en Ontario) (**Figure 25**). Toutefois, il semble que l'oxydation influence le taux de récupération réel de l'or total du till dans plusieurs cas (Nichol et al., 1992).

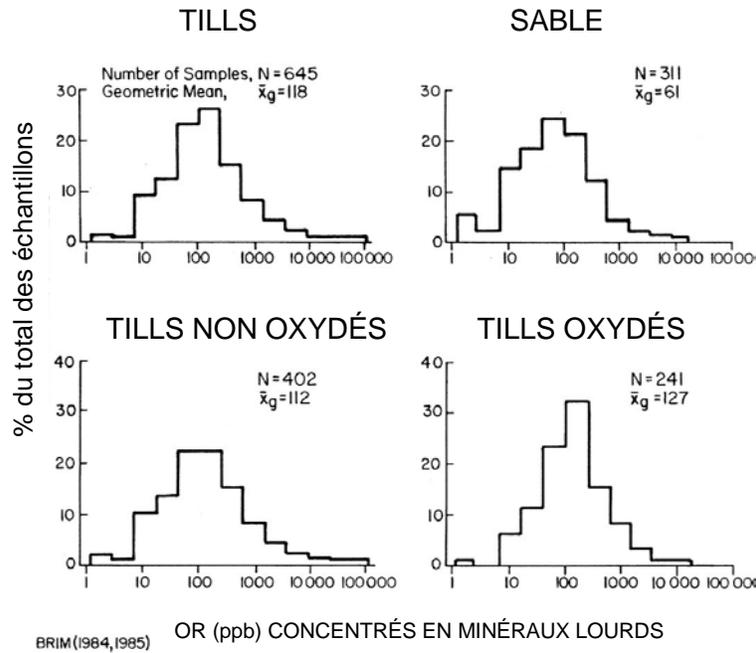


Figure 24. Or dans les minéraux lourds selon l'oxydation du till, levé de Matheson (tiré de Bloom et Steele, 1989).

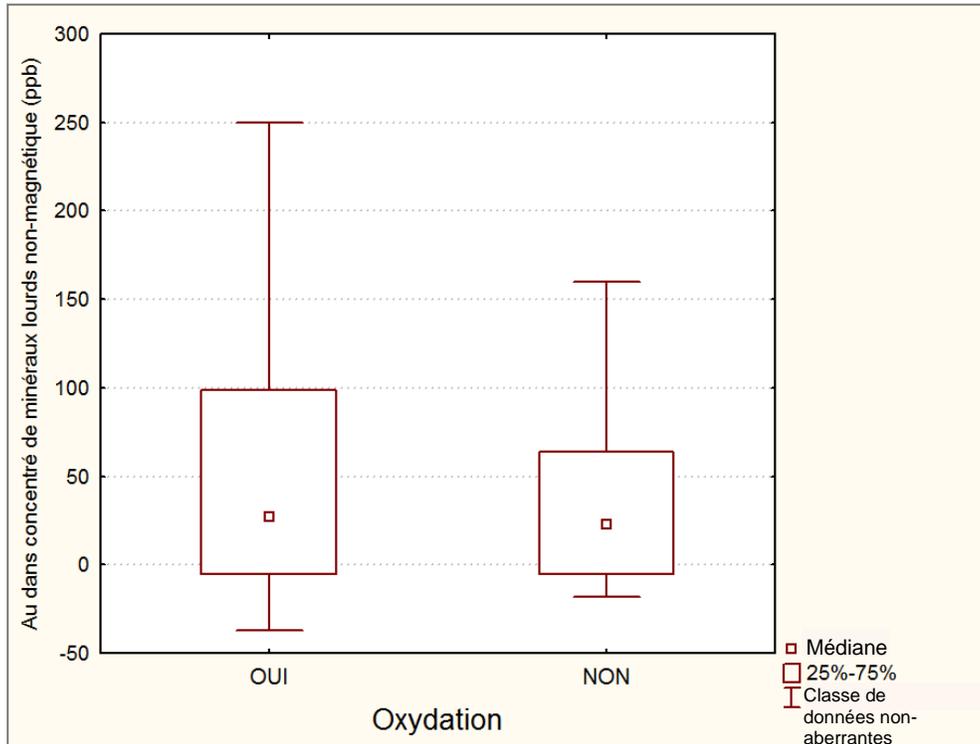


Figure 25. Teneurs en or dans le concentré de minéraux lourds non-magnétique selon l'oxydation du till (données du Dossier Public 2266 de la CGC; Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Implications pour l'exploration

Il semble important d'identifier les échantillons potentiellement oxydés dans les levés de till pour les traiter séparément des échantillons frais, en particulier dans le traitement des minéraux lourds pour les métaux de base. McClenaghan (1992) conclue que la fraction fine du till est un médium plus efficace que les minéraux lourds pour l'exploration des métaux de base lorsque des échantillons de surface (oxydés) sont prélevés.

2.3.2 Tills des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson, Abitibi (Ontario)

Les mines Kidd Creek et Canadian Jamieson sont des minéralisations de type SMV à Zn-Cu situées dans la partie ontarienne de l'Abitibi (**Figure 26**). Le levé de till du Dossier Public 3675 comprend deux échantillons situés à proximité de ces mines. Un échantillon a été prélevé à 500 m au SE de la mine Kidd Creek et un autre à 200 m à l'ouest de la mine Canadian Jamieson.

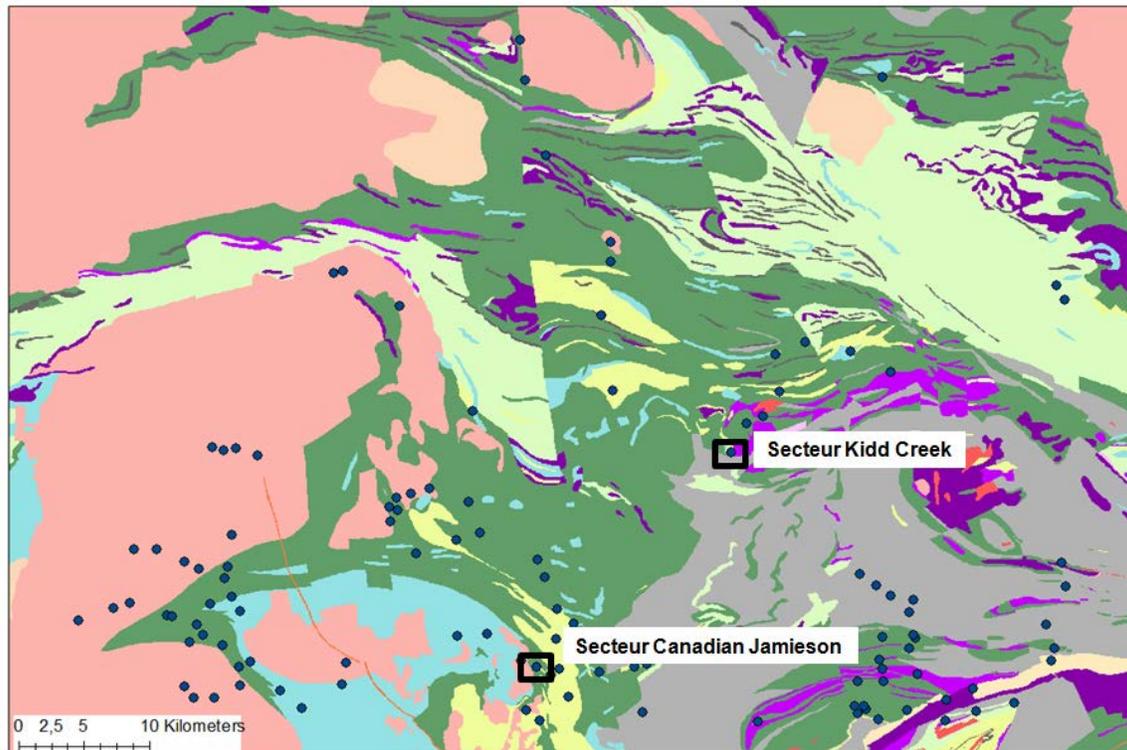


Figure 26. Localisation des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson, nord-est de l'Ontario.

Le **Tableau 1** montre les valeurs recalculées en centiles des principaux métaux d'intérêt dans chaque échantillon. L'échantillon de Kidd Creek montre une excellente anomalie en minéraux lourds non-magnétiques ($d > 3,2$) alors que les teneurs des fractions fines sont faibles. Pour Canadian Jamieson, une anomalie forte en zinc est présente mais on ne trouve rien dans les minéraux lourds.

Ces différences peuvent s'expliquer par des degrés d'oxydation variables du till dans chaque cas. Le till prélevé à Kidd Creek est décrit comme étant de couleur grise, donc non-oxydé. Ses minéraux lourds (sulfures) ont donc été conservés, d'où l'anomalie très forte. Dans le cas de Canadian Jamieson, le till est de couleur "Brun olive pâle", donc montrant une certaine oxydation. Ceci peut expliquer l'absence d'anomalies en minéraux lourds et la très forte anomalie dans les fractions fines dans ce cas (transfert des métaux des sulfures vers les matières adsorbantes de la fraction fine).

Tableau 1. Valeurs recalculées en centiles pour les échantillons à proximité des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

Méthode	Élément	Kidd Creek, 500m SE mine	Canadian Jamieson, 200m SO mine
Mx lourds ICP bruts	Cu	97,7	25
	Zn	97,6	78
	Pb	94	45
Fines <63 microns ICP	Cu	73	45
	Zn	82	100
	Pb	54	5
Couleur du till	--	Gris	Brun olive pâle

3 DONNEES DE TILL POUR L'EXPLORATION AURIFERE

Toute discussion sur l'utilisation des données de tills pour l'exploration de l'or doit d'abord aborder le problème de la reproductibilité des analyses directes de l'or. Cet examen permettra par la suite de mieux évaluer et comparer les différentes méthodes analytiques couramment employées pour l'exploration aurifères.

3.1 Reproductibilité des échantillons de till pour les mesures directes de l'or

Théorie de l'échantillonnage de l'or en particules

L'effet pépite est un phénomène connu depuis longtemps en exploration minière. Le problème de l'effet pépite a été étudié de façon générale par plusieurs auteurs (Gy, 1954; Clifton et al., 1969; Harris, 1982, etc.) et de façon plus spécifique pour l'or dans les données de till (Nichol et al., 1992).

La collecte, le traitement et l'analyse d'un échantillon de till peut être considéré comme un échantillonnage d'une certaine quantité de particules (minéraux et/ou fragments de roches) dans une population (ex: une couche de till). Idéalement, on voudrait que l'échantillon soit reproductible et parfaitement représentatif de la population en termes de concentration d'un élément (ex: or).

La question est de savoir quelle est la reproductibilité d'un échantillon recueilli par rapport à la reproductibilité désirée. Ce dernier peut varier selon le contraste entre les anomalies et le bruit de fond.

Les travaux de Clifton et al. (1969) proposent de fixer une reproductibilité de $\pm 50\%$ à 95% de confiance pour les analyses d'or. Prenons par exemple un till dont la teneur réelle en or est de 100 ppb. Pour obtenir une reproductibilité de $\pm 50\%$ à 95% de confiance, il faudrait donc que les teneurs analysées de 95% des échantillons prélevés soient entre 50 et 150 ppb.

Le nombre de particules d'or récoltés lors d'un échantillonnage aléatoire peut être décrit par la distribution de Poisson, telle que proposée par Clifton et al. (1969) et par la suite démontrée par Stanley (2006). La distribution de Poisson permet de calculer la probabilité d'obtenir un certain nombre k d'occurrences étant donné le nombre attendu λ :

$$f(k; \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!},$$

La distribution de Poisson s'applique lorsque le nombre d'évènements est très élevé et que la probabilité d'obtenir un certain résultat (ex: obtenir un grain d'or) se rapproche de 0. Clifton et al. (1969) indiquent qu'il faut que le nombre total de grains soit plus de 1 000, et que les grains d'or représentent moins de $0,1\%$ du total des grains. C'est effectivement le cas pour les grains d'or dans le till, car le nombre de particules individuelles dans un échantillon de till est certainement très élevé, et que la proportion de grains d'or sur l'ensemble des particules du till est très faible.

La distribution de Poisson permet d'estimer le nombre de particules nécessaire dans un échantillon pour obtenir une précision de $\pm 50\%$ sur le nombre de particules. Ce nombre est arrondi à 20 particules (Clifton et al., 1969). En effet, par la distribution de Poisson sur un nombre attendu de 20, 96% des échantillons auront entre 11 et 29 particules inclusivement (ce qui donne une précision d'environ $\pm 45\%$ sur la valeur de 20).

Connaissant la teneur et en fixant le diamètre des particules d'or, on peut calculer la taille d'échantillons (g) nécessaire à analyser pour obtenir 20 particules d'or, en supposant des grains d'or de forme de disques aplatis à environ 5:1, tel que proposé par Clifton et al., 1969 (**Tableau 2**). L'examen des données du tableau permet de constater que la taille d'échantillons nécessaire augmente linéairement avec la diminution de la concentration en or et augmente selon le cube du diamètre des grains. On peut également calculer le nombre attendu de grains d'or dans un échantillon de 30 g connaissant sa taille et sa concentration (**Tableau 3**).

Tableau 2. Tailles d'échantillons à analyser pour obtenir 20 particules d'or en forme de disques de taille 5:1, selon la taille effective des grains et la concentration en or. Les poids sont en grammes sauf là où indiqué.

Diamètre effectif grains or (microns)	Concentration or (ppb)					
	1000	250	64	16	4	1
250	942	3,77 kg	14,7 kg	58,9 kg	235 kg	942 kg
125	118	471	1,84 kg	7,36 kg	29,4 kg	118 kg
63	15,1	60,3	235	942	3,77 kg	15,1 kg
50	7,54	30,2	118	471	1,88 kg	7,54 kg
32	1,98	7,91	30,9	123	494	1,98 kg
16	0,25	0,99	3,86	15,4	61,7	247
8	0,03	0,12	0,48	1,93	7,72	30,8
4	0,00	0,02	0,06	0,24	0,97	3,86

Tableau 3. Nombre de grains d'or pour 30 g de matériel analysé, pour des grains en forme de disques aplatis 5:1, selon le diamètre effectif des grains et la concentration en or.

Diamètre effectif grains or (microns)	Concentration or ppb					
	1000	250	64	16	4	1
250	0,63	0,15	0,04	0,010	0,003	0,001
125	5,09	1,27	0,32	0,081	0,02	0,005
63	39,8	9,94	2,54	0,636	0,16	0,040
50	79,5	19,9	5,09	1,273	0,32	0,080
32	303	75,9	19,4	4,85	1,21	0,304
16	2 428	607	155	38,8	9,714	2,42
8	19 428	4 857	1 243	310	77,7	19,4
4	155 424	38 856	9 947	2 486	621	155

Ce modèle considère des grains d'or de taille constante. Évidemment, cette condition est peu réaliste. Il existe toutefois une façon de calculer le diamètre effectif de grains d'or sphériques d'une population de grains de différents diamètres. La formule donnée ici est tirée de Stanley (2008):

$$d = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} d_i^3}$$

- d est la taille effective des grains (diamètre);
- m_i est la masse d'or dans la classe granulométrie j;
- d_i est la point milieu de la classe granulométrie j;
- m est la masse totale d'or.

Si on veut des disques ayant des ratios de diamètre/épaisseur de 5 plutôt que des sphères, on multiplie le résultat du diamètre par **1,49**. Ce calcul donne alors le diamètre du disque 5:1 équivalent en volume à une sphère.

Évaluation de la taille des grains d'or dans les tills et les minéralisations

Il existe relativement peu d'exemples de caractérisations des diamètres des grains d'or sur les minéralisations primaires (Stanley, 2008). Un exemple est toutefois donné par Wood et al. (1986) (**Figure 27**). Le diamètre effectif des grains calculé par Nichol et al. (1992) pour cette distribution est d'environ 52 microns. Il existe également peu de données sur la taille des grains dans les échantillons de fraction fine. Par contre, beaucoup de données sont disponibles concernant la taille des grains d'or des concentrés de minéraux lourds. Ces données pourront être utilisées pour calculer la taille effective des grains dans les concentrés.

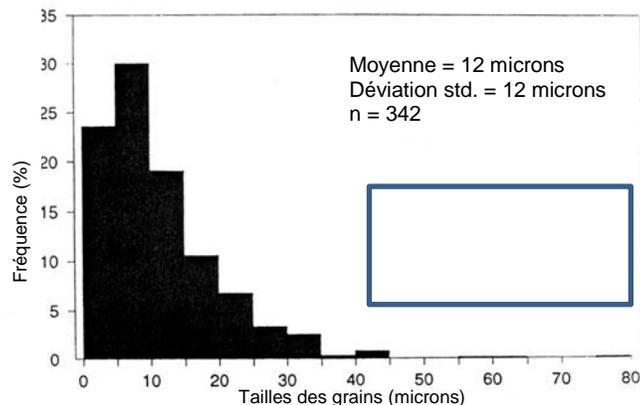


Figure 27. Taille des grains d'or dans l'encaissant altéré de la mine Hollinger, Ontario. Tiré de Nichol et al., 1992.

Évaluation de la taille des grains par réanalyses

Avec des réanalyses d'un même échantillon et en calculant la moyenne et l'écart-type des valeurs, on peut calculer le nombre attendu de grains, en sachant que le nombre de particules suit la distribution de Poisson. Il s'agit de trouver le nombre attendu de particules pour lequel la distribution de Poisson donne le même coefficient de variation

(écart-type/moyenne) que les valeurs analysées. Dans la distribution de Poisson, l'écart-type égale la racine carrée de la valeur attendue. Cette approche basée sur les réanalyses est expliquée par Nichol et al., (1989). Le **Tableau 4** montre le coefficient de variation de la distribution de Poisson pour diverses valeurs attendues.

Tableau 4. Coefficients de variation pour la distribution de Poisson, selon la valeur attendue lambda (calculs réalisés sur Ms-Excel).

Nombre de grains attendu (lambda)	Ecart-type/Moyenne (coefficient de variation)
0,1	3,16
0,25	2,00
0,5	1,41
1	1,00
1,5	0,82
2	0,71
3	0,58
5	0,45
7	0,38
10	0,32
15	0,26
20	0,22
30	0,18
50	0,14
100	0,10
150	0,08
125	0,09

3.2 Fractions et méthodes analytiques typiques

Pour l'exploration aurifère, trois types de données de till sont typiquement recueillies (McClenaghan, 2001).

Géochimie de la fraction fine (< 0,063 mm ou < 0,177 mm) par ICP et/ou activation neutronique (Au et éléments traceurs tels que As, Sb, etc.);

Géochimie par activation neutronique des minéraux lourds non-magnétiques (densité > 3,2) (Au et éléments traceurs tels que As, Sb, etc.);

Compte et morphologie des grains d'or

Chacune de ces méthodes sera examinée dans les sections suivantes. Les problèmes relatifs à ces différents types de données seront abordés (dont certains s'expliquent par l'effet pépite discuté précédemment) et des solutions possibles seront examinées.

3.2.1 Fraction fine

La fraction fine du till est fréquemment analysée dans le cadre de l'exploration pour les minéralisations aurifères. La fraction fine la plus couramment analysée est la fraction silt+argile (<63 microns) mais certains levés contiennent également la fraction <177 microns (sables fins+silts+argiles) ou <2 microns (argiles). En général, la concentration en or est plus forte dans la fraction <63 microns (**Figure 28**). Toutefois, le problème de la reproductibilité des échantillons se pose lorsque les teneurs en or de la fraction fine sont considérées.

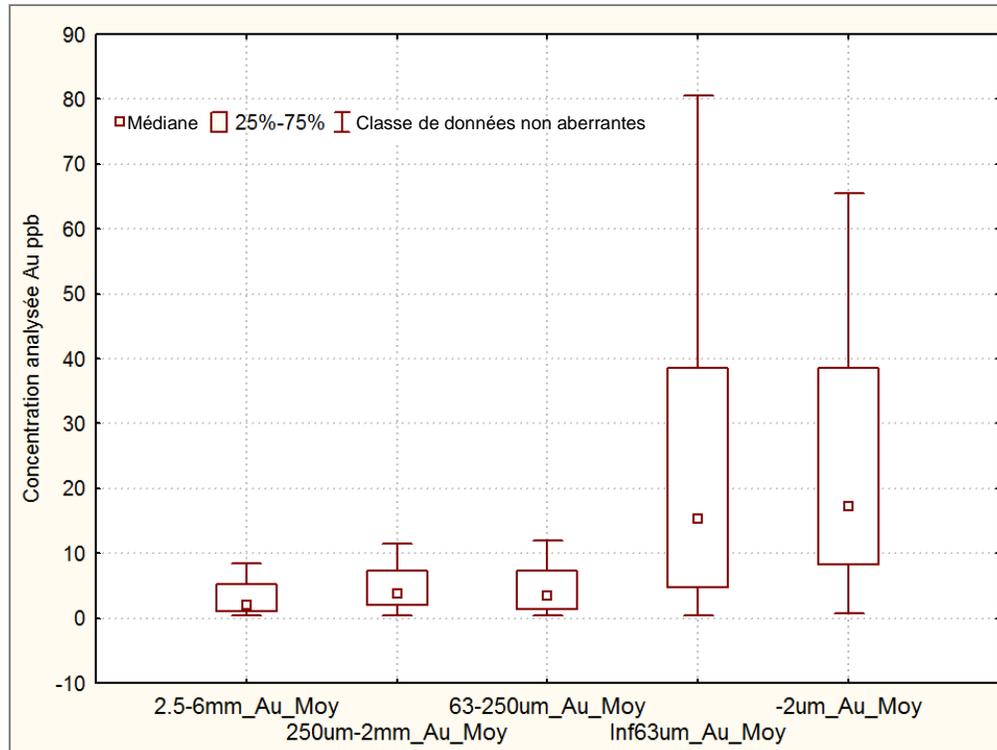


Figure 28. Concentration en or selon la fraction granulométrique, tills aurifères du secteur Beardmore-Geraldton. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Reproductibilité des analyses de fraction fine

La masse de matériel réellement analysée par les méthodes analytiques commerciales typiques varie de 0,5 g à 50 g pour l'ICP-MS, l'activation neutronique et la pyronalyse. Certains laboratoires offrent également la cyanuration qui permet d'analyser de plus gros échantillons (500-1 000 g). Dans le **Tableau 2**, les lignes bleue, verte et rouge représentent les conditions pour lesquelles une reproductibilité de $\pm 50\%$ à 95% de confiance est respectée pour des échantillons de 0,5, 50 g et 500 g respectivement (voir la section 3.1 pour une discussion).

On peut se demander quelle est la reproductibilité des analyses dans des cas réels. Des données provenant de Thorleifson et Kristjansson (1990) du secteur de Beardmore-

Geraldton fournissent un exemple pour la fraction fine du till. Neuf échantillons de fraction fine (<63 microns) de till de 100 kg ont été analysés chacun trente-six fois par pyroanalyse sur des sous-échantillons de 30 g (**Figure 29**). Les statistiques sur la distribution des réanalyses de chaque échantillon sont données dans le **Tableau 5**. Pour diminuer l'effet des valeurs extrêmes sur les statistiques, la valeur la plus élevée et la plus basse de chaque série ont été soustraites des calculs.

On peut calculer le nombre attendu de particules qui donne une distribution de Poisson semblable à celles observées. À partir du nombre de particules et de la concentration moyenne, on peut alors calculer la taille effective des grains d'or (**Tableau 5**). Le nombre de particules approche ou dépasse le 20 dans deux cas seulement. Ceci indique que sur les 9 échantillons, deux seulement donne une précision à 50 % sur 95 % de confiance avec un seul échantillon.

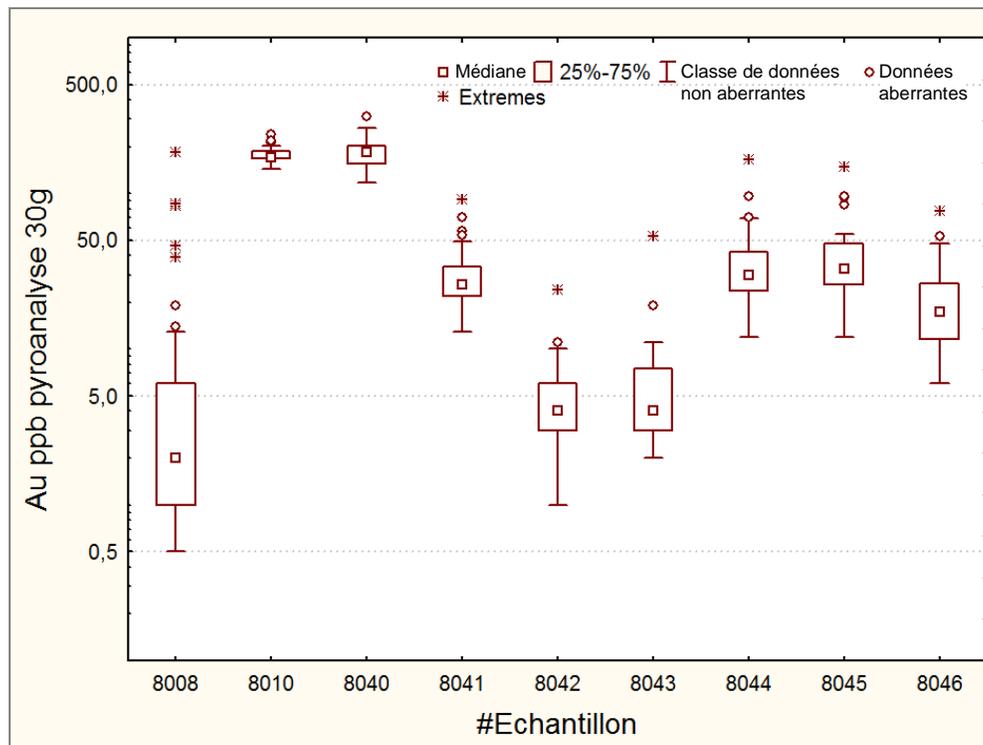


Figure 29. Teneurs analysées dans 36 réanalyses des mêmes échantillons de fraction fine de till. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Tableau 5. Nombre et taille des grains d'or calculés pour des échantillons de fraction fine ayant été analysés 36 fois. La valeur la plus élevée et la plus basse ont été enlevées de chaque série de réanalyses pour diminuer l'effet des anomalies. Données du Dossier Public 2266, CGC.

Échantillon	Moyenne (n=34)	Écart-type (n=34)	Coefficient de variation	Précision 95 % confiance	Nombre de grains d'or effectifs calculé	Diamètre des grains (disques ratio 5:1)
8008	8	17	2,14	428	0,23	23
8010	178	16	0,09	18	125	8
8040	184	37	0,20	40	25	13
8041	30	12	0,41	82	6	12
8042	5	3	0,52	104	4	8
8043	5	4	0,66	133	2,25	9
8044	35	17	0,49	99	4	14
8045	40	20	0,49	98	4	15
8046	21	13	0,60	120	2,75	14

Conclusions: or dans la fraction fine

La discussion précédente sur l'effet pépite pour l'or dans les échantillons de fraction fine du till permet de tirer les conclusions et recommandations suivantes pour l'exploration.

Fraction granulométrique

Lors de l'échantillonnage de la fraction fine du till, il est avantageux de choisir une fraction granulométrique petite pour le tamisage. Par exemple, l'analyse de la fraction inférieure à 63 microns est grandement préférable à celle inférieure à 177 microns. Ceci minimisera l'effet pépite puisque la reproductibilité varie en fonction du cube de la taille effective des grains. La présence d'un seul grain d'or de 125 microns dans une analyse provoquera une très forte anomalie erratique en or. De plus, l'or est souvent concentré dans la fraction <63 microns, ce qui permet d'augmenter la proportion d'or présent dans l'échantillon.

Quantité de matériel à analyser en laboratoire

Pour l'analyse de la fraction fine, il est fortement recommandé d'utiliser des méthodes analytiques à partir d'au moins 30 g de matériel. Certaines méthodes, comme l'ICP-MS, peuvent utiliser aussi peu que 0,5 g de matériel; cette quantité n'est toutefois pas recommandable pour l'analyse de l'or dans le till. Par contre, l'option d'analyser plus de matériel est couramment offerte par les laboratoires commerciaux. À titre d'exemple, les méthodes ICP-MS offertes par ALS-Chemex en 2010 offraient l'option d'analyser 50 g de matériel par ICP-MS.

Une option d'analyse par cyanuration sur 500 g de matériel est également offerte pour un prix d'environ 25 % plus élevé qu'une pyro-analyse sur 50 g. Cependant, il faut alors

que l'échantillon contienne au moins 500 g de fraction fine; ceci veut dire des échantillons plus gros devrait être prélevés. En effet, les échantillons de 1 kg prélevés normalement pour l'analyse de la fraction fine ne contiendront en général pas le 500 g requis. En multipliant ainsi par un facteur de 10 la quantité de matériel traité, le nombre de grains d'or de tous les échantillons du **Tableau 5**, sauf un (#8008), franchiraient alors le seuil de 20 particules effectives nécessaires à obtenir ± 50 % de reproductibilité.

Duplicatas des analyses

En théorie, on pourrait également considérer d'analyser plusieurs fois le même échantillon pour la fraction fine (idéalement une dizaine de fois au moins) pour augmenter la reproductibilité. Toutefois, les coûts d'analyse augmentent alors très rapidement si on compare à une méthode comme la cyanuration qui permet d'analyser dix fois plus de matériel pour un prix relativement abordable.

Aspect spatial des anomalies

Une façon alternative de confirmer les anomalies dans des banques de données existantes serait de considérer les regroupements d'anomalies dans l'espace. La présence d'anomalies groupées indiquerait alors une véritable anomalie plutôt qu'un effet pépite erratique. Toutefois, une densité de données élevée est nécessaire. En effet, les trains de dispersion aurifères typiques ont une surface relativement faible (ex: 1 km par 200 m, pour 0,2 km²). Pour obtenir en moyenne deux anomalies par train de dispersion et en considérant une telle surface, il faudrait donc au moins 10 échantillons par kilomètre carré. Il est clair que ce type d'analyse spatiale ne peut donc s'appliquer qu'à des données à l'échelle de l'exploration locale (et non régionale).

3.2.2 Géochimie des minéraux lourds non-magnétiques

La concentration des minéraux lourds d'un échantillon de till est une façon possible d'augmenter la reproductibilité de l'analyse de l'or dans le till. En général, la concentration des minéraux lourds s'effectue sur la fraction <2 mm d'échantillons de till de 10 à 15 kg. Donc, en principe, le concentré représente un échantillon réel de cette taille.

Historiquement, la concentration de l'or a été également proposée pour connaître la quantité d'or présente dans des échantillons en contenant peu et pour lesquels l'analyse de la fraction fine pourrait donner une valeur sous la limite de détection. Toutefois, cet avantage s'est estompé avec le temps avec le développement moderne de techniques par ICP-MS permettant d'analyser l'or jusqu'à des fractions de parties par milliard.

Contrairement aux analyses des fractions fines, il existe une variété de techniques qui sont utilisées pour récupérer des concentrés de minéraux lourds à partir des échantillons de till. La **Figure 30** présente la méthodologie utilisée par la Commission Géologique du Canada, qui est utilisée dans de nombreux levés publics. Cette technique comprend les étapes suivantes:

- Préconcentration des minéraux lourds par table à secousses;
- Concentration du préconcentré par iodure de méthyle (densité > 3,2);

- Séparation magnétique par aimant à main pour obtenir un concentré non-magnétique.

D'autres techniques sont employées dans différents laboratoires.

Les paragraphes suivants traitent de différents enjeux qui influencent les l'interprétation des concentrations en minéraux lourds.

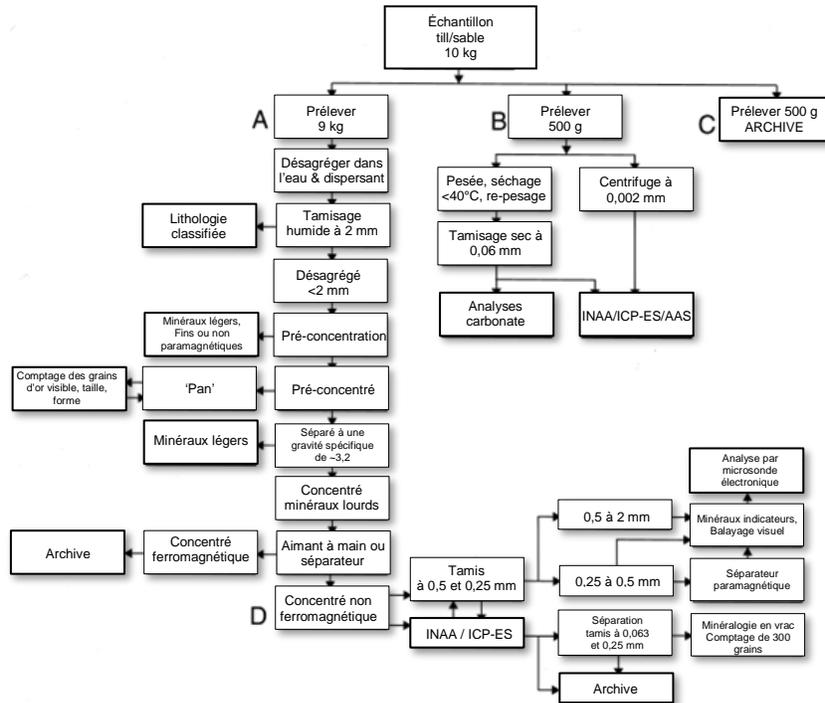


Figure 30. Méthodologie de traitement des échantillons de till de la CGC. (A) Indicateur du traitement des minéraux, (B) Géochimie du till, (C) Archives et (D) Analyses des minéraux indicateurs. Tiré de McMartin et McClenaghan, 2001.

Concentrations en minéraux lourds des échantillons

Typiquement, la quantité de minéraux récupérée varie d'un échantillon à l'autre. Par exemple, pour le levé du Dossier Public 3675 du secteur de Timmins, la concentration en minéraux lourds non-magnétiques varie de 0,5 à 13 g par kg de till (**Figure 31**). Dans ce même levé, on trouve également des différences dans les concentrations en minéraux lourds selon la source des fragments de till; les tills à dominance de roches métavolcaniques et d'intrusions felsiques ont de plus fortes concentrations en minéraux lourds. La proportion de minéraux lourds des échantillons varie également à l'échelle d'une propriété (**Figure 32**)

Cette variation dans la quantité de minéraux lourds fait en sorte que, pour une même quantité absolue d'un indicateur donné dans le till (ex: or), la concentration retournée par l'analyse chimique va varier. Connaissant la quantité de minéraux lourds et la quantité totale de till traitée pour la concentration de minéraux lourds, on peut toutefois

normaliser les valeurs pour éliminer cet effet (Bloom et Steele,1989). La formule suivante permet de faire la normalisation:

$$t_{\text{Normalisée,Concentré}} = (t_{\text{Concentré}} * m_{\text{Concentré}}) / m_{\text{Till}}$$

$t_{\text{Concentré}}$ = teneur du concentré de minéraux lourds analysée (ppb ou ng/g)

$m_{\text{Concentré}}$ = masse du concentré de minéraux lourds (g)

m_{Till} = masse de till soumis au processus de concentration (g)

$t_{\text{Normalisée,Concentré}}$ = teneur normalisée du concentré (ppb)

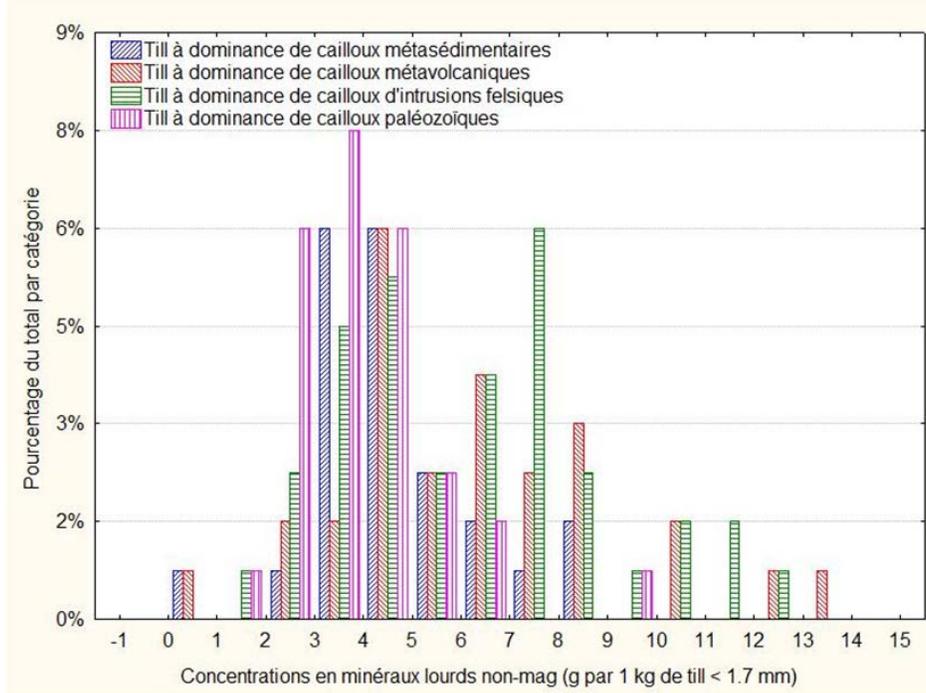


Figure 31. Concentrations en minéraux lourds selon le type de till, secteur de Timmins (données du Dossier Public 3675, CGC).

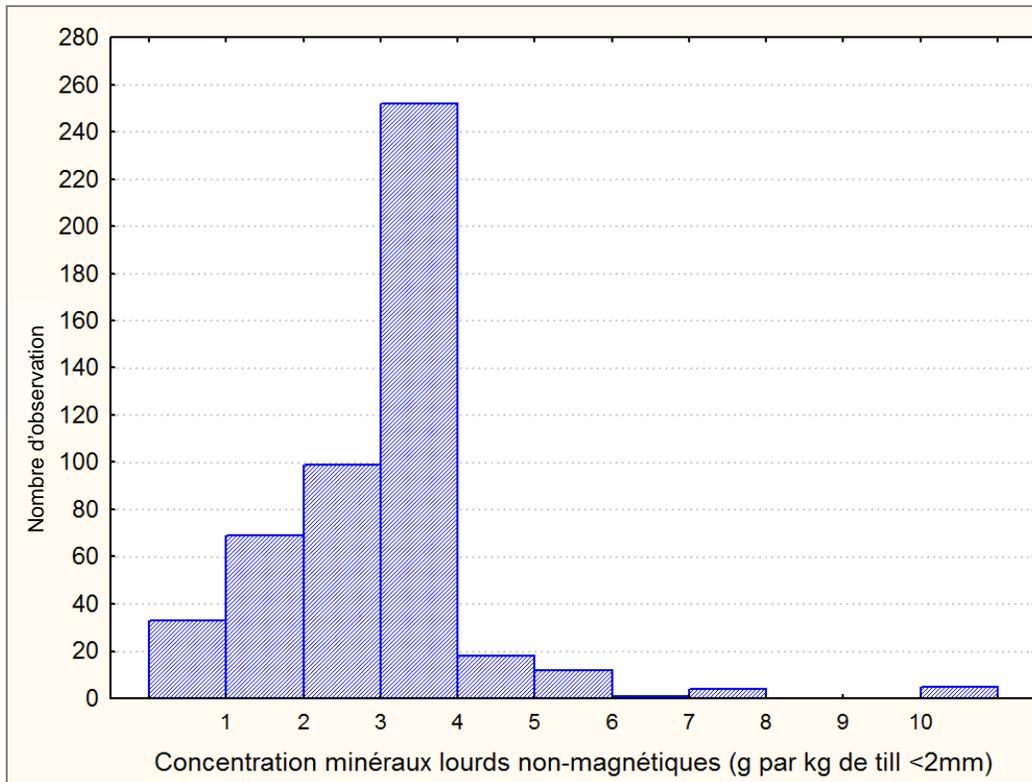


Figure 32. Concentration en minéraux lourds, propriété La Grande Sud. Données de Mines d'Or Virginia.

Comparabilité des concentrés et analyses de minéraux lourds entre laboratoires

Nichol et al. (1992) ont testé la récupération des minéraux lourds de différents laboratoires. Ces auteurs ont prélevé des échantillons de 100 kg de till de sept sites différents à proximité de minéralisations. Les échantillons ont par la suite été tamisés à 2 mm, mélangés de façon rigoureuse, et séparés en sous-échantillons de 5 kg. Chaque laboratoire utilisait la même méthode de concentration des minéraux lourds. Les résultats indiquent que le facteur de concentration varie d'un facteur de 10 entre différents laboratoires (**Figure 33**, panneau haut-gauche). De même, la concentration en or du concentré varie énormément, d'un facteur d'environ 10 également (**Figure 33**, panneau haut-droite). Lorsque l'on normalise les concentrations en or, les différences diminuent toutefois mais demeurent (**Figure 33**, panneau bas-gauche). Les valeurs normalisées pour 4 des 7 laboratoires sont très proches les unes des autres. Le taux de récupération des minéraux lourds varie également.

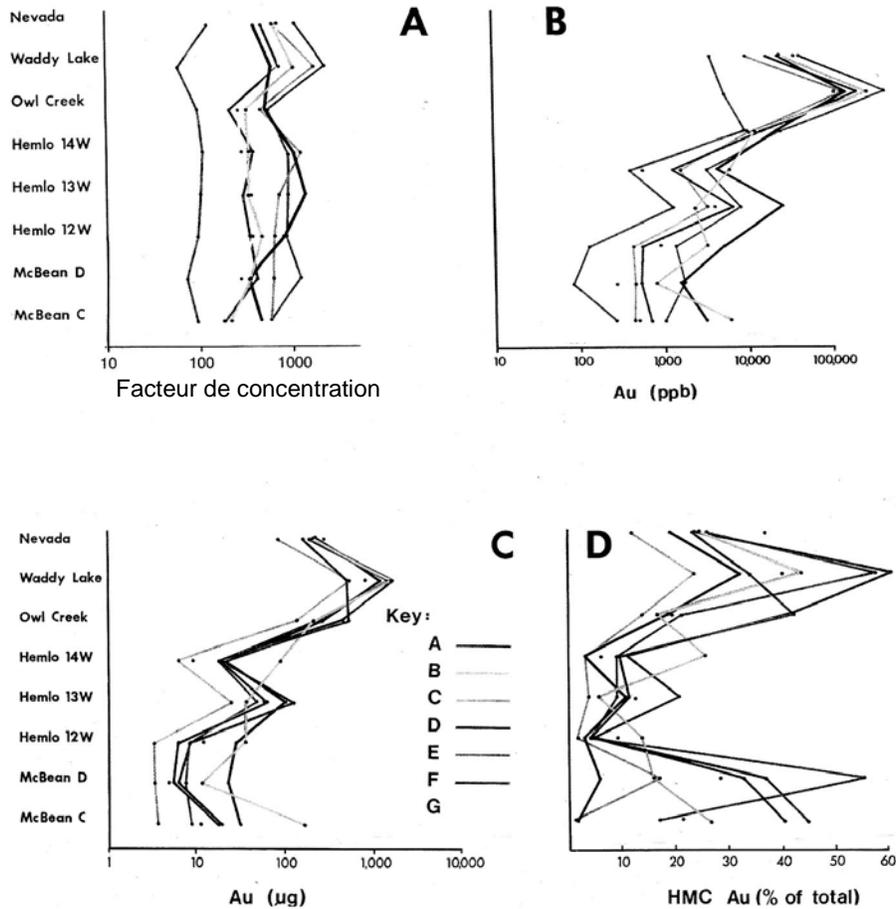


Figure 33. Comparaisons de concentrés de minéraux lourds préparés par sept laboratoires différents. Tiré de Nichol et al., 1992.

Ces différences peuvent s'expliquer principalement par des variations dans les paramètres de la table à secousse d'un laboratoire à l'autre (Nichol et al., 1992). **Ceci indique qu'en général, les concentrations en métaux dans les minéraux lourds ne sont pas comparables d'un laboratoire à l'autre.** La normalisation diminue toutefois l'écart entre les différents laboratoires. Les analyses de minéraux lourds ne sont évidemment pas non plus comparables lorsque les instruments/méthodes de séparation diffèrent.

Taux de récupération de l'or dans les concentrés de minéraux lourds

La concentration des minéraux lourds ne permet pas de récupérer tout l'or libre présent dans le till. Le principal facteur qui influence le taux de récupération est la granulométrie de l'or dans le till. La **Figure 34** montre le taux de récupération de l'or dans le concentré de minéraux lourds selon la méthode de séparation et la taille des grains. Des exemples de calcul du taux de récupération sont donnés aux **Figures 35, 36, 37** et **38**. Les taux de récupération de l'or dans le concentré varient d'environ 5 à 80 % selon la granulométrie. En général, le taux de récupération est bon pour l'or grossier mais devient plus faible à mesure que l'or est fin.

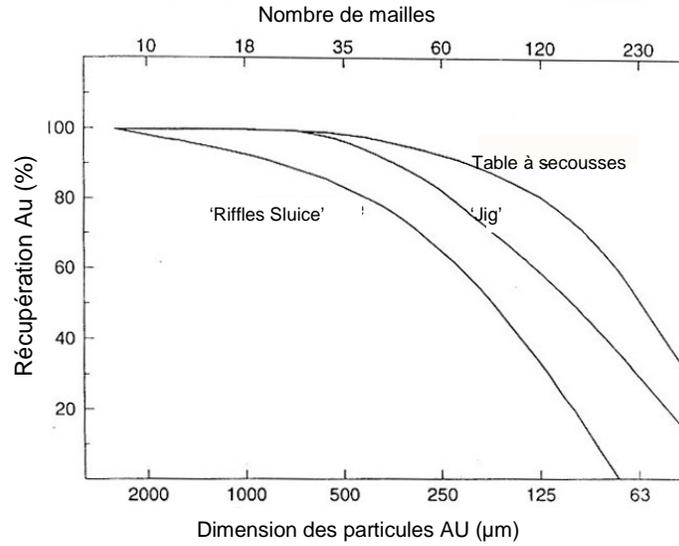


Figure 34. Taux de récupération de l'or dans les concentrés de minéraux lourds selon la méthode de traitement. Tiré de Nichol et al., 1992.

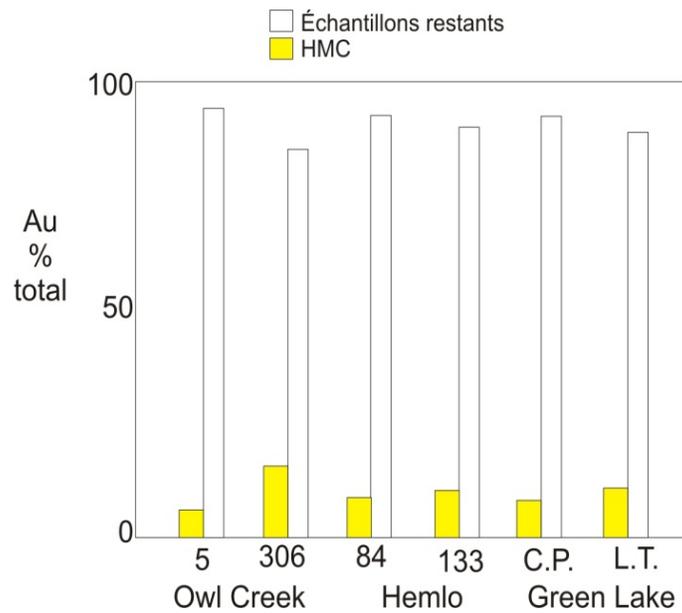


Figure 35. Comparaison de l'or entre le concentré de minéraux lourds et l'échantillon total. Tiré de Nichol et Shelp, 1985.

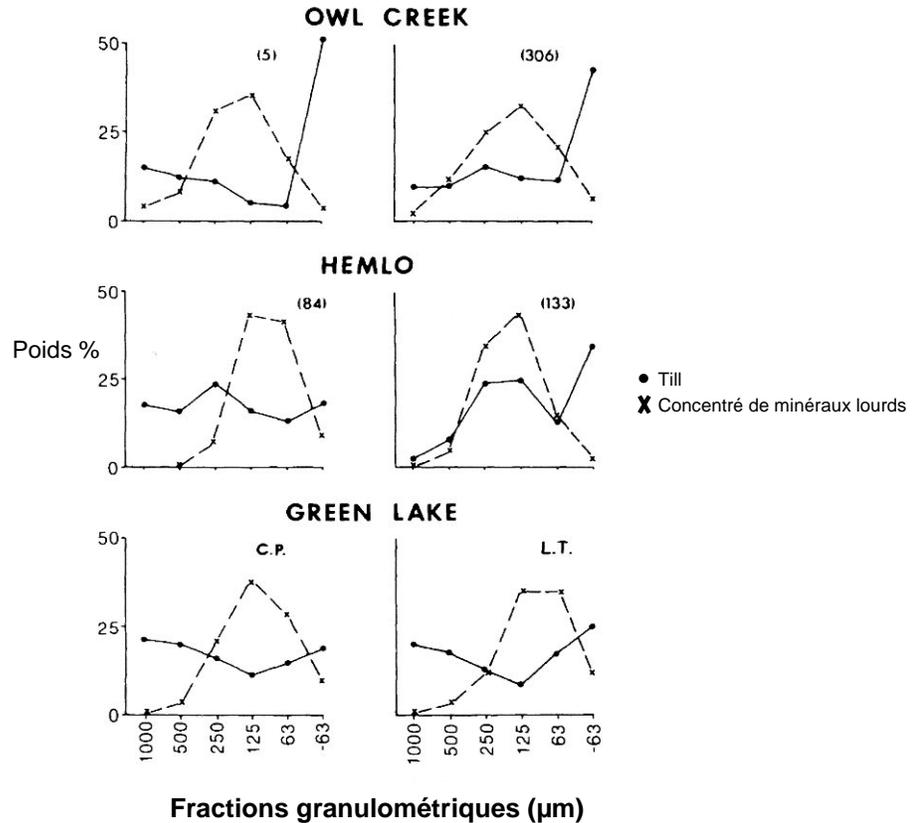


Figure 36. Distribution de l'or selon la fraction granulométrique et selon le type d'échantillon. Tiré de Nichol et Shelp, 1985.

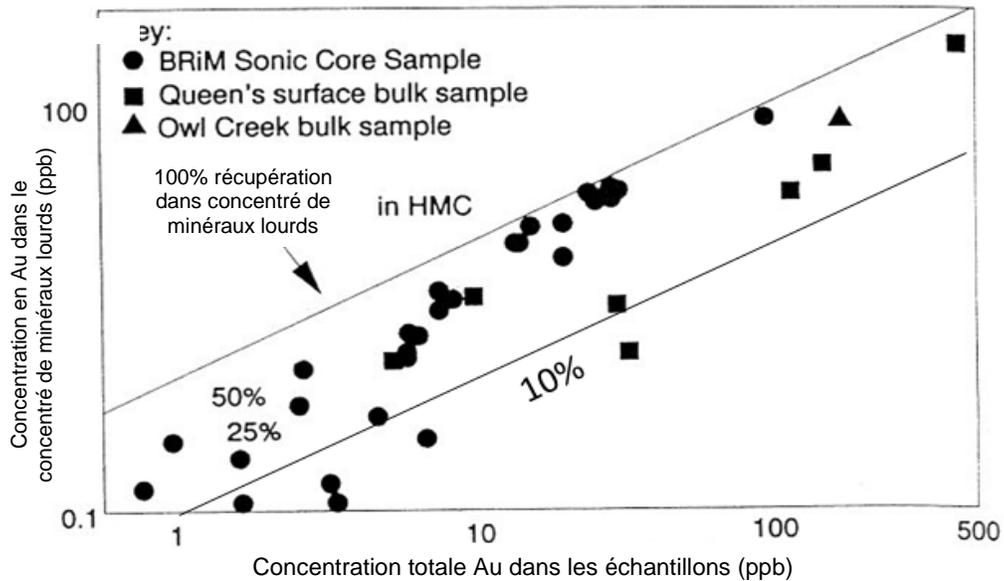


Figure 37. Proportion de l'or récupéré dans le concentré de minéraux lourds, levé Black River-Matheson, Ontario. Tiré de Nichol et al., 1992.

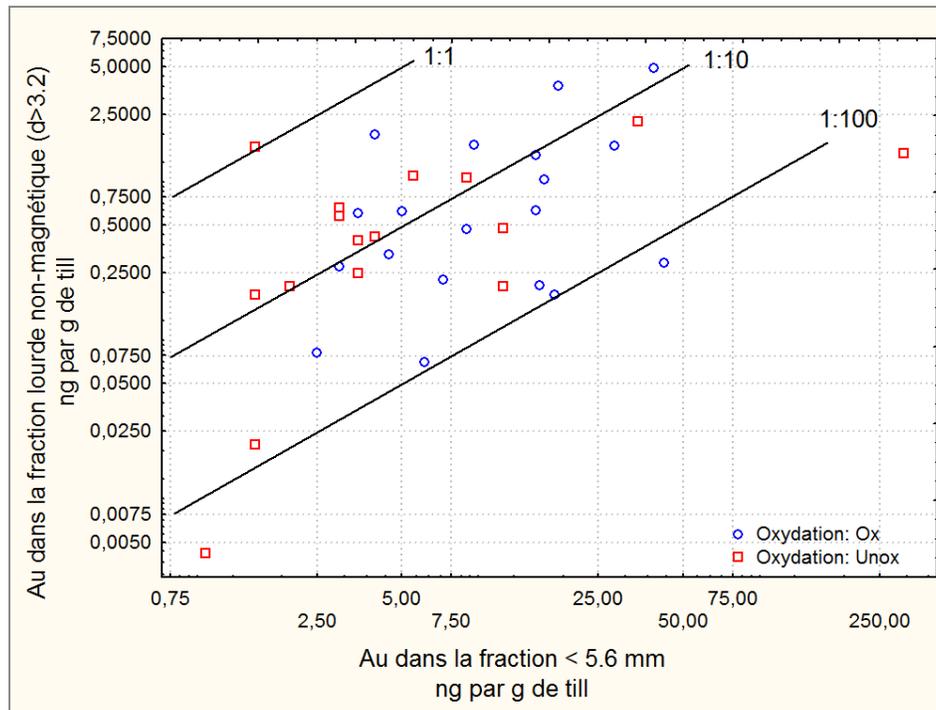


Figure 38. Comparaison de la concentration en or dans le till total vs le concentré non-magnétique de minéraux lourds. Données du Dossier Public 2266, CGC (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Reproductibilité des analyses de minéraux lourds

L'extraction des minéraux lourds se fait typiquement sur un échantillon de 10-15 kg. En principe, ceci devrait améliorer de façon importante la reproductibilité en or des échantillons. Toutefois, il faut rappeler que les concentrés de minéraux lourds sont efficaces pour extraire les grains d'or de taille moyenne et que les particules fines sont expulsées. De plus, selon les détails des méthodes de concentration, les concentrés sont réalisés sur des particules qui vont jusqu'à 2 mm de taille. La présence de particules grossières d'or est alors susceptible de causer des problèmes de reproductibilité car la taille effective des grains dans les concentrés est probablement plus grande que dans le cas des fractions fines.

Calcul de la reproductibilité: approche statistique sur réanalyses

Le calcul de la reproductibilité par réanalyses peut également s'appliquer aux concentrés de minéraux lourds. En considérant un concentré de minéraux lourds de 20 g (taille typique) avec des particules de taille moyenne de 250 microns et de densité moyenne 3,5, le nombre de particules calculé est de près de 30 000, ce qui dépasse largement le nombre de 1 000 requis pour la distribution de Poisson (Clifton et al., 1969).

Neuf concentrés de minéraux lourds de tills aurifères du secteur de Beardmore-Geraldton ont été séparés chacun en 4 sous-échantillons et envoyés à l'analyse par Thorleifson et Kristjansson (1990). La **Figure 39** montre la variabilité des résultats pour chaque concentré (minimum à maximum). Sachant que le nombre de particules d'or dans un sous-échantillon suit la distribution de Poisson (variance égale à la moyenne), on peut calculer le nombre de grains d'or effectifs qui donnent l'écart-type calculé sur les réanalyses (**Tableau 6**). Les résultats indiquent qu'un seul des concentrés montre suffisamment de grains d'or pour être représentatif. Il faut toutefois noter ici que le nombre d'analyses par échantillon est faible et qu'il existe une forte incertitude sur l'écart-type et donc sur les résultats.

Tableau 6. Nombre et diamètre des grains d'or calculés pour 4 sous-échantillons de concentrés de minéraux lourds par échantillon. Données du Dossier Public 2266, CGC.

Échantillon	Moyenne (n=4)	Écart-type de la population (n=4)	Coefficient de variation	Précision 95% confiance	Nombre de grains d'or par concentré	Diamètre des grains (disques ratio 5:1)
8008	909	456	0,50	100	4	137
8010	297	261	0,88	175	1,25	136
8040	12 770	6 587	0,52	103	4	211
8041	2 204	987	0,45	90	5	108
8042	939	982	1,05	209	0,9	221
8043	994	889	0,89	179	1,25	177
8044	1 033	725	0,70	140	2	134
8045	972	89	0,09	18	125	34
8046	373	223	0,60	120	2,75	94

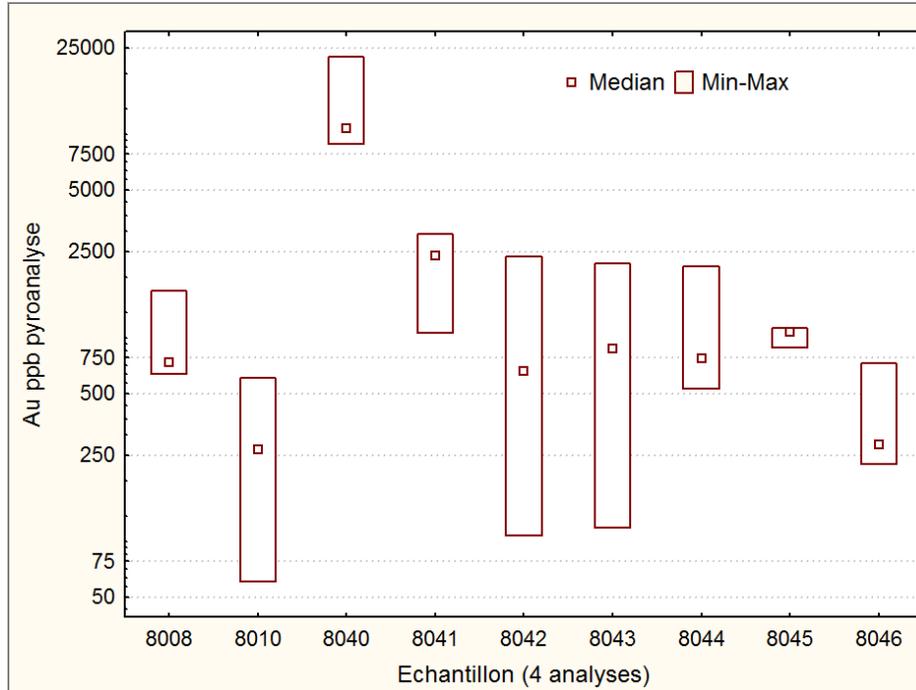


Figure 39. Variations de la concentration d'or dans les minéraux lourds lors de la réanalyse de 4 sous-échantillons de concentrés provenant des mêmes échantillons. Données du Dossier Public 2266, CGC.

Calcul de la reproductibilité: approche granulométrique

Contrairement aux fractions fines, il existe beaucoup de données sur la taille des grains d'or dans les concentrés de minéraux lourds. Si on connaît les dimensions des grains d'un échantillon, on peut alors calculer les tailles de grains effectives pour les concentrés et calculer la reproductibilité des concentrés analysés géochimiquement par la suite.

Les données de grains d'or disponibles viennent principalement des travaux de la compagnie Overburden Drilling Management (ODM). Les largeurs et les longueurs des grains sont mesurées au microscope. Toutefois, l'épaisseur des grains est rarement mesurée mais en général estimée. La formule utilisée pour calculer l'épaisseur est la suivante (Huneault, comm. pers., 2010).

$$t = (0,2 - 0,01 * (d - 100) / 100) * d$$

t est l'épaisseur calculée. d est le diamètre moyen du grain.

L'utilisation de cette formule donne des ratios diamètre/épaisseur d'environ 4,8 :1 pour des grains de 10 microns, et de 6,25 :1 pour des grains de 500 microns. Pour simplifier les calculs, un ratio de 5 :1 a été utilisé pour le reste des calculs.

En utilisant la formule de la section 3.1, on peut calculer le diamètre effectif des grains d'or d'échantillons. La **Figure 40** montre les diamètres effectifs des grains d'or en forme de disque aplatis à 5 :1, tels que calculés sur 40 échantillons de tills aurifères montrant chacun au moins 10 grains d'or observés, peu importe la taille. La médiane de la distribution est de 90 microns environ.

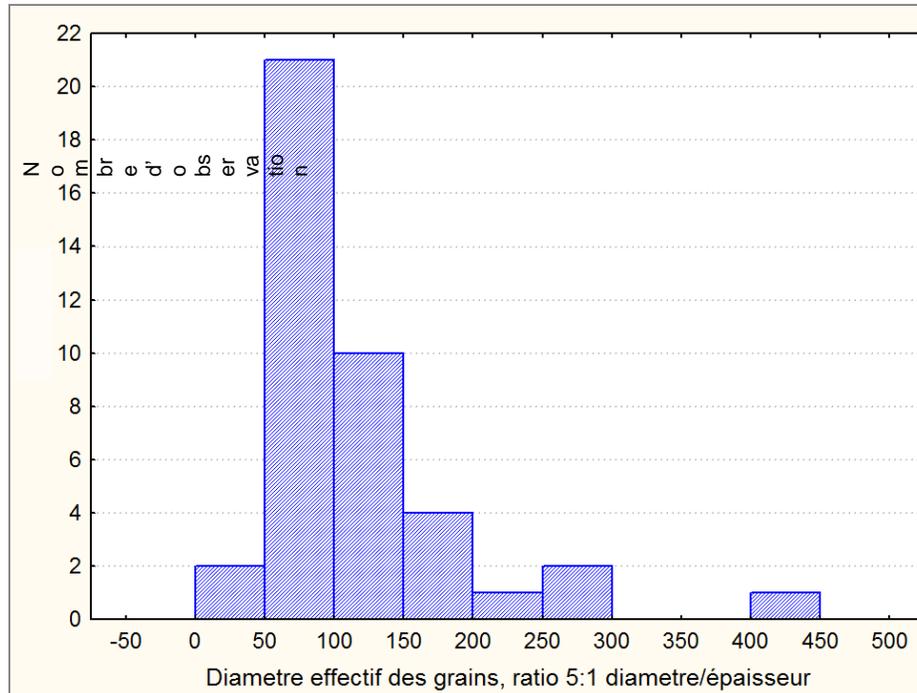


Figure 40. Diamètres effectifs des grains d'or en forme de disques d'épaisseur cinq fois plus petite que le diamètre. Voir le texte pour la liste des données utilisées.

En considérant ce diamètre effectif moyen de grains de 90 microns pour des grains aplatis à 5:1, on peut calculer la reproductibilité des analyses géochimiques de minéraux lourds pour l'or. Le **Tableau 7** montre le nombre de grains d'or attendus pour une taille effective de 90 microns à 5:1 selon la concentration, pour des échantillons de till de 10 kg. Le seuil de concentration de l'or pour obtenir une reproductibilité de $\pm 50\%$ est d'environ 4 ng d'or par g de till. À un facteur de concentration typique des minéraux lourds de 200, cela donne une concentration de 800 ppb nécessaire dans le concentré pour être représentatif.

Tableau 7. Nombre de grains d'or pour 10 kg de matériel traité pour les minéraux lourds, pour des grains en forme de disques aplatis 5:1, pour un diamètre effectif de 90 microns des disques. Les concentrations en or doivent être normalisées.

Diamètre effectif grains or (microns)	Concentration or normalisées ppb (ng par g de till)							
	1000	250	64	16	8	4	2	1
90	4 548	1 137	291	73	36	18	9	4,5

Le **Tableau 8** compare les diamètres et nombre de grains déduits par les deux approches présentées pour des échantillons du secteur de Beardmore-Geraldton (les mêmes que ceux des fractions fines présentés auparavant). On constate d'abord que dans 8 cas sur 9, les nombre de grains déduits par les deux approches indépendantes sont d'un ordre de grandeur semblable. Seul l'échantillon #8045 donne une forte différence. Les diamètres effectifs sont également dans le même ordre de grandeur dans les deux cas. On note toutefois que le nombre de grains effectifs tend à être plus élevé par la méthode du compte des grains.

Selon une méthode de calcul ou l'autre, le nombre de grains d'or effectifs dans le concentré de minéraux lourds atteint rarement le nombre requis de 20 particules. Ceci indique que les concentrés de minéraux lourds sont fortement influencés par l'effet pépite et que la reproductibilité est plutôt faible. Deux facteurs sont à l'origine de cette faible reproductibilité: 1) le diamètre effectif des grains qui relativement grossier 2) le faible taux de récupération de l'or dans le concentré.

Tableau 8. Comparaison du calcul du nombre de grains effectifs dans le concentré de minéraux lourds pour la méthode granulométrique et par réanalyses. Tous les calculs supposent des grains en forme de disques dont le diamètre est cinq fois l'épaisseur. Données du Dossier Public 2266, CGC.

Éch	Concentration normalisée (ng par g)	Diamètre effectif calculé par compte/ observations grains (microns)	Diamètre effectif calculé par réanalyses (microns)	Nombre de grains effectifs calculé par observation grains	Nombre de grains attendu par réanalyses
8008	2,40	127	137	7,2	4
8010	0,59	72	136	2,8	1,25
8040	6,60	196	211	11,6	4
8041	1,41	108	108	8,6	5
8042	1,86	434	221	1,0	0,9
8043	1,09	222	177	2,56	1,25
8044	0,85	117	134	6,9	2
8045	1,12	103	34	11	125
8046	0,45	52	94	4	2,75

Comparaison minéraux lourds vs fractions fines

On peut finalement comparer le nombre de particules attendu dans les concentrés de minéraux lourds par rapport aux fractions fines, pour les mêmes échantillons (**Tableau 9**). Les données nous permettent de constater qu'en général ni les fractions fines ni les minéraux lourds ne donnent une bonne reproductibilité dans la majorité des cas. Les données nous indiquent également que les minéraux lourds n'améliorent pas vraiment la reproductibilité des analyses d'or, à tout le moins dans le cas des échantillons du secteur de Beardmore-Geraldton.

Tableau 9. Comparaison du nombre de grains attendu dans les minéraux lourds et les fractions fines. Données du Dossier Public 2266, CGC.

Éch	Minéraux lourds Nombre de grains effectifs calculé par observation grains	Minéraux lourds Nombre de grains effectifs attendu par réanalyses	Fraction fine Nombre de grains attendu par réanalyses
8008	7,2	4	0,23
8010	2,8	1,25	125
8040	11,6	4	25
8041	8,6	5	6
8042	1,0	0,9	4
8043	2,56	1,25	2,26
8044	6,9	2	4
8045	11	125	4
8046	4	2,75	2,75

Sommaire: or dans les minéraux lourds

La concentration en minéraux lourds varie d'un échantillon à l'autre. Pour une même quantité d'or dans l'échantillon, la valeur analysée en or variera donc. Il est recommandé de normaliser les valeurs en or selon le poids du concentré et le poids de l'échantillon traité pour les minéraux lourds.

Les résultats d'analyse de minéraux lourds ne sont pas comparables entre laboratoires, même si les techniques utilisées sont en apparence identiques. La quantité de minéraux lourds extraite, la quantité d'or extraite et le taux de récupération de l'or dans le concentré varient selon les laboratoires.

Une quantité importante de l'or à grains fins (<63 microns) est perdue lors de la concentration des minéraux lourds. Le pourcentage de l'or total récupéré dans les concentrés de minéraux lourds varie de 5 à 80 %.

L'approche granulométrique et l'approche par réanalyses du calcul de la reproductibilité des concentrés de minéraux lourds pour l'or suggèrent que le nombre de particules effectives est nettement insuffisant dans la plupart des concentrés pour obtenir une reproductibilité adéquate de $\pm 50\%$ à 95 % de confiance. L'analyse du concentré n'est en général pas représentative de la quantité réelle d'or de l'échantillon, sauf dans le cas de fortes concentrations en or (valeurs normalisées >4 ppb ou valeurs analysées de 800 ppb avec facteur de concentration des minéraux lourds de 200).

En comparaison aux fractions fines, l'analyse du concentré de minéraux lourds pour l'or n'améliore pas la reproductibilité des échantillons.

3.2.3 Minéralogie des concentrés de minéraux lourds (or et autres minéraux)

Les concentrés de minéraux lourds peuvent être examinés au microscope binoculaire pour identifier, compter et caractériser les grains d'or qui sont présents ainsi que d'autres minéraux indicateurs utiles comme les sulfures, oxydes, etc. (Averill, 1988; DiLabio, 1995; Averill, 2001; McClenaghan, 2001). La discussion qui suit se concentre sur les grains d'or, qui constituent l'analyse la plus fréquemment utilisée pour l'exploration aurifère.

Taille des grains d'or observés

La taille des grains d'or qui peuvent être observés varie de 10 à 2 000 microns; la taille de 10 microns est la taille minimale à laquelle les grains peuvent être observés au microscope binoculaire (Averill, 1988). Quarante à quatre-vingt-dix pourcent (80-90 %) des grains sont de taille silt et moins (<63 microns) (Averill, 2001; McClenaghan, 2001). Il faut noter toutefois le taux de récupération des grains est de plus en plus faible à mesure que la taille des grains d'or diminue (voir section 3.3.2).

Normalisation de l'abondance des grains

Pour obtenir des résultats plus comparables entre échantillons, il est utile de normaliser le nombre de grains sur la taille de l'échantillon traité (normalement la fraction < 2 mm). Le nombre de grains peut être normalisé en grains par kg ou grains par 10 kg.

Abondance moyenne des grains d'or dans les till

L'abondance générale (c.-à-d. le bruit de fond) des grains d'or varie de 0,1 grain par kg dans les secteurs de roches du Paléozoïque, jusqu'à 2 grains par kg en aval des grandes ceintures volcanosédimentaires archéennes (Averill, 2001). En Abitibi, l'abondance des grains varie de moins de 1 grain par 10 kg au nord à plus de 5 grains par 10 kg à la limite sud (**Figure 41**).

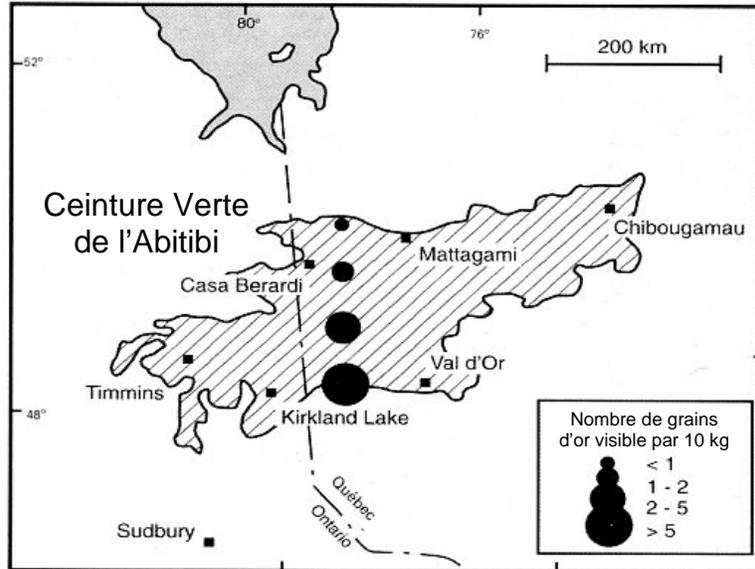


Figure 41. Variations régionales du nombre de grains d'or dans le till en Abitibi (tiré de McClenaghan, 2001).

Morphologie des grains

Avec le transport glaciaire, les grains d'or passent de leur état initial parfait (« pristine ») à un état modifié (« modified ») puis à un état refaçonné (« reshaped ») (**Figure 42**). Selon la dynamique glaciaire, ces modifications peuvent se produire sur une plus ou moins grande distance de transport.

Morphologie des grains d'or

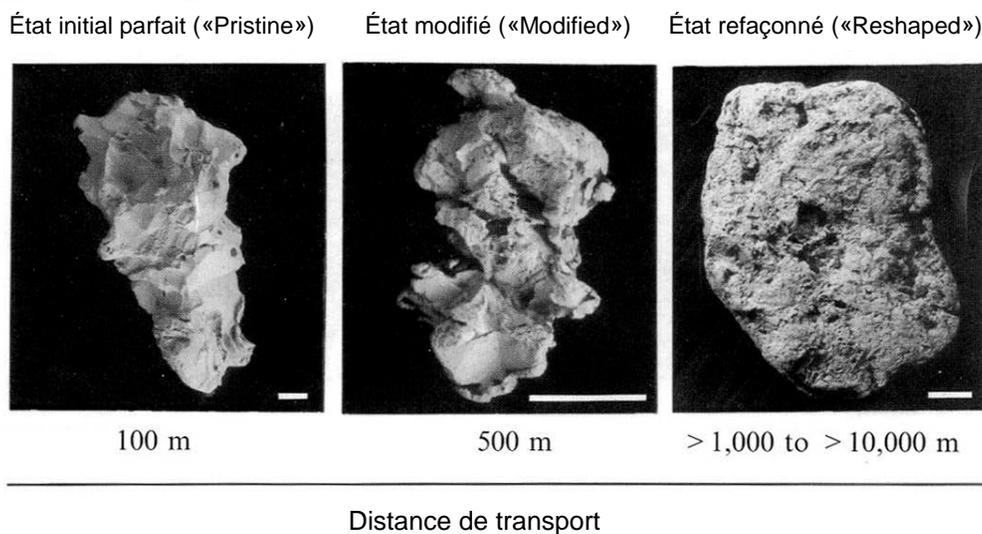


Figure 42. Morphologie des grains d'or typiques selon la distance de transport. Tiré de Averill, 2001.

En général, les grains sont dans un état parfait à moins de 100 m de transport, modifiés jusqu'à 500 m et refaçonnés après 1 000 m de transport. Toutefois, dans certains cas, lorsque la glace s'est déplacée très rapidement, ces changements peuvent se produire sur 5-10 km.

Il faut être prudent dans l'interprétation de la distance de transport par la forme des grains car la forme des grains d'or dans la source peut être variable. De plus, l'or peut être libéré de fragments de roche transportés dans le till à une grande distance de la source (McClenaghan, 2001).

Trains de dispersion des grains d'or à partir des minéralisations

La plupart des trains de dispersion identifiés par les grains d'or sont moins de 1 km de long (**Figure 43**). La plupart des grains sont donc de forme parfaite à modifiée. À mi-chemin dans le train de dispersion, le nombre de grains est typiquement de 2 à 4 grains par kg (20 à 40 grains par échantillon de 10 kg).

Ceinture	Nom du gisement	Longueur du train de dispersion* (m)		Nombre de grain par kg	Diamètre moyen grains d'or (µm)
		Tracé	Est. totale		
Abitibi	Belore	400	400	2	50-100
Abitibi	Cooke Mine [†]	800	1000	Encapsulated	-
Abitibi	Golden Pond West	400	[‡] 400	3	50-100
Abitibi	Golden Pond	400	[‡] 500	2	50-75
Abitibi	Golden Pond East	800	[‡] 1000	6	25-75
Abitibi	Orenada	100	200	2	25-75
Abitibi	Kiena	100	300	3	10-75
Abitibi	Chimo	600	1000	4	50-75
La Ronge	EP** (Waddy Lake)	600	2000	10	10-100
La Ronge	Star Lake	300	800	2	10-50
La Ronge	Tower Lake	7000	[‡] 7000	10	10-50
La Ronge	Bakos	2000	2000	20	25-50
Lynn Lake	Farley Lake	400	400	1	25-75
Humber	Devil's Cove	2000	2000	6	10-100
Rainy River	17 Zone	2000	^{††} 15 000	10	10-50

* Basé sur un minimum de 10 grains d'or de taille et de forme similaire pour un standard de 10 kg pour une trainée d'or libre et, qui coïncide avec les hautes teneurs en or et en métaux de bases dans des tills non altérés «encapsulant» les trainées aurifères.

[†] Gisement d'or «encapsulé»

[‡] Trainée réduite et/ou dispersée par l'érosion durant le dernier avancé glaciaire.

** Gisement orienté parallèlement à l'écoulement glaciaire.

^{††} Longueur de la trainée augmentée par une auréole d'altération riche en or, mesurant 5 km² et entourant le gisement aurifère.

Figure 43. Exemples de trains de dispersion identifiés par les grains d'or dans le till (tiré de Averill, 2001).

Reproductibilité des comptes de grains d'or

La discussion de la section 3.1 sur la reproductibilité de mesures directes de l'or dans le till s'applique facilement aux comptes des grains d'or dans le till. L'application est en fait beaucoup plus directe que pour les analyses géochimiques.

Le nombre de grains d'or minimal pour obtenir une reproductibilité de $\pm 50\%$ à 95% de confiance est de 20. On peut reprendre les données du secteur de Beardmore-

Geraldton et les comparer avec les comptes de grains dans ces échantillons pour comparer la reproductibilité des différentes méthodes pour ces échantillons.

L'examen des résultats de reproductibilité montre que sur les 9 échantillons de till aurifère, 5 dépassent le seuil de reproductibilité par le nombre de grains réels observés, comparé à 2 pour les fractions fines et un seul pour la géochimie des minéraux lourds. Dans le cas de l'échantillon de minéraux lourds, une seule des deux approches donne une bonne reproductibilité pour l'échantillon.

Tableau 10. Comparaison du nombre de grains effectifs attendu dans le concentré de minéraux lourds, dans les fractions fines et du nombre de grains réels observés. Données du Dossier Public 2266, CGC. Les cellules en jaunes sont celles qui dépassent le seuil de 20 particules.

Éch	Analyse géochimique minéraux lourds Nb grains effectifs calculé par observation grains	Analyse géochimique minéraux lourds Nb grains effectifs attendu par réanalyses	Fraction fine Nb de grains attendu par réanalyses	Nombre de grains total observé
8008	7,2	4	0,23	33
8010	2,8	1,25	125	3
8040	11,6	4	25	269
8041	8,6	5	6	41
8042	1,0	0,9	4	9
8043	2,56	1,25	2,26	10
8044	6,9	2	4	24
8045	11	125	4	35
8046	4	2,75	2,75	10

On peut également comparer la reproductibilité des analyses avec les seuils d'anomalies proposés pour les comptes de grains. Par exemple, le seuil d'anomalie proposé pour la région de Timmins est de 5 grains pour des échantillons standards de 10 kg de till. Ce nombre de 5 grains est insuffisant pour donner une bonne reproductibilité. Ceci signifie que pour les valeurs près du bruit de fond, il reste une bonne quantité d'imprécision sur la décision de considérer des échantillons comme anormaux ou non.

Sommaire pour les concentrés de minéraux lourds

Le compte et la caractérisation des grains d'or permet donc d'obtenir de l'information importante sur les anomalies aurifères. Ceci permet par exemple de distinguer dans le concentré, les cas de hautes valeurs géochimiques en or causées par un ou deux gros grains refaçonnés (moins intéressantes pour l'exploration) des anomalies géochimiques

plus basses mais causées par un très grand nombre de petits grains en parfait état (beaucoup plus intéressantes) n=2001).

Le compte des grains d'or donne une mesure qui semble plus représentative que la géochimie de la fraction fine ou des minéraux lourds pour l'or.

3.3 Synthèse des méthodes d'analyses du till pour l'exploration aurifère

Chaque méthode a donc ses avantages et ses inconvénients et aucune n'est auto-suffisante en elle-même. Les différentes méthodes peuvent possiblement être considérées comme complémentaires. Par exemple, l'analyse de la fraction fine mesure efficacement l'or en fines particules alors que le concentré de minéraux lourds est efficace pour détecter l'or plus grossier. Le **Tableau 11** résume les principaux avantages et inconvénients des trois grandes méthodes.

Il n'y a pas de consensus dans la littérature sur la ou les méthodes optimales à utiliser pour l'exploration de l'or (McMartin et McClenaghan, 2001). Il peut être intéressant de réaliser les trois types d'analyses si possible (McClenaghan, comm. pers., 2010). C'est particulièrement vrai aux premiers stades d'une campagne d'exploration, lorsque les caractéristiques des anomalies aurifères dans le till dans un secteur donné sont encore peu connues. Des levés d'orientation devraient, si possible, être réalisés pour comparer l'efficacité des trois méthodes dans un contexte donné. D'autre part, dans plusieurs campagnes d'échantillonnage de till, ce sont probablement les coûts pour réaliser l'échantillonnage qui sont les plus élevés et non les coûts d'analyse. Lorsque la prise d'échantillons est ainsi coûteuse, il peut être préférable de vouloir obtenir toute l'information possible à partir du matériel échantillonné. Toutefois, il serait pertinent de comparer de façon objective l'utilité de ces différents types d'analyse dans différents cas de dispersions à partir des minéralisations.

Tableau 11. Principaux avantages et inconvénients des principales méthodes d'analyse du till pour l'exploration aurifère.

Méthode	Avantages	Inconvénients
Géochimie fraction <63 microns Au + traceurs	<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteux et rapide • Détecte l'or en très fines particules (silts fins et argiles) • Permet de détecter les traceurs mobiles (ex: As, Sb, Cu) quand le till est oxydé 	<ul style="list-style-type: none"> • Reproductibilité mauvaise à moyenne pour Au (effet pépite fort à moyen)
Géochimie concentré minéraux lourds Au + traceurs	<ul style="list-style-type: none"> • Concentre l'or pour l'analyser avec une meilleure précision analytique • Détecte l'or inclus dans les 	<ul style="list-style-type: none"> • Reproductibilité mauvaise pour Au (fort effet pépite) • Ne détecte pas bien l'or en très fines particules

Méthode	Avantages	Inconvénients
	<ul style="list-style-type: none"> sulfures ou couverts de croûtes d'oxydes non-détectés visuellement Détecte l'or de taille silts grossiers à sables Meilleur ratio signal sur bruit que fractions fines? 	<ul style="list-style-type: none"> Difficile de bien détecter les anomalies en traceurs mobiles si le till est oxydé (ex: As, Sb, Cu) ou en sulfures à grains fins Résultats inter-laboratoires en général non-comparables
Minéralogie des concentrés de minéraux lourds (or et autres minéraux)	<ul style="list-style-type: none"> Évaluation qualitative de la distance de la source minéralisée (morphologie grains or) Relativement meilleure reproductibilité pour la mesure de l'or par compte des grains (effet pépite présent mais plus faible que autres méthodes) 	<ul style="list-style-type: none"> Ne détecte pas bien l'or en très fines particules Ne détecte pas l'or inclus dans les sulfures Ne détecte pas l'or couvert de croûtes d'oxydes secondaires (till oxydé) Ne détecte pas les minéraux traceurs de l'or si le till est oxydé (ex: arsénopyrite) Méthode la plus coûteuse et lente

3.4 Récurrence des anomalies selon différentes méthodes

Les sections précédentes permettent de constater que les différentes méthodes d'analyses directes de l'or dans le till sont fondamentalement différentes. La question de la récurrence des anomalies peut se poser. Obtient-on les mêmes anomalies par une méthode ou l'autre?

La récurrence des anomalies des 95e, 97 et 99e centiles en or ont été comparées dans le levé du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990), du secteur de Beardmore-Geraldton (**Tableau 12**). Le levé contient 852 échantillons. Les trois mesures comparées sont l'or analysé par pyroanalyse dans la fraction <63 microns, l'or dans le concentré de minéraux lourds non-magnétique normalisé en ng par g de till, et le nombre de grains d'or observé dans le concentré par kg de till.

La majorité des anomalies du 95e et du 97e centile dans un indicateur ne sont pas des anomalies selon les autres. Le taux de récurrence tend toutefois à augmenter graduellement du 95e au 99e centile. Ceci est une conséquence probable de deux facteurs discutés précédemment. D'abord, les différentes méthodes analytiques mesurent des attributs différents de l'or dans le till. Ensuite, les mesures sont influencées par l'effet pépite et sont par conséquent souvent peu représentatives.

Tableau 12. Récurrence des anomalies en Au dans la fraction <63 microns, dans les concentrés de minéraux lourds normalisés et dans les nombres de grains d'or par 10 kg.

Nombre de mesures anomaliques	Nb anomalies >95 centile (% total)	Nb anomalies >97e centile (% total)	Nb anomalies >99e centile (% total)
1 sur 3	64 (64,5 %)	31 (58,4 %)	13 (48,1 %)
2 sur 3	20 (20,3 %)	12 (22,7 %)	10 (37,1 %)
3 sur 3	15 (15,2 %)	10 (18,9 %)	4 (14,8 %)

4 DONNEES DE TILL POUR L'EXPLORATION DES METAUX DE BASE (Cu, Zn, Ni)

4.1 Fractions et méthodes analytiques typiques

Les données de till pour l'exploration des métaux de base se classent en trois principales catégories qui sont:

1. Géochimie par ICP- aqua regia et/ou activation neutronique de la fraction fine. Différentes fractions sont utilisées:
 - a. Fraction < 0,063 mm (fraction la plus utilisée par l'OGS et la CGC);
 - b. Fraction < 0,177 mm (fraction la plus utilisée pour les levés du SIGÉOM);
 - c. Fraction < 0,002 mm (peu utilisé car très coûteux).
2. Géochimie par activation neutronique des minéraux lourds non-magnétiques (densité > 3,2);
3. Comptes de minéraux indicateurs (ex: gahnite, staurotides zincifères, etc; Averill, 2001).

Historiquement, la géochimie des fractions fines a été la plus utilisée car c'est l'approche qui est la moins coûteuse et la plus facile à réaliser.

4.1.1 Fraction fine

Problèmes spécifiques à l'analyse de la fraction fine pour les métaux de base

La fraction argileuse du till est fortement enrichie en métaux usuels par rapport aux autres fractions (Shilts, 1995; Tarvainen, 1995; Klassen, 2001). Le dossier public 2616 de la CGC (Kettles, 1993), couvrant le secteur de Manitouwadge en Ontario permet de confirmer cette observation. Dans ce levé, la fraction argileuse (< 0,002 mm) a été analysée séparément, en plus de la fraction silt+argile (< 0,063 mm). La **Figure 44**

compare par exemple la distribution des teneurs en cuivre dans les deux fractions et permet de constater que la fraction argileuse est nettement enrichie en cuivre. La **Figure 45** montre la même relation pour le zinc.

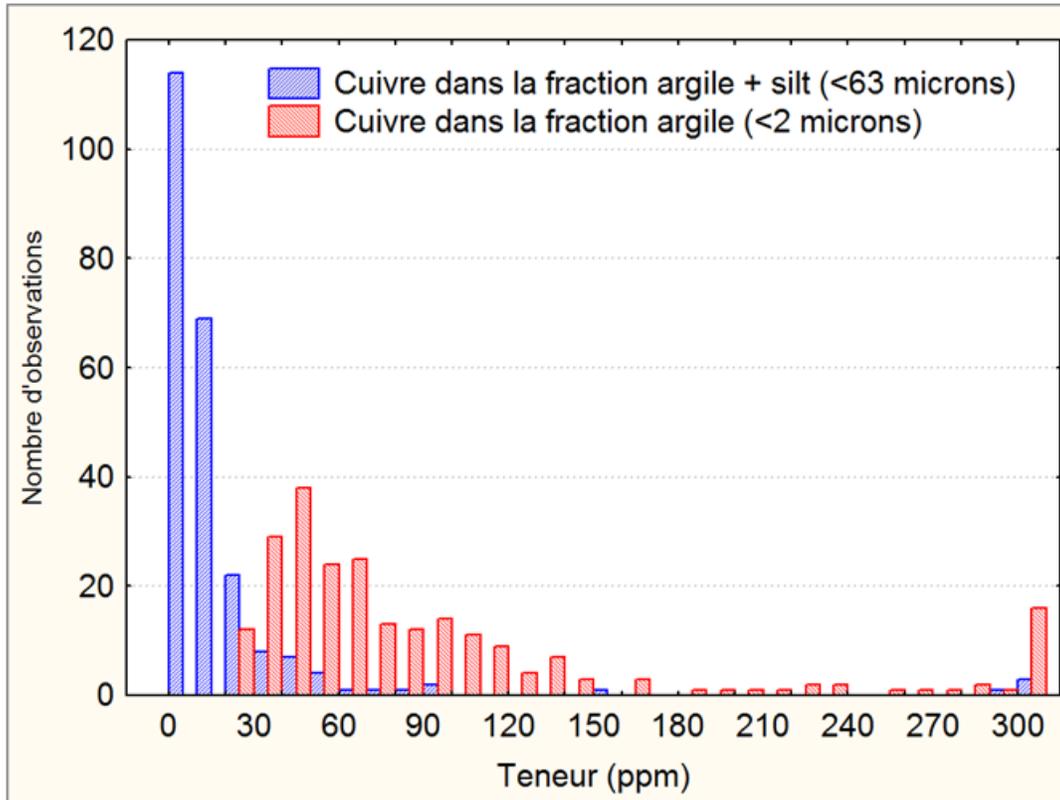


Figure 44. Teneurs en cuivre dans la fraction < 63 microns et < 2 microns. Données du Dossier Public 2616 (Kettles, 1993).

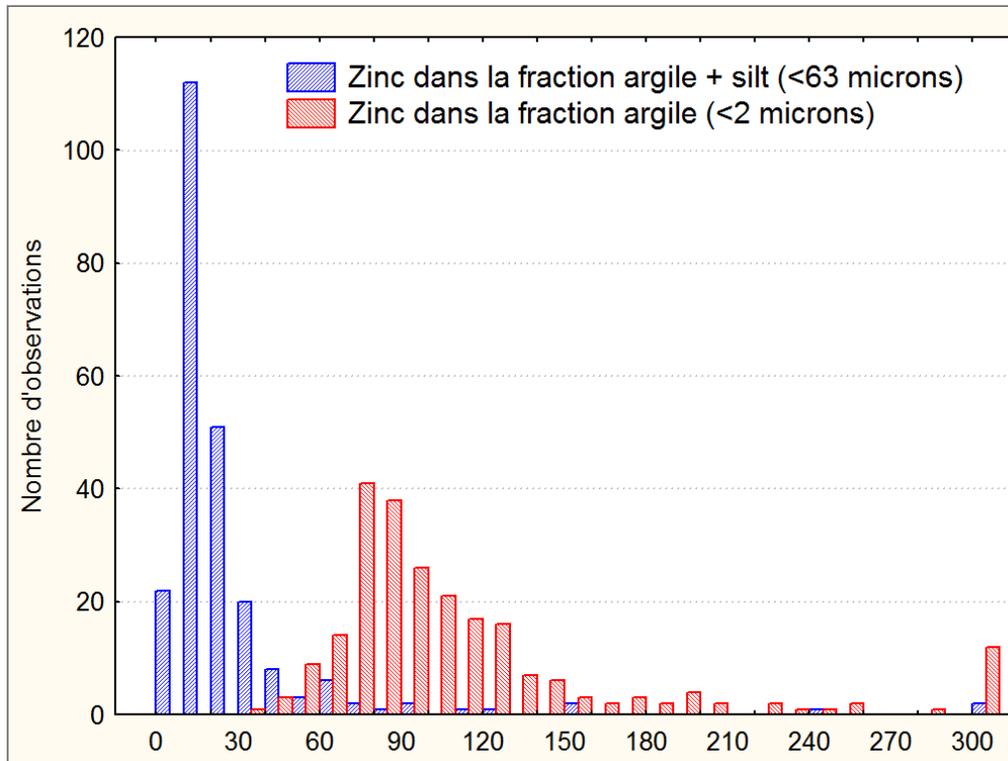


Figure 45. Teneurs en zinc dans la fraction < 63 microns et < 2 microns. Données du Dossier Public 2616 (Kettles, 1993).

Si la proportion de fraction argileuse varie de façon significative d'un échantillon à l'autre dans un levé, il est possible que l'essentiel des variations des teneurs en métaux de base de la fraction silt+argile soit essentiellement dû à cette variation de la proportion d'argiles (Shilts, 1995). On peut observer cette relation dans le dossier public 3675 de la CGC, couvrant la portion centrale de la Sous-province de l'Abitibi en Ontario. Dans ce levé, les proportions des différentes fractions ont été déterminées en laboratoire. La **Figure 46** montre la relation entre la proportion de fraction argileuse dans la fraction silt+argile et les teneurs en Zn de la fraction silt+argile. Les échantillons ont été séparés en deux selon la nature du till (till carbonaté ou non). La relation observée est très nette, en particulier pour le till carbonaté. Dans ce levé, l'essentiel des variations de teneurs en métaux est causée par la variation du pourcentage d'argiles dans les échantillons.

Cette relation entre la quantité d'argiles dans la fraction et les teneurs en métaux s'explique principalement par la minéralogie de la fraction fine du till. Selon Shilts (1995), la fraction fine (< 0,063 mm) du till peut être divisée en deux parties. La partie la plus grossière (> 0,010 mm; silts moyens et grossiers) est riche en quartz et feldspath, qui sont des minéraux relativement résistants à l'abrasion. La fraction la plus fine (< 0,010 mm; silts fins et argiles) est plutôt enrichie en phyllosilicates. Ceci est dû principalement à la résistance différentielle des minéraux qui donnent une taille terminale spécifique aux différents minéraux (Dreimanis et al., 1971).

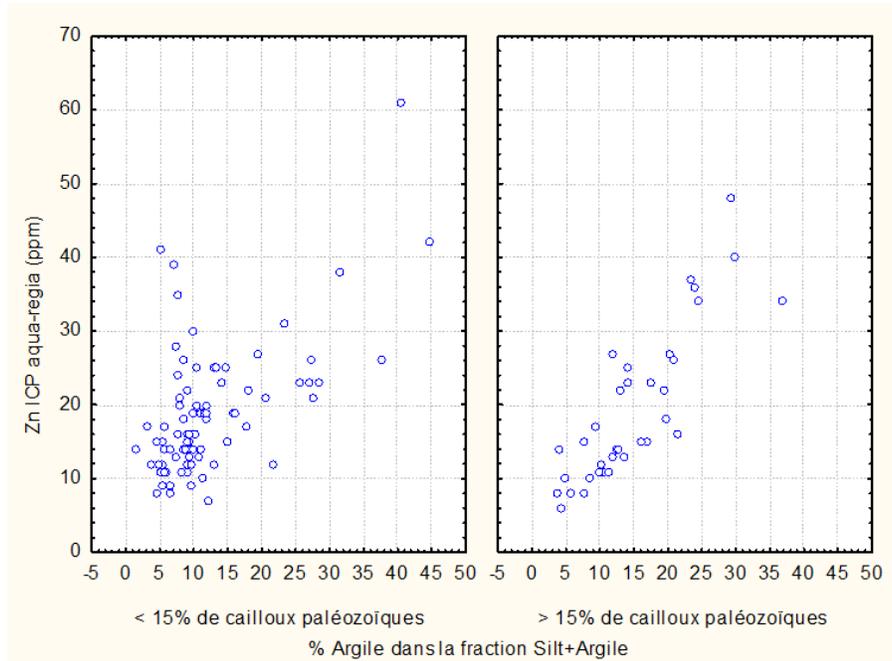


Figure 46. Teneurs en zinc de la fraction < 63 microns vs la proportion d'argile dans la fraction < 63 microns.

Thorleifson et Kristjansson (1990) ont réalisé des analyses totales de différentes fractions granulométriques de tills. Les **Figures 47, 48 et 49** présentent le quartz, l'albite et la séricite normative telle que calculés par le logiciel Normat (Piché et Jébrak, 2004) sur différentes fractions de till non-oxydé et non-carbonaté. Les résultats confirment effectivement que la fraction argileuse (< 2 microns) est enrichie en phyllosilicates et dépourvue en quartz et albite. À l'inverse, la fraction de sable fin est particulièrement enrichie en quartz par rapport aux autres fractions.

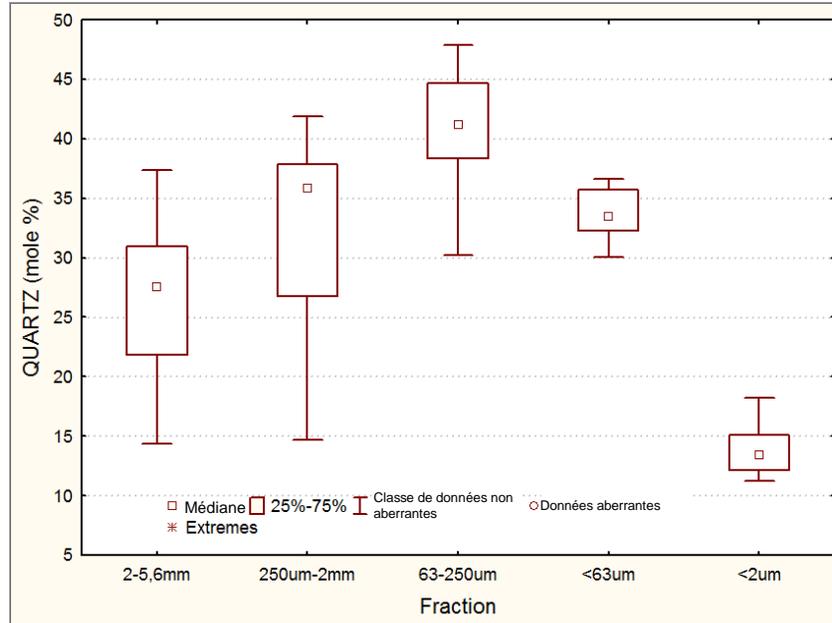


Figure 47. Quartz normatif NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

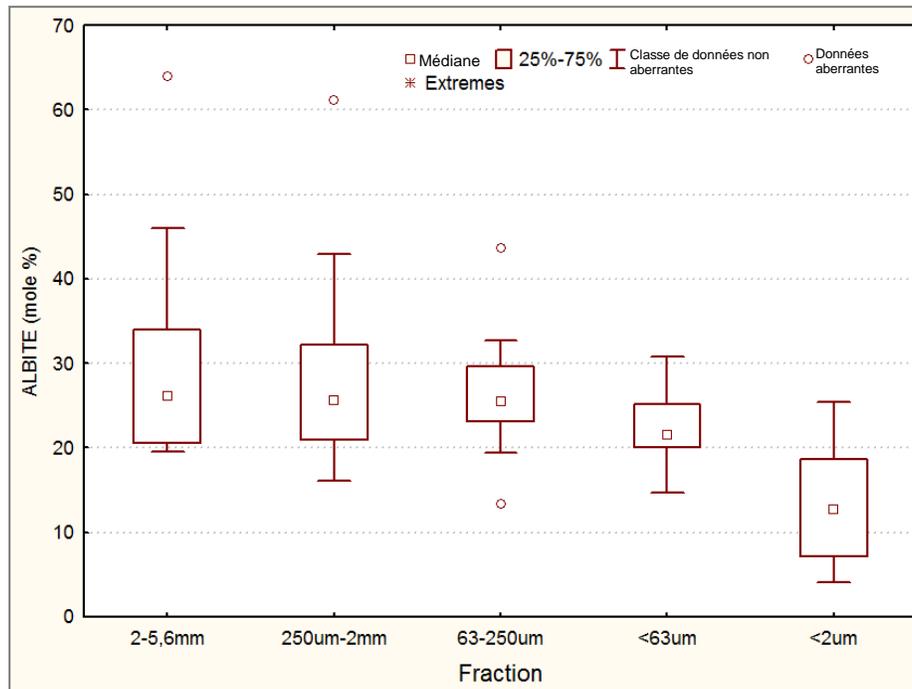


Figure 48. Albite normative NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

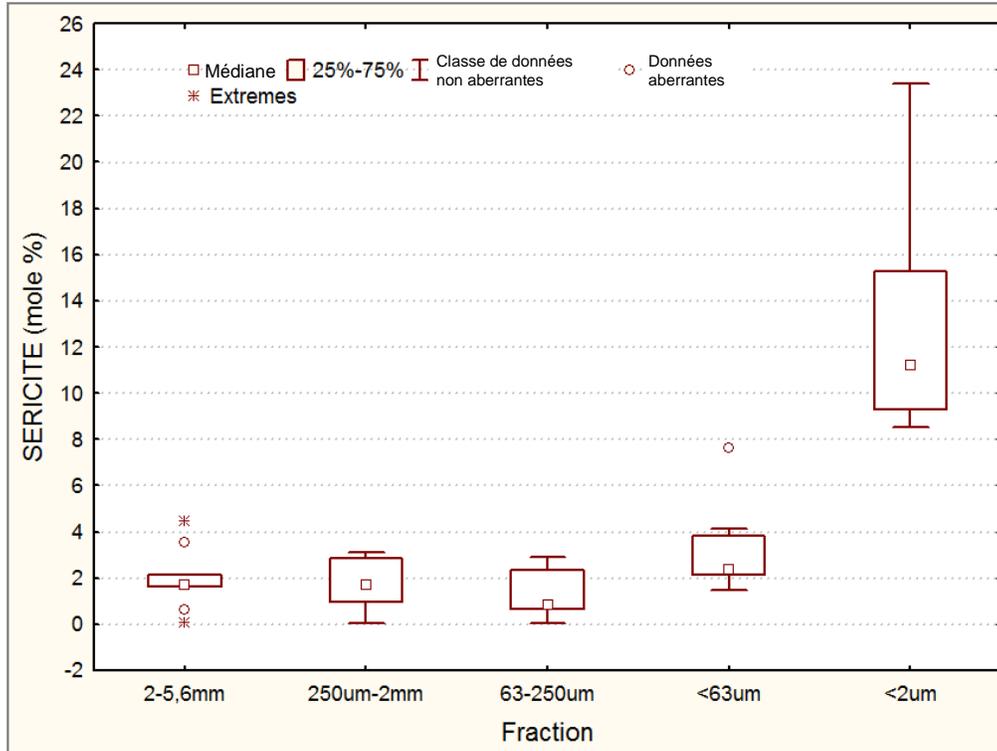


Figure 49. Séricite normative NORMAT calculé sur différentes fractions granulométriques de till (9 échantillons). Données du Dossier Public 2266 (Thorleifson et Kristjansson, 1990).

Les phyllosilicates des roches contiennent en général des teneurs en métaux usuels (Cu, Zn, Ni, Co) qui sont beaucoup plus élevées que les autres minéraux. Le **Tableau 13** montre par exemple les teneurs en métaux analysées de différents minéraux de roches métamorphiques. Dans ces trois exemples, les teneurs en métaux sont d'au moins un ordre de grandeur supérieures dans les biotites et chlorites par rapport aux autres minéraux. Les phengites et la tourmaline sont dans une moindre mesure également enrichies en métaux. Puisque les phyllosilicates sont enrichis dans les fractions les plus fines du till (argiles), ces fractions deviennent donc les plus riches en métaux.

Tableau 13. Teneurs en métaux de différents minéraux de roches métamorphiques. Les lignes en jaune indiquent les minéraux les plus enrichis en métaux dans chaque roche.

	Gneiss dioritique (Schröter et al., 2004)			Micaschiste (métapélite; El Korh et al., 2009)		Schiste vert (métabasalte; El Korh et al., 2009)	
	Co	Ni	Cu	Ni	Zn	Ni	Zn
Apatite	0,08	0,5	1,9	18	13	0,48	0,73
Biotite	76	22	360				
Muscovite	3,6	1,2	26				

	Gneiss dioritique (Schröter et al., 2004)			Micaschiste (métapélite; El Korh et al., 2009)		Schiste vert (métabasalte; El Korh et al., 2009)	
	Co	Ni	Cu	Ni	Zn	Ni	Zn
Chlorite				394	1 168	323	418
Phengite				92	112	21	25
Grenat				4	30	3,4	18
Tourmaline				80	357		
Épidote				9,9	6,3	6,4	5,6
Albite				<0,42	0,69	<1	<2,6
Quartz	0	0,03	0,08				

Selon Makinen (1995), les variations granulométriques, et, conséquemment, les variations des teneurs en métaux, sont principalement dues aux processus glaciaires. Elles expliquent l'aspect typiquement ondulé des cartes géochimiques des métaux du till, dont les ondulations se conforment aux dispersions glaciaires. Makinen (1995) présente un modèle dans lequel les différentes composantes sont illustrées (**Figure 50**).

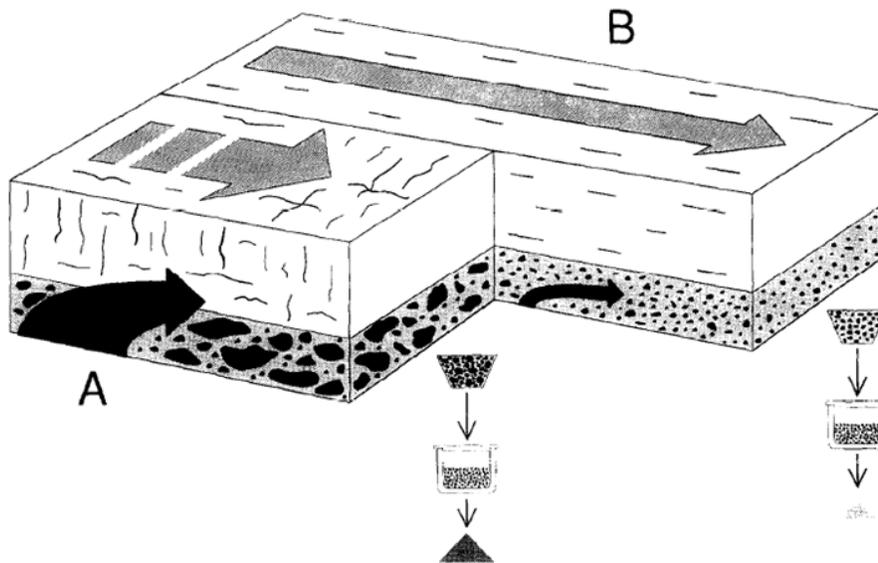


Figure 50. Relation entre l'entraînement de débris, le transport, et la composition de la fraction fine du till. (A) L'entraînement des débris de la base est effective, la distance du transport est courte et, les concentrations en Co, Cu, Fe, Mn, Ni et Zn ainsi que la proportion de micas et d'amphiboles est élevée. (B) Situation inverse.

4.1.2 Géochimie des minéraux lourds

La géochimie des minéraux lourds est souvent utilisée pour l'exploration des métaux de base. Toutefois, sa principale limitation demeure la sensibilité des teneurs en Cu, Zn et Ni au degré d'oxydation du till (voir section 2.4).

4.1.3 Minéraux indicateurs

Les minéraux indicateurs peuvent également être utiles pour l'exploration des minéralisations de métaux de base (Averill, 2001). Les minéraux utiles sont typiquement des minéraux lourds, à grains grossiers, et résistants à l'érosion mécanique et chimique. Les processus géologiques suivants forment des minéraux utiles à l'exploration (Averill, 2001):

1. Recristallisation des sulfures massifs volcanosédimentaires et de leurs altérations hydrothermales lors du métamorphisme de moyen et de haut grade;
2. Métasomatisme magmatique de haute température (skarns et greisens);
3. Réactions associées à la séparation des sulfures de Ni-Cu-Fe des magmas ultramafiques.

La majorité des minéraux utiles comme indicateurs sont des silicates et des oxydes. Comme la plupart des sulfures sont très instables dans l'environnement secondaire, ils sont peu utiles comme minéraux indicateurs. Toutefois, certains sulfures comme la chalcopryrite, la loellingite (FeAs_2) et la rammelsbergite (NiAs_2) sont suffisamment stables pour être utilisés comme indicateurs (Averill, 2001).

Plusieurs de ces minéraux sont présents à la fois dans la minéralisation, dans les roches hôtes et dans les zones d'altération périphériques aux gisements. Pour être utiles, les minéraux indicateurs doivent être rares ou absents des roches régionales non-minéralisées. De plus, la présence de deux ou plusieurs minéraux indicateurs permet de confirmer l'importance des anomalies.

Minéraux indicateurs des sulfures massifs en contexte volcanosédimentaire métamorphisés

Les minéraux indicateurs des sulfures massifs de type SMV ou SEDEX peuvent provenir autant de la minéralisation que de l'altération des encaissants. Certains des minéraux indicateurs sont communs dans le métamorphisme régional (ex: kyanite, sillimanite, orthopyroxène), ce qui peut diminuer leur utilité dans plusieurs cas. Cependant, dans certaines conditions, ils peuvent demeurer utiles (Averill, 2001). La **Figure 51** donne la liste des minéraux indicateurs utiles pour ces minéralisations.

Minéraux indicateurs	Composition chimique	Éléments indicateurs
sillimanite	Al_2SiO_5	Al
kyanite	Al_2SiO_5	Al
corundum	Al_2O_3	Al
anthophyllite	$(Mg,Fe)_7Si_8O_{22}(OH)_2$	Mg
orthopyroxène	$(Mg,Fe)_2Si_2O_6$	Mg
Mg-spinel	$MgAl_2O_4$	Mg, Al
sapphirine	$(Mg,Al)_8(Al,Si)_6O_{20}$	Mg, Al
staurolite	$(Fe,Mg,Zn)_2Al_9(Si,Al)_4O_{22}(OH)_2$	Mg (\pm Zn), Al
tourmaline	$(Na,Ca)(Mg,Fe)_3Al_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(OH)_4$	Al, B
dumortierite	$Al_7(BO_3)(SiO_4)_3O_3$	Al, B
Mn-epidote	$Ca_2(Al,Fe,Mn)_3Si_3O_{12}(OH)$	Mn
spessartine	$Mn_3Al_2Si_3O_{12}$	Mn, Al
gahnite	$ZnAl_2O_4$	Zn, Al
franklinite	$(Zn,Mn,Fe)(Fe,Mn)_2O_4$	Zn, Mn
willemite	Zn_2SiO_4	Zn
Cr-rutile	$(Ti,Cr)O_2$	Cr
barite	$BaSO_4$	Ba, S
chalcopyrite	$CuFeS_2$	Cu, S
cinnabar	HgS	Hg, S
loellingite	$FeAs_2$	As
native gold	Au	Au

Figure 51. Minéraux lourds indicateurs utiles pour l'exploration des amas de sulfures métamorphisés en contexte volcanosédimentaire (terrains glaciaire). Tiré de Averill, 2001.

Minéraux indicateurs des sulfures magmatiques de Ni-Cu

Plusieurs minéraux indicateurs sont également utiles pour l'exploration des gisements de sulfures de Ni-Cu (**Figure 52**). Il faut noter que certains de ces minéraux (ex: olivine, chromite, orthopyroxène) sont communs dans les roches non-minéralisées. Toutefois, certaines compositions sont plus favorables (ex: forstérite particulièrement magnésienne, bronzite-enstatite magnésiennes). Ils peuvent également être utiles lorsque considérés en association avec d'autres minéraux indicateurs plus spécifiques.

Plusieurs de ces minéraux se forment probablement lors de l'assimilation d'un encaissant sédimentaire sulfuré par les magmas mafiques/ultramafiques (Averill, 2001) à l'origine de la formation des magmas sulfurés. L'assimilation forme des roches hybrides alumino-magnésiennes telles que les troctolites et les norites. On y trouve donc des minéraux hybrides qui combinent Mg, Cr, Fe avec Al et Si comme l'ugarovite et hercynite. D'autres minéraux comme le rutile chromifère et le diopside chromifère peuvent également se former. Ce dernier minéral est considéré par Averill (2001) comme le plus utile pour tracer ce type de minéralisation, étant à la fois abondant et distinctif.

Minéraux indicateurs	Composition chimique	Éléments indicateurs
hercynite	FeAl ₂ O ₄	Al
olivine	(Mg,Fe)SiO ₄	Mg
orthopyroxene	(Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆	Mg
low-Cr diopside	Ca(MgCr)Si ₂ O ₆	Mg, Cr
chromite	(Fe,Mg)(Cr,Al) ₂ O ₄	Cr, Mg, Al (±Zn)
uvarovite	Ca ₃ Cr ₂ Si ₃ O ₁₂	Cr
Cr-rutile	(Ti,Cr)O ₂	Cr
chalcopyrite	CuFeS ₂	Cu, S
loellingite	FeAs ₂	As
rammelsbergite	NiAs ₂	Ni, As
sperrylite	PtAs ₂	Pt, As
PGE alloys	PGE	PGE

Figure 52. Minéraux lourds indicateurs utiles pour l'exploration des amas de sulfures de Ni-Cu magmatique (terrains glaciaire). Tiré de Averill, 2001.

4.2 Méthodes de correction des valeurs des fractions fines

4.2.1 Ratios métal sur élément

Même si les teneurs brutes en métaux de la fraction fine du till semblent influencées par les processus glaciaires, il semble que les ratios entre métaux sont peu influencés par ces processus (Makinen, 1995). Différentes transformations ont ainsi été proposées pour éliminer cet effet sur les teneurs. Shilts (1995) propose de diviser les teneurs par l'aluminium aqua-regia alors que Klassen (2001b) propose de diviser par le magnésium, en terrain non-carbonaté. Ces transformations n'ont toutefois jamais été testées sur des cas avec minéralisations et de façon limitée sur des cas de cartographie géochimique.

4.2.2 Réseaux neuronaux

Une approche alternative est de tenter d'évaluer, pour chaque échantillon, le contenu attendu en un métal recherché (ex: Cu, Zn). Cette évaluation devrait se faire en considérant ses teneurs en autres éléments qui ne sont pas particulièrement enrichis dans les minéralisations de métaux de base. Cette approche est similaire à l'approche de régression linéaire utilisée dans le cadre de projets antérieurs du CONSOREM. De plus, par prudence, les modèles ainsi que leur application devrait être restreints à un contexte géologique précis (ex: Province de Supérieur).

L'approche peut être résumée de la façon suivante:

- Choisir un contexte géologique désiré;
- Compiler toutes les données régionales de fractions fines disponibles pour le contexte (ex: tous les levés régionaux de fractions fines du Supérieur);
- Séparer les données en sous-ensembles selon les caractéristiques analytiques des échantillons (fraction analysée, extraction chimique, méthode analytique);
- Pour chaque sous-ensemble, modéliser les teneurs en métaux d'intérêt par réseaux neuronaux, à partir des autres éléments analysés par la même méthode qui ne sont particulièrement enrichis dans les minéralisations recherchées;

- Prédire les valeurs en métaux par réseaux neuronaux et comparer avec la valeur analysée. L'anomalie est alors valeur analysée - valeur prédite;
- Calculer le centile correspondant à la résiduelle par rapport au sous-ensemble de référence.

Fraction < 63 microns, extraction aqua-regia, analyses ICP, roches archéennes de la Province de Supérieur

Ces analyses contiennent plusieurs éléments majeurs des roches et sont les plus utilisées pour les tills hors du Québec. Les éléments Al, Ba, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn, Sr et V ont servi d'éléments explicatifs. Des modèles séparés ont été construits pour Cu et Zn. Les paramètres suivants ont été utilisés pour la modélisation:

- Réseau de type "back-propagation", apprentissage par Levensberg, 18 neurones sur le niveau caché
- Les échantillons ayant des teneurs clairement anormales en Zn (> 300 ppm, ~98e centile) ou en Cu (>200 ppm, ~98e centile) ont été enlevés
- Séparation des échantillons en 3 groupes: 50 % pour l'entraînement, 25 % pour la contre-validation en cours d'entraînement, 25 % pour le test.

Les levés suivants contiennent des données ayant ces caractéristiques. Ces levés couvrent différents secteurs de la Province de Supérieur et représentent un échantillonnage assez représentatif des contextes géologiques favorables à l'exploration dans ces roches archéennes (**Figure 53**).

- MRNF:
 - Levé 1993005 (SO de Chibougamau, Québec)..
- Commission Géologique du Canada:
 - OF-2266 (Secteur Beardmore-Geraldton, Ontario).
- Ontario Geological Survey:
 - MRD-015 (Ceinture de Swayze, Ontario).
 - MRD-021 (Separation Lake, Ontario).
 - MRD-024-029 (Peterlong-Radisson, sud Abitibi, Ontario).
 - MRD-044-050 (Shebandowan, Ontario).
 - MRD-053-061 (Sudbury et est de Sudbury).
 - MRD-074

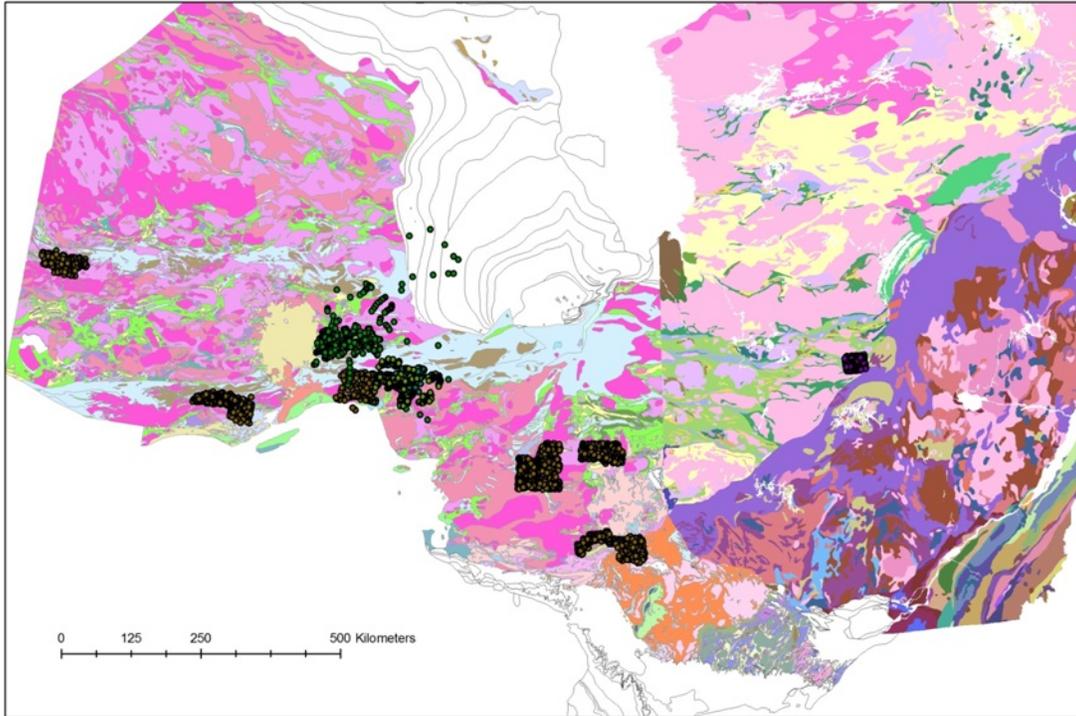


Figure 53. Localisation des échantillons utilisés pour modéliser la composition de la fraction fine du till par réseaux neuronaux.

Le **Tableau 14** montre les corrélations de Spearman entre la valeur prédite et la valeur analysée pour les échantillons de test de la banque de référence (25 % des 6 787 total). Ces corrélations sont élevées (sauf pour Pb) et indiquent que les modèles expliquent bien les teneurs de bruit de fond en métaux.

Tableau 14. Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, till <63 microns, analyses ICP avec extraction aqua-regia.

Élément	Corrélation de Spearman
Cu	0,775
Zn	0,864
Co	0,838
Ni	0,871
Pb	0,625

L'utilisation d'une banque de référence permet également de fixer des seuils globaux pour les valeurs résiduelles applicables à ces données. Ces seuils pourront remplacer les seuils calculés par levés qui sont normalement utilisés. Le **Tableau 15** montre quelques centiles des résiduelles calculés sur la banque de référence qui permettent de juger de l'ampleur des anomalies.

Tableau 15. Seuils d'anomalies globaux sur les valeurs résiduelles en métaux. Modèle par réseaux neuronaux, till <63 microns, analyses ICP avec extraction aqua-regia.

Élément	25e centile	50e centile	75e centile	90e centile	95e centile	97e centile	99e centile
Cu	-0,291	0,001	0,309	0,635	0,876	1,058	1,512
Zn	-0,171	-0,011	0,153	0,392	0,591	0,766	1,260
Ni	-0,169	-0,013	0,155	0,337	0,476	0,586	0,877
Co	-0,150	0,011	0,175	0,352	0,494	0,590	0,845
Pb	-0,330	0,036	0,377	0,746	0,963	1,146	1,62

Il est intéressant de connaître le comportement des valeurs résiduelles par rapport à différents paramètres. Les valeurs résiduelles en zinc seront prises ici comme exemple. D'abord, on peut regarder la variation des résiduelles selon les levés de la banque de référence (**Figure 54**). Dans l'ensemble, les distributions sont assez semblables d'un levé à l'autre et sont centrées sur 0, ce qui est désiré.

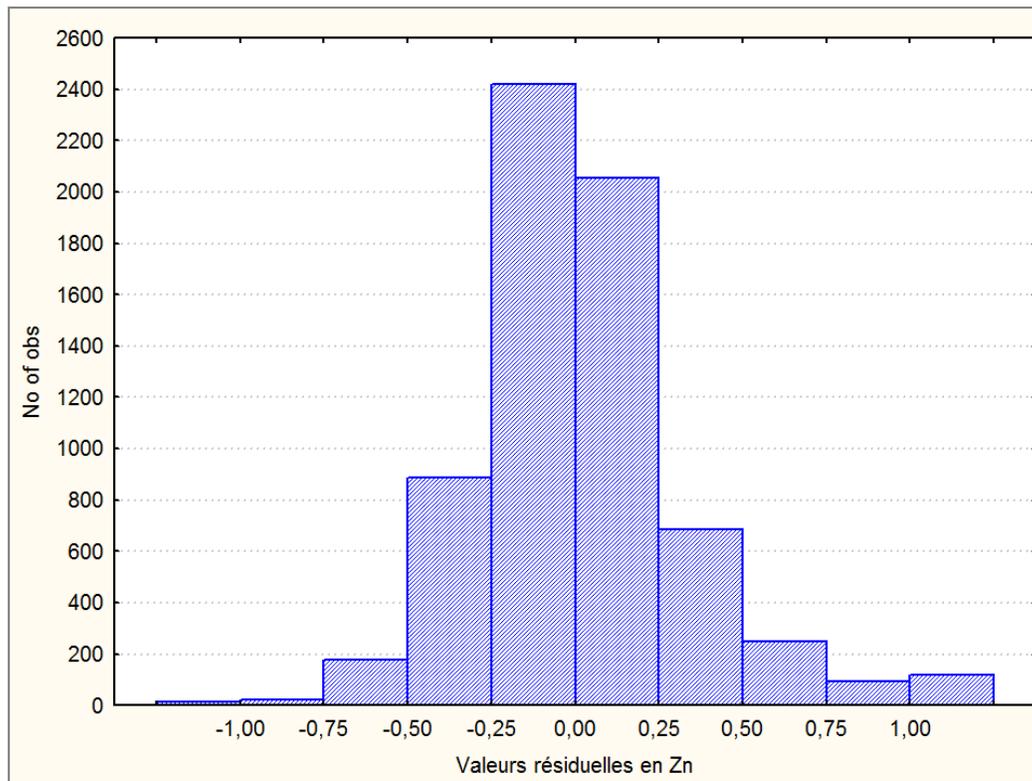


Figure 54. Distribution des valeurs résiduelles en zinc, modélisation par réseaux neuronaux de la fraction <63 microns du till, analyses ICP avec extraction aqua-regia.

D'autres tests peuvent être réalisés sur le levé OF3675, du secteur de Timmins. Il s'agit d'un levé de 134 échantillons qui a intentionnellement été omis de la banque de référence pour être testé de façon indépendante (**Tableau 16**). Ce levé contient

également de nombreux paramètres auxiliaires qui permettent de juger du comportement des résiduelles.

Tableau 16. Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, modèle <63 microns avec analyses ICP avec et extraction aqua-regia, levé test de Timmins (Dossier Public 3675, CGC).

Élément	Corrélation de Spearman
Cu	0,6880
Zn	0,62
Co	0,735
Ni	0,791
Pb	-0,14

Il est d'abord intéressant de constater que les résiduelles, contrairement aux valeurs brutes, sont indépendantes du pourcentage d'argiles dans la fraction silt+argile (**Figure 55** vs **Figure 56**). Par contre, les résiduelles sont affectées par l'oxydation comme le sont les valeurs brutes (**Figure 57**). Ceci est probablement causé par un lessivage du zinc lors de l'oxydation du till.

Il faut rappeler finalement que cette méthode doit être appliquée uniquement aux échantillons ayant les paramètres analytiques énoncés (c.-à-d. fraction <63 microns, analyses ICP aquaregia).

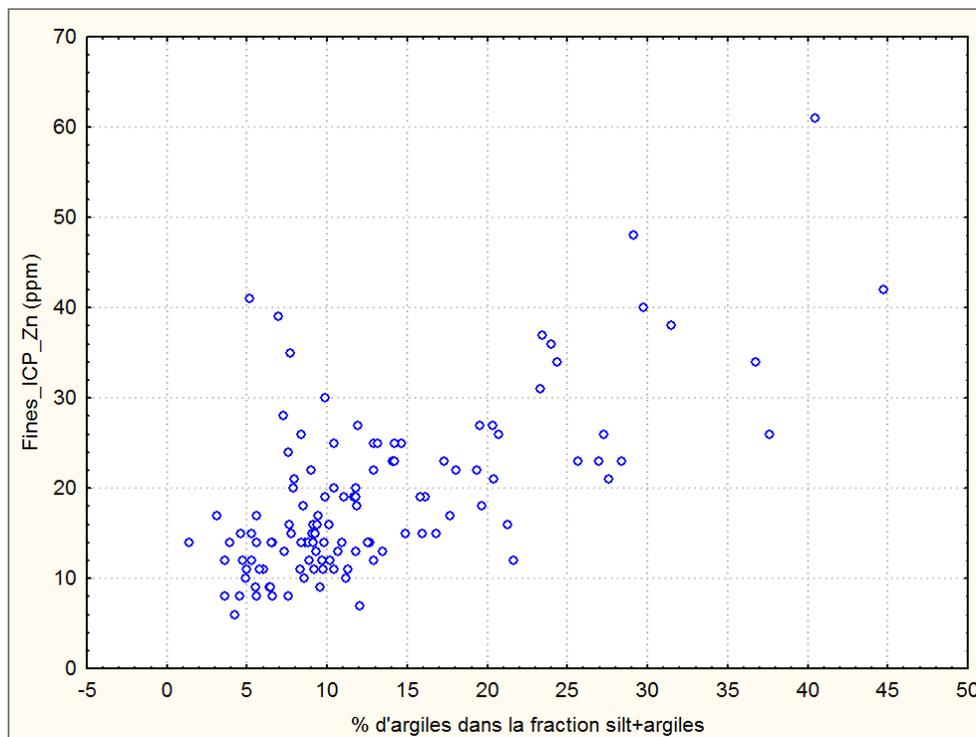


Figure 55. Teneur en zinc et pourcentage d'argiles dans la fraction <63 microns. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

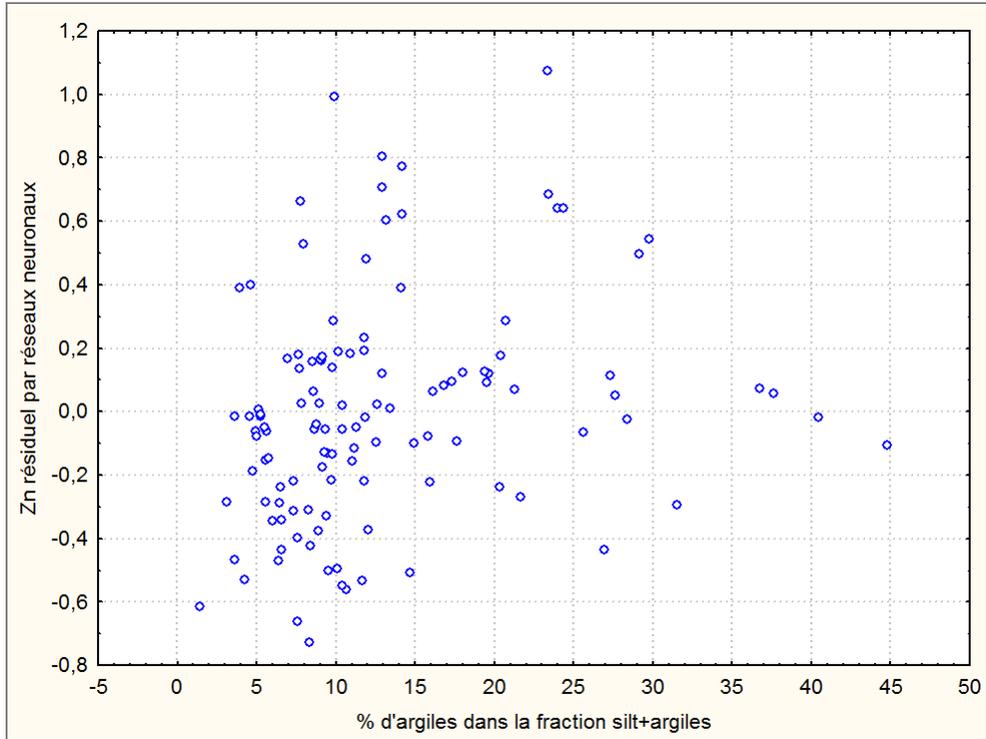


Figure 56. Résiduelles en zinc par réseaux neuronaux et proportion d'argiles dans la fraction <63 microns. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

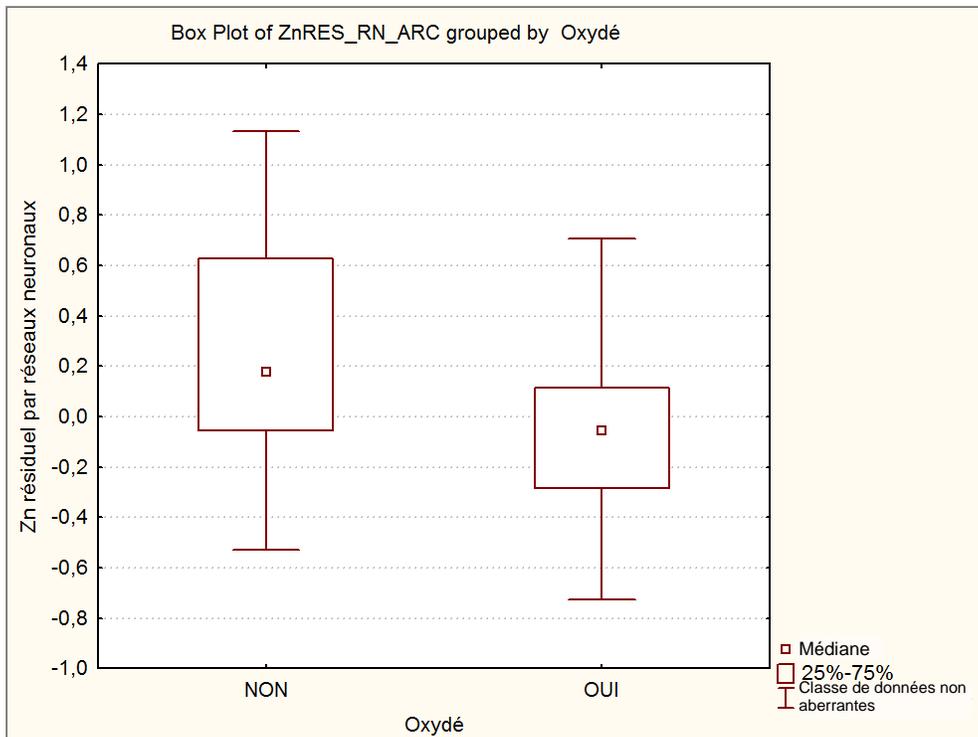


Figure 57. Résiduelles en zinc par réseaux neuronaux et oxydation du till. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

Fraction < 177 microns, extraction HNO₃, analyses AA

Ce modèle s'applique principalement aux levés de l'Abitibi au Québec réalisé en 1971. Ce levé contient seulement Cu, Co, Mn, Pb, Ni, et Zn comme éléments analysés. Pour la modélisation, Ni, Co et Mn ont été retenus pour modéliser Cu et Zn, ces éléments n'étant pas en général pas particulièrement enrichis dans les minéralisations Cu-Zn de type SMV.

- Réseau de type "back-propagation", apprentissage par Levensberg, 18 neurones sur le niveau caché.
- Séparation des échantillons en 3 groupes: 50 % pour l'entraînement, 25 % pour la contre-validation en cours d'entraînement, 25 % pour le test.

Le **Tableau 17** montre les corrélations de Spearman entre la valeur prédite et la valeur analysée pour les échantillons de test de la banque de référence (25 % des 7 871). La corrélation pour Cu est élevée et se compare à celle obtenue pour le modèle ICP aqua-regia pour la fraction de moins 63 microns. La corrélation pour le zinc est toutefois plus faible.

Tableau 17. Corrélations de Spearman entre valeurs analysées et valeurs modélisées par réseaux neuronaux, till <177 microns, extraction HNO₃

Élément	Corrélation de Spearman
Cu	0,784
Zn	0,638

4.2.3 Test de l'efficacité des corrections

L'efficacité de ces méthodes de rehaussement des anomalies a été testée sur le cas de la mine Kidd Creek en Ontario. Cet exemple a déjà été présenté à la section 2.4.1. Les teneurs dans les fractions fines recalculées en centiles par rapport à l'ensemble du levé OF-3675 sont relativement décevantes (**Tableau 18**). En plus des valeurs brutes, différentes corrections ont été testés: résiduelles par réseaux neuronaux (section 4.2.2), et ratios entre métaux et différents éléments majeurs (section 4.2.1). Les centiles calculés sur les résultats de ces corrections sont présentées.

Les résultats du **Tableau 18** indiquent que certaines corrections améliorent nettement le signal de l'échantillon de Kidd Creek dans les fractions fines. La meilleure correction est le ratio métal sur aluminium suivi par la valeur résiduelle par réseaux neuronaux,. Ces deux corrections permettent donc de passer de valeurs qui ne sont pas des anomalies à des anomalies fortes à très fortes. Le ratio métal / potassium donne des résultats plus moyens alors que le ratio métal / manganèse ne donne aucune amélioration du signal.

Tableau 18. Valeurs recalculées en centiles pour les échantillons à proximité des mines Kidd Creek et Canadian Jamieson. Données du Dossier Public 3675, CGC (McClenaghan et al., 1998).

Méthode	Élément	Kidd Creek, 500m SE mine
Fines <63 microns ICP Brut	Cu	73
	Zn	82
	Pb	54
Fines <63 microns ICP Résiduelles réseaux neuronaux	Cu	94,7
	Zn	97,7
	Pb	83
Fines <63 microns ICP Ratio Métal / Potassium	Cu	85
	Zn	96
	Pb	79
Fines <63 microns ICP Ratio Métal / Manganèse	Cu	74
	Zn	82
	Pb	54
Fines <63 microns ICP Ratio Metal / Aluminium	Cu	97,7
	Zn	98,5
	Pb	97,6

5 CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Ce projet a permis d'examiner plusieurs aspects importants de l'utilisation des tills en exploration. Les recommandations suivantes découlent des travaux effectués:

- Il est très utile d'effectuer des comptes pétrographiques lors des campagnes d'échantillonnage de till. Ces comptes permettent de qualifier la provenance du till et d'évaluer correctement la présence ou l'absence d'anomalies dans un secteur donné.
- L'évaluation de la couleur du till permet de juger de son degré d'oxydation et d'évaluer l'utilité des fractions fines et des minéraux lourds pour les métaux usuels (Cu, Zn, As, Ni, Co par exemple). Les sulfures qui portent typiquement les métaux de base sont détruits lors de l'oxydation et transférés vers les fractions

fines du till. Dans le cas des tills oxydés, il est donc préférable d'utiliser la fraction fine.

- Les valeurs en métaux de base (Cu, Ni, Co, Zn) des fractions fines du till sont fortement dépendantes de la quantité de matière argileuse présente dans le till. L'utilisation du ratio Métal / Aluminium ou de modèles par réseaux neuronaux semble diminuer ou éliminer cet effet indésirable. L'amélioration de la détection des anomalies liées aux minéralisations a été démontrée le cas du SMV de Kidd Creek en Ontario.
- Pour l'exploration aurifère, chaque méthode a des avantages et inconvénients. Il n'y a pas de consensus dans la littérature sur la méthode optimale à utiliser.
- Pour l'analyse de l'or (analyse géochimique de la fraction fines et minéraux lourds), l'effet pépite semble important et mène à une faible reproductibilité des analyses. Il est possible d'augmenter la reproductibilité des analyses de fraction fine pour l'analyse de l'or en augmentant la quantité de matériel analysée au laboratoire.

Différentes questions demeurent toutefois à la suite de cette première phase de travaux. Ces questions pourraient faire l'objet d'une phase supplémentaire de travaux pouvant comprendre les éléments suivants:

- Tester si la séparation des tills en échantillons oxydés vs non-oxydés améliore la détection des minéralisations connues pour des levés ayant ces deux types d'échantillons, en particulier pour les minéraux lourds.
- Tester l'utilité réelle des différentes méthodes pour l'exploration aurifère (fractions fines, lourds, comptes de grains) dans des cas de levés avec minéralisations connues. Tester l'efficacité des corrections proposées pour les teneurs en métaux de base sur d'autres levés avec minéralisations connues et comparer et d'autres méthodes: minéraux lourds, minéraux indicateurs.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Averill, S.A., 1988. Regional variations in the gold content of till in Canada. *In: Prospecting in areas of glaciated terrain 1988*, MacDonald, D.R. and Mills, K.A., Editors. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, London, Ontario. Pp 271-284.
- Averill, S. A., 2001. The application of heavy indicator mineralogy in mineral exploration with emphasis on base metal indicators in glaciated metamorphic and plutonic terrains. Dans: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. et Cook, S.J. (eds). *Drift Exploration in Glaciated Terrain*. Geological Society, London, Special Publications 185, p. 69-81.
- Bird, D.J., Coker, W.B., 1987. Quaternary Stratigraphy and Geochemistry at the Owl Creek Gold Mine, Timmins, Ontario, Canada. *Journal of Geochemical Exploration* 28, p.267-284.
- Bloom, L.B. et Steele, K.G., 1989. Gold in till: preliminary results from the Matheson area, Ontario. Dans: DiLabio, R.N.W. et Coker, W.B., (eds). *Drift prospecting*. Geological Survey of Canada, Paper 89-20, p61-70.
- Clifton, H.E., Hunter, R.E., Swanson, F.J., Phillips, R.L., 1969. Sample size and meaningful gold analysis. United States Geological Survey, Professional Paper 625-C. 17p.
- DiLabio, R.N.W., 1995. Residence sites of trace elements in oxidized till. Dans: Bobrowsky, P.T., Sibbick, S.J., Newell, J.H., et Matysek, P.F. (eds). *Drift Exploration in the Canadian Cordillera*. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Paper 1995-2, p. 139-148.
- Dreimanis, A., 1989. Tills: Their genetic terminology and classification. Dans: Goldthwait et Matsch (eds). *Genetic classification of glacial deposits*, p. 17-83.
- Dreimanis, A., Vagners, U.J., 1971. Bimodal distribution of rock and mineral fragments in basal till. Dans: Goldthwait, R.P. (ed). *Till - A symposium*, p.237-250.
- El Korh, A., Schmidt, S.T.H., Ulianov, A., Potel, S., 2009. Trace Element Partitioning in HP-LT Metamorphic Assemblages during Subduction-Related Metamorphism, Ile de Groix, France: a Detailed LA-ICPMS Study. *Journal of Petrology* 50, vol 6. p. 1107-1148.
- Gy, P., 1954. Erreur commise dans le prélèvement d'un échantillon sur un lot de minerai. *Revue de l'industrie minière*, volume 35, p.311-345.
- Harris, J.F., 1982. Sampling and analytical requirements for effective use of geochemistry in exploration for gold. Dans: *Precious metals in the Northern Cordillera*. Association of Exploration Geochemists, p. 53-67.

- Kettles, I.M., 1993. Reconnaissance geochemical data for till samples from the Manitowadge area, Ontario. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 2616.
- Kettles, I.M., Garrett, R.G., Bauke, S.D., 1998. Till, Soil, and Stream Sediment Geochemistry in the vicinity of the Manitowadge Greenstone Belt. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3562.
- Klassen, R., 2001. A quaternary geological perspective on geochemical exploration in glaciated terrain. Dans: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. et Cook, S.J. (eds). Drift Exploration in Glaciated Terrain. Geological Society, London, Special Publications 185, p. 1-17.
- Klassen, R., 2001b. The interpretation of background variation in regional geochemical surveys - an example from Nunavut, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 1, p. 163-173.
- Makinen, J., 1995. Effect of grinding and chemical factors on the generation and composition of the till fine fraction: an experimental study. *Journal of Geochemical Exploration* 54, p. 49-62.
- McClenaghan, M.B., Lavin, O.P., Nichol, I., Shaw, J., 1992. Geochemistry and clast lithology as an aid to till classification, Matheson, Ontario, Canada.
- McClenaghan, M.B., Paulen, R.C., Ayer, J.A., Trowell, N.F., Bauke, S.D., 1998. Regional till and humus geochemistry of the Timmins-Kamiskotia area, northeastern Ontario (NTS 42A/11, 12, 13, 14). Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3675.
- McClenaghan, M.B., 1999. Till geochemical signatures associated with gold deposits in the Timmins-Matheson area, Western Abitibi Greenstone Belt, northeastern Ontario. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 3707.
- McClenaghan, M.B., 2001. Regional and local-scale gold grain and till geochemical signatures of lode Au deposits in the western Abitibi Greenstone Belt, Central Canada. Dans: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. et Cook, S.J. (eds). Drift Exploration in Glaciated Terrain. Geological Society, London, Special Publications 185, p. 201-224.
- McMartin, I., et McClenaghan, M.B., 2001. Till geochemistry and sampling techniques in glaciated shield terrain: a review. Dans: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. et Cook, S.J. (eds). Drift Exploration in Glaciated Terrain. Geological Society, London, Special Publications 185, p. 1-17.
- Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation 2005. Integrated GIS compilation of geospatial data from the Abitibi greenstone belt, Northeastern Ontario: Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release--Data 186.

- Nichol, I., Closs, L.G., Lavin, O.P., 1989. Sample representativity with reference to gold exploration. Dans: Proceedings of Exploration '87. Édité par Garland, G.D. Ontario Geological Survey, Special volume #3, p.609-624. Nichol, I., Lavin, O.P., McClenaghan, M.B., Stanley, C.R. 1992. The optimization of geochemical exploration for gold using glacial till.
- Nichol, I., Lavin, O.P., McClenaghan, M.B., and Stanley, C.R., 1992, The optimization of geochemical exploration for gold using glacial till: Exploration Mining Geology, 1, no. 4, 305-326.
- Nichol, I., Shelp, G.S., 1985. Geochemical exploration for gold. Dans: Geoscience Research Grant Program. Summary of research 1984-1985. Édité par Milne, V.G. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper #127, p.124-135.
- Parent, M., Paradis, S.J., Doiron, A., 1996. Palimpsest glacial dispersal trains and their significance for drift prospecting. Journal of Geochemical Exploration 56, p. 123-140.
- Piché, M., Jébrak, M., 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
- Schröter, F.C., Stevenson, J.A., Daczko, N.R., Clarke, G.L., Pearson, N.J., Klepšis, K.A., 2004. Trace element partitioning during high-P partial melting and melt-rock interaction; an example from northern Fiordland, New Zealand. Journal of Metamorphic Geology 22, p. 443-457.
- Shaw, J., 1988. Paper 30: Geochemical exploration in areas of glaciated terrain: geological processes. Proceedings of Exploration 87: Third Decennial International Conference on Geophysical And Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater. Edité par Garland, G.D., Ontario Geological Survey Special Volume 3, 960 p.
- Shilts, W.W., 1976. Glacial till and mineral exploration. Dans: Legget, R.F. (ed). Glacial Till. Royal Society of Canada, Special Publication 12, p.205-224.
- Shilts, W.W., 1995. Geochemical partitioning in till. Dans: Bobrowsky, P.T., Sibbick, S.J., Newell, J.H., et Matysek, P.F. (eds). Drift exploration in the canadian cordillera. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Paper 1995-2, p. 149-164.
- Stanley, C.R., 2006. On the special application of Thompson-Howarth error analysis to geochemical variables exhibiting a nugget effect. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 6. p.357-368.
- Stanley, C.R., 2008. Missed hits or near misses: determining how many samples are necessary to confidently detect nugget-borne mineralization. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, vol 8, p. 129-138.
- Tarvainen, T., 1995. The geochemical correlation between coarse and fine fractions of till in southern Finland. Journal of geochemical exploration 54, p. 187-198.

- Thorleifson, L.H., Kristjansson, F.J., 1990. Geochemical, mineralogical and lithological analyses of glacial sediments for gold, base metal and kimberlite exploration, Beardmore-Geraldton area, district of Thunder Bay, Northern Ontario. Commission Géologique du Canada, Dossier Public 2266, 418p.
- Wood, P.C., Burrows, D.R., Thomas, A.V., Spooner, E.T.C., 1986. The Hollinger-McIntyre Au-quartz vein system, Timmins, Ontario, Canada; geochemical characteristics, fluid properties and light stable isotope geochemistry. Dans: McDonald, A.J. (ed). Gold'86 - An International Symposium on the Geology of Gold deposits, Proceedings volume 86. p. 56-80.