CR 2003-01

Les gisements protérozoïques d'oxydes de fer polymétallique : cibles d'exploration au Québec, projet 2000-04

Documents complémentaires

Additional Files





Licence



License

Cette première page a été ajoutée
au document et ne fait pas partie du
rapport tel que soumis par les auteurs.

Énergie et Ressources naturelles
Québec

Les gisements protérozoïques d'oxydes de fer polymétalliques : cibles d'exploration au Québec

Par

Stéphane Faure, Géo. Ph.D.

Automne 2003

CONSOREM
Consortium de recherche en exploration minérale

CONSOREM
Consortium de recherche en exploration minérale

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 :

Faure, S. 2003. Les gisements protérozoïques d'oxydes de fer polymétalliques : cibles d'exploration au Québec. Rapport, projet CONSOREM 2000-4, 61 p.

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

Résumé

Les principales caractéristiques des gisements d'oxydes de fer polymétalliques et protérozoïques dans le monde sont présentées et discutées dans ce rapport. Des cibles régionales d'exploration basées sur des méthodes d'analyse de données géochimiques et géophysiques sont proposés pour ce type de dépôt pour le NE de l'Amérique du Nord, avec un accent particulier pour le Québec.

Ces gisements sont caractérisés par l'abondance du fer (tonnages entre 100 Mt et 2000 Mt @ 35 à 65% Fe) et des teneurs en TiO_2 <0,5%. Les gisements polymétalliques sont particulièrement intéressants puisqu'ils peuvent contenir entre 1 et 2% Cu et des valeurs en or jusqu'à 1 g/t. Ils peuvent également être minéralisés en uranium, Terres Rares légères, cobalt et niobium.

Les oxydes de fer et la minéralisation se mettent en place dans des contextes tarditectoniques ou anorogéniques. La majorité des gisements sont situés dans des roches volcano-plutoniques intermédiaires à felsiques. L'âge des roches hôtes varie entre 2,2 et 1,3 Ga (Protérozoïque précoce et moyen) à l'exception de l'âge de l'encaissant à Salobo (Brésil) qui est à 2,74 Ga. Les districts miniers et les gisements sont localisés principalement le long de structures majeures, souvent à la limite d'un socle et de roches de couverture. Les corps minéralisés mis en place par injections (brèches, veines, dykes) sont généralement discordants, alors que ceux formés par remplacement sont tabulaires et parallèles à des horizons perméables (grès, carbonates, pyroclastites).

Trois types de minéralisation sont distingués : 1) riche en magnétite, 2) dominé par l'hématite et 3) à sulfures dominants. Les systèmes de minéralisations et d'altérations sont généralement zonés. L'altération sodique est proximale, profonde et précoce. L'altération potassique est distale et tardive. L'hématite, les sulfures et les autres minéraux économiques sont principalement associés à l'altération potassique. Les principaux guides d'exploration régionale utilisés pour ce type de dépôt au Québec et au Labrador sont : 1) association spatiale avec des intrusions alcalines intermédiaires à felsiques; 2) association avec des gîtes apparentés (skarns ferrifères, pegmatites et métaux rares associés au magmatisme alcalin); 3) proximité d'un linéament ou intersection de linéaments géophysiques; 4) présence d'anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes; 5) cortège d'éléments indicateurs (Cu, Ce, La, U, Th et Co) dans les sédiments de fonds de lac et de ruisseaux. L'intégration dans un SIG de ces guides d'exploration montre que le potentiel pour trouver des gisements d'oxydes de fer polymétalliques au Québec est bon. Les secteurs favorables sont : Côte Nord (secteur des gîtes de Kwijibo et le nord du bassin du groupe de Wakeham), certaines frontières de blocs lithotectoniques dans le Grenville; d'anciens aulacogènes protérozoïques (point triple); des cibles géochimiques et/ou géophysiques ponctuelles en bordures ou à l'intersection de linéaments géophysiques dans la Province du Lac Supérieur.

Table des matières

Avertissement ii
Résumé iii
Table des matières iv
Liste des tableaux iv
Liste des figures v
1. Introduction et objectifs 1
2. Principales caractéristiques des gisements d'oxydes de fer 1
2.1 Localisation, tonnage versus teneur, âge 3
2.2 Caractéristiques géologiques 4
2.3 Formes des gisements et profondeurs de mise en place 5
2.4 Zonations et types d'altération et de minéralisation 6
2.4.1 Altérations 6
2.4.2 Minéralisations 8
2.5 Contrôle structural de la minéralisation 9
2.6 Modèles génétiques 10
2.7 Particularité du gisement archéen d'oxydes de fer à Cu-Au de Salobo, Brésil 11
2.7.2 Caractéristiques du gisement de Salobo 12
3. Potentiel pour les minéralisations de type Salobo ou oxydes de fer polymétalliques dans le NE de l'Amérique du Nord 13
3.1 Stratégie d'exploration pour les gisements d'oxydes de fer polymétalliques 13
3.1.1 Approche métallogénique 14
3.1.2 Approche structurale 15
3.1.3 Approche géophysique 17
3.1.4 Approche géochimique 18
3.2 Identification des secteurs d'intérêt 19
3.2.1 Province du Grenville : sud du Québec et de l'Ontario 19
3.2.2 Province du Grenville, Côte-Nord 20
3.2.3 Province de Nain, Labrador 22
3.2.4 Province du Supérieur, Grand-Nord du Québec 22
3.2.5 Synthèse des secteurs favorables pour l'exploration des dépôts d'oxydes de fer 23
4. Conclusion 23
5. Remerciements 23
6. Références 24

Liste des tableaux

Tableau 1: Catégories de gisements d'oxydes de fer polymétalliques 2
Tableau 2: Caractéristiques de la zonation des gisements d'oxydes de fer en fonction de leur profondeur 7
Tableau 3: Séquence de la minéralisation et de l'altération en fonction de la profondeur de mise en place du gisement et de la nature des roches volcaniques et plutoniques. 8
Tableau 4: Gîtes apparentés aux gisements et indices d'oxydes de fer 15

Liste des figures

Figure 1: Localisation de certains gisements et gîtes d'oxydes de fer dans une reconstitution palinspathique de Rhodinia (1,1 Ga).. 28
Figure 2: Localisation des principaux gisements de type oxydes de fer dans le monde. 28
Figure 3: Diagramme binaire comparant les teneurs en Cu en fonction du tonnage (échelle logarithmique) pour des gisements porphyriques et d'oxydes de fer.. 29
Figure 4: Diagramme binaire des teneurs en Au en fonction du tonnage pour certains gisements d'oxydes de fer protérozoïques dans le monde.. 29
Figure 5: Diagramme représentant l'âge de la minéralisation par rapport à l'âge de la roche hôte pour les principaux gisements d'oxydes de fer d'âge archéen et protérozoïque dans le monde.. 30
Figure 6: Gisement de type discordant, Olympic Dam, Australie (Hitzman et al., 1992).. 30
Figure 7: Gisement de type concordant à Kiruna, Suède (Nyström et Henriquez, 1994).. 31
Figure 8: Profondeurs de mise place (losange) de gisements d'oxydes de fer protérozoïques avec les incertitudes (lignes noires verticales de part et d'autre du losange). Les profondeurs des gisements de Starra et de Salobo sont incertaines.. 31
Figure 9: Section illustrant les altérations zonées des dépôts d'oxydes de fer à Cu-U-ÉTR-Au et formés dans une séquence sédimentaire. Les quantités de K_2O et Na_2O provenant de l'altération, varient respectivement de 5 à 9% et de 5 à 8% (Hitzman et al., 1992).. 32
Figure 10: Zonalité des altérations potassiques et sodiques des dépôts d'oxydes de fer (Cu-U-ÉTR-Au) dans des roches volcaniques et plutoniques (Hitzman et al., 1992).. 32
Figure 11: À Olympic Dam, le gisement et l'anomalie gravimétrique sont situés à l'intersection de linéaments régionaux NNE et WNW (O'Driscoll, 1986). 33
Figure 12:.Contrôle régional de la minéralisation à l'intérieur de la zone magmatique du Grand Lac de l'Ours, Canada (Gandhi et Bell, 1996) 33
Figure 13: Section d'un modèle magmatique pour le secteur du Grand Lac de l'Ours, Canada (Gandhi et Bell, 1996). 34
Figure 14: Vues en coupe montrant la formation du gisement d'Olympic Dam, Australie (Haynes et al., 1995) 34
Figure 15: Modèle génétique pour l'ouest américain montrant les relations géochimiques entre les fluidesévaporitiques et magmatiques et les roches hôtes de la minéralisation (Barton et Johnson, 2000).. 35
Figure 16: Carte géologique du district minier de Carajás montrant la position du gisement de Salobo et des principaux dépôts de Fe, Cu, Au, et Mn (Requia et al., 2003).. 35
Figure 17: Carte géologique du gisement de Salobo, Brésil. L'image du haut montre une vue en plan du gisement et la ligne rouge indique la position de la coupe dans l'image du bas (Lindenmayer, 1990).. 36
Figure 18: Compilation des gîtes d'oxydes de fer et autres gîtes apparentés dans le NE de l'Amérique du Nord avec les périodes de minéralisation en millions d'années (Ma).. 37
Figure 19: Cadre chronostratigraphique des gîtes d'oxydes de fer, U, et ÉTR d'âge protérozoïque pour le Québec, l'Ontario et le Labrador.. 37
Figure 20: Image de gauche : linéaments géophysiques d'entraînement (ligne bleue) interprétés à partir de la carte du champ magnétique total (total de 98 linéaments). Image de droite : linéaments géophysiques francs (ligne noire) interprétés à partir de la carte du champ magnétique total (total de 1913 linéaments). Les linéaments tracés en trait plus large sont de longueurs égales ou plus grandes à 200 km.. 38
Figure 21: Linéaments géophysiques crustaux interprétés à partir de la carte du gradient vertical de la gravité (217 linéaments au total).. 38
Figure 22: Carte représentant les linéaments magnétiques francs et d'entraînement interprétés à partir de cartes magnétiques et gravimétriques superposées aux failles de terrain observées ou interprétées par le gouvernement provincial. Failles de terrain avant 2001.. 39

Figure 23: Les trois types de linéaments géophysiques (d'entraînement, francs et crustaux) sont superposés à la carte des provinces géologiques. Les rosaces montrent les orientations dominantes des linéaments géophysiques.. 39
Figure 24: Distribution des linéaments géophysiques par catégories et orientations. Les linéaments d'entraînement sont tous disposés sur l'image du haut à gauche. Les linéaments francs et crustaux sont divisés en 5 groupes selon leur orientation sur les cinq images suivantes 40
Figure 25: Linéaments géophysiques SE-NO (en vert) interprétés à partir de cartes magnétique et gravimétrique. La majorité des linéaments sont corrélés à des extensions successives 40
Figure 26: Synthèse des linéaments géophysiques NE-SO pour le Québec et le Labrador interprétés à partir de levés magnétiques et gravimétriques. Principaux événements tectoniques pouvant être corrélés aux linéaments.. 41
Figure 27: Linéaments géophysiques NE-SO interprétés à partir de cartes magnétique et gravimétrique. Principaux événements tectoniques pouvant être corrélés aux linéaments 41
Figure 28: Intersections des linéaments géophysiques NE (mauve) et SE (vert). Certaines intersections sont l'hôte d'intrusion dans le Grenville (complexe de Sept-îles) et pourraient être des cibles favorables à l'exploration des gîtes d'oxydes de fer.. 42
Figure 29: Densité de linéaments géophysiques évaluée à partir de la méthode des points. L'échelle de couleurs indique les densités, des plus faibles (en bleu) aux plus élevées (en rouge).. 42
Figure 30: Carte du gradient vertical de la gravité du Québec sur laquelle sont isolés les hauts gravimétriques (en beige).. 43
Figure 31: Signature magnétique isolée dans les hauts gravimétriques 43
Figure 32: Les cibles favorables à l'exploration correspondent à la superposition de hauts magnétiques et gravimétriques (en bleu foncé).. 44
Figure 33: Couverture des données géochimiques provinciales (zones délimitées par une ligne rouge)pour les sédiments de fonds de lac.. 44
Figure 34: Seuils établis par province géologique pour 4 éléments analysés à partir de sédiments de fonds de lac.. 45
Figure 35: Distribution normalisée par province géologique du Cu, U, et Ce dans les sédiments de fonds de lac pour les centiles supérieurs à 95.. 45
Figure 36: Distribution des principaux gîtes d'oxydes de fer et des gîtes apparentés dans le sud du Québec et de l'Ontario ainsi que dans le NE des États-Unis.. 46
Figure 37: Principaux gîtes d'oxydes de fer et gîtes associés dans le sud du Québec et de l'Ontario et champ magnétique total. Anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes (en quadrillé). Légende identique à celle de la figure 36.. 46
Figure 38: Linéaments magnétiques par orientations (traits colorés) et gravimétriques (tirets), grabens, et principaux gîtes d'oxydes de fer et gîtes associés dans le sud du Québec et de l'Ontario. Légende identique à celle de la figure 36.. 47
Figure 39: Géochimie des sédiments de ruisseaux dans le bassin sédimentaire et protérozoïque de Mont- Laurier, vallée de la Rivière Gatineau.. 47
Figure 40: Méthode de la logique floue appliquée pour le Bassin de Mont-Laurier. À gauche, approches géochimique, structurale et métallogénique. À droite, approches géochimique et géophysique bonifiées par la carte des intrusions des syénites et des granitoïdes. Légende pour les gîtes identique à la figure 36 48
Figure 41: Image de gauche : cibles d'exploration régionale (cercle bleu) à l'intersection de deux rifts (tracés en rouge). Image de droite : cibles d'exploration le long des zones tectoniques bordant la Ceinture Centrale Mobile et celle du Saint-Maurice ainsi qu'au Front du Grenville (en gris). Légende pour les gîtes identique à la figure 36.. 48
Figure 42: Distribution dans le Grenville du Cu, U, Ce, et Co dans les sédiments de fonds de lac et position du gîte d'oxydes de fer de Kwyjibo et autres gîtes apparentés. Légende pour les gîtes identique à la figure 36.. 49
Figure 43: Méthode de la logique floue appliquée pour le Grenville pour les éléments du Cu, Ce et U dans les sédiments de fonds de lac (addition de pixels avec valeur unitaire de

1, pour un maximum de 6) avec lithologies favorables aux gîtes d'oxydes de fer. Les encadrés montrent les secteurs de plus grand intérêt. 49
Figure 44: Détails de la figure 43 montrant la combinaison des approches géochimique et géophysique. Les hauts magnétiques et gravimétriques sont en hachurés. Sur l'image de droite, le gîte de Kwyjibo est indiqué par le carré rouge. Les secteurs où la densité d'anomalies géochimiques et les hauts magnétiques et gravimétriques se superposent, sont les secteurs les plus favorables à l'exploration de nouveaux gîtes d'oxydes de fer 50
Figure 45: Approches géochimique et structurale (linéaments) où la densité des anomalies géochimiques (en gris) est superposée à la densité des linéaments (échelle de couleur de bleu foncé à rouge, respectivement des plus petites aux plus grandes densités de linéaments), Côte-Nord.. 50
Figure 46: Carte d'une partie du Labrador montrant les principaux gîtes de Cu, U et ÉTR et l'âge probable de la minéralisation en millions d'années.. 51
Figure 47: Approches géophysique, structurale et métallogénique, Labrador. Cible géophysique identifiée (petit cercle noir) où un haut gravimétrique et un haut magnétique se superposent. Cible structurale identifiée à l'intersection de trois sous-provinces (grand cercle noir indiquant un point triple).. 51
Figure 48: L'image de gauche représente les anomalies géochimiques de fonds de lac en U (en jaune) superposées aux bas magnétiques (en bleu) avec les principales sous-provinces géologiques. L'image de droite est une représentation de l'image de gauche sur laquelle les anomalies géochimiques en Cu et Ce supérieures à 95 centiles ont été ajoutées.. 52
Figure 49: Cibles d'exploration régionale dans la Province du Lac Supérieur en utilisant la logique floue pour les éléments du Cu, U, et Ce dans les sédiments de fonds de lac (addition de pixels avec valeur unitaire de 1, pour un maximum de 6). Les indices de U et U-Cu qui sont répertoriés dans la province du Supérieur avec en arrière plan les linéaments géophysiques interprétés. Deux secteurs plus favorables à l'exploration des dépôts d'oxydes de fer sont encadrés en rouge et agrandis à la figure 50.. 53
Figure 50: Détails de la figure 49 dans la Province du Lac Supérieur montrant, pour deux secteurs, la superposition des anomalies en Cu-U-Ce rapportées sur une échelle de 6. Les flèches indiquent les plus fortes anomalies géochimiques (valeurs de 6) et correspondent à des cibles d'exploration de première importance. Anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes indiquées par le quadrillé.. 54
Figure 51: Compilation des secteurs favorables pour l'exploration des dépôts d'oxydes de fer au Québec.. 54

1. Introduction et objectifs

Les gisements d'oxydes de fer sont connus pour leur énorme quantité de fer (>100 Mt et >35% fer). Ceux de Kiruna, dans le nord de la Suède, ont probablement été les premiers à être étudiés (Geijer, 1910). Jusqu'au milieu des années soixante-dix, l'exploitation de ces gisements était liée à l'industrie de la sidérurgie. Suite à la découverte, en 1975, du mégagisement d'oxydes de fer polymétalliques à Cu-U-Au-Ag- ÉTR d'Olympic Dam en Australie (32 Mt Cu, 38 Moz Au; Roberts et Hudson, 1983), ce type de minéralisation a pris une toute autre dimension; la rentabilité des gisements était maintenant basée sur le contenu en uranium, or, cuivre ou en Terres Rares plutôt que sur le fer. Ce n'est qu'au début des années 1990 que les premières synthèses sur ce type de minéralisation ont été publiées (Hitzman et al. 1992). Depuis ce temps, l'engouement pour la découverte de ces gisements n'a pas cessé de croître auprès des grands producteurs de cuivre et d'uranium, en raison du tonnage considérable de ce type de gisement.

L'objectif de cette étude est de diversifier le potentiel minéral au Québec en proposant la recherche de nouveaux types de gisement. Le contexte géotectonique au Québec, en particulier celui du Grenville (figure 1), est similaire à celui retrouvé en Australie (référence au gisement d'Olympic Dam). Cette étude présente les différents types de gisements d'oxydes de fer et les méthodes permettant l'identification de zones favorables à l'exploration. L'étude est restreinte aux gisements d'âge Protérozoïque dans le but d'appliquer les critères d'exploration dans l'Est du Canada aux provinces du Lac Supérieur et du Grenville.

2. Principales caractéristiques des gisements d'oxydes de fer

Les gisements d'oxydes de fer possèdent des caractéristiques propres selon plusieurs critères dont l'âge, le contexte tectonique, la minéralogie, l'altération, la suite d'éléments spécifiques, le tonnage et la teneur. La majorité des gisements sont d'âge Protérozoïque (1,9 à 1,1 Ga) à Holocène, à l'exception de Salobo au Brésil qui est archéen (Requia et al., 2003). Les gisements sont caractérisés par l'abondance de magnétite et/ou d'hématite avec des teneurs en fer qui varient entre 35 et 65%. Ils se distinguent des gisements magmatiques de fer-titane par leur faible contenu en TiO_2 (inférieur à 0,5%). L'altération est caractérisée par un vaste système hydrothermal plurikilométrique riche en sodium (Na) et en potassium (K). Les éléments chimiques constituant la suite caractéristique de ces gisements sont le cuivre, le cobalt, les éléments des terres rares, l'or, l'argent et l'uranium. Généralement, ces gisements ont de forts tonnages, plus de 100 Mt de minerai, et de faibles teneurs, moins de 2% de cuivre, inférieur à 1 g/t d'or et 0,5% de Terres Rares. Les roches hôtes des gisements sont très variées. Cependant, et dans la majorité des gisements, il y a un lien spatial et/ou temporel avec des intrusions intermédiaires ou

felsiques alcalines.

Les gisements d'oxydes de fer se divisent en deux grandes catégories : les gisements monométalliques, c'est-à-dire ceux qui sont riches en fer (magnétite-hématite) avec des quantités variables d'apatite et/ou d'actinote, de calcite et de diopside, et les gisements polymétalliques caractérisés par des contenus sub-économiques à économiques en Cu, U, Au, Ag, Co, ou Terres Rares. Il s'agit en fait de deux pôles extrêmes et des catégories intermédiaires, économiques ou non, existent entre les deux.

Les gisements monométalliques et protérozoïques les plus importants sont ceux de la Norvège et du Missouri (Kisvarsanyi et Proctor, 1967; Frietsch et Perdahl, 1995). Ils contiennent des quantités variables mais non économiques d'uranium, de cuivre et de Terres Rares.

Actuellement, les spécialistes s'entendent pour classer les dépôts polymétalliques en trois types distincts (Wall, 2000; Etheridge et Bartsch, 2000) : riches en magnétite, pauvres en magnétite, et riches en hématite (tableau 1). Les gisements riches en magnétite se sont formés à hautes températures dans des conditions oxydantes, et sont généralement minéralisés en Cu, Au et Co. Les exemples les plus typiques sont Ernest Henry, Starra, Tennant Creek en Australie, et Salobo au Brésil. Les gîtes de Mar, Nod et Sue-Dianne dans les Territoires du Nord-Ouest sont également de ce type (Gandhi, 1992; Gandhi et Bell, 1996). Dans les dépôts pauvres en magnétite, la proportion de sulfures de fer (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite) est plus grande que celle de la magnétite ou l'hématite. Les gisements ont de plus petits tonnages (<10 Mt) et sont minéralisés en Cu, Au et Co. La minéralisation a été formée par des fluides hydrothermaux réducteurs de hautes températures. Les exemples de ce type de dépôt sont Osborne, Eloise et Mount Elliot en Australie (Baker, 1998). Les gisements où l'hématite est dominante par rapport à la magnétite présentent une minéralisation particulière en Cu, Au, U et Terres Rares. La minéralisation se met en place dans des conditions oxydantes et de basses températures. Olympic Dam est certes le gisement de ce type le plus connu et le plus étudié. Au Yukon, les brèches de Wernecke font également parties de ce type (Gandhi et Bell, 1996). Ces différents types de minéralisation sont systématiquement liés dans le temps et l'espace. Ils peuvent être uniques, transitionnels, superposés, ou se former en même temps lors d'un même épisode hydrothermal.

Tableau 1: Catégories de gisements d'oxydes de fer polymétalliques

Caractéristiques	1) riche en magnétite	2) pauvre en magnétite	3) riche en hématite
Minéralogie	magnétite > hématite	sulfures-Fe > magnétite	hématite > magnétite
Conditions de mise en place	température élevée milieu non-déterminé	température élevée milieu réducteur	température basse milieu oxydant
Assemblage métallique	Cu-Au-Co	Cu-Au-Co	Cu-Au-U-ÉTR
Exemples de gisement	Ernest Henry Salobo	Osborne Eloise	Olympic Dam Wernecke

2.1 Localisation, tonnage versus teneur, âge

Les principaux gisements d'oxydes de fer sont distribués sur les cinq continents (figure 2). L'Australie est l'un des principaux pays dans le monde possédant un grand nombre et d'importants dépôts d'oxydes de fer polymétalliques avec, entre autre, le gisement d'Olympic Dam et ceux des districts de Clonclurry et Tennant Creek. En Norvège, les gisements de Kiruna, Aitik et Bergslagen se distinguent par une association fer-apatite et sont parmi les plus importants dans leur catégorie. Des gisements de même type, exploités pour le fer, sont connus en Amérique du Nord, dans le SE du Missouri (Terrane de St-François) et dans l'état de New York (Adirondack). La plus importante mine est celle de Pea Ridge (1964) avec plus de 130 Mt @ 57% fer et des quantités sub-économiques de cuivre et de Terres Rares. En Afrique du Sud, le gisement d'hématite et de fluorine de Vergenoeg recoupe le complexe de Bushveld. Le fer dans le gisement de Bayan Obo, en Chine, est d'âge protérozoïque, mais l'âge de la minéralisation en éléments des terres rares est interprété comme étant Dévonien (Drew et al., 1990; Zhang et al., 1999).

Au Canada, seulement quelques gîtes d'oxydes de fer sont connus dans les Territoires du Nord-Ouest (TNO), au Yukon (champ de pipes de Wernecke), et au Québec (gîte de Kwijibo). Le plus important dépôt est celui de Sue-Dianne (Lac de l'Ours, TNO), avec une ressource estimée à 17,3 Mt @ 0,72% Cu. En Amérique du sud, les roches archéennes de la région de Cajaras au Brésil sont les hôtes de plusieurs gisements d'oxydes de fer polymétalliques dont le plus important est celui de Salobo. Ce district minier est appelé à devenir la plus importante région pour l'exploration et l'exploitation de ce type de gisement après l'Australie.

Les gisements d'oxydes de fer polymétalliques sont encore plus attrayant que les gisements porphyriques parce que les teneurs en cuivre sont en moyenne deux fois plus élevées pour des tonnages comparables (figure 3). La quantité de cuivre dans les gisements d'oxydes de fer varie entre 1 et 2%, comparativement à la plupart des porphyres cuprifères qui ont une teneur moyenne <1%. Olympic Dam et Salobo sont les deux plus importants gisements d'oxydes de fer cuprifères, suivit par Sossego et Cristallino au Brésil.

Les teneurs en or dans les dépôts d'oxydes de fer sont généralement comprises entre 0,5 et 1 g/t pour un tonnage >35 Mt (figure 4). Ces valeurs sont comparables à celles des gisements porphyriques aurifères (Sillitoe, 1993). La majorité des gisements aurifères se situent entre 100 et 1000 Mt. Les teneurs sont plus élevées (> 1 g/t) dans les petits gisements. Olympic Dam et Salobo sont les plus importants producteurs d'or dans leur catégorie avec un potentiel de plus de 100 tonnes d'or.

L'âge des roches hôtes des gisements protérozoïques varie entre 2,1 et 1,3 Ga, avec un mode à 1,8 milliard d'années (figure 5). L'âge de la minéralisation des gisements protérozoïques varie entre 1,9 à 1,1 milliard d'années. Salobo fait exception car les roches hôtes et la minéralisation sont archéennes (Requia et al., 2003). Dans la

majorité des cas, la minéralisation est épigénétique et est restreinte à la période comprise entre 1,8 et 1,5 Ga. Elle s'introduit en moyenne 250 Ma après la formation des roches encaissantes, ne dépassant pas 350 Ma. Par contre dans le cas d'Olympic Dam et dans le district de Cloncurry en Australie et dans le gisement de Grängesberg en Suède, la minéralisation se met en place moins de 100 Ma, voir quelques millions d'années, après la formation des encaissants (Hitzman et al., 1992; Johnson et McCulloch, 1995; Baker, 1998; Adshead-Bell, 1998).

L'hypothèse la plus probable pour expliquer la mise en place de la majorité des gisements durant cette période est que la croûte continentale ait atteint son épaisseur maximale au Protérozoïque précoce et moyen (1,9 – 1,1 Ga). Le flux de chaleur aurait été plus élevé par rapport au Phanérozoïque (Hitzman et al., 1992). L'épisode de minéralisation situé entre 1,8 et 1,5 Ga coïncide avec une phase globale de fragmentation du super continent Rodinia.

2.2 Caractéristiques géologiques

Les caractéristiques géologiques des gisements d'oxydes de fer varient beaucoup d'un dépôt ou d'un district à un autre. La nature des roches hôtes en particulier n'est pas un facteur qui détermine le type de minéralisation. Certaines caractéristiques communes peuvent cependant être décrites à partir du contexte tectonique, du type d'altération, de la minéralogie, des éléments métalliques, et de la morphologie des corps minéralisés.Les roches hôtes de la minéralisation peuvent être des sédiments détritiques ou chimiques, des volcanites et des intrusions felsiques, intermédiaires ou mafiques principalement d'affinité calco-alcaline, ou des roches métamorphiques des faciès des schistes verts ou des amphibolites. Aucun gisement ou indice n'a été documenté dans des roches ultramafiques. Les volcanites se composent de tous les lithofaciès volcaniques existant entre les systèmes nourriciers épizonaux de milieux proximaux et les roches sédimentaires volcanoclastiques d'environnements distaux. Plusieurs gisements sont associés à des roches volcano-plutoniques alcalines de milieux continentaux et formées dans des contextes tardiorogéniques à postorogéniques. Bien que des roches ignées soient liées dans l'espace et le temps à plusieurs de ces gisements, il ne semble pas y avoir de corrélation entre la minéralisation et les différentes compositions de roches ignées (Barton et Johnson, 1996). Dans la majorité des gisements par contre, la minéralisation est associée, à l'échelle du district, à une phase magmatique ou à une époque intrusive en particulier (Etheridge et Bartsch, 2000). Les gisements protérozoïques sont principalement localisés dans ou en marges d'un craton stable et se sont mis en place dans des régimes tectoniques en extension ou en transtension (Hitzman, 1992; Gandhi et Bell, 1996). Les gisements des camps de Tennant Creek et Cluncurry en Australie ont cependant été formés pendant des épisodes régionaux de compression (Williams, 2000).

Les gisements en Suède, dans les états du Missouri et de New York, dans les TNO,

et en Afrique du Sud sont encaissés dans des roches volcaniques felsiques (localement intermédiaires) et dans des plutons épizonaux apparentés (Hitzman et al., 1992; Ghandi et Bell, 1996; Borrok et al., 1998). Dans la région de Cajaras au Brésil, les roches volcaniques hôtes de la minéralisation sont plutôt de composition mafique à intermédiaire. Les dépôts du district de Cloncurry et Tennant Creek en Australie, et celui de Boyan Obo en Chine, sont principalement localisés dans des métasédiments (argilites, wackes, dolomies, carbonates) avec localement des amphibolites (Drew et al. 1990; Williams et al., 1995). Les minéralisations à Olympic Dam et à Pea Ridge (SE du Missouri) montrent une intime association avec des granites rapakivi et des volcanites felsiques (Haapala, 1995).

2.3 Formes des gisements et profondeurs de mise en place

La forme des gisements est complexe et communément contrôlée par la perméabilité le long de failles, d'horizons favorables, ou de contacts avec des intrusions. Les corps minéralisés discordants résultent d'injections et recoupent la stratigraphie sous formes de brèches, de pipes, de dykes, de veines, ou d'amas irréguliers. Ces structures ont des contacts généralement francs. Ils se mettent en place rapidement et témoignent généralement d'événements brusques ou violents. Ces systèmes sont communément polyphasés et peuvent atteindre plus de 1 km verticalement (exemple de Olympic Dam, figure 6). Les dépôts du Missouri et en Afrique du Sud et les gîtes dans les TNO et du Yukon montrent des morphologies discordantes en forme de culots, de cheminées, de filons ou d'amas irréguliers auxquels sont associées des zones de brèches et des pegmatites (Gandhi, 1992; Gleason et al., 2000). Les dépôts concordants sont tabulaires et plutôt massifs, stratifiés, ou disséminés. Ils ont été formés par remplacement (processus plus lent) le long de couches sédimentaires (grès, calcaires) ou volcaniques perméables. Le système minéralisé le plus impressionnant est celui de Kiruna qui atteint plus de 4 km de long, 1,5 km de large et 100 m d'épaisseur (figure 7). À Boyan Obo, les lentilles de plusieurs centaines de mètres à magnétite (±hématite) semi-massives à massives, interlitées de monazite, fluorite et bastnaesite, remplacent un horizon de dolomie sur plus 7 km. Les gisements d'Eloise et d'Osborne dans le Cloncurry et d'Emmie Bluff au sud d'Olympic Dam se composent de lentilles tabulaires formées par remplacement mais sont de moins grandes dimensions (Gow et al., 1994; Williams et al., 1995; Baker, 1998). Il existe des zones d'injections discordantes dans tous les gisements tabulaires et concordants.

La plupart des gisements se sont formés à moins de deux kilomètres de profondeur (figure 8). Les systèmes hydrothermaux se sont développés près de la surface comme en témoigne l'aspect cassant des structures et des textures associées : cataclastites, brèches, veines, filons tabulaires, sédimentation, croissance de cristaux en espace ouvert, etc. Le volcanisme aérien ou sub-aérien associé au gisement d'Olympic Dam et les textures très vésiculaires dans les volcanites de Kiruna

appuient cette interprétation (Nyström et Henriquez, 1994). Dans la majorité des cas, les gisements catégorisés comme superficiels n'ont pas été basculés et supportent l'idée qu'ils sont post- tectoniques.

Les gisements de Starra (District de Cloncurry), du district minier de Tennant Creek et de Salobo (Brésil) sont par contre des exemples de minéralisations plus profondes (Williams, 2000). À Starra et Tennant Creek, la minéralisation est associée à un épisode de déformation à la limite du régime ductile-cassant (Wedekind et Large, 1989; Rattenbury, 1994; Adshead-Bell, 1998; Williams, 2001). La minéralisation à Salobo est localisée en bordure d'une faille de socle et est synchrone au dernier épisode métamorphique de faciès des schistes verts supérieurs (Lindenmayer, 1990).

2.4 Zonations et types d'altération et de minéralisation

De façon générale, les systèmes hydrothermaux sont zonés. Les variations spatiales des altérations et de la minéralisation dépendent principalement de quatre facteurs : 1) la profondeur, 2) la composition des roches hôtes, 3) l'origine des fluides hydrothermaux, et 4) l'évolution du système hydrothermal dans le temps (Barton et Johnson, 1996).

2.4.1 Altérations

L'altération, principalement alcaline, est de type métasomatique. Elle est intense et occupe un large volume (plusieurs dizaines de km^3). Les caractéristiques de la zonalité en fonction de la profondeur sont présentées dans le tableau 2. L'altération sodique est proximale et souvent précoce. Elle se trouve en profondeur et au cœur du dépôt. Des fluides oxydants principalement magmatiques et des températures élevées favorisent le dépôt de la magnétite ± pyrite ± apatite. L'altération potassique est distale et se superpose à l'altération sodique en périphérie. Elle résulte d'un système hydrothermalde plus basses températures, dans des conditions plus réductrices. Cette altération est synchrone à la précipitation de l'hématite et des sulfures.

Bien que l'altération dépend de la profondeur de mise en place du dépôt, la géochimie des roches encaissantes est également un facteur important. Dans les roches sédimentaires, l'altération sodique est marquée par l'assemblage albite-séricite- magnétite et des teneurs en Na_2O variant entre 5 et 8% (figure 9; Hitzman et al., 1992). L'altération potassique consiste en un assemblage de séricite-chlorite-carbonates avec de l'hématite. Les teneurs moyennes en K_2O varient entre 5 et 9%. Les gisements de Wernecke et Bayan Obo sont deux exemples de gisement d'oxydes de fer encaissés dans des roches sédimentaires.

Tableau 2: Caractéristiques de la zonation des gisements d'oxydes de fer en fonction de leur profondeur

Profondeur	**Près de la surface (1 à 2 km)**	**Plus profond (4 à 6 km)**
Température	200° à 400°C	400° à >600°C
Source des fluides	Météoritique et magmatique	Magmatique
Minéralogie	Hématite, sulfures et ± ÉTR	Magnétite, ± pyrite et ± apatite
Altération	Potassique (FK-Mus-Bo-Act-Chl) Tardivement (Ser-Hem-Cb-Chl-Qz)	Sodique (Alb-Scap-Act-Chl)

Dans les roches volcaniques et plutoniques, l'altération en hématite et en chlorite-carbonates (roches mafiques) ou quartz-séricite-chlorite (roches felsiques) occupe les parties superficielles et près de la paléo-surface (figure 10). Cette altération de plus basses températures est associée à la précipitation de la majorité des sulfures (Barton et Johnson, 1996). Une altération tardive en séricite-quartz peut se développer le long de structures discordantes mais occupe un faible volume. La géométrie d'un patron d'altération dans des structures verticales peut être modifiée et devenir horizontale le long d'horizons plus perméables comme des grès, des carbonates ou des pyroclastites (Hitzman et al., 1992).

Le tableau 3 résume les assemblages minéralogiques de l'altération et des minéralisations en fonction de la profondeur et de la nature des roches volcaniques et plutoniques. Dans les volcanites intermédiaires ou felsiques, l'altération sodique est caractérisée par la présence d'albite-scapolite-actinote en association avec la magnétite±apatite (Barton et Johnson, 1996). L'altération potassique dans ces roches est marquée par un assemblage de feldspath potassique, de séricite, de quartz, de biotite, d'albite, d'actinote et de chlorite. Le quartz apparaît sous forme de veines et de remplissages entre les autres minéraux d'altération (Hitzman et al. 1992). Dans les roches intermédiaires ou mafiques, l'altération sodique consiste en un assemblage de scapolite-hornblende-pyroxène avec de la magnétite ± apatite. Les valeurs en Na_2O dépassent 4,5 % (Requia et Fontboté, 2000). En périphérie de ce système, le feldspath potassique est sous forme de veines, et la matrice est altérée en albite et chlorite. Les gisements de Olympic Dam, Kiruna, Pea Ridge et Ernest Henry sont des exemples de dépôts encaissés dans des roches d'origine volcanique ou plutonique.

Tableau 3: Séquence de la minéralisation et de l'altération en fonction de la profondeur de mise en place du gisement et de la nature des roches volcaniques et plutoniques.

Profondeur	Altération et minéralisation	Roche mafique-intermédiaire	Roche intermédiaire-felsique
Le moins profond	Altération séricite-chlorite	Chl-Dol-(Hm)	Qz-Ser-Chl-(Hm)
↑	Minéralisation oxyde-sulfure tardive de basses températures	Hm-(Py-Cp)	Hm-(Py-Cp)
	Altération sodique (potassique) tardive de basses températures	Ab-Chl-(Cal-Hm)	Ab-Chl-(Hm-Cal)
			Bi-Kf-Mt
	Skarn oxydé (hautes et basses températures)	Ad-Px-(Act)	Ad-Px-(Act)
	Minéralisation oxyde précoce de hautes températures	Mt-Ap-(Am)	Mt-Ap-Am
Le plus profond	Altération sodique précoce de hautes températures	Scp-Hbl-Px	Alb-Scp-Act-(Px)

(Barton et Johnson, 1996)

2.4.2 Minéralisations

La minéralisation en sulfures et autres minéraux économiques est principalement contemporaine à l'hématite et l'hématite arrive après la magnétite, soit par apport direct ou par altération de la magnétite (Barton et Johnson, 1996). Il arrive que des systèmes précoces à magnétite avortent au moment ou l'hématite et les sulfures pourraient se déposer, formant des gîtes à magnétite-apatite stériles ou sub-économiques comme ceux des états de New York, du New Jersey et du Missouri (Kisvarsanyi et Proctor, 1967; Foose et McLelland, 1995).

La minéralisation se présente sous forme de skarns, de pegmatites, de veines ou de textures de remplacement. La majorité des sulfures sont contemporains ou tardifs à l'hématite. Les principaux sulfures de cuivre associés à l'hématite sont la chalcosite, la bornite, et, localement, la covellite. La chalcopyrite et/ou la pyrite ou la pyrrhotite apparaissent fréquemment dans les gisements riches en magnétite (Hitzman et al. 1992). La molybdénite et la sphalérite sont rarement observées. L'or est associé intimement aux minéraux de cuivre et apparaît tardivement dans la paragenèse (Lindenmayer, 1990; Gandhi et Bell, 1996). Les minéraux contenant des Terres Rares légères sont l'apatite, la monazite $[(Ce,La,Nd)PO_4]$, la bastnaésite $[(Ce,La)(CO_3)F]$, la florencite $[(Ce,La,Nd,Y)F_3]$ et le xenotime $[(Er,Gd,Y)PO_4]$ (Oreskes et Einaudi, 1990; Hitzman et al. 1992). Les minéraux d'uranium sont associés à l'hématite; il s'agit de l'uraninite (UO_2), la pechblende (variété massive de l'uraninite), la brannérite $[(U,Ca,Th,Y)(Ti,Fe)_2O_6]$ et la coffinite $[(U(SiO_4)\ (OH)_4]$ (Reeves et al. 1990). D'autres minéraux d'or et d'argent, des arséniures de cobalt et de nickel existent dans certains gisements. Un enrichissement supergène en U et Cu est présent à Olympic Dam, Igarapé au Brésil et à Sue-Dianne dans les Territoires du Nord-Ouest (Oreskes et Einaudi, 1990; Gandhi et Bell, 1996) et en fluorine à Vergenoeg en Afrique du Sud (Borrok et al, 1998).

Deux exemples de gisements zonés sont celui d'Olympic Dam et d'Eloise en Australie. À Olympic Dam, la minéralisation varie verticalement et latéralement avec de la pyrite en profondeur, suivit de la chalcopyrite, de la bornite et de la chalcosite vers le sommet et le cœur du gisement (Reeves et al. 1990). Le gisement d'Eloise est riche en magnétite et pyrite au sud, minéralisé en chalcopyrite et pyrrhotite dans le lobe central, et seulement en pyrrhotite au nord (Baker, 1998).

2.5 Contrôle structural de la minéralisation

Tant à l'échelle régionale que locale, le contrôle structural est évident et présent dans presque tous les gisements (Barton et al., 2000). Ces gisements se sont mis en place généralement en régime extensif et dans un contexte tectonique tardiorogénique ou anorogénique le long de structures régionales et crustales. Plusieurs dépôts en Australie (Régions de Tennant Creek et de Cloncurry) se sont mis en place en régime compressif à la fin d'une orogénie, mais ils sont systématiquement associés, à l'échelle du gisement, à des structures de dilatation (Valenta, 2000). Les corps minéralisés sont généralement allongés parallèlement au grain tectonique dominant. L'anomalie gravimétrique que constitue le gisement d'Olympic Dam est localisée à l'intersection d'un linéament ONO traversant littéralement l'Australie et d'un autre d'une centaine de km de longueur orienté NNE (figure 11); O'Driscoll, 1986; Woodall, 1994). Dans les TNO, les gîtes et les indices d'oxydes de fer sont alignés parallèlement à la Zone magmatique du Grand Lac de l'Ours et forment un corridor linéaire de 500 km x 100 km de large (figure 12). Ce corridor est situé à la limite des roches du Protérozoïque précoce et de l'Archéen et des roches de couverture du Protérozoïque tardif et du Paléozoïque (Gandhi et Bell, 1996).

À l'échelle de la propriété, le gîte de Sue-Dianne (TNO) est localisé à l'intersection d'une faille NNE et d'une autre ENE. Dans le district de Cloncurry, les gisements de Starra, Mount Elliot, Mount Dore et Kuridala sont localisés le long de la faille majeure de Mount Dore (Rotherham et al., 1998). À l'échelle du gisement, la minéralisation à Olympic Dam, Ernest Henry, et Osborne est contrôlée par des structures de dilatation dans des zones de failles cassantes et ductiles-fragiles et des brèches (Etheridge et Bartsch, 2000). La minéralisation à Salobo est contrôlée par une faille de chevauchement majeure orientée ESE (Lindenmayer, 1990; Delgado et al., 1994).

2.6 Modèles génétiques

Bien que les lithologies hôtes de la minéralisation soient très diversifiées d'un gisement à l'autre, la présence d'intrusions proximales ou distales semble un élément clé de l'activité hydrothermale. L'activité hydrothermale et magmatique joue un rôle important, mais l'importance relative de ces deux processus est controversée et varie d'un gisement à l'autre ou à l'intérieur même d'un dépôt. À Olympic Dam par exemple (figure 13), des fluides réducteurs de hautes températures, d'origine magmatique et/ou météoritique profond, sont à l'origine de l'assemblage précoce à magnétite(±hématite)- chlorite-séricite-sidérite-(Py-Cp-Ur). Dans un second temps, des fluides météoritiques oxydants et de salinité modérée ont permis la déposition de l'hématite-séricite- chalcocite-bornite-pitchblende-fluorine dans des conditions de plus basses températures (Haynes et al. 1995). Un modèle magmatique a été proposé par Gandhi et Bell (1996). Il est basé sur les minéralisations en magnétite/hématite-apatite (figure 14). Le fer associé à la minéralisation proviendrait de la même source magmatique que les roches volcaniques et plutoniques encaissantes. Dans plusieurs gisements, comme à Kiruna et dans les TNO, des textures et des structures montrent des évidences d'une cristallisation survenue à partir de fluides magmatiques résiduels riches en fer (Nyström et Henriquez, 1994; Gandhi et Bell, 1996). Dans ce modèle, les gîtes riches en magnétite se forment à des températures élevées à partir de la fraction magmatique, alors que les gîtes à hématite se forment à des températures plus basses dans un milieu superficiel ou subaérien.

Les évidences directes qui favorisent le modèle magmatique sont cependant faibles. Dans bien des gisements, il n'y a aucun lien avec le magmatisme (Hitzman et al., 1992). Lorsque les minéralisations sont associées à des intrusions, la composition des magmas est granitique à syénitique. Il n'y a pas d'évidence de massifs anorthositiques ou gabbroïques expliquant l'apport du fer. De plus les températures estimées lors de la déposition en fer ne sont pas compatibles avec les températures qui accompagnent le magmatisme. Le contenu en TiO_2 est également très faible en comparaison avec les gîtes magmatiques.

L'origine de l'hématite dans certains gisements stratifiés est controversée. Des auteurs suggèrent qu'il s'agit d'oxydes de fer primaires issus de solutions hydrothermales ou de processus exhalatifs-syngénétiques, alors que d'autres proposent que l'hématite serait le produit de remplacement de la magnétite (Hitzman et al. 1992). Dans plusieurs gisements, les inclusions fluides, les textures de remplacement, la cohérence des patrons d'altération et l'altération associée aux veines plaident en faveur de processus hydrothermaux (Borrok et al., 1998). L'énorme quantité de fer déplacée et précipitée et le volume d'altération impliquent un vaste système hydrothermal qui ne peut être expliqué par des systèmes porphyriques ou de skarns.

Le fait que la nature du magmatisme est indépendant de la minéralisation et qu'il n'y ait aucun lien avec des intrusions dans certains gisements, comme ceux du district de Cloncurry, porte à croire que le vaste système hydrothermal accompagnant ces gisements n'est pas d'origine magmatique. Barton et Johnson (2000) soulignent l'importance des évaporites dans le transport du sodium, du fer et des métaux de bases par des saumures salines pauvres en souffre (figure 15).

2.7 Particularité du gisement archéen d'oxydes de fer à Cu-Au de Salobo, Brésil

Requia et Fontboté (1999) ont été les premiers à identifier Salobo comme appartenant à la catégorie des oxydes de fer polymétalliques. Actuellement, c'est le seul dépôt d'oxydes de fer d'âge Archéen (Requia et al., 2003).Le dépôt appartient au holding CVRD (Companhia Vale do Rio Doce : *http ://www.cvrd.com.br/produtos.htm*) et a été découvert en 1977 par géochimie de ruisseaux, puis de sols, faites sur des anomalies magnétiques survolées en 1973-1974 (de Pontes Vieira et al., 1988). Les réserves sont estimées à 789 Mt à une teneur moyenne de 0,96% Cu et 0,52 g Au/t (Souza et Vieira, 2000).

2.7.1 Géologie du gisement de Salobo

Le gisement de Salobo est situé au SE de l'état de Pará, dans la province minérale de Carajás, à l'est du craton Guapore d'âge Archéen et Protérozoïque précoce (figure 16). Ce gisement est localisé dans des roches sédimentaires et volcaniques amphibolitisées et encaissées dans des gneiss (figure 17); Lindenmayer, 1990; Delgado et al. 1994). Salobo se situe dans la Formation de Salobo-Pojuca d'âge archéen. Il s'agit d'une séquence de roches volcano-sédimentaires déposée dans un bassin de rift (Zang et Fyfe, 1995). La formation est constituée de trois unités, de la base vers le sommet : 1)de basaltes continentaux d'affinité tholéiitique, 2) de formations de fer silicatées à la base (Type I : fayalite-magnétite) et alumineuses au sommet (Type II magnétite- grenat), et 3) de graywackes (Lindenmayer, 1990).

Le gisement est bordé au nord par une faille qui sépare le socle gneissique fortement albitisé et la séquence volcano-sédimentaire. Deux intrusions de granitoïdes se sont mises en place en marge du dépôt de Salobo : 1) un granite alcalin, sodique et métalumineux formé dans des conditions mésozonales (granite de Type I) et 2) une syénite à feldspath-quartz, alcaline, potassique, et post-tectonique, analogue à des granitoïdes intra cratoniques de type A.

2.7.2 Caractéristiques du gisement de Salobo

La géologie et la minéralisation à Salobo sont typiques d'un dépôt de type oxydes de fer polymétalliques : formations de fer épigénétiques, faibles teneurs en TiO_2, vaste altération potassique superposant une altération sodique, minéralisation en Cu-Au, anomalies en Ag, Co, U, Mo, F et Terres Rares légères, et présence d'intrusions tardives (Requia et Fontboté, 1999). Le degré de métamorphisme est élevé par rapport à la majorité des autres gisements, mais est comparable à certains gisements du district minier de Cloncurry en Australie. Les deux caractéristiques qui distinguent cependant le gisement de Salobo sont : 1) la composition mafique et l'affinité tholéiitique de l'encaissant et 2) l'âge archéen de la minéralisation (2576 et 2562 Ma ; Requia et al., 2003).

La minéralisation est stratifiée et localisée dans des bandes foliées à granoblastiques riches en magnétite ou dans des lentilles fortement déformées à l'intérieur de la formation de fer de type I (silicatée). De faibles quantités de grenat almandin, grunérite, fayalite, biotite et sulfures sont présents. Les sulfures sont surtout associés à la magnétite, localement avec les silicates, et leur quantité augmente avec le contenu en magnétite. Ils sont principalement disséminés ou sous forme de remplissage dans des fractures, avec quelques lentilles massives <1m d'épaisseur (Lindenmayer, 1990). Les sulfures identifiés sont principalement la bornite et la chalcosite avec une faible proportion de chalcopyrite et de covellite et des traces de molybdénite, de digénite, d'or et d'argent (Requia et Fontboté, 2000). La chalcopyrite est précoce et associée principalement aux roches à magnétite-fayalite, alors que la bornite et la chalcosite prédominent dans les formations de fer à magnétite-grunerite-biotite-chlorite. L'or est localement observé en flocons dans des veines non-déformées de chlorite et de stilpnomelane recoupant les formations de fer. Des arséniures de cobalt, la safflorite et la cobaltite, se trouvent en traces et sont localisées dans des veines non-déformées avec la magnétite, la chalcopyrite et l'épidote. De l'uraninite est également présente.L'altération hydrothermale a été étudiée par Lindenmayer (1990), Lindenmayer et al. (1995) et Requia et Fontboté (1999, 2000). Lindenmayer (1990) a distingué deux altérations hydrothermales dont la minéralogie est en équilibre avec un métamorphisme au faciès des amphibolites rétrogradé aux schistes verts. Requia et Fontboté (2000) ont précisé les dimensions et la chimie du système d'altération. Celui-ci atteint plus de 3 km de long par plus de 500 m de large. Les amphibolites ont enregistré deux altérations successives : une première alcaline et une seconde potassique. L'altération alcaline est intense et localement préservée avec des teneurs en Na_2O supérieures à 4,5%. L'altération potassique (K_2O > 4,6%) est marquée par le remplacement partiel ou complet des plagioclases par le feldspath-K ou la biotite. La minéralisation semble coïncider avec les zones fortement altérées en potassium.

L'origine des formations de fer et l'âge de la minéralisation en Cu-Au à Salobo sont controversés. Les formations de fer ont été interprétées comme étant d'origine

syngénétique et exhalatif – SEDEX (Lindenmayer, 1990 ; Figueiredo et al., 1994) ou d'origine épigénétique (Requia et Fontboté, 2000). La formation de fer de type I est caractérisée par des anomalies positives en Europium et un patron de fractionnement des Terres Rares très prononcé, ce qui suggère une origine hydrothermale. Lindenmayer et Teixeira (1999) ont par la suite associé la minéralisation en Au-Mo-Cu à un système porphyrique cuprifère.

L'âge de la minéralisation à Salobo est controversé. D'après Lindenmayer (1990), la minéralisation s'est mise en place au cours du dernier épisode hydrothermal entre 2,58 et 2,55 Ga, lors de la remontée et de la granitisation du socle. Par la suite, Lindenmayer et al. (1995) ont proposé que la minéralisation soit liée à la mise en place d'un granite anorogénique daté à 1880 Ma. Selon les textures pétrographiques entre la magnétite et la chalcopyrite, Requia et Fontboté (2000) indiquent que la minéralisation est post-métamorphique. Requia et al. (2003) tendent à confirmer la première hypothèse de Lindenmayer et indiquent que la minéralisation s'est mise en deux étapes. La principale phase de minéralisation est associée à un granite tardi-orogénique (Old Salobo Granite) et est datée à 2576±1,4 Ma (datation sur molybdénite). La minéralisation secondaire est datée à 2561,7±3,1 Ma et correspond au développement, ou à des réactivations, de failles locales. D'après Ethridge et Bartsch (2000), la minéralisation dans d'autres gisements de la province minérale de Cajaras est sous la forme de brèches, recoupe la foliation régionale et est postérieure au métamorphisme de haut grade.

3. Potentiel pour les minéralisations de type Salobo ou oxydes de fer polymétalliques dans le NE de l'Amérique du Nord

Le gisement de Salobo est un gisement d'oxydes de fer dont l'âge des roches hôtes et de la minéralisation est archéen, tandis que tous les autres gisements d'oxydes de fer sont d'âge protérozoïque. Cette exception fait en sorte que les provinces archéennes du NE de l'Amérique du Nord (Province du Lac Supérieur) sont des secteurs favorables à l'exploration au même titre que les territoires protérozoïques.

3.1 Stratégie d'exploration pour les gisements d'oxydes de fer polymétalliques

Régionalement, l'exploration pour les gisements d'oxydes de fer se fait en intégrant des données géologiques, géophysiques et géochimiques. Différentes approches sont utilisées pour identifier des cibles d'exploration : 1) approche métallogénique, 2) approche structurale, 3) approche géophysique, et 4) approche géochimique. La méthodologie de chacune de ces approches est présentée et décrite en détails. En combinant ces différentes approches, des cibles d'exploration peuvent être identifiées.

3.1.1 Approche métallogénique

La majorité des dépôts d'oxydes de fer sont groupés à l'intérieur de provinces métallifères (Lac de l'Ours, Tennant Creek, Kiruna, Salobo). La compilation des gîtes d'oxydes de fer et des gîtes apparentés (skarns, pegmatites) permet déjà d'identifier certaines provinces métallifères favorables à l'exploration. Les indices, les gîtes et les mines d'oxydes de fer et les gîtes apparentés (pour un total de 192) ont été compilés pour le Québec, le Labrador, l'Ontario, et les états de New York et du New Jersey (figure 18). Ces différents types de minéralisation ont été placés dans un cadre chronostratigraphique pour le Québec, le Labrador, et le SE de l'Ontario (figure 19). Les gîtes d'oxydes de fer et certaines minéralisations épigénétiques en uranium se forment à la fin de l'orogenèse Grenvillienne (≈1 Ga).

Les dépôts et indices d'oxydes de fer répertoriés dans le NE de l'Amérique du Nord appartiennent à deux types. Le premier type est un dépôt d'oxydes de fer polymétalliques à Cu-ÉTR-U et à faible teneur en titane. Le seul dépôt connu au Québec et classé dans cette catégorie est celui de Kwijibo dans la province du Grenville (figure 18). Le deuxième type est un dépôt d'oxydes de fer monométalliques à magnétite-apatite ou à hématite et à faibles teneurs en TiO_2. Ces gisements sont localisés dans les états de New York et du New Jersey et ont été exploités pour le fer. Pour le NE des États-Unis, la compilation comprend des indices et d'anciennes exploitations de fer qui remontent au siècle dernier (Mine Lyon par exemple avec 350 Mt à 31% Fe et 0,6% Cu). Des indices minéralisés en hématite situés aux contacts de roches métamorphiques et des sédiments du Cambrien (Groupe de Potsdam) et dans des brèches (Brown, 1983) sont également compilés.

Les gîtes apparentés de près ou de loin aux dépôts d'oxydes de fer sont divisés en 6 types de dépôts différents (tableau 4). Les skarns ferrifères sont le type de minéralisation qui s'apparente le plus aux gîtes d'oxydes de fer. Les skarns ferrifères se produisent 1) par métasomatisme de contact ou par remplacement le long de bordures d'intrusions ignées ou 2) par métamorphisme dans des roches sédimentaires et volcaniques en relation avec des intrusions (Gross, 1996). Les mines de Marmora dans le Grenville en Ontario (28 Mt @ 42,8% Fe) et de Hilton près de Hull sont deux exemples de skarns à magnétite-épidote-grenat.

Il existe également des similitudes pétrogénétiques et minéralogiques entre les gîtes d'oxydes de fer et certaines minéralisations en uranium ou en métaux rares (Richardson et Birkett, 1996). Les minéralisations en Zr, Nb, Be, U, Th, Ta, ÉTR, Y, et Ga dans les carbonatites et les roches hyperalcalines sont associées dans le temps et l'espace à des roches felsiques anorogéniques riches en fluore. Les gîtes d'âge Protérozoïque moyen de Letitia (1,8 Mt @ 0,4% BeO et 0,24% Nb_2O_5) et Stranger Lake (52 Mt @ 2,9% ZrO_2 et 0.54% ÉTR) au Labrador et Kipawa dans le SO du Québec en sont des exemples (Richardson et Birkett, 1996). Les gîtes d'oxydes de fer dans les Adirondacks et le New Jersey sont souvent associés à des pegmatites (Foose et McLelland, 1995). Les gîtes à métaux rares associés à des roches hyperalcalines ou à des carbonatites, et les indices et mines d'uranium (U, U-Th, U-

Cu) de différentes origines ont été également compilés sur tout le territoire.

Tableau 4: Gîtes apparentés aux gisements et indices d'oxydes de fer.

Gîte apparenté	Type de minéralisation	Exemples
Skarns ferrifères (contenu en Fe très élevé)	Au contact de syénite et de marbre	Marmora Hilton
U-Th (uranium-thorium)	Pegmatites	Madawaska Gatineau
U-Cu-(Au, Ag, Mo, Ba)	Filons, Stockwerks	Sakami Labrador
U	Imprégnations Conglomérats pyriteux	Sabka
Nb, ÉTR, Y, Zr	Associé au magmatisme alcalin	Letitia Strange Lake Kipawa
Li, Be	Pegmatites	Québec Lithium, Abitibi

3.1.2 Approche structurale

La minéralisation des gisements d'oxydes de fer est principalement contrôlée par les éléments structuraux, autant à l'échelle régionale que locale. Ces gisements se trouvent souvent alignés ou à l'intersection de linéaments majeurs (Olympic Dam par exemple). L'approche structurale proposée pour cette étude se base sur l'interprétation de linéaments géophysiques à l'échelle du Québec et du Labrador. Les linéaments géophysiques interprétés sont ensuite comparés entre eux par différentes méthodes et, finalement, par rapport à des structures régionales connues (failles géologiques ou des zones de rifts).

L'interprétation de linéaments géophysiques est basée sur des cartes du champ magnétique total et du gradient vertical de la gravité. Les données gravimétriques et magnétiques proviennent du gouvernement fédéral. Des traitements d'ombrage et de rehaussement ont été faits afin de bonifier certaines données, notamment sur le champ magnétique total. La sélection de certaines longueurs d'ondes en particulier a permis de mettre en évidence ou de préciser des linéaments.

Trois types de linéaments géophysiques sont distingués : les linéaments francs, les linéaments d'entraînement et les linéaments crustaux. Les linéaments francs sont définis à partir de discontinuités nettes ou de bris de susceptibilité magnétique. Ils ont généralement un angle supérieur à 30 degrés par rapport au grain magnétique (figure 20). Ces linéaments sont interprétés comme des failles « cassantes » parce qu'il n'y a pas de plissement apparent du grain magnétique en bordures de ces linéaments. Les linéaments d'entraînement sont caractérisés par le plissement et l'entraînement du grain magnétique en bordures de creux magnétiques continus et parallèles au grain tectonique. Ces linéaments peuvent atteindre une centaine de kilomètres de longueur et sont interprétés comme des corridors de déformation

ductile séparant des domaines magnétiques distincts (figure 20). Les linéaments crustaux sont définis comme des linéaments plus profonds dans la croûte et délimitent des domaines gravimétriques distincts (figure 21).

Afin de valider l'interprétation des linéaments, la position et l'orientation des linéaments magnétiques et gravimétriques ont été comparées au fichier de failles cartographiées ou interprétées par les géologues du gouvernement provincial dans la Province du Lac Supérieur (figure 22). Il s'agit, dans cet exercice, de valider la présence de certains linéaments ou d'associer des linéaments à un événement tectonique particulier. Dans l'ensemble, les positions et les orientations des linéaments géophysiques sont très comparables et permettent même de prédire l'orientation des structures dans les zones non cartographiées.

Trois méthodes sont utilisées afin de comparer les linéaments entre eux : la distribution statistique des linéaments par provinces géologiques, les subdivisions en familles de linéaments par filtres directionnels et l'évaluation de la densité de linéaments.

L'interprétation géophysique a permis de distinguer cinq familles de linéaments à partir des données magnétiques et gravimétriques (figure 23 et figure 24). Des filtres directionnels permettent de séparer les linéaments francs et d'entraînement pour les directions prédominante N-S, NE-SO, NO-SE, ONO-ESE et E-O (figure 24). Les linéaments d'entraînement sont surtout présents dans la province du Lac Supérieur et ont des orientations NO-SE et, dans une moindre mesure, E-O. Ils correspondent aux grands couloirs de déformation qui délimitent les ceintures de roches vertes archéennes, tant en Abitibi (Failles Porcupine-Destor et Cadillac Larder lake), à la Baie de James, que dans le Grand-Nord (décrochements senestres). De grands linéaments d'entraînement NNO-SSE caractérisent également la Zone Tectonique d'Abloviak au Labrador.

Les linéaments francs et crustaux SE-NO sont les plus abondants (figure 23 et figure 24). Ils traversent toutes les provinces géologiques, perpendiculairement au front du Grenville, et se trouvent même au large du Golf du Saint-Laurent (figure 25). Bon nombre de ces linéaments délimitent des domaines de gravité contrastée et correspondent probablement à des accidents crustaux anciens (Ouverture de l'Océan Iapetus). Dans la Province du Lac Supérieur, certains des linéaments francs correspondent, ou sont parallèles, à des structures ductiles archéennes de même orientation, alors que d'autres linéaments recoupent les structures ductiles. Plusieurs linéaments traversent le contact entre la Province du Lac Supérieur et le Grenville, dont un linéament en particulier qui atteint plus de 1000 km de long. Les linéaments SE-NO traversant le Grenville pourraient être des structures présentes dans le socle sous- jacent ou être des failles plus jeunes que le Front du Grenville (Graben du Saguenay par exemple). Dans le Grenville, les linéaments SE-NO et, dans une moindre mesure, les linéaments ESE-ONO et E-O (figure 24), se corrèlent à des événements extensifs protérozoïques, paléozoïques ou mésozoïques. Ils sont orientés perpendiculaires à la Province du Grenville et correspondent pour la majorité à des structures de rifts avortés. Au sud-ouest du Grenville et dans le Pontiac, ces

linéaments correspondent à des structures du rift du Lac Supérieur (Protérozoïque précoce) et à des failles de graben du Timiskaming (Mésozoïque). Dans le sud du Bassin de Mont-Laurier, des minéralisations en uranium et fer sont localisées à l'intersection de ces deux rifts, alors que d'anciennes mines et des gîtes de fer-apatite dans les Adirondack sont situés à l'intersection du graben du Saint-Laurent avec le prolongement du rift du Lac Supérieur. Les linéaments géophysiques SO-NE au Québec et au Labrador sont parallèles au Front de Grenville et correspondent soit à des événements extensifs ou compressifs (figure 26). Dans la Province du Lac Supérieur, les linéaments SO-NE se concentrent le dans l'axe du rift avorté du Lac Cambrien à l'ouest de la Fosse du Labrador. Certains linéaments délimitent la Faille de Vaujours, une structure complexe et courbe qui a jouée à plusieurs reprises en failles inverses à l'Archéen et en failles normales au Protérozoïque. Dans la Province de Grenville, les linéaments SO-NE correspondent à des structures de chevauchement d'âge grenvillien, à des domaines anorthositiques allongés SO-NE (Côte Nord) ou à des structures d'extension liées à l'ouverture de l'Océan Iapétus (Rift du Lac Melville au Labrador par exemple), voire même de l'Océan Atlantique (figure 27). Les intersections de ces deux familles de linéaments (SE-NO et SO-NE) sont parfois l'hôte d'une intrusion, comme celle de Sept-îles (figure 28).

La densité des linéaments (figure 29), exprimée en terme de surface, permet d'illustrer le degré d'évidence d'un linéament et de visualiser les régions de plus forte densité de linéaments. La méthode permet de superposer différentes couches d'interprétation de linéaments. Elle consiste à segmenter en parts égales chacun des linéaments afin de former une série de points alignés. La superposition des linéaments est ainsi traduite en densité de points. Les densités de points les plus élevées correspondent à des régions où des linéaments s'entrecroisent ou à des linéaments qui sont observés plus d'une fois, soit sur les cartes magnétiques ou gravimétriques. La méthode permet ainsi de délimiter des régions allongées (surfaces) qui matérialisent des linéaments avec un certain degré de confiance.

3.1.3 Approche géophysique

La principale caractéristique des gisements d'oxydes de fer est l'abondance de fer (>100 Mt à 30-50% Fe). Le fer est contenu sous la forme de magnétite précoce ou d'hématite tardive. Le système peut également évoluer vers un pôle plus réducteur en précipitant de la pyrrhotite. La géophysique est un outil de première importance dans l'exploration de ce type de gisement. De fortes anomalies magnétiques peuvent témoigner de la présence de magnétite et/ou de pyrrhotite, et la masse du dépôt à hématite, magnétite et/ou pyrrhotite engendre une anomalie gravimétrique positive. La majorité des gisements contenant de la magnétite et/ou de la pyrrhotite ont des anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes. Si ces anomalies sont de forme circulaire, elles suggèrent la présence d'un diatrème. Il est à noter que les sulfures ne sont pas associés aux pics magnétiques, mais plutôt à la phase à hématite tardive.

L'approche géophysique préconisée pour l'exploration régionale des oxydes de fer

consiste à isoler d'abord les anomalies gravimétriques positives (figure 30). Une fois que les hauts gravimétriques sont identifiés, la carte magnétique est superposée aux anomalies gravimétriques (figure 31). Cette méthode est utilisée pour identifier les zones correspondant à la fois à des hauts magnétiques et à des hauts gravimétriques (figure 32). Les données magnétiques isolées dans les anomalies gravimétriques sont ensuite étalonnées avec un nouveau spectre de couleurs. Ces zones correspondent aux cibles géophysiques favorables à l'exploration des gîtes d'oxydes de fer.

Les données radiométriques en K, U et Th permettent d'identifier les anomalies géochimiques. Le potassium est relié à l'altération en feldspath potassique ou en biotite située généralement au pourtour du dépôt. L'uranium correspond à des enrichissements dans les gisements d'oxydes de fer ou dans les gîtes apparentés. Cependant, aucune donnée radiométrique n'a été utilisée dans cette étude.

3.1.4 Approche géochimique

Les gisements polymétalliques sont associés à une suite d'éléments caractéristiques. Outre le fer, au moins le 2/3 des gisements ont des anomalies en F, Co, Mo et Terres Rares. Viennent ensuite en ordre d'importance, le Cu, Au-Ag-U, Ba, P, Cl-W-Sn-Zn-Bi,et plus rarement le Se, Hg, B, Y.L'approche géochimique consiste à compiler les anomalies en cuivre, uranium, cérium, lanthane et cobalt, qui se trouvent dans les sédiments de fonds de lac ou dans les ruisseaux. Combinées à des approches métallogéniques et géophysiques, les zones anomales en un de ces éléments, ou au cortège d'éléments indicateurs, correspondent à des cibles potentielles pour l'exploration.

Les données géochimiques brutes des sédiments de fonds de lac (111 551 échantillons) couvrent le Grand Nord, une partie du Moyen Nord, l'Abitibi, et le Grenville à partir du Saguenay jusqu'à Blanc Sablon (figure 33). Les données ont été subdivisées par provinces géologiques et ensuite comparées et nivelées. Des comparaisons statistiques indiquent qu'il y a une bonne corrélation entre l'U et le Mo dans la Provincedu Lac Supérieur, entre le Co et le Pb, et le Ba et le B pour certains endroits au Québec, entre le Ba et le Co dans le Province de Ray et le centre de la Fosse du Labrador et entre U, Th, Y dans le Supérieur et le Grenville (Côte Nord). Dans le Grenville, le cérium a une corrélation ~ 0,5 avec le lanthane. Le plomb est surtout présent à la Baie de James et dans le Grenville à l'O et au SO de Sept-îles. Par contre aucune corrélation n'a pu être faite avec le P, Na, K, F, Au, Ag, et le Bi parce qu'il n'y a pas suffisamment de données ou que les seuils de détection sont trop bas.

Les éléments du Cu, Ce, Co, et de l'U ont été utilisés pour l'étude. Les anomalies géochimiques sont déterminées par province géologique et à partir d'un seuil correspondant au bruit de fond régional (figure 34). Les centiles 95, et 97 ont été choisi comme étant des anomalies géochimiques favorables. Les anomalies géochimiques en Cu-U-Ce (centile 95) sont présentées par provinces géologiques

(figure 35). Une logique floue est ensuite appliquée en superposant les différentes anomalies et centiles. Pour chaque élément (Cu, U et Ce) et pour chacun des centiles >95 et >97, une valeurde 1 a été assignée par pixel. Ainsi, en combinant les anomalies >95 et >97 centiles en Cu, U et Ce, le nombre maximum est de 6 et correspond aux plus fortes anomalies. Par contre, une valeur de 1 signifie qu'il y a une faible anomalie >95 centile de un des trois éléments.

Les sédiments de ruisseaux ont été analysés à partir d'échantillons de silts et de minéraux lourds provenant du SO de la Province de Grenville. Les analyses sont utilisées pour le Bassin de Mont-Laurier avec la même approche que pour les sédiments de fonds de lac.

3.2 Identification des secteurs d'intérêt

L'identification des secteurs d'intérêt est faite en combinant plus d'une approche. De cette façon, les cibles sont plus significatives et précises. Les cibles sont identifiées pour chacune des provinces géologiques : Province de Grenville (Côte-Nord et sud du Québec et de l'Ontario, New York et New Jersey), Province de Nain (Labrador), et Province du Lac Supérieur (Grand-Nord québécois).

3.2.1 Province du Grenville : sud du Québec et de l'Ontario

Le sud du Québec et de l'Ontario contient plusieurs indices et gîtes apparentés aux dépôts d'oxydes de fer, en particulier les dépôts ferrifères au sud du Bassin de Mont- Laurier, au nord d'Ottawa (figure 36). Le long de la marge ouest de ce bassin protérozoïque, deux domaines uranifères sont également présents avec quelques gîtes à Terres Rares (CMBBZ).

Les anomalies gravimétriques et magnétiques coïncidentes et les principaux linéaments géophysiques sont superposés aux gîtes apparentés connus (figure 37). Plusieurs gîtes uranifères à l'ouest d'Ottawa, et quelques-uns au nord du Bassin de Mont-Laurier, sont situés près ou dans des anomalies gravimétriques et magnétiques coïncidentes. Les skarns ferrifères au NO d'Ottawa sont par contre localisés en bordures de hauts magnétiques seulement. Au NO d'Ottawa, la localisation des gîtes apparentés coïncide avec l'intersection des grabens du Timiskaming et d'Ottawa-Bonnechère. Ces gîtes sont localisés sur ou à moins de quelques kilomètres d'un linéament géophysique orienté ONO ou NO (figure 38). Les indices d'U et de Cu au NNO d'Ottawa (secteur de Mont-Laurier) sont localisés à l'intersection de deux linéaments majeurs orientés N-S et NE-SO.

Le traitement des données géochimiques des sédiments de ruisseaux a permis de mieux documenter le potentiel en oxydes de fer du Bassin de Mont-Laurier (figure

39). Les anomalies géochimiques ont été établies séparément à partir d'échantillons de silts (U, Cu et La) et de minéraux lourds (U, Cu et Ce). La position des échantillons dans les silts est sensiblement différente de la couverture des échantillons de minéraux lourds. Dans les silts, les anomalies en U ne correspondent généralement pas à celles en Cu. Cependant, des anomalies coïncidentes ou des groupes d'anomalies en Cu-U-ÉTR dans les silts sont présents dans le secteur de Mont-Laurier et coïncident avec des indices à U-Cu. À environ 75 km à l'ONO d'Ottawa, des groupes d'anomalies en Cu-U- ÉTR coïncident avec des gîtes à pegmatites et d'U.

Les anomalies géochimiques en Cu-U-La dans les silts ont été combinées pour la Gatineau et les régions adjacentes en utilisant une logique floue. Pour chaque élément (Cu, U et La) une valeur de 1 a été assignée par pixel pour les valeurs >95 centile. En combinant les anomalies en Cu, U et La, le nombre maximum est de 3 et correspond aux plus fortes anomalies.

Deux cartes regroupant les approches métallogénique, géophysique, et structurale sont analysées par rapport à la densité des anomalies géochimiques (figure 40). La majorité des granitoïdes de la Gatineau correspondent à des anomalies gravimétriques et magnétiques coïncidentes. Quelques anomalies géochimiques superposées sont situées dans ou au pourtour de ces intrusions. Certaines syénites au nord et à l'est du Bassin de Mont-Laurier coïncident avec deux ou trois anomalies géochimiques superposées et des hauts gravimétriques et magnétiques.

Pour la région du sud du Québec et de l'Ontario, les secteurs cibles se trouvent à l'intersection de zones de rifts et dans les zones de déformation aux frontières des sous- provinces (figure 41).

3.2.2 Province du Grenville, Côte-Nord

Le seul gîte reconnu comme étant des oxydes de fer polymétalliques (Cu-La-Ce) est celui de Kwyjibo, situé à 120 km au NE de Sept-îles (voir la figure 19). Ce gîte est caractérisé par un signal radiométrique spécifique avec des anomalies coïncidentes en K±Th±U. La minéralisation est encaissée dans des gneiss quartzo-feldspathiques et est associée à des oxydes de fer (Cayer et al. 1998). Trois autres indices ont été également identifiés sur la propriété. Les valeurs en Cu sont inférieures à 2%. La magnétite est le principal oxyde et forme une enveloppe de dimension moyenne de plus de 2 km de longueur par 750 m de largeur. Un halo d'hématite spéculaire de moins de 100 m entoure cette enveloppe. La minéralisation stratiforme est associée à des bandes de magnétite semi-massives (>40% magnétite) d'une centaine de mètres de largeur par plus de 1 km de longueur et sont orientées NE. Des faciès de brèches hydrothermales, de stockwerk, et de veines se trouvent dans les bandes à magnétite semi-massive, alors que de la dissémination et des veinules caractérisent la minéralisation dans les gneiss. Trois granites de dimension kilométrique à pluri-kilométriques sont situés à 1-2 km des différents indices.

Les anomalies radiométriques en K forment une vaste anomalie qui coïncide avec

les différents types de minéralisation. Ces anomalies seraient causées principalement par la présence de feldspath potassique. L'uranium montre une corrélation positive avec le Th. Les anomalies en Th sont ponctuelles et se trouvent au SO, centrées sur les faciès à magnétite semi-massive et de brèches hydrothermales des deux indices (Josette et Malachite). Des anomalies ponctuelles en U sont situées sur les indices Josette et Fluorine et correspondent à l'emplacement des faciès à magnétite semi-massive. Le granite au NE ne correspond à aucune anomalie radiométrique.

Le potentiel pour des minéralisations de type oxydes de fer dans le terrane de Wakeham (moyenne Côte-Nord) a été souligné par Clark et Gobeil (1992). Ce terrane est une ceinture allochtone monocyclique (Rivers et al., 1989) constituée de roches métasédimentaires et métavolcaniques (Supergroupe de Wakeham). Les roches reposent sur un socle gneissique d'âge protérozoïque et se seraient déposées dans un rift continental. Le Supergroupe de Wakeham est divisé en deux groupes; celui d'Aguanus qui est formé de grès et d'une grande épaisseur de rhyolite et de quelques niveaux de basaltes (1271 Ma), et le Groupe de Davy qui repose en discordance d'érosion et qui est formé principalement de schistes. Des filon-couches de gabbro généralement concordants sont logés dans les deux groupes. Plusieurs plutons subcirculaires tardi- à post-tectoniques (anorogéniques) de granite à biotite et de monzonite quartzifère (993 Ma) sont présents.

La majorité des indices de Cu dans le Groupe de Wakeham sont associés à des veines de quartz en bordure de contacts entre des filon-couches de gabbro et des quartzites du Groupe de Davy (Choinière et Clark, 1994). Des indices de Cu-Au-Ag sont associés à la zone de déformation du lac Carron. Des indices d'uranium sont également présents dans le sud et sont associés au granite du Lac Turgeon à l'ouest et au socle gneissique à l'est. Au Lac Noël, de la chalcopyrite-chalcocite-hématite sont présentes dans une séquence de brèches de basaltes et de rhyolites. Des anomalies en Ba, ÉTR, F, Mo, Pb, Sr, Th, U, Y et Zn sont présentes au nord du Lac Jérémie. Des indices de fer sont localisés près de contacts quartzite-gabbro.

Dans la Province de Grenville, la superposition des anomalies en Cu, U, Ce et Co, pour le centile >95, permet de délimiter les deux régions précédemment décrites, soit la région de l'indice Kwyjibo et celle à l'est du Groupe de Wakeham (figure 42). Les anomalies géochimiques U, Ce et en Cu sont combinées en utilisant une logique floue pour les centiles >95 et >97 (figure 43). Les plus fortes anomalies (>97 centile) combinées de Ce, U et Co au NE de Sept-îles (centre de l'encadré de la figure 43) correspondent à la région du gîte de Kwyjibo. Sur la Côte Nord, la majorité des anomalies égales ou supérieures à 4 (sur une échelle de 6) sont localisées dans ou en bordures de granitoïdes et à la bordure nord et est du Groupe de Wakeham.

La combinaison des approches géochimique, géophysique et structurale est illustrée en détails et par secteurs à la figure 44. Le gîte de Kwyjibo est clairement exprimé à l'échelle régionale par la géochimie de fonds de lac, ce qui indique que l'approche est valable pour localiser d'autres gîtes d'oxydes de fer dans les provinces du Grenville et du Lac Supérieur. Les anomalies géochimiques dans le secteur du gîte de Kwyjibo sont localisées à l'intersections de linéaments NE-SO et NO-SE ou sont

bordées par l'une ou l'autre de ces deux familles de linéaments. Elles coïncident également avec des anomalies magnétiques positives. Une combinaison des approches géochimique et structurale est illustrée à la figure 45. Les secteurs les plus favorables à l'exploration de gîtes d'oxydes de fer sont ceux où une densité élevée d'anomalies géochimiques est superposée à une densité élevée de linéaments géophysiques.

3.2.3 Province de Nain, Labrador

Au Labrador, la majorité des indices et dépôts d'uranium et métaux rares sont situés dans les roches archéennes et protérozoïques (Ceinture Mobile Centrale; Province de Nain et Groupe de Seal Lake). L'interprétation géophysique du Labrador faite à partir des données géophysiques du fédéral, a permis d'établir des corrélations entre les minéralisations en U-(Cu) et ÉTR et certains linéaments et quelques anomalies géophysiques (figure 46 et figure 47). La majorité des minéralisations en uranium sont situées au Front du Grenville près ou dans la Province archéenne de Nain. Le point triple formé par le Groupe de Seal Lake, le Front du Grenville et la Province de Nain semble particulièrement intéressant du fait que les minéralisations en Cu-U sont d'âge tardi-grenvillien. À noter qu'aucun traitement géochimique n'a été effectué dans ce secteur.

3.2.4 Province du Supérieur, Grand-Nord du Québec

Dans la Province du Lac Supérieur, seulement un indice (un bloc erratique) d'oxydes de fer a été trouvé. Il s'agit de l'indice Sagar situé dans le centre de la Fosse du Labrador. Plusieurs types de minéralisations à Cu-U et U sont également présents dans ce secteur qui correspond au rift protérozoïque avorté du Lac Cambrien. Ce rift est associé à l'ouverture de la Fosse du Labrador vers 1800 Ma (figure 48).

Les anomalies géochimiques de fonds de lac en U, Cu et Ce sont compilées et normalisées sur l'ensemble du Grand-Nord québécois (figure 48). La majorité des anomalies géochimiques correspondent à des ceintures de roches vertes archéennes de la sous-province de Minto. L'approche de la logique floue dans le Grand-Nord permet d'identifier des cibles géochimiques significatives (figure 49). Cinq domaines géochimiques à Cu-Ce-U, Cu-Ce, U-Ce, ou U sont reconnus. Six anomalies ponctuelles à U-Cu-Ce (pour les centiles >95 et >97) et de premières importances sont reconnues dans ces cinq domaines (figure 50). Elles sont pour la plupart localisées le long de linéaments géophysiques. Par contre aucunes de ces anomalies géochimiques coïncident avec une anomalie gravimétrique et magnétique coïncidente. Parmi ces six anomalies, deux sont situées dans la sous-province de Bienville. Elles sont alignées ENE parallèles aux bassins sédimentaires d'âge protérozoïque de la formation de Sakami.

3.2.5 Synthèse des secteurs favorables pour l'exploration des dépôts d'oxydes de fer

La figure 51 illustre les secteurs les plus favorables pour l'exploration de nouveaux gisements d'oxydes de fer au Québec. Ces secteurs correspondent à des jonctions de points triples, à des zones de déformation aux frontières de domaines géologiques ou à des anomalies géochimiques isolées.

4. Conclusion

Cette étude montre que le potentiel est favorable dans l'est du Canada pour trouver desgisements de type Salobo ou oxydes de fer. L'approche intégrée de la métallogénie, de la structure (linéaments géophysiques), de la géophysique et de la géochimie permet de définir des secteurs d'intérêt pour l'exploration. Une approche de logique floue appliquée à la géochimie de sédiments de fonds de lac et de ruisseaux permet de bonifier les données géochimiques. La transformation des linéaments géophysiques en points puis en surfaces de probabilité est également un apport méthodologique significatif.

Le seul dépôt d'oxydes de fer documenté actuellement au Québec, le gîte de Kwyjibo sur la Côte Nord, est reconnu par cette approche. Les secteurs ciblés pour l'exploration sont les frontières de blocs lithotectoniques dans la province du Grenville, notamment les zones tectoniques bordant la Ceinture Mobile Centrale et celle du Saint-Maurice. Des cibles intéressantes dans le Grenville sont également générées au nord et à l'est du Groupe de Wakeham. La rencontre de rifts (région d'Ottawa) et des points triples correspondant à d'anciens aulacogènes protérozoïques sont favorables, notamment au Labrador (Groupe de Seal Lake) et à l'ouest de la Fosse du Labrador (rift avorté du Lac Cambrien). Il y a également des cibles ponctuelles géochimiques de premières importances en bordure ou à l'intersection de linéaments à l'ouest de la Fosse du Labrador, dans la Province du Lac Supérieur.

Tous les secteurs ciblés peuvent être précisés et de nouvelles cibles peuvent être générées en intégrant de la lithogéochimie, des cartes géologiques plus détaillées, et une interprétation plus minutieuses des linéaments. Bien que les méthodes et les données générées par cette étude soient appliquées à la recherche de gisements d'oxydes de fer, elles peuvent s'appliquer à d'autres types de gisements selon des critères spécifiques choisis.

5. Remerciements

Sincères remerciements à Réal Daigneault et Michel Jébrak pour la lecture critique du texte et à Marie-Line Tremblay pour la mise en page du document.

6. Références

Adshead-Bell, N.S. 1998. Evolution of the Starra and Selwyn high-strain zones, Eastern Fold Belt, Mount Isa Inlier; implications for Au-Cu mineralization. Economic Geology, 93: 1450-1462.

Baker, T. 1998. Alteration, mineralization, and fluid evolution at the Eloise Cu-Au deposit, Cloncurry district, Northwest Queensland, Australia. Economic Geology, 93 : 1213-1236.

Barton, M.D. et Johnson D.A. 2000. Alternative brine sources for Fe-Oxide (Cu-Au) systems : implications for hydrothermal alteration and metals. Cours intensif, Vancouver Mining Exploration Group and British Columbia & Yukon Chamber of Mines, 16 novembre 2000, Vancouver.

Barton, M.D., Johnson, D.A. et Zurcher, L. 2000. Phanerozoic Iron-Oxyde (-REE-CU-Au-U) systems in southwestern North America and their origins. Dans Fe-oxide-Cu-Au deposits: a discussion of critical issues and current developments. Extended symposium abstracts. M.D. Roberts et M.C. Fairclough, éditeurs. EGRU Contribution 58 : 5-11.

Barton, M.D. et Johnson D.A. 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au- U) mineralization. Geology 24 : 259-262.

Borrok, D.M, Kesler, S.E., Boer, R.H. et Essene, E. 1998. The Vergenoeg magnetite-fluorite deposit, South Africa : support for a hydrothermal model for massive iron oxide deposits. Economic Geology, 93 : 564-586.

Brown, C.E.1983. Mineralization, mining, and mineral resources in the Beaver Creek area of the Grenville Lowlands in St. Lawrence County, New York. US Geological Survey, Professional paper 1279, 22 p.

Cayer, A., Gauthier, M., et Chartrand, F. 1998. Étude des gîtes d'oxydes de fer minéralisés en cuivre et terres rares de la propriété Kwyjibo, Province de Grenville, Côte Nord. Affiche présentée lors du Colloque du Ministère à Québec.

Choinière, J. et Clark, T. 1994. Nouvelles analyses pour l'or dans les sédiments de lac de la région de Baie-Johan-Beetz (Moyenne –Côte-Nord). Document promotionnel PRO- 94-02. Ministère Énergie et Ressources du Québec.

Clark, T. et Gobeil, Y. (1992). Potentiel du Terrane de Wakeham pour des gîtes de Cu-U-Au-Ag de type Olympic Dam, et de Pb-Zn stratiformes en milieu gréseux. Document promotionnel PRO-92-05. Ministère Énergie et Ressources du Québec. 7 p.

Delgado, I. Pedreira, A.J. et Thorman, C.H. 1994. Geology and mineral resources of Brazil: a review. International Geology Review, 36: 503-544. De Pontes Vieira, E.A., Saueressig, R., Siqueira, J.B., Pinto da Silva, E.R, et Café de Castro, F. 1988. Caracterizaçao geologica da jazida polimetalica do Salobo 3A reavaliaçao. XXXV Congresso Brasileiro
de Geologia, 97-111.

Drew, L.J., Qingrun, M. et Weijun, S. 1990. The Boyan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. Lithos, 26; 43-65.

Etheridge, M. et Bartsch, R. 2000. Exploring for Fe-oxide Cu-Au deposits. Dans Iron oxide Copper-Gold deposits: separating fact from fantasy. Cours intensif, Vancouver Mining Exploration Group and British Columbia & Yukon Chamber of Mines, 16 novembre 2000, Vancouver.

Foose, M.P. et McLelland, J.M. 1995. Proterozoic low-ti iron-oxide deposits in New York and New Jersey: relation to Fe-oxide (Cu-U-Au-rare earth element) deposits and tectonic implications.

Geology, 23: 665- 668.

Figueiredo, B.R., Requia, K. et Xavier, R.P. 1994. Post depositional changes of the Salobo ore deposit, Cajaras Mineral Province, northern Brazil. Comunicaciones 45 : 23-32.

Frietsch, R. et Perdahl, J.A. 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. Ore Geology Reviews, 9: 489-510.

Gandhi, S.S. 1992. Magnetite-rich breccia of the Mar deposit and veins of the Nod prospect, southern Great Bear magmatic zone, Northwest Territories. Dans Current Research, Part C ; Geological Survey of Canada, Paper 92-1C ; 237-249.

Gandhi, S.S. et Bell, R.T., 1996. Gîtes de fer, de cuivre, d'uranium, d'or et d'argent de type Kiruna/Olympic Dam. *Dans* Géologie des types de gîtes minéraux du Canada, Géologie du Canada no. 8 ; 569-579.

Geijer, P. 1910. Igneous rocks and iron ores of Kiirunavaara, Luossavaara and Tualluvaara. Stockholm, Scientific and Practical Research in Lapland Arranged by Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, 278 p.

Gleason, J.D., Marikos, M.A., Barton, M.D. et Johson, D.A. 2000. Neodymium isotopic study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) systems. Geochimica and Cosmochimica Acta, 64: 1059-1068.

Gow, P.A., Wall, V.J., Oliver, N.H.S. et Valenta, R.K. 1994. Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: further evidence of hydrothermal origins. Geology, 22: 633-636.

Gross, G.A. 1996. Skarns ferrifères. *Dans* Géologie des types de gîtes minéraux du Canada, Géologie du Canada no. 8 ; 544-550.

Haapala, I. 1995. Metallogeny of the Rapakivi Granites. Mineralogy and Petrology, 54: 149-160.

Haynes, D.W., Cross, K.C., Bills, R.T., Reed, M.H. 1995. Olympic Dam ore genesis: a fluid-mixing model. Economic Geology, 90; 281-307.

Hitzman, M.W., Oreskes, N. et Einaudi, M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. Precambrian Research, 58: 241-287.

Johnson, J.P. et McCulloch, M.T. 1995. Sources of ineralizing fluids for the Olympic Dam deposit (South Australia) : Sm-Nd isotopic constraints. Chemical Geology, 121; 177-199.

Kisvarsanyi, G. et Proctor, P.D. 1967. Trace element content of magnetites and hematites, southeast Missouri iron metallogenic Province, U.S.A. Economic Geology, 62: 449-471.

Lindenmayer, Z.G. 1990. Salobo sequence, Cajaras, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism. Thèse Doctorat University of Western Ontario, London Ont. 405 p.

Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., Viero, A.C. 1995. O papel da alteraçao hidrotermal nas rochas da Bacia Cajaras. Boletin Museu Paraense Emilio Goeldi, Ciencia da Terra series, 7 : 125-145.

Lindenmayer, Z. et Teixeira, J.B. 1999. Ore genesis at the Salobo copper deposit, Serra dos Carajas. In Base metal deposits of Brazil. Silva, M.G. et Misi, A. (éditeurs), MME, CPRM, DNPM, Salvador, Bahia, 33- 43.

Nyström, J.O. et Henriquez, F. 1994. Magmatic features of Iron Ores of the Kiruna Type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. Economic Geology, 89: 820-839. O'Driscoll, E.S.T. 1986. Observations of the lieament-ore relation. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 317; 195-

218.

Oreskes, N. et Einaudi, M.T. 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia. Economic Geology 85: 1-28.

Rattenbury, M.S. 1994. A linked fold-thrust model for the deformation of the Tennant Creek goldfield, northern Australia. Mineralium Deposita 29: 301-308.

Reeves, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N. et Oreskes, N. 1990. The Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit, south Australia. *Dans* F.E. Hughes éditeur, Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Australas. Inst. Min. Metall. Monography 14 : 1009-1035.

Requia, K. et Fontboté, L. 2000. The Salobo iron oxide copper-gold deposit, Cajaras, northern Brazil. *Dans* Porter, T.M. editeur, Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and related deposits: a global perspective. Australian Mineral Foundation Adelaide, 225-236.

Requia, K. et Fontboté, L. 1999. Hydrothermal alkali metasomatism in the Salobo iron oxide Cu-(Au) deposit, Cajaras mineral Province, northern Brazil. In Mineral Deposits: Processes to processing, Stanley et al. éditeurs, Rotterdam, 1025-1028.

Requia, K., Stein, H., Fontboté, L. et Chiaradia, M. 2003. Re–Os and Pb–Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper–gold deposit, Carajas mineral province, northern Brazil. Mineralium Deposita, 38: 727-738.

Richardson, D.G. et Birkett, T.C. 1996. Gîtes de métaux rares associés à des roches hyperalcalines. *Dans* Géologie des types de gîtes minéraux du Canada, Géologie du Canada no. 8, 581-600.

Rivers, T., Martignole, J., Gower, C.F. et Davidson, A. 1989. New tectonic divisions of the Grenville Province, southeast canadian shield. Tectonics, 8: 63-84.

Roberts, D.E. et Hudson, G.R.T. 1983. The Olympic Dam copper-uranium gold-silver deposit, Roxby Downs, South Australia. Economic Geology, 78: 799-822.

Rotherham, J.F., Blake, K.L., Cartwright, I. et Williams P.J. 1998. Stable isotope evidence for the origin of the Mesoproterozoic Starra Au-Cu Deposit, Cloncurry district, Northwest Queensland. Economic Geology, 93: 1435-1449.

Sillitoe, R.H. 1993. Gold-rich porphyry copper deposits : geological model and exploration implications. *Dans* Kirkham R.V, Sinclair W.D., Thorpe R.I. and Duke J.M., éditeurs. Mineral Deposit Modelling, Association géologique du Canada, volume special 40: 465-478.

Souza, L.J., et Vieira, E.A. 2000. Salobo 3 Alpha deposit : geology and mineralization. *Dans* T.M. Porter éditeur. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposit: a global perspective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 213-224.

Valenta, R. 2000. Structural controls on localization of ironstone-hosted Cu-Au deposits. *Dans* Fe-Oxide- Cu-Au deposits: a discussion of critical issues and current developments. M. D. Roberts et M. C. Fairclough éditeurs. Extended Symposium Abstracts, EGRU, 67-69.

Wall, V.J. 2000. Iron oxide-rich copper-gold systems. Dans Iron Oxide Copper-Gold Deposits: separating fact from fantasy. The short course, Vancouver Mining Exploration Group and British Columbia & Yukon Chamber of Mines, 16 novembre 2000, Vancouver, p. B63-B87.

Wedekind, M.R. et Large, R.R. 1989. Controls on High-Grade gold mineralization at Tennant Creek, northern Territory, Australia. Economic Geology monograph, 168-179.

Williams, P.J. 2001. Time-space relations of hydrothermal alteration and Fe-Oxide-Cu-Au deposits in the Cloncurry and Curnamona regions, Australia. GSA annual meeting, SEG special session I: Iron-Oxide-(- Copper-Gold) systems – Deposit studies to global context.

Williams, P.J. 2000. Geological and geodynamic framework of Australian Proterozoic Fe-Oxide Cu-Au deposits. *Dans* Fe-oxide-Cu-Au deposits: a discussion of critical issues and current developments. Extended symposium abstracts. M.D. Roberts et M.C. Fairclough, éditeurs. EGRU Contribution 58 : 12- 18.

Williams, P.J., Adshead, N.D., Blake, K.L., de Jong, G., Mark, G. et Rotherham, J.F. 1995. Magnetite Cu- Au deposits in deeply eroded magmatic arcs: lessons from Proterozoic terrains. PACRIM 95, 631-636.

Woodall, R. 1994. Empiricism and concept in successful mineral exploration. Australian Journal of Earth Sciences, 41: 1-10.

Zang, W. et Fyfe, W.S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Cajaras, Brazil. Mineralium Deposita, 30: 30-38.

Zhang, H.T., So, C.S., et Yun, S.T. 1999. Regional geologic setting and metallogenesis of central Inner Mongolia, China: guides for exploration of mesothermal gold deposits. Ore Geology Reviews, 14: 129- 146.

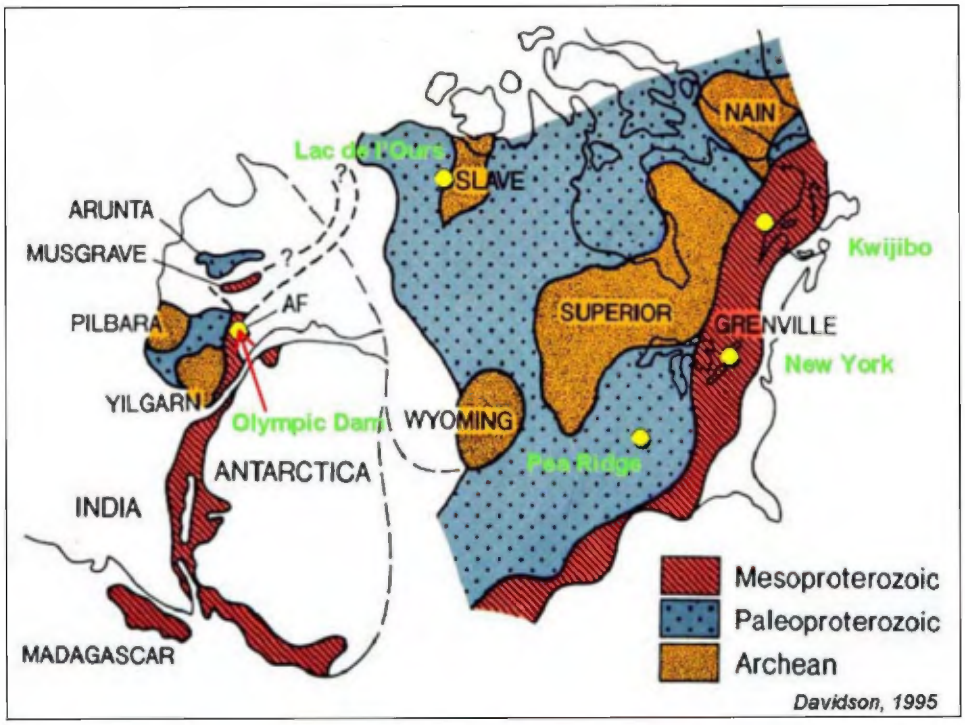


Figure 1 : Localisation de certains gisements et gîtes d'oxydes de fer dans une reconstitution palinspathique de Rhodinia (1,1 Ga). Retour au texte.

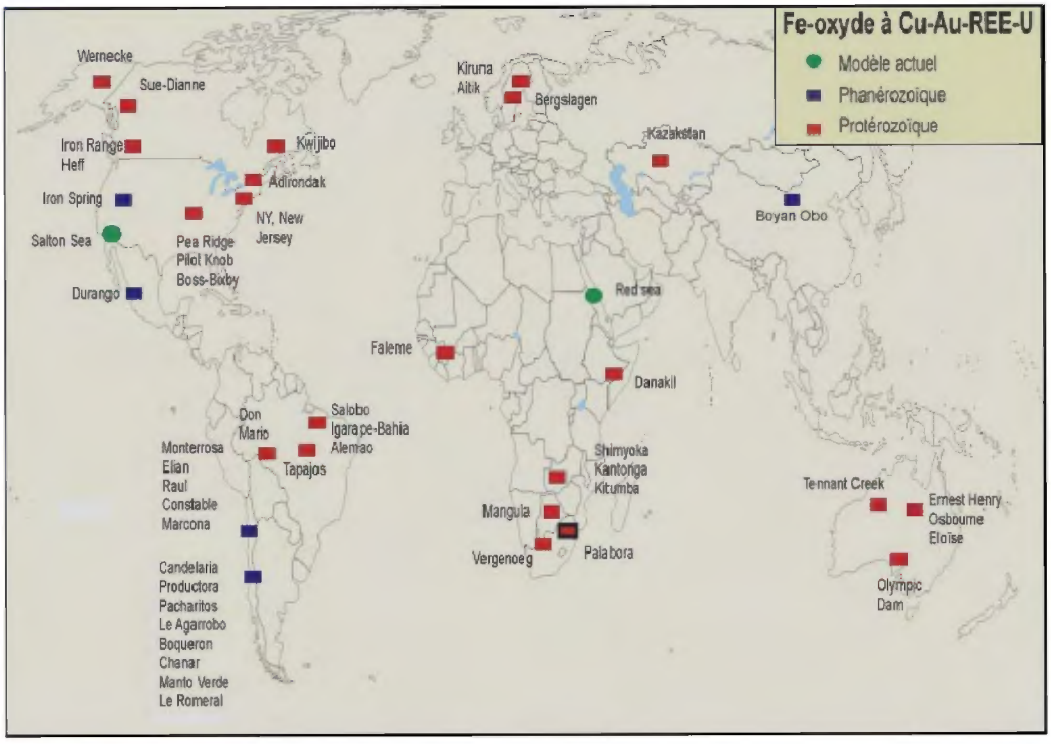


Figure 2: Localisation des principaux gisements de type oxydes de fer dans le monde. Retour au texte.

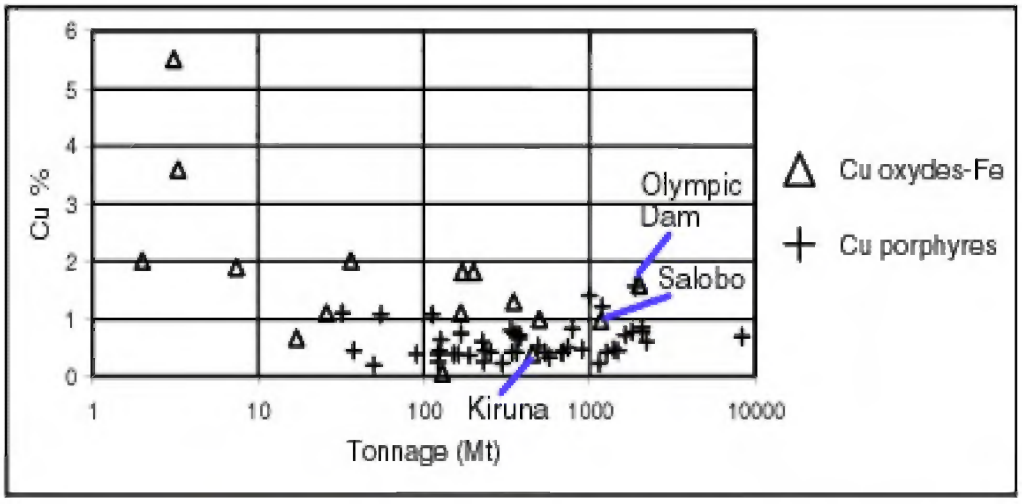


Figure 3: Diagramme binaire comparant les teneurs en Cu en fonction du tonnage (échelle logarithmique) pour des gisements porphyriques et d'oxydes de fer. Retour au texte.

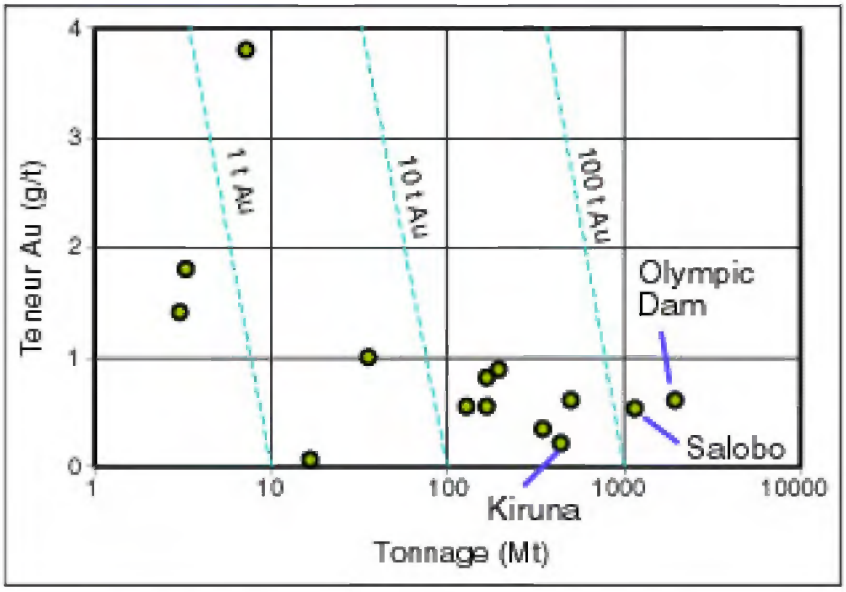


Figure 4: Diagramme binaire des teneurs en Au en fonction du tonnage pour certains gisements d'oxydes de fer protérozoïques dans le monde. Retour au texte.

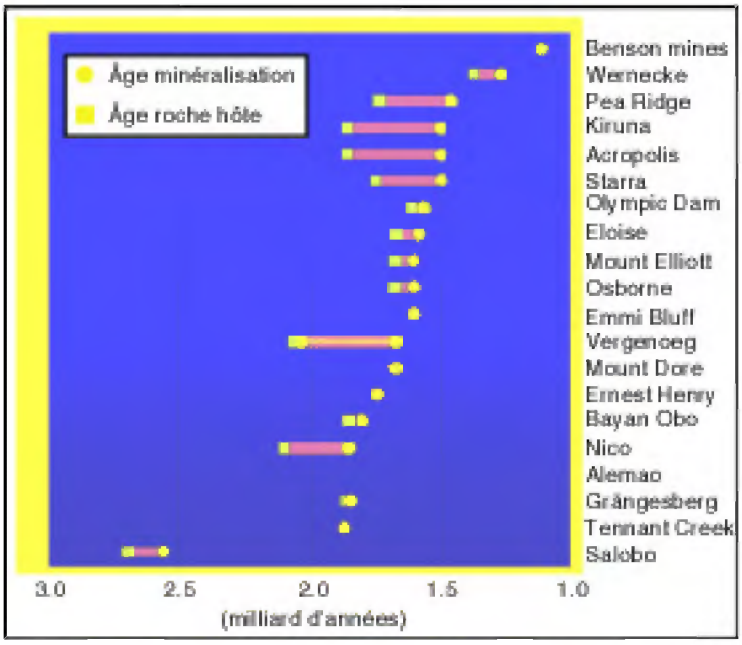


Figure 5: Diagramme représentant l'âge de la minéralisation par rapport à l'âge de la roche hôte pour les principaux gisements d'oxydes de fer d'âge archéen et protérozoïque dans le monde. Retour au texte.

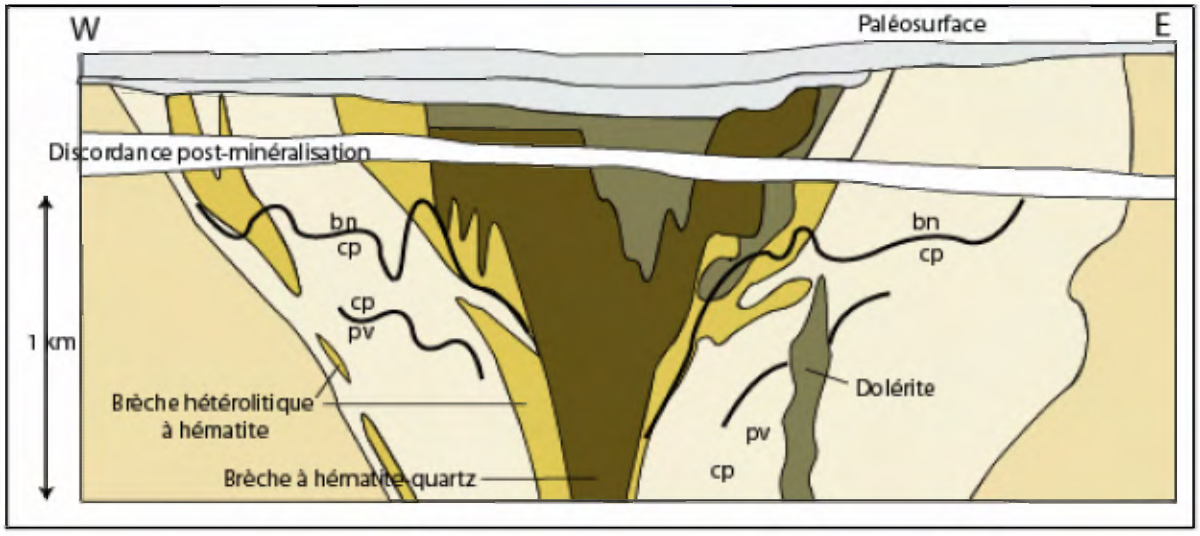


Figure 6: Gisement de type discordant, Olympic Dam, Australie (Hitzman et al., 1992). Retour au texte.

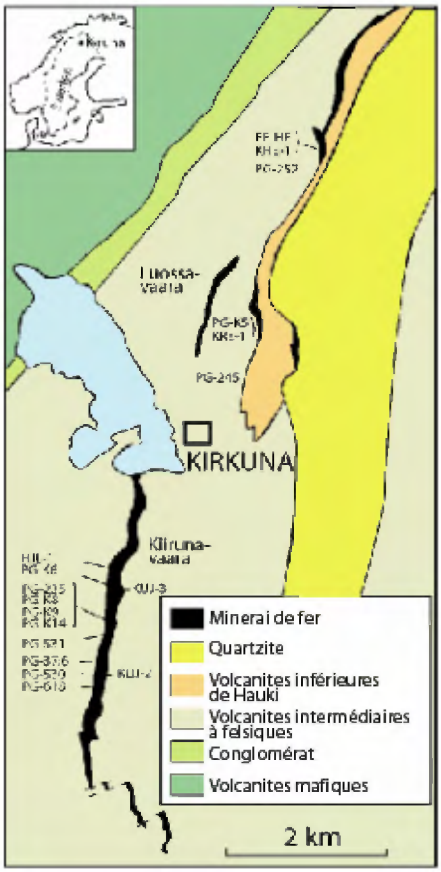


Figure 7: Gisement de type concordant à Kiruna, Suède (Nyström et Henriquez, 1994). Retour au texte.

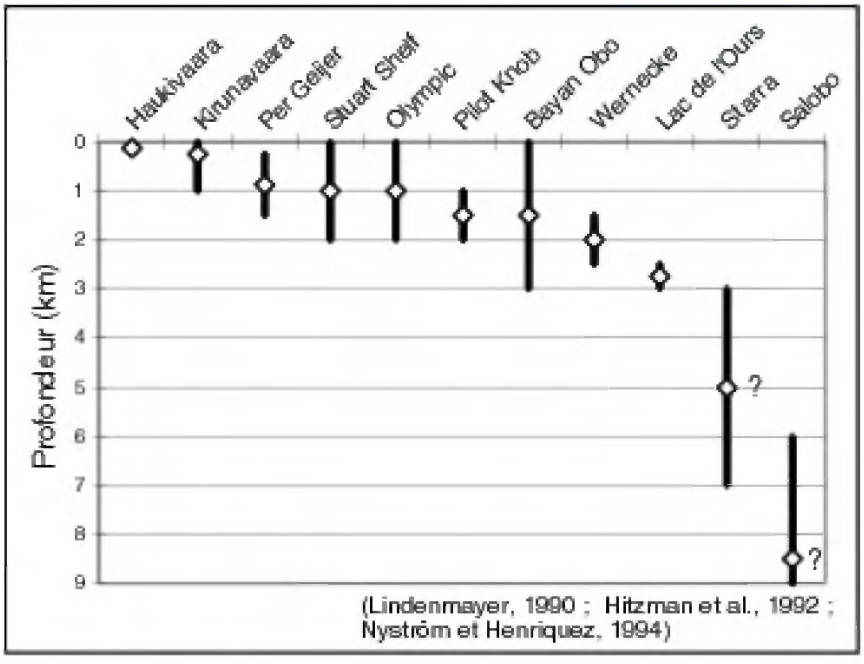


Figure 8: Profondeurs de mise place (losange) de gisements d'oxydes de fer protérozoïques avec les incertitudes (lignes noires verticales de part et d'autre du losange). Les profondeurs des gisements de Starra et de Salobo sont incertaines. Retour au texte.

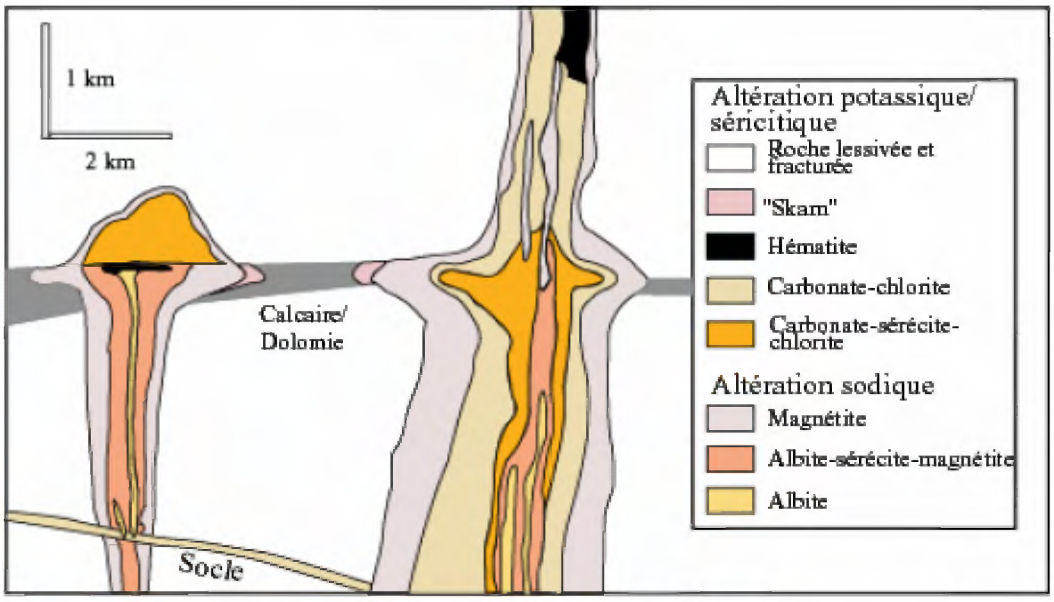


Figure 9: Section illustrant les altérations zonées des dépôts d'oxydes de fer à Cu-U-ÉTR-Au et formés dans une séquence sédimentaire. Les quantités de K2O et Na2O provenant de l'altération, varient respectivement de 5 à 9% et de 5 à 8% (Hitzman et al., 1992). Retour au texte.

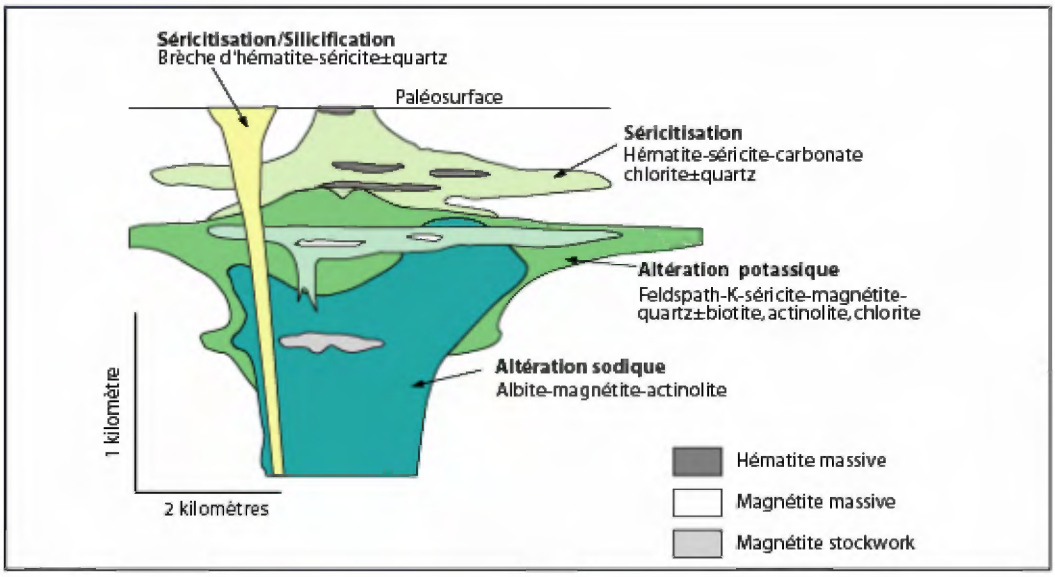


Figure 10: Zonalité des altérations potassiques et sodiques des dépôts d'oxydes de fer (Cu-U-ÉTR-Au) dans des roches volcaniques et plutoniques (Hitzman et al., 1992). Retour au texte.

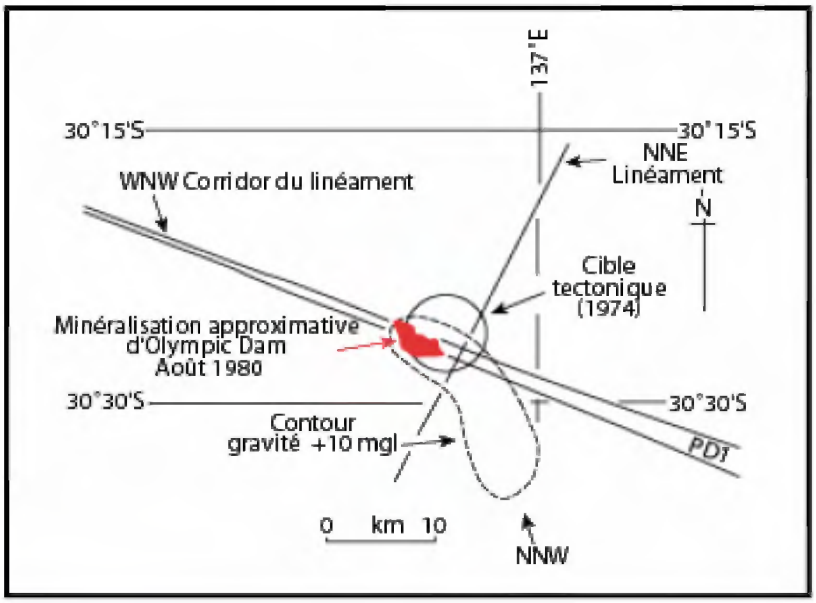


Figure 11: À Olympic Dam, le gisement et l'anomalie gravimétrique sont situés à l'intersection de linéaments régionaux NNE et WNW (O'Driscoll, 1986). Retour au texte.

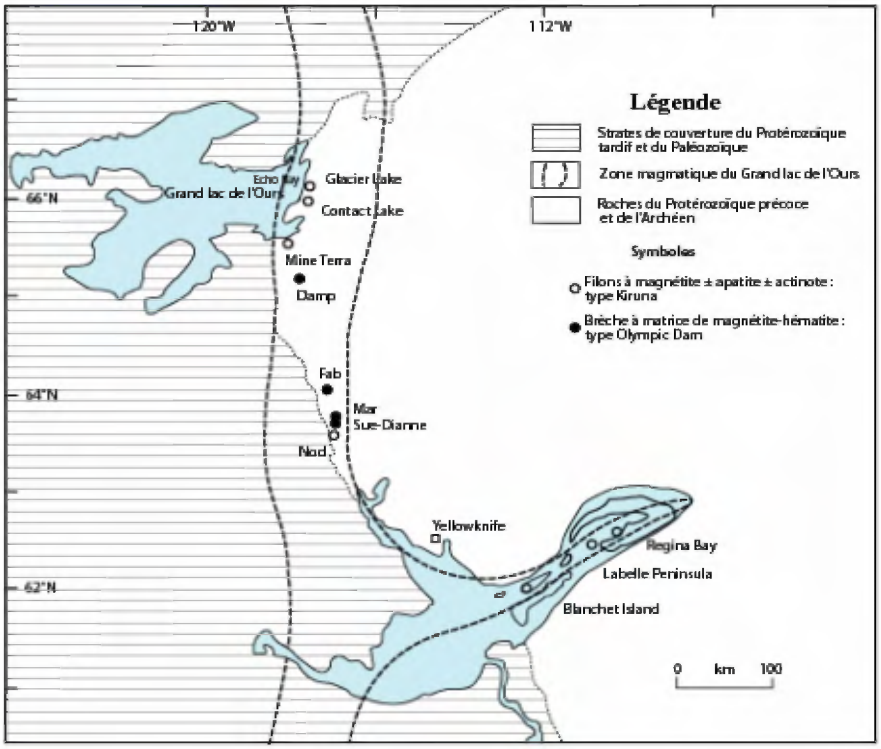


Figure 12: Contrôle régional de la minéralisation à l'intérieur de la zone magmatique du Grand Lac de l'Ours, Canada (Gandhi et Bell, 1996). Retour au texte.

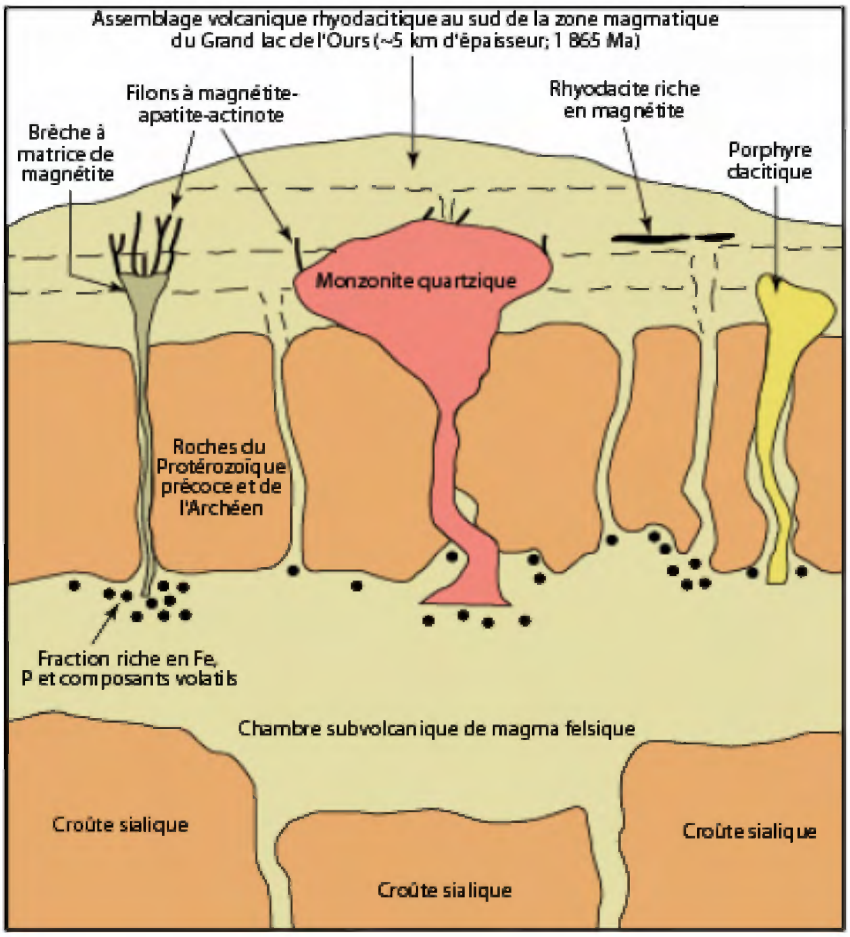


Figure 13: Section d'un modèle magmatique pour le secteur du Grand Lac de l'Ours, Canada (Gandhi et Bell, 1996). Retour au texte.

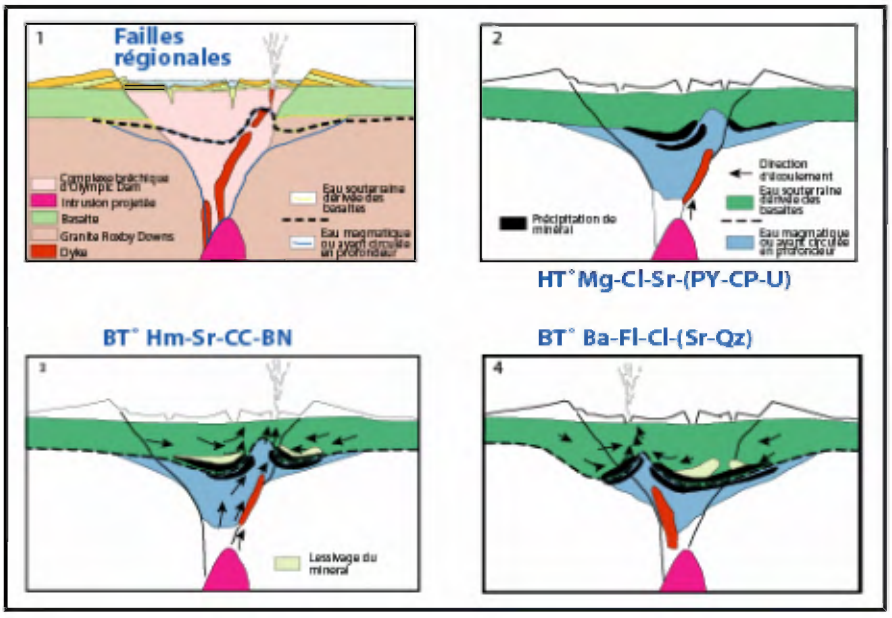


Figure 14: Vues en coupe montrant la formation du gisement d'Olympic Dam, Australie (Haynes et al., 1995). Retour au texte.

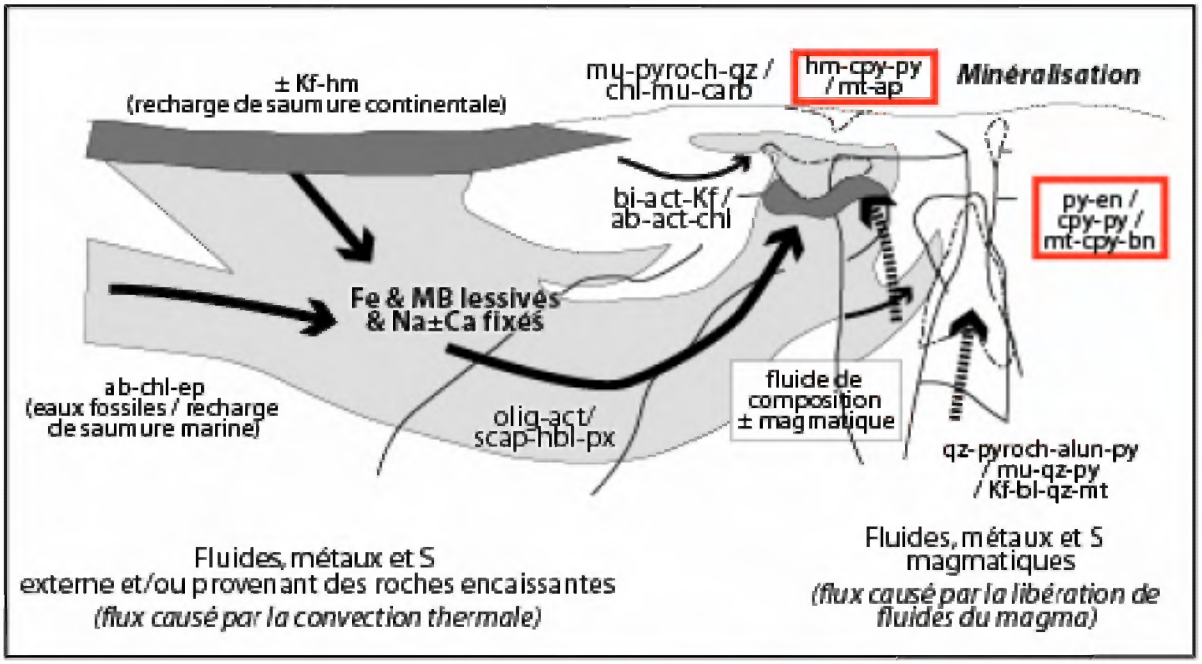


Figure 15: Modèle génétique pour l'ouest américain montrant les relations géochimiques entre les fluides évaporitiques et magmatiques et les roches hôtes de la minéralisation (Barton et Johnson, 2000). Retour au texte.

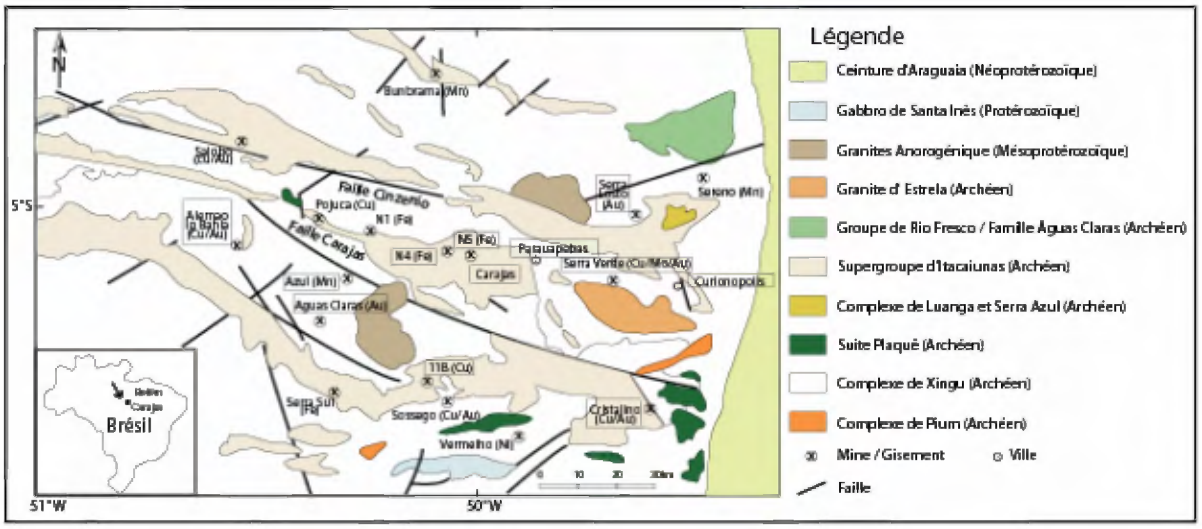


Figure 16: Carte géologique du district minier de Carajás montrant la position du gisement de Salobo et des principaux dépôts de Fe, Cu, Au, et Mn (Requia et al., 2003). Retour au texte.

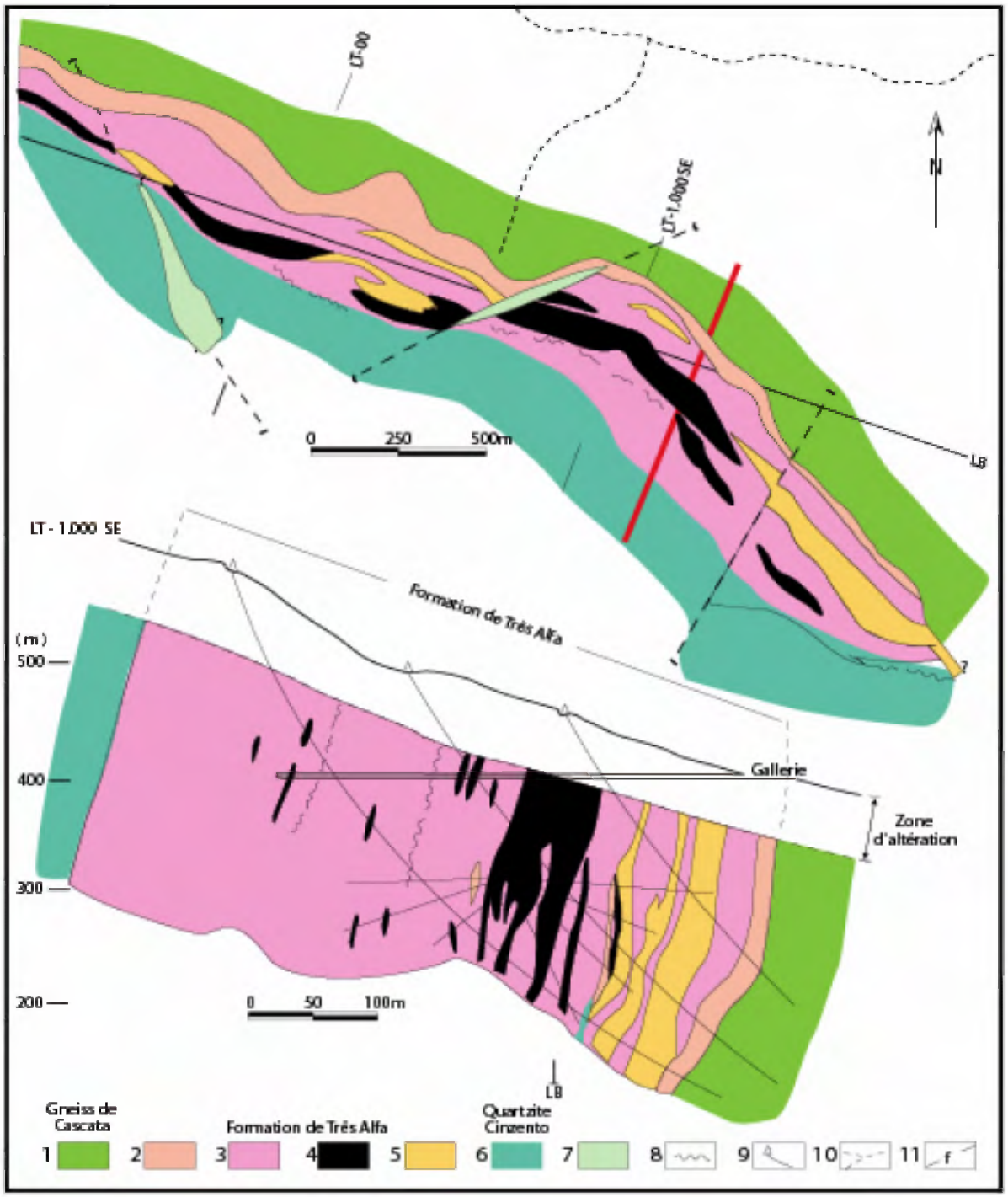


Figure 17: Carte géologique du gisement de Salobo, Brésil. L'image du haut montre une vue en plan du gisement et la ligne rouge indique la position de la coupe dans l'image du bas (Lindenmayer, 1990). Retour au texte.

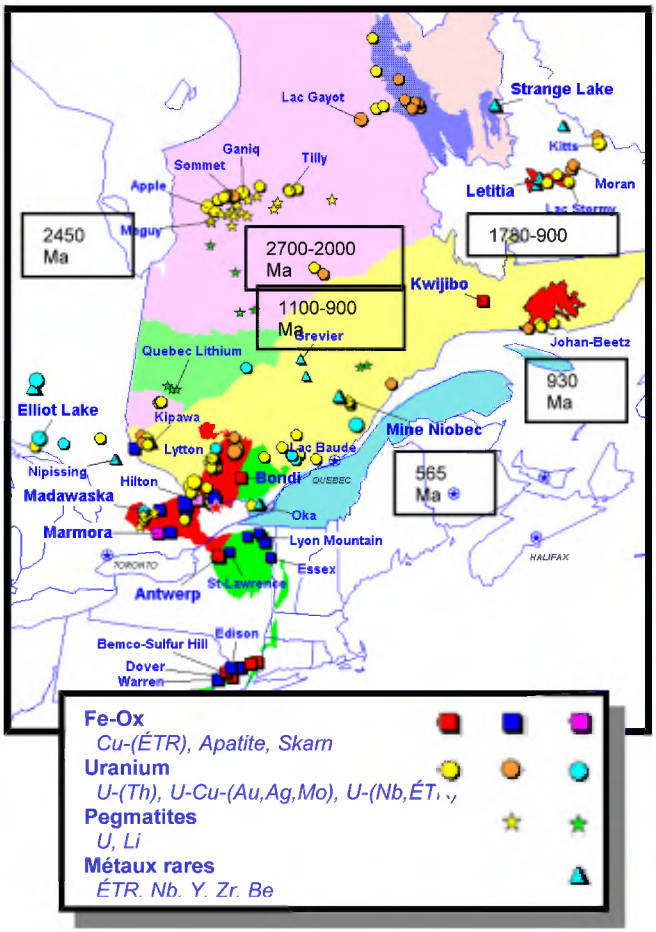


Figure 18: Compilation des gîtes d'oxydes de fer et autres gîtes apparentés dans le NE de l'Amérique du Nord avec les périodes de minéralisation en millions d'années (Ma). Retour au texte.

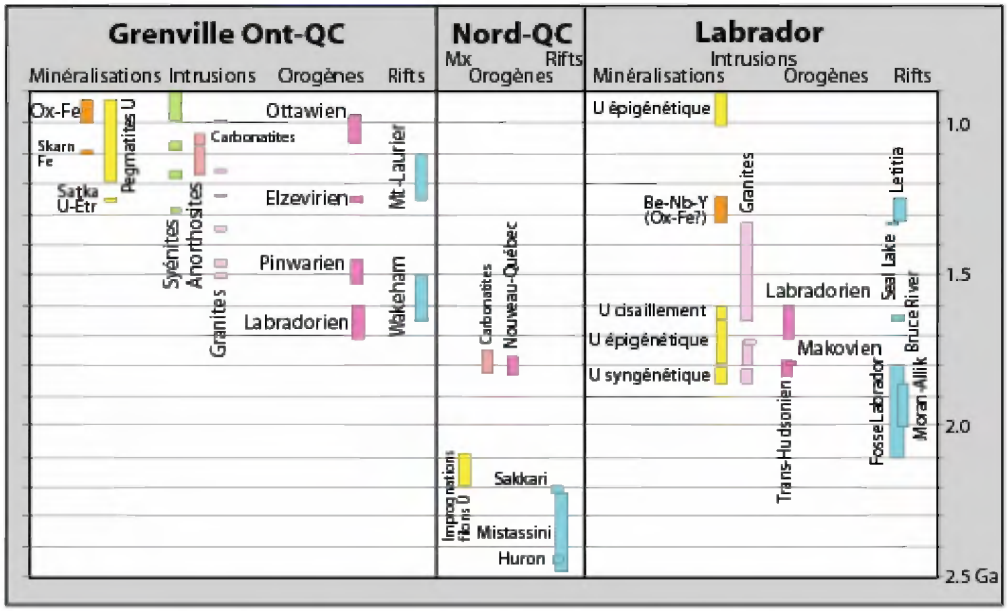


Figure 19: Cadre chronostratigraphique des gîtes d'oxydes de fer, U, et ÉTR d'âge protérozoïque pour le Québec, l'Ontario et le Labrador. Retour au texte.

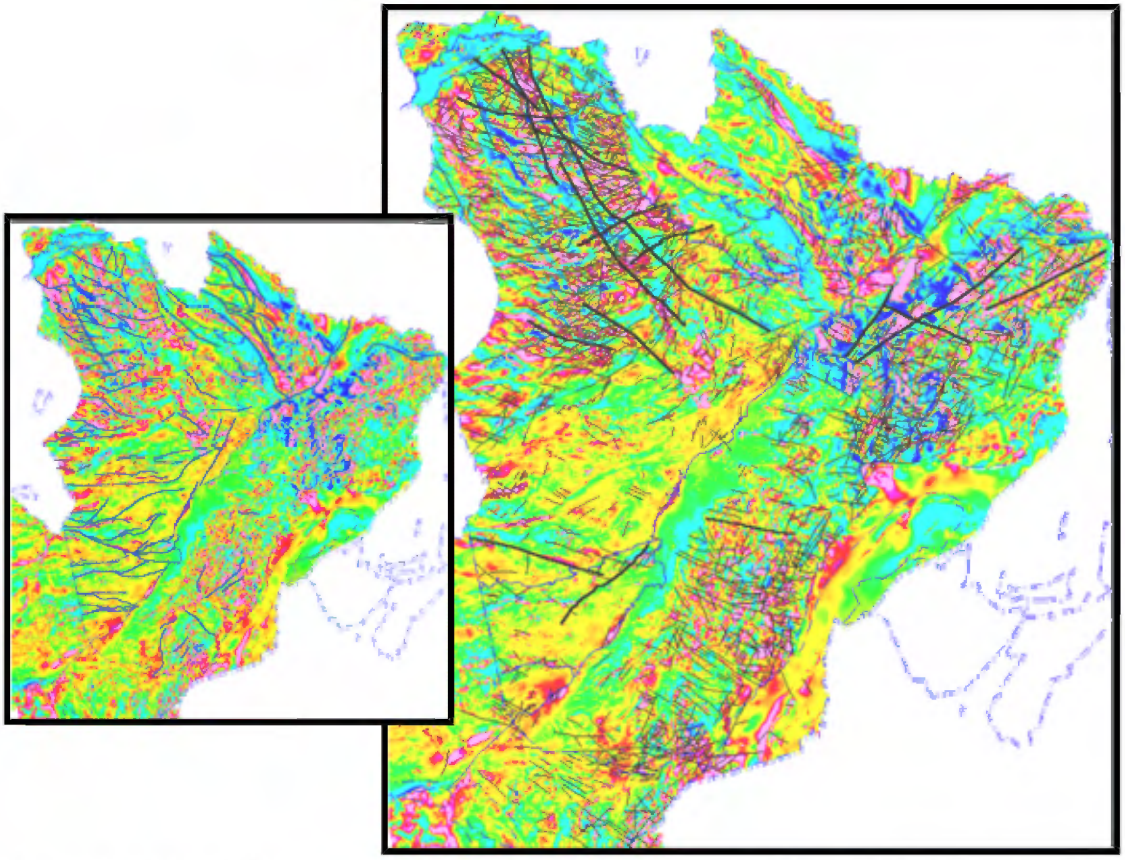


Figure 20: Image de gauche : linéaments géophysiques d'entraînement (ligne bleue) interprétés à partir de la carte du champ magnétique total (total de 98 linéaments). Image de droite : linéaments géophysiques francs (ligne noire) interprétés à partir de la carte du champ magnétique total (total de 1913 linéaments). Les linéaments tracés en trait plus large sont de longueurs égales ou plus grandes à 200 km. Retour au texte.

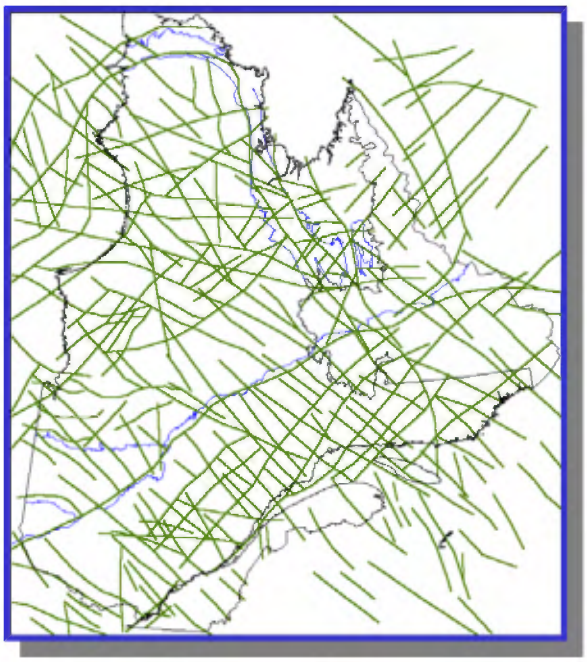


Figure 21: Linéaments géophysiques crustaux interprétés à partir de la carte du gradient vertical de la gravité (217 linéaments au total). Retour au texte.

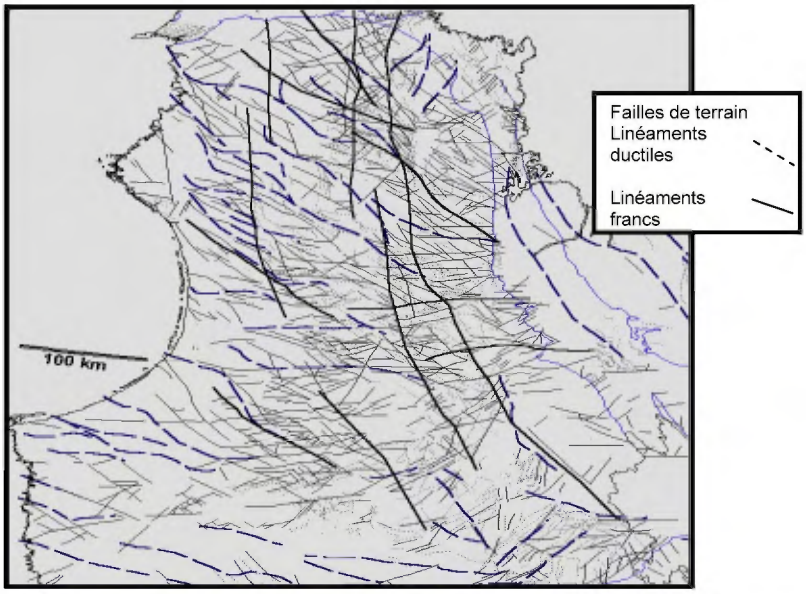


Figure 22: Carte représentant les linéaments magnétiques francs et d'entraînement interprétés à partir de cartes magnétiques et gravimétriques superposées aux failles de terrain observées ou interprétées par le gouvernement provincial. Failles de terrain avant 2001. Retour au texte.

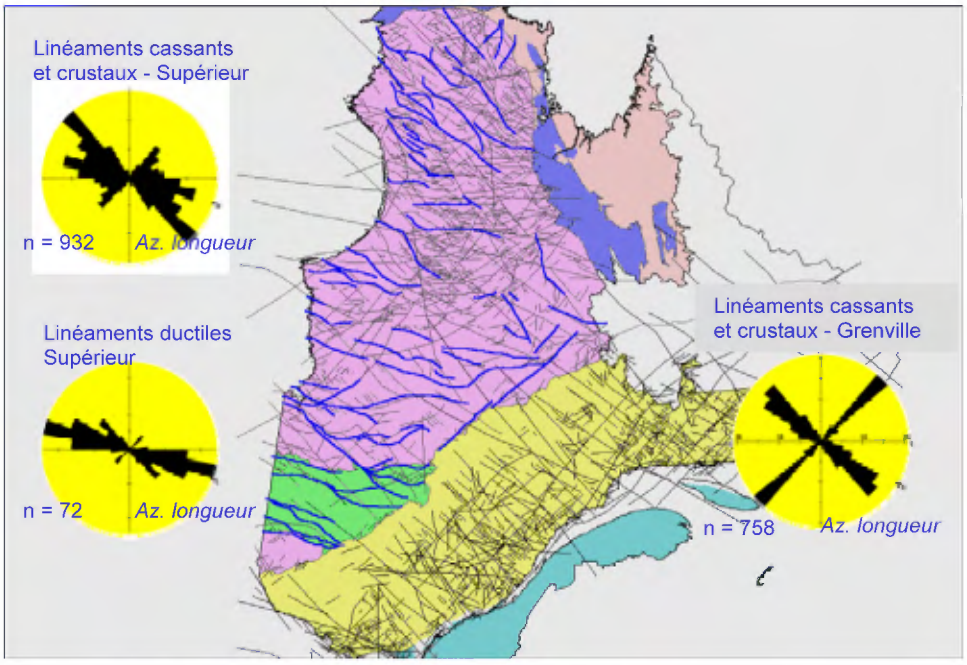


Figure 23: Les trois types de linéaments géophysiques (d'entraînement, francs et crustaux) sont superposés à la carte des provinces géologiques. Les rosaces montrent les orientations dominantes des linéaments géophysiques. Retour au texte.

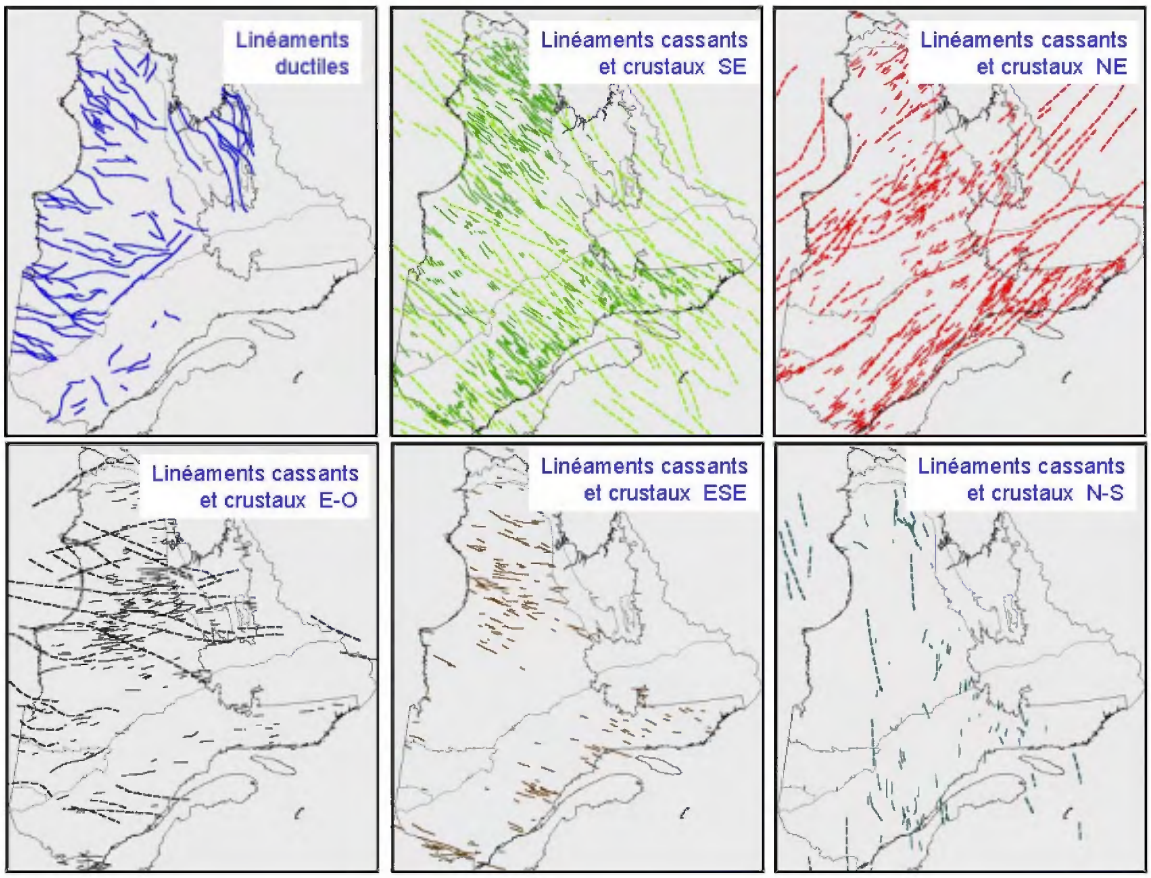


Figure 24: Distribution des linéaments géophysiques par catégories et orientations. Les linéaments d'entraînement sont tous disposés sur l'image du haut à gauche. Les linéaments francs et crustaux sont divisés en 5 groupes selon leur orientation sur les cinq images suivantes. Retour au texte.

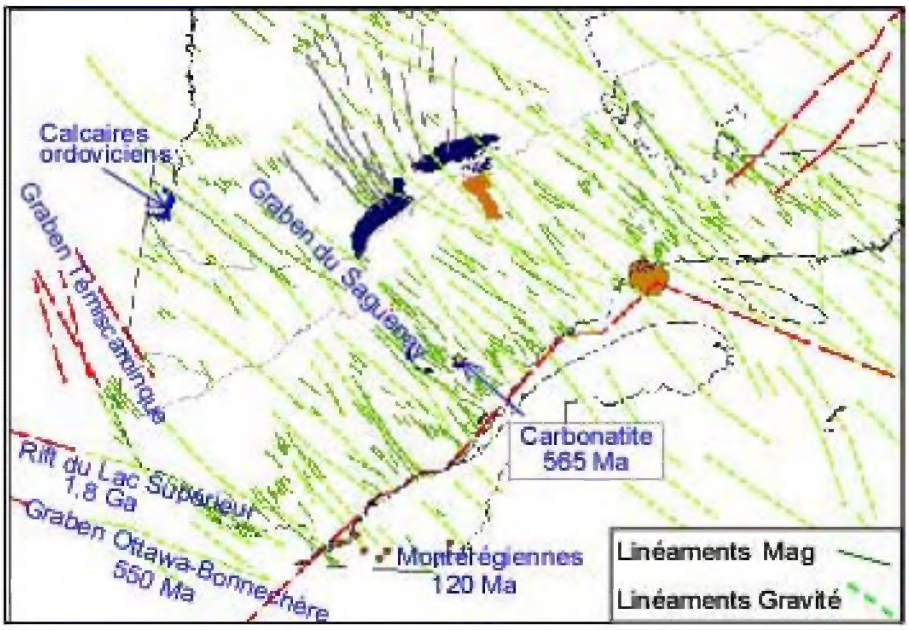


Figure 25: Linéaments géophysiques SE-NO (en vert) interprétés à partir de cartes magnétique et gravimétrique. La majorité des linéaments sont corrélés à des extensions successives. Retour au texte.

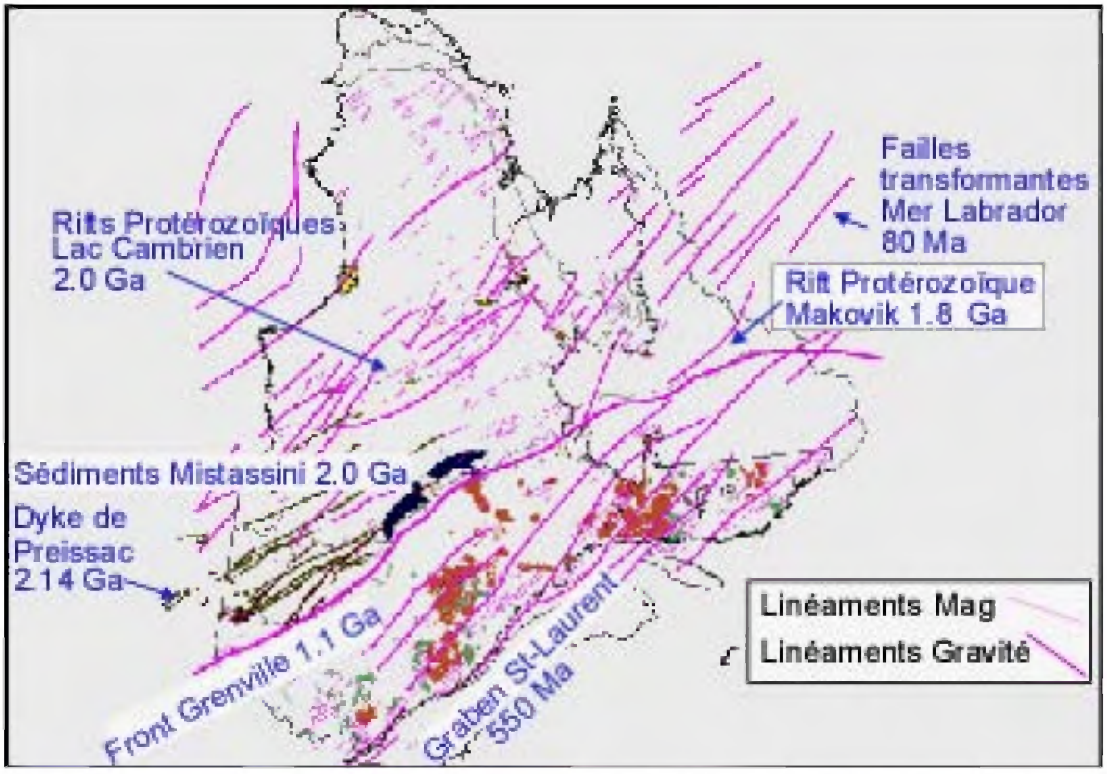


Figure 26: Synthèse des linéaments géophysiques NE-SO pour le Québec et le Labrador interprétés à partir de levés magnétiques et gravimétriques. Principaux événements tectoniques pouvant être corrélés aux linéaments. Retour au texte.

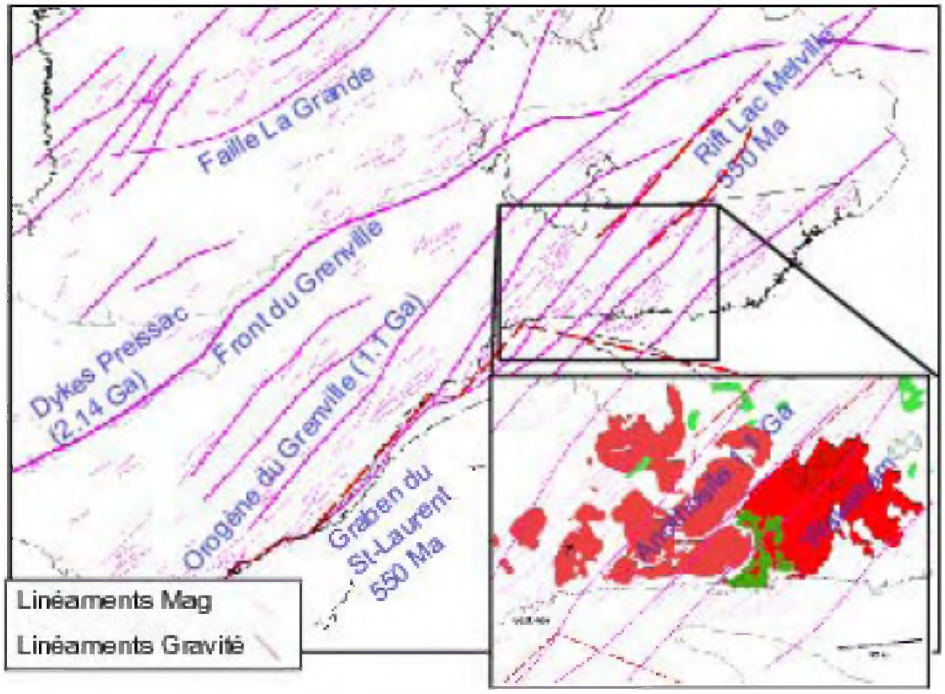


Figure 27: Linéaments géophysiques NE-SO interprétés à partir de cartes magnétique et gravimétrique. Principaux événements tectoniques pouvant être corrélés aux linéaments. Retour au texte.

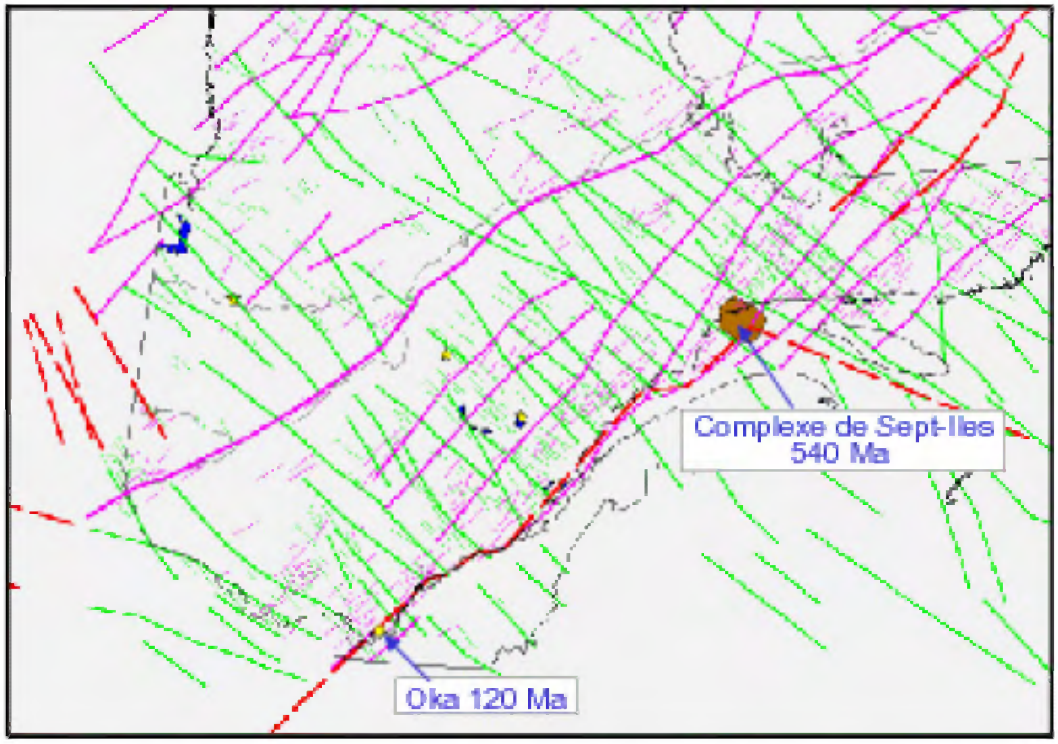


Figure 28: Intersections des linéaments géophysiques NE (mauve) et SE (vert). Certaines intersections sont l'hôte d'intrusion dans le Grenville (complexe de Sept-îles) et pourraient être des cibles favorables à l'exploration des gîtes d'oxydes de fer. Retour au texte.

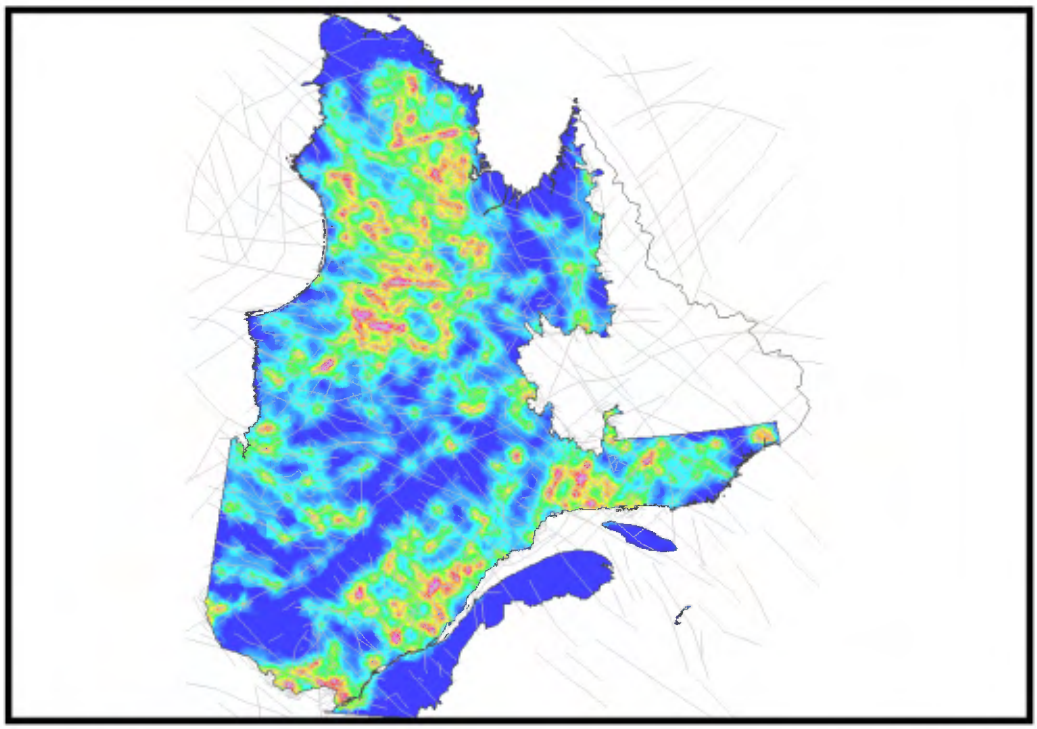


Figure 29: Densité de linéaments géophysiques évaluée à partir de la méthode des points. L'échelle de couleurs indique les densités, des plus faibles (en bleu) aux plus élevées (en rouge). Return to the text.

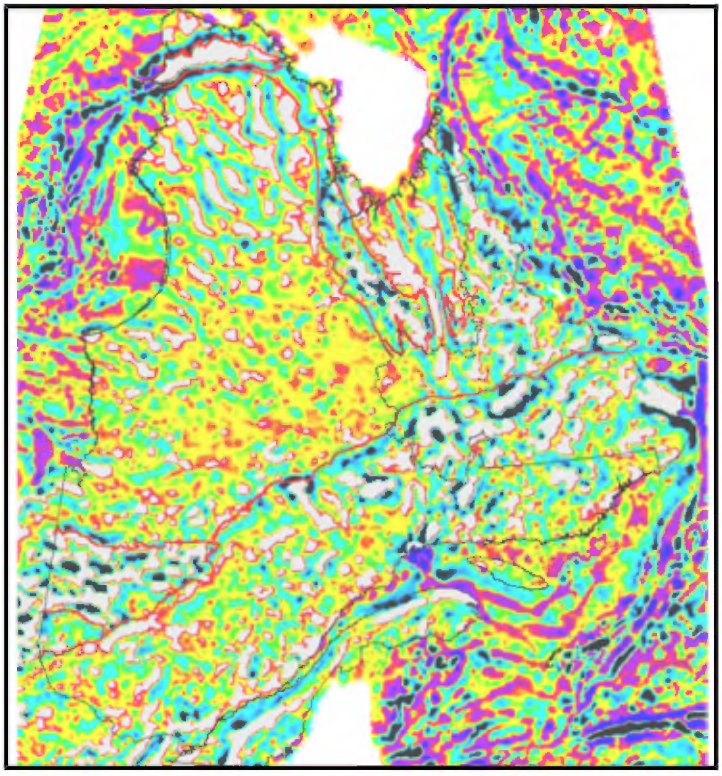


Figure 30: Carte du gradient vertical de la gravité du Québec sur laquelle sont isolés les hauts gravimétriques (en beige). Retour au texte.

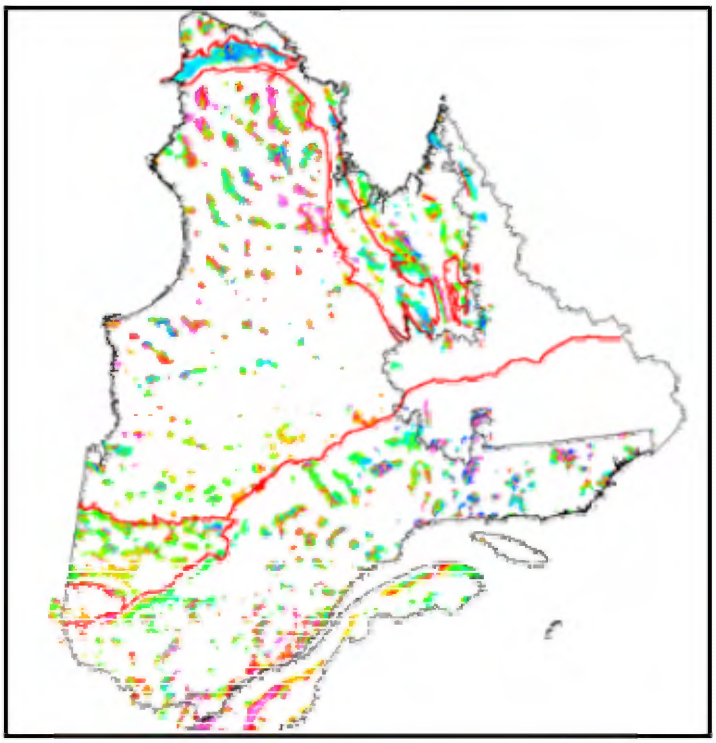


Figure 31: Signature magnétique isolée dans les hauts gravimétriques. Retour au texte.

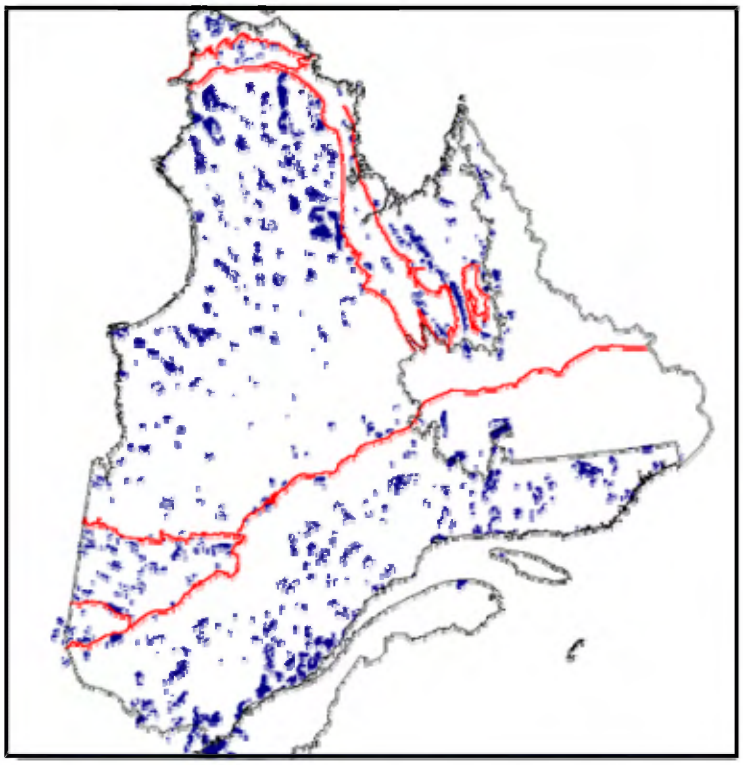


Figure 32: Les cibles favorables à l'exploration correspondent à la superposition de hauts magnétiques et gravimétriques (en bleu foncé). Retour au texte.

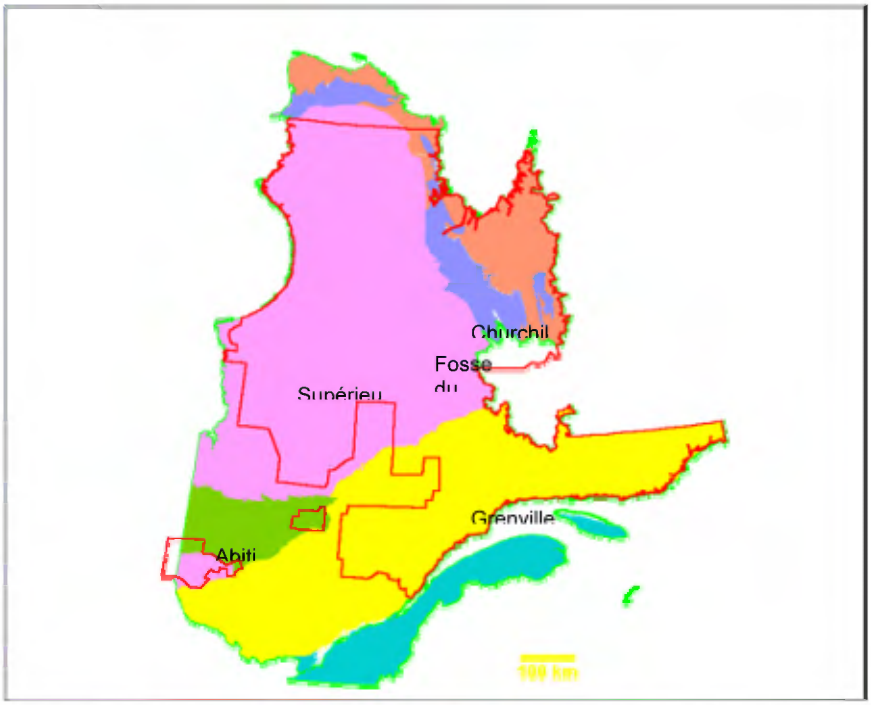


Figure 33: Couverture des données géochimiques provinciales (zones délimitées par une ligne rouge) pour les sédiments de fonds de lac. Retour au texte.

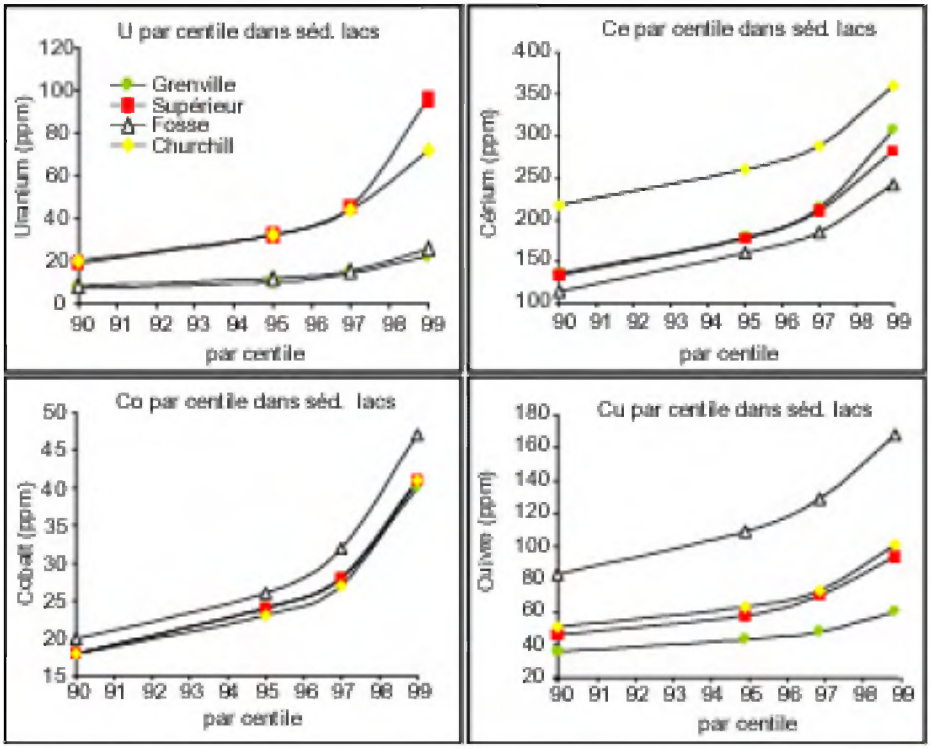


Figure 34: Seuils établis par province géologique pour 4 éléments analysés à partir de sédiments de fonds de lac. Retour au texte.

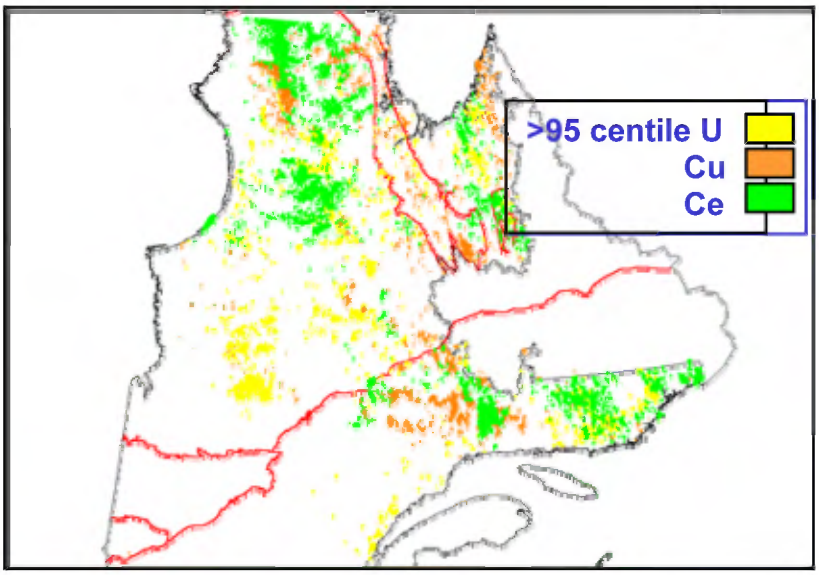


Figure 35: Distribution normalisée par province géologique du Cu, U, et Ce dans les sédiments de fonds de lac pour les centiles supérieurs à 95. Retour au texte.

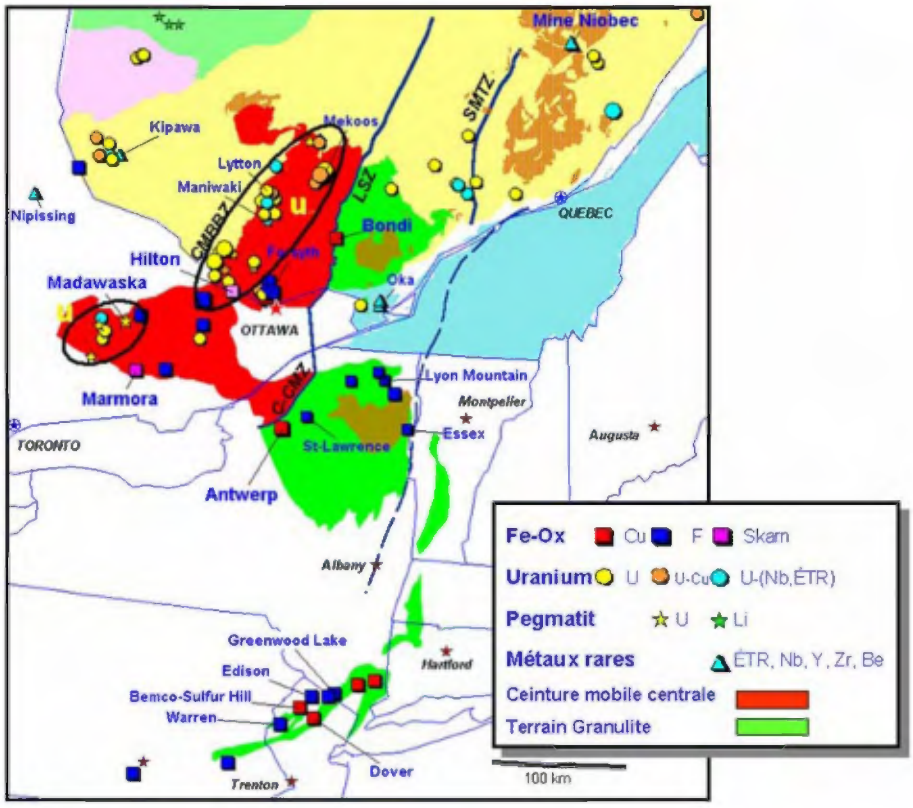


Figure 36: Distribution des principaux gîtes d'oxydes de fer et des gîtes apparentés dans le sud du Québec et de l'Ontario ainsi que dans le NE des États-Unis. Retour au texte.

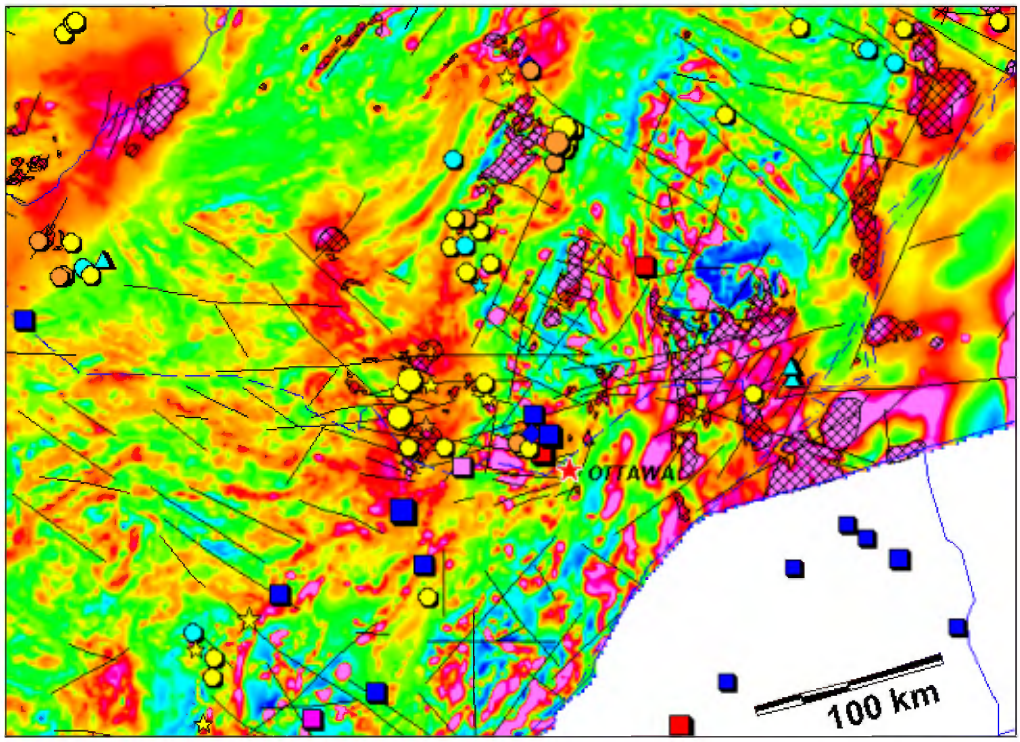


Figure 37: Principaux gîtes d'oxydes de fer et gîtes associés dans le sud du Québec et de l'Ontario et champ magnétique total. Anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes (en quadrillé). Légende identique à celle de la figure 36. Retour au texte.

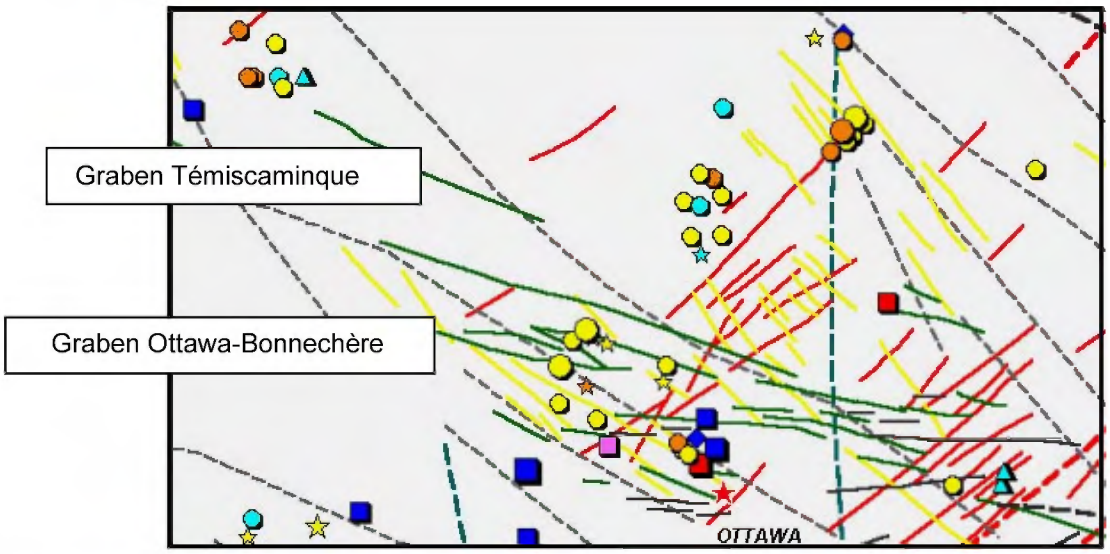


Figure 38: Linéaments magnétiques par orientations (traits colorés) et gravimétriques (tirets), grabens, et principaux gîtes d'oxydes de fer et gîtes associés dans le sud du Québec et de l'Ontario. Légende identique à celle de la figure 36. Retour au texte.

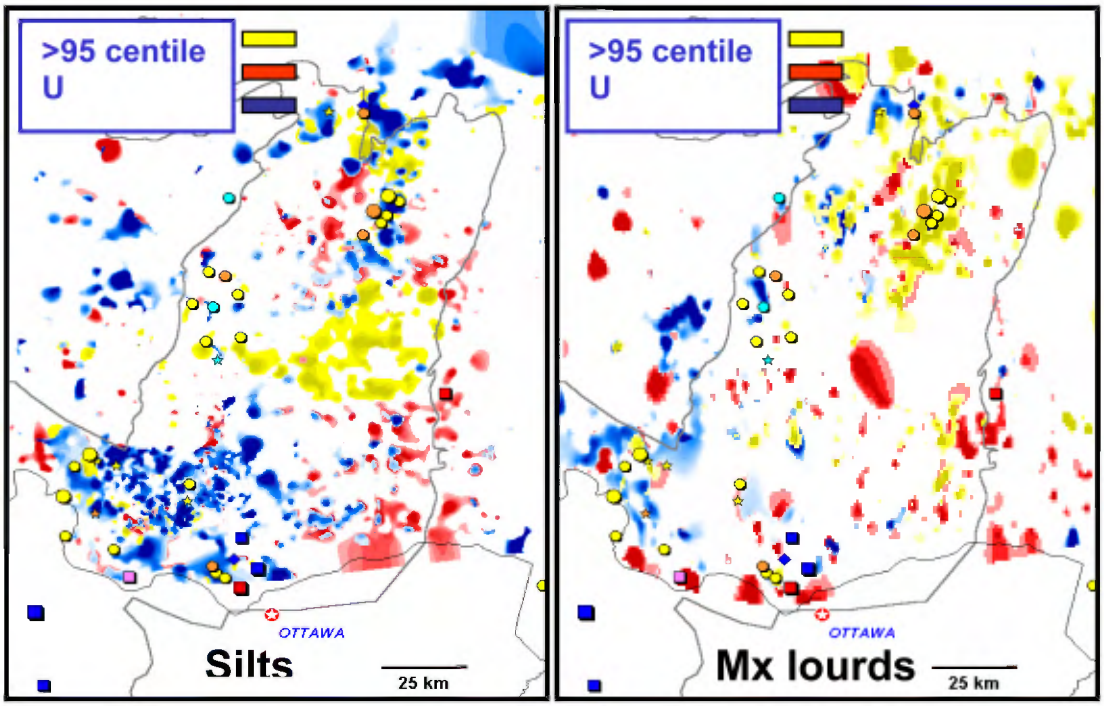


Figure 39: Géochimie des sédiments de ruisseaux dans le bassin sédimentaire et protérozoïque de Mont-Laurier, vallée de la Rivière Gatineau. Retour au texte.

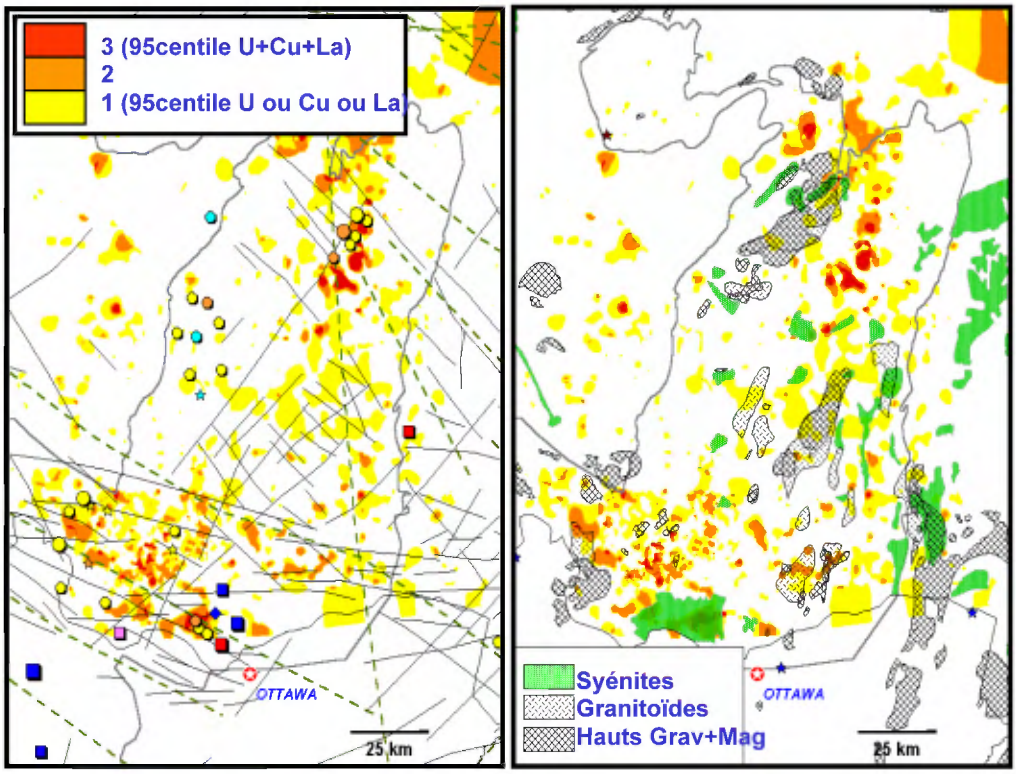


Figure 40: Méthode de la logique floue appliquée pour le Bassin de Mont-Laurier. À gauche, approches géochimique, structurale et métallogénique. À droite, approches géochimique et géophysique bonifiées par la carte des intrusions des syénites et des granitoïdes. Légende pour les gîtes identique à la figure 36. Retour au texte.

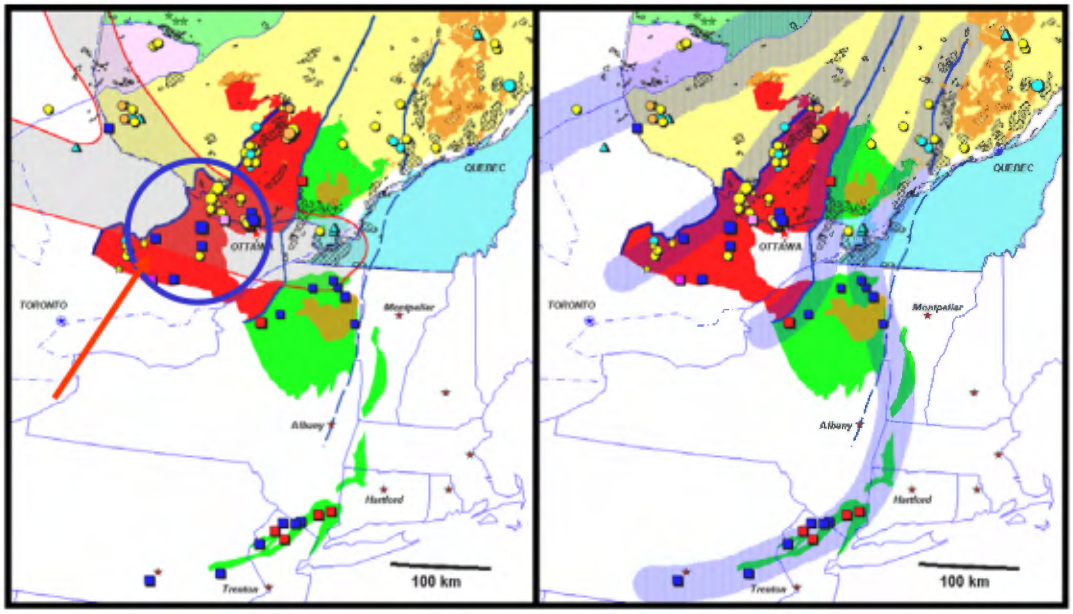


Figure 41: Image de gauche : cibles d'exploration régionale (cercle bleu) à l'intersection de deux rifts (tracés en rouge). Image de droite : cibles d'exploration le long des zones tectoniques bordant la Ceinture Centrale Mobile et celle du Saint-Maurice ainsi qu'au Front du Grenville (en gris). Légende pour les gîtes identiques à la figure 36. Retour au texte.

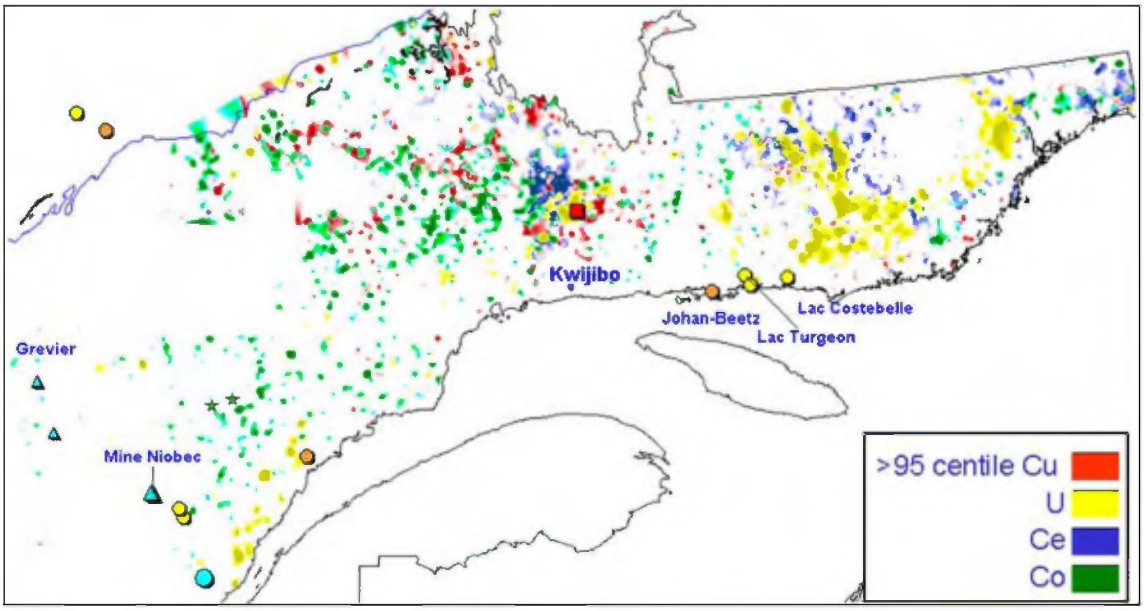


Figure 42: Distribution dans le Grenville du Cu, U, Ce, et Co dans les sédiments de fonds de lac et position du gîte d'oxydes de fer de Kwyjibo et autres gîtes apparentés. Légende pour les gîtes identique à la figure 36. Retour au texte.

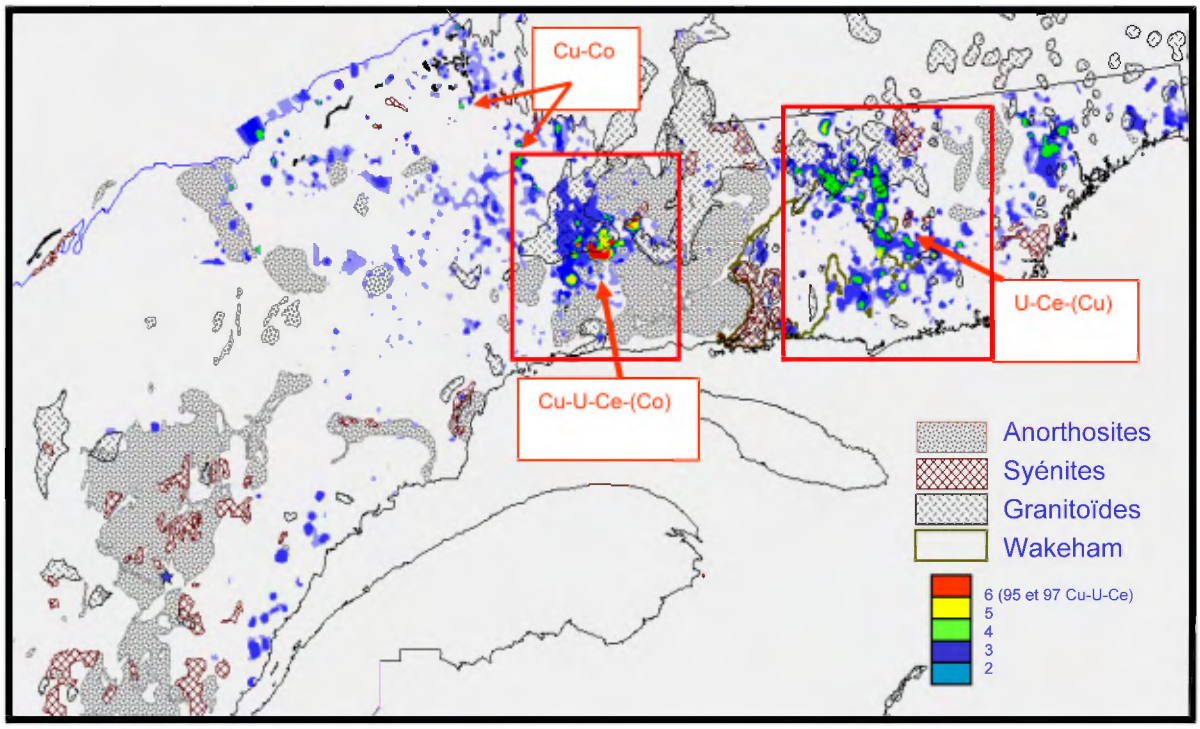


Figure 43: Méthode de la logique floue appliquée pour le Grenville pour les éléments du Cu, Ce et U dans les sédiments de fonds de lac (addition de pixels avec valeur unitaire de 1, pour un maximum de 6) avec lithologies favorables aux gîtes d'oxydes de fer. Les encadrés montrent les secteurs de plus grand intérêt. Retour au texte.

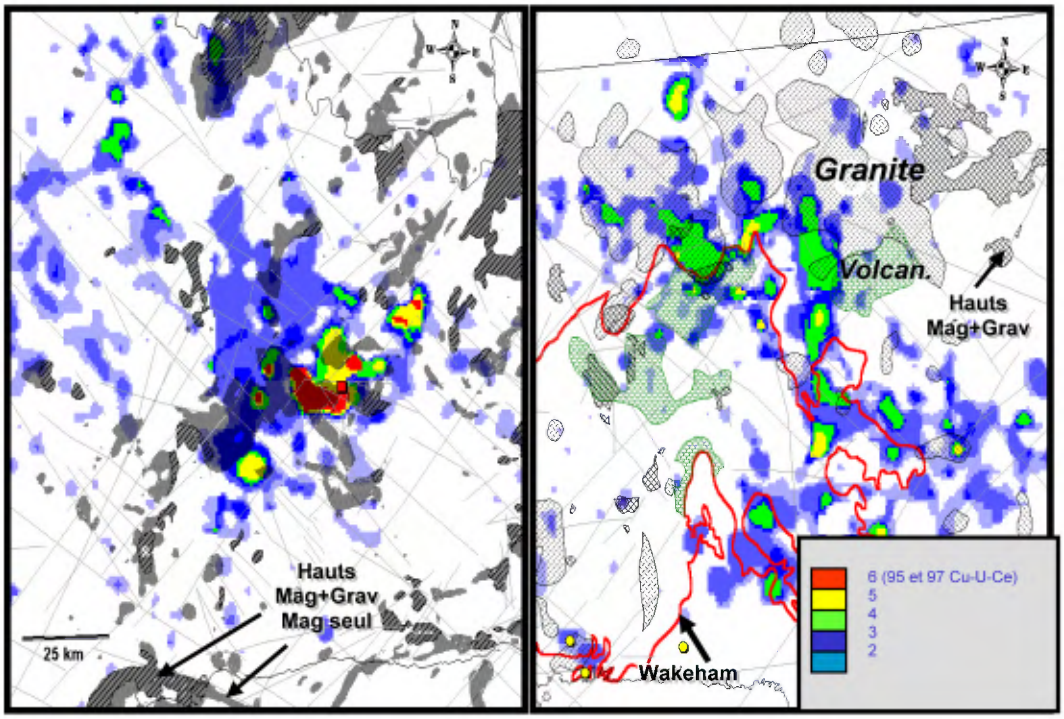


Figure 44: Détails de la figure 43 montrant la combinaison des approches géochimique et géophysique. Les hauts magnétiques et gravimétriques sont en hachurés. Sur l'image de droite, le gîte de Kwyjibo est indiqué par le carré rouge. Les secteurs où la densité d'anomalies géochimiques et les hauts magnétiques et gravimétriques se superposent, sont les secteurs les plus favorables à l'exploration de nouveaux gîtes d'oxydes de fer. Retour au texte.

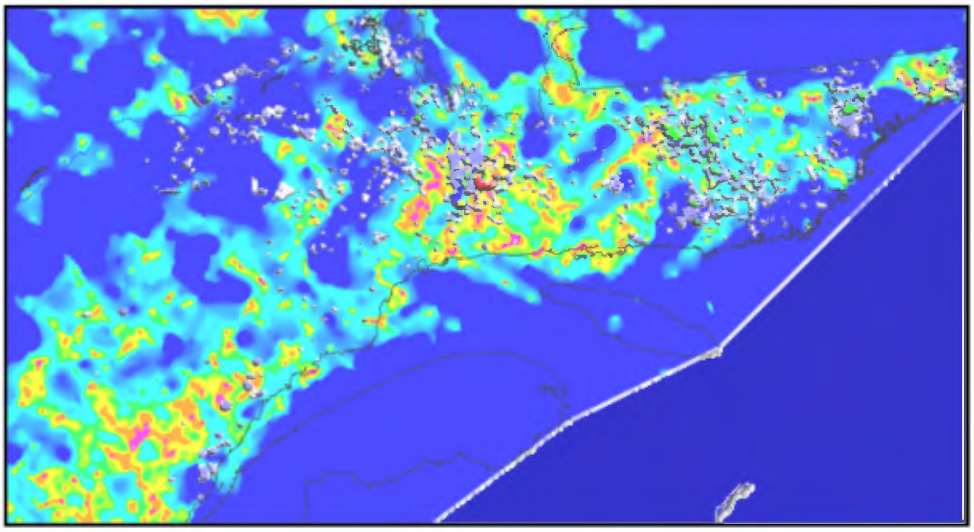


Figure 45: Approches géochimique et structurale (linéaments) où la densité des anomalies géochimiques (en gris) est superposée à la densité des linéaments (échelle de couleur de bleu foncé à rouge, respectivement des plus petites aux plus grandes densités de linéaments), Côte-Nord. Retour au texte.

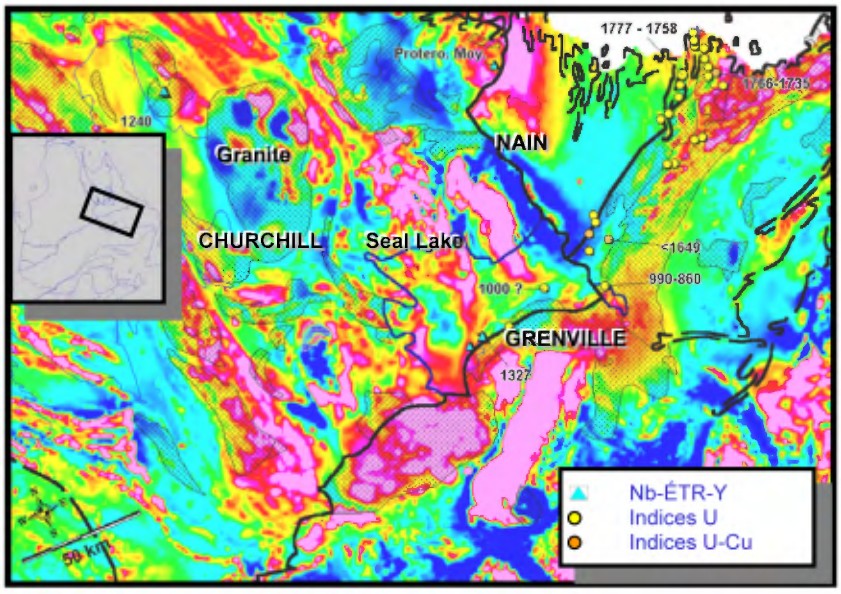


Figure 46: Carte d'une partie du Labrador montrant les principaux gîtes de Cu, U et ÉTR et l'âge probable de la minéralisation en millions d'années. Retour au texte.

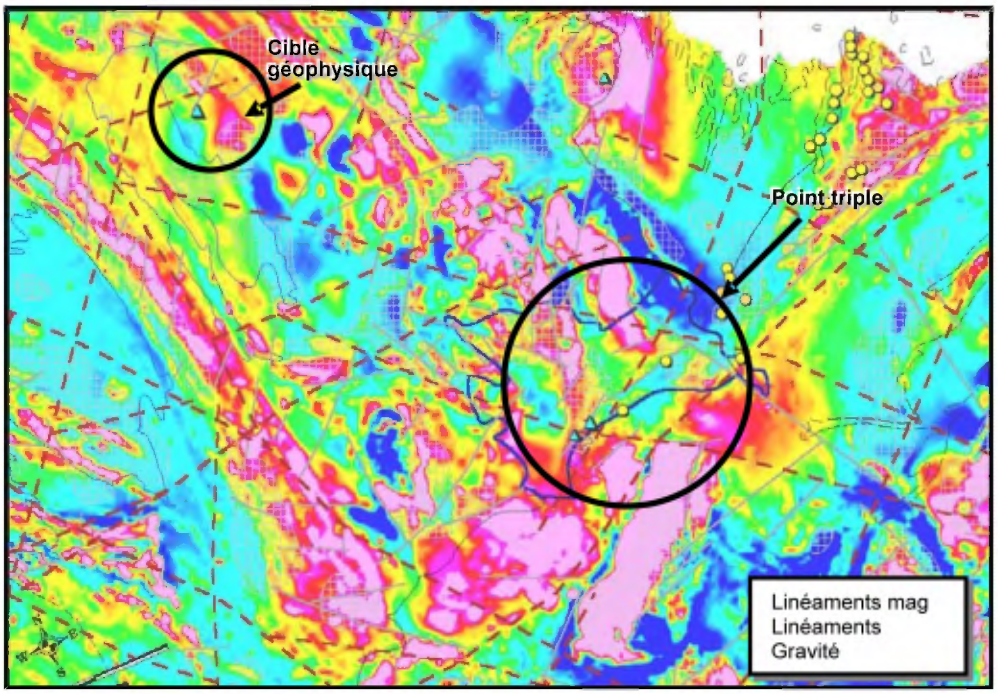


Figure 47: Approches géophysique, structurale et métallogénique, Labrador. Cible géophysique identifiée (petit cercle noir) où un haut gravimétrique et un haut magnétique se superposent. Cible structurale identifiée à l'intersection de trois sous-provinces (grand cercle noir indiquant un point triple). Retour au texte.

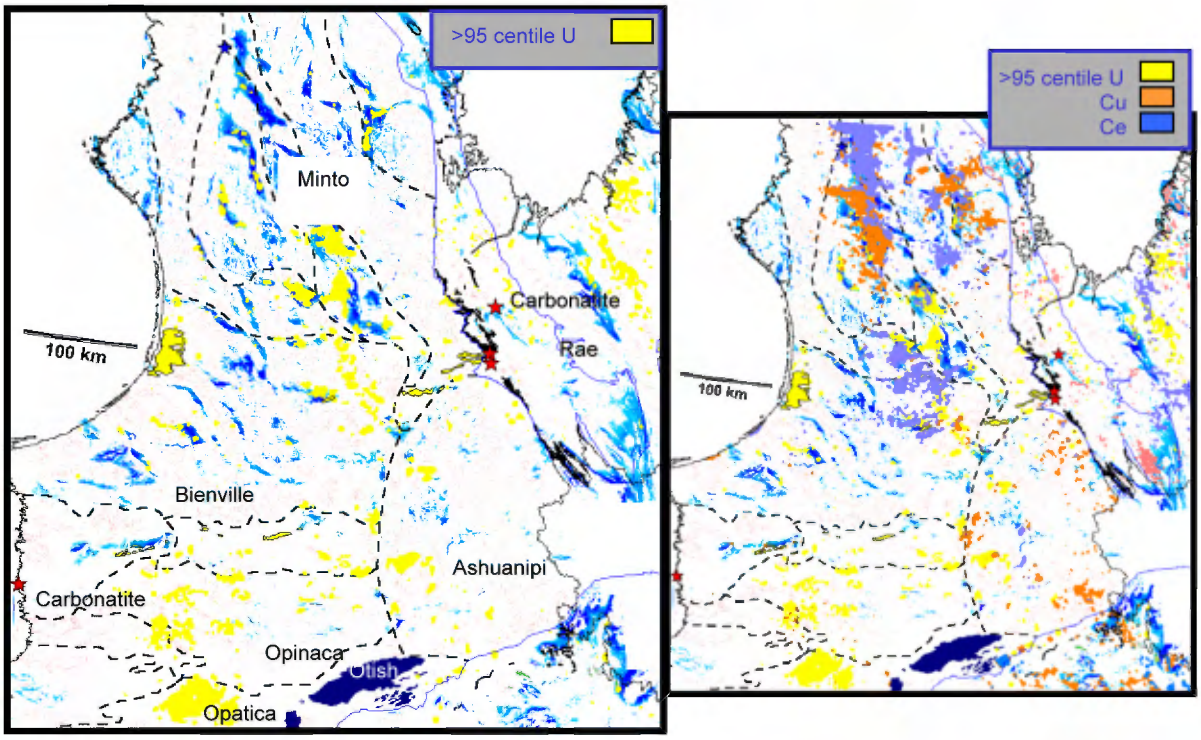


Figure 48: L'image de gauche représente les anomalies géochimiques de fonds de lac en U (en jaune) superposées aux bas magnétiques (en bleu) avec les principales sous-provinces géologiques. L'image de droite est une représentation de l'image de gauche sur laquelle les anomalies géochimiques en Cu et Ce supérieures à 95 centiles ont été ajoutées. Retour au texte.

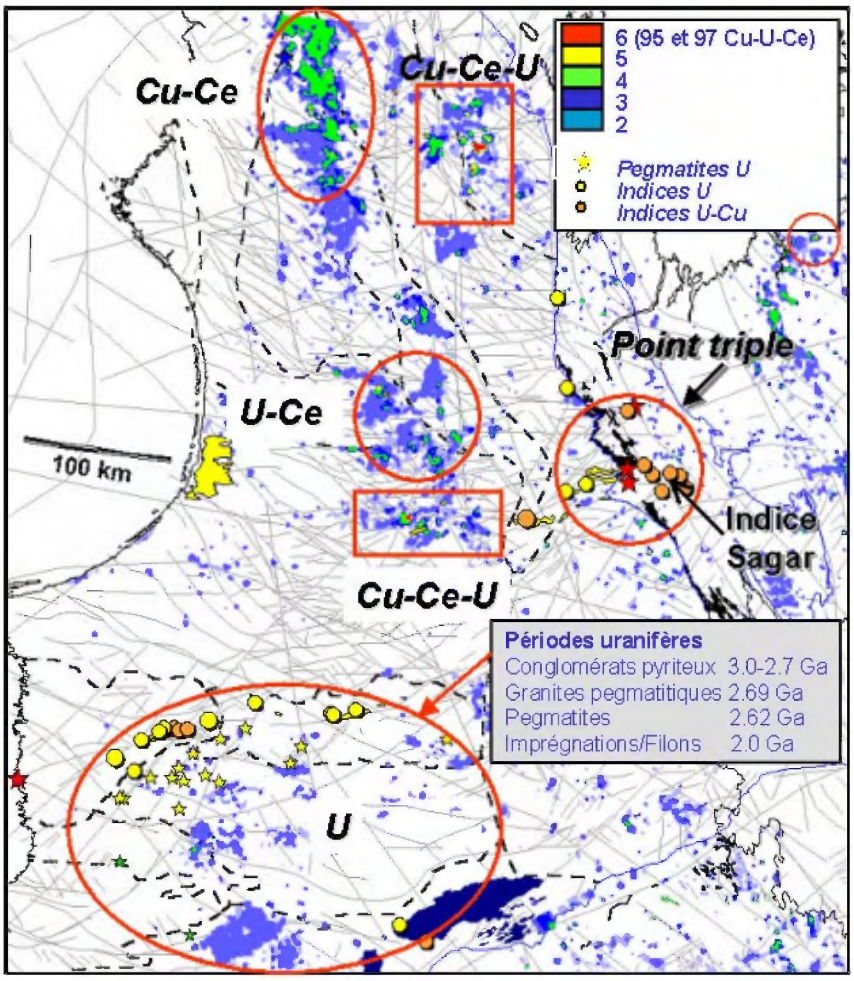


Figure 49: Cibles d'exploration régionale dans la Province du Lac Supérieur en utilisant la logique floue pour les éléments du Cu, U, et Ce dans les sédiments de fonds de lac (addition de pixels avec valeur unitaire de 1, pour un maximum de 6). Les indices de U et U-Cu qui sont répertoriés dans la province du Supérieur avec en arrière plan les linéaments géophysiques interprétés. Deux secteurs plus favorables à l'exploration des dépôts d'oxydes de fer sont encadrés en rouge et agrandis à la figure 50. Retour au texte.

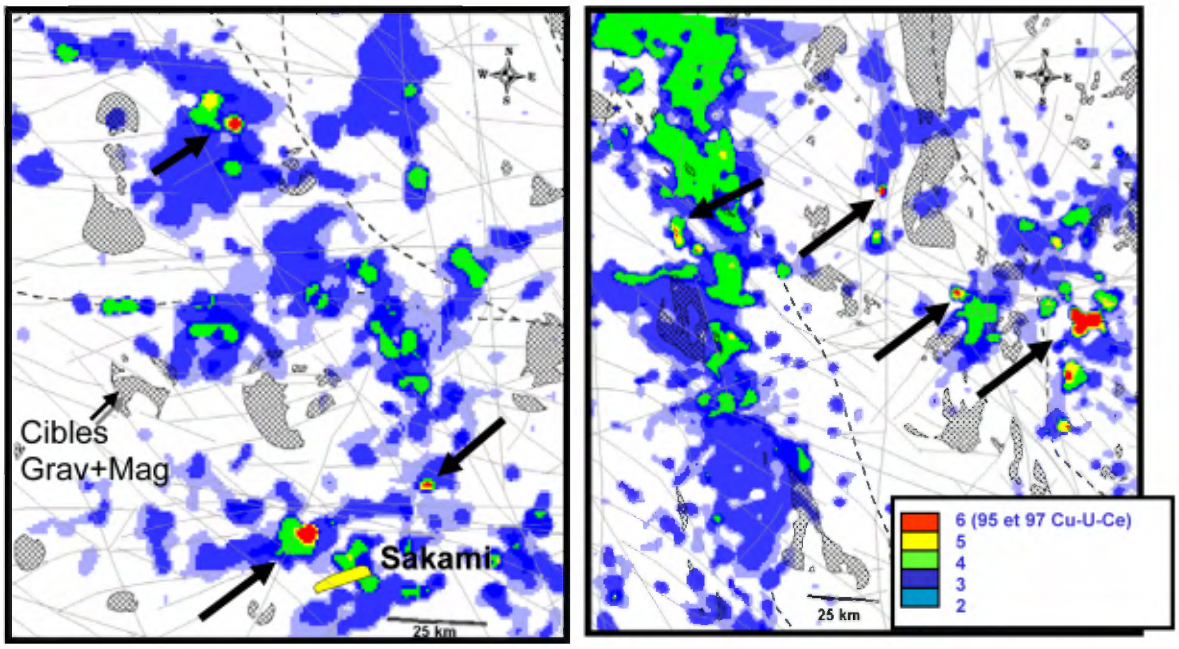


Figure 50: Détails de la figure 49 dans la Province du Lac Supérieur montrant, pour deux secteurs, la superposition des anomalies en Cu-U-Ce rapportées sur une échelle de 6. Les flèches indiquent les plus fortes anomalies géochimiques (valeurs de 6) et correspondent à des cibles d'exploration de première importance. Anomalies magnétiques et gravimétriques coïncidentes indiquées par le quadrillé. Retour au texte.

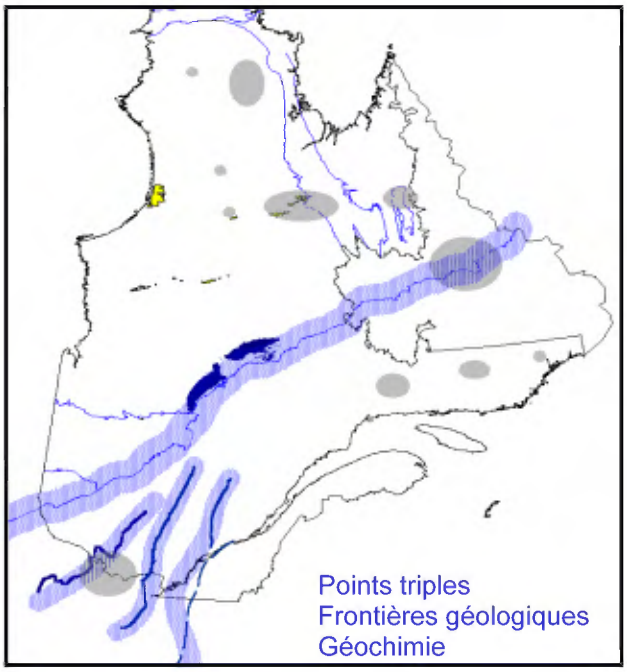


Figure 51: Compilation des secteurs favorables pour l'exploration des dépôts d'oxydes de fer au Québec. Retour au texte.