



RAPPORT D'ÉTAPE 1

2006

Sous-projet SC16

Signature géochimiques des oxydes de fer et application à l'exploration minière

Par

Patrice Gosselin¹, Georges Beaudoin¹ et Michel Jébrak²

¹ Département de Géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, G1K 7P4

² Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal,
C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3P8

Soumis à l'administration de DIVEX

mars 2006 - Montréal

Résumé

La magnétite et l'hématite sont des minéraux abondants dans plusieurs types de gîtes. Ce sont également des minéraux qui forment plusieurs solutions solides et qui sont résistants à l'altération supergène. Peu de travaux d'analyse géochimiques ont jusqu'ici ciblés ces deux minéraux. L'analyse par microsonde électronique de la magnétite et de l'hématite de plusieurs types de gîtes (Cu-Au à oxydes de fer (IOCG), Kiruna, formations de fer (BIF), porphyres à Cu-Au-Mo, skarns à Ca-Fe et Cu-Au, SMV, Fe-Ti, Ni-Cu-EGP et chromitite) a permis d'établir la composition chimique de la magnétite et d'établir des variations dans l'abondance de certains éléments-clés selon le type de gîte. Les oxydes de fer des gîtes BIF et Cr se caractérisent par de faibles teneurs en V et Ti et présentent, respectivement, des teneurs élevées en Al et en Cr. Les gîtes de VMS et de Ni-Cu possèdent des teneurs faibles en V et Ti, mais sont caractérisés respectivement par des teneurs élevées en Si et en Ni. Les oxydes des gîtes de Fe-Ti sont très riches en V et Ti, ainsi qu'en Cr, Al et Mg. Les gîtes de type IOCG et Kiruna se différencient selon les teneurs en V et Ti. Les IOCG sont également plus riches en Al et Si par rapport aux Kiruna. Les porphyres et les skarns montrent des teneurs relativement élevées en V et Ti, mais les porphyres ont des valeurs élevées en Al et Si, tandis que les skarns montrent un enrichissement supplémentaire en Ca et Mg. Il est ainsi possible d'assigner une signature unique des oxydes de fer à un type de gîte particulier. La microsonde électronique offre donc une nouvelle méthode rapide et peu coûteuse de classification géologique pouvant être utilisée en exploration minière.

1) Introduction

Les oxydes de fer sont des minéraux communs qui se retrouvent dans plusieurs types de roches et d'environnements géologiques. Ils peuvent constituer une composante parfois importante de plusieurs types de gîtes minéraux. Bien qu'ils soient très répandus, leur géochimie reste peu étudiée jusqu'à présent.

Cette étude préliminaire a pour but d'établir la composition géochimique des oxydes de fer retrouvés dans différents types de gîtes minéraux. Elle vise à définir une signature géochimique caractéristique qui pourra être utile à l'exploration minière. Bien que de nombreuses techniques analytiques soient possibles pour analyser les oxydes de fer, l'utilisation de la microsonde électronique (EMP) présente l'avantage de pouvoir effectuer de nombreuses analyses à l'intérieur d'un court laps de temps et à faible coût (p.ex. ICP-MS par ablation laser). C'est donc un outil idéal pour l'industrie de l'exploration qui a souvent de grandes quantités d'échantillons à analyser et qui désire avoir des résultats rapidement.

Propriétés chimiques des oxydes de fer

La magnétite est un minéral membre du groupe des spinels, dont la formule générale est XY_2O_4 , où X est un ion divalent ($2+$) et Y un ion trivalent ($3+$). La magnétite (Fe_3O_4) possède un ion Fe^{2+} et deux ions Fe^{3+} . Le groupe des spinels se divise en trois séries selon l'ion trivalent : la série du spinel (Al), la série de la magnétite (Fe), et la série de la chromite (Cr). La série de la magnétite présente des substitutions divalentes en Mg, Fe, Zn, Mn, Ni, et Ti. Ces substitutions forment respectivement la magnésioferrite ($MgFe_2O_4$), la magnétite, la franklinite ($ZnFe_2O_4$), la jacobsite ($MnFe_2O_4$), la trévorite ($NiFe_2O_4$) et l'ulvospinel (Fe_2TiO_4). Il existe des solutions solides complètes entre la magnétite et la magnésioferrite ainsi qu'entre la magnétite et l'ulvospinel; des exsolutions d'ulvospinel apparaissent toutefois dans la magnétite sous les $600^\circ C$ (Deer et al., 1997). Des solutions solides partielles existent entre la magnétite et la franklinite, la jacobsite et la trévorite, en plus de solutions solides avec les minéraux des autres séries, soit le spinel ($MgAl_2O_4$), la gahnite ($ZnAl_2O_4$), l'hercynite ($FeAl_2O_4$) et la galaxite ($MnAl_2O_4$), ainsi qu'avec la magnésiochromite ($MgCr_2O_4$) et la chromite ($FeCr_2O_4$). D'autres substitutions possibles au niveau des ions trivalents et divalents sont possibles dans la magnétite, notamment le vanadium (V^{3+}), ainsi que le calcium (Ca^{2+}) et le cobalt (Co^{2+}). La magnétite est un composant majeur des gîtes de Fe-Ti. Elle est également un composant important de différents types de gîtes comme les skarns, les porphyres et les IOCG, et se retrouve comme minéral accessoire dans une grande variété de gîtes comme les Ni-Cu-EGP, les SEDEX et les SMV.

L'hématite (formule chimique Fe_2O_3) est formée uniquement de fer trivalent (Fe^{3+}). Elle forme une solution solide complète avec l'ilménite ($FeTiO_3$), cependant des exsolutions d'hématite apparaissent dans l'ilménite sous les $950^\circ C$. Elle forme également une solution solide partielle avec la magnétite. L'hématite peut incorporer dans sa structure une certaine quantité de Mn^{2+} et Fe^{2+} (Deer et al., 1997). L'hématite est le principal minerai de fer exploité dans le monde et se retrouve principalement dans les formations de fer métamorphisées, où elle remplace souvent la magnétite. Elle forme également une grande partie du minerai exploité à Olympic Dam en Australie (un gîte de type IOCG) ainsi que dans nombre de gîtes du même type. L'hématite forme un minéral primaire des gîtes magmatiques ou hydrothermaux, ainsi que comme minéral secondaire par remplacement de la magnétite ou par altération supergène.

2) Sélection des échantillons

Des échantillons provenant de divers gîtes de type IOCG, ainsi que d'autres types, ont été sélectionnés dans la collection d'échantillons de l'université Laval ainsi que les collections des professeurs Georges Beaudoin et Michel Jébrak. D'autres échantillons ont été gracieusement fournis par les professeurs Michel Gauthier (UQAM), Larry Meinert (Smith College), et Marc Constantin (U. Laval), par Renan Furic (UQAM), Marjorie Simard (U. Laval), ainsi que par Doug Kirwin (Ivanhoe Resources Ltd.), Mark Cruise (Cardero Resources Corp.) et Peter Lightfoot (Inco Technical Services Ltd.).

Le Tableau 1 illustre la provenance des différents échantillons analysés ainsi que leurs répartition par type de gîte. Le nombre de grains analysés ainsi que le nombre total d'analyses figure également au tableau. La classe des IOCG au sens large (gîtes de type IOCG, Kiruna et IOCG-like) est la mieux représentée, avec 31 échantillons sur un total de 61 échantillons pour toute l'étude. Cette subdivision des IOCG est nécessaire car il fallait vérifier s'il existe des différences de composition entre les gîtes pauvres (IOCG) et riches en apatite (Kiruna). Plusieurs gîtes placés dans le type IOCG ont une affiliation qui demeure spéculative ou contestée, de sorte qu'ils sont placés dans une classe à part (IOCG-like) qui permettra de comparer leurs signatures chimiques à celle des IOCG et Kiruna. Bien que l'échantillonnage représente 8 différents types de gîte répartis sur 4 continents, il n'en demeure pas moins que cet échantillonnage ne représente qu'une petite portion des variations de composition potentielles pour un type de gîte. Une courte description géologique des gîtes est présentée à l'Annexe 2.

3) Méthodologie

Les lames minces polies contenant les grains d'oxydes de fer sélectionnés ont été recouvertes d'une couche de carbone, puis analysées avec la microsonde électronique CAMECA SX-100 de l'université Laval. Trois routines d'analyse (une routine pour des analyses d'éléments majeurs et 2 routines d'éléments traces) ont été nécessaires afin de pouvoir analyser tous les éléments souhaités. Le Tableau 2 présente la liste des éléments analysés, le cristal et les raies utilisés, les temps de comptage (sur pic et bruit de fond), ainsi que les limites de détection obtenues. La limite de détection est normalement calculée lors de chaque analyse et pour chaque élément; elle peut

donc varier d'une analyse et d'un échantillon à l'autre. La limite de détection affichée dans le Tableau 2 est un calcul de la moyenne de la limite de détection obtenue pour 10 analyses sur 10 échantillons différents.

La routine d'analyse des éléments majeurs génère des limites de détections substantiellement plus élevées que celle des éléments traces. L'augmentation de l'ampérage pour les routines d'analyse des éléments traces de 20 à 100 nA permet de diminuer d'un facteur de 5 à 6 fois la limite de détection. Il est par conséquent jugé inutile d'effectuer une routine des éléments majeurs si ces éléments peuvent être inclus dans une routine d'analyse des éléments traces. Nous n'utiliserons donc par les analyses des majeurs, sauf pour le Ca qui n'a pas été analysé à 100 nA.

4) Résultats analytiques

Un tableau complet des résultats est fourni à l'Annexe 1, tandis qu'un diagramme multiéléments (*spider*) pour toutes les analyses d'un gîte est présenté à l'Annexe 2. Les analyses dont le total des oxydes n'est pas compris entre 98% et 102% ne figurent pas dans l'Annexe 1, sauf pour les analyses provenant du gîte de Coleraine (chromitite), qui sont toutes entre 102,9% et 103,3%.

4.1) Différenciation magnétite vs hématite

Des différences de composition entre la magnétite et l'hématite dans un même gîte sont parfois apparentes. L'hématite secondaire formée par oxidation de la magnétite, mise en évidence par une texture destructrice de la magnétite (e.g. Mont-de-l'Aigle), montre les variations les plus importantes, notamment un appauvrissement en Si et un enrichissement en Ti. Cependant, l'hématite formée par remplacement pseudomorphique de la magnétite (e.g. Rektor) ne montre pas de changements de composition.

4.2) Diagrammes multiéléments

La composition moyenne de chaque gîte est présentée sur un diagramme multiéléments. Tous les exemples de gîtes d'un même type sont comparés entre eux et avec la moyenne (calculée en faisant la moyenne des moyennes des analyses de chaque gîte) pour le type de gîte. Sur les diagrammes qui suivent, la ligne tirée représente cette moyenne globale pour un type de gîte particulier, alors que L.D. représente

Tableau 1 : Liste des échantillons analysés

Type	Gîtes	Provenance	Nb lames minces	Nb grains	Nb analyses
IOCG (4)	Olympic Dam	Australie, Southern Australie	3	11	22
	Ernest Henry	Australie, Queensland	2	6	12
	Candelaria	Chili	1	3	6
	Alemao	Brésil	1	3	6
Kiruna (6)	Kiruna	Suède	1	3	6
	El Romeral	Chili	1	3	6
	Pilot Knob	USA, Missouri	1	4	8
	Pea Ridge	USA, Missouri	1	5	10
	Rektor	Suède	1	4	8
	Savage River	Australie, Tasmanie	1	5	10
IOCG- like (9)	Kvyjibo	Canada, Québec	3	9	18
	Queylus	Canada, Québec	3	11	22
	Mont-de-l'Aigle	Canada, Québec	3	12	21
	Fort Constantine	Australie, Queensland	1	5	10
	Osborne	Australie, Queensland	2	6	12
	Murdie Island	Australie, Southern Australie	3	14	28
	Amargosa	Mexique, Baja California	1	3	6
	San Fernando	Mexique, Baja California	1	3	6
	Bayan Obo	Chine, Mongolie Intérieure	1	3	6
BIF (6)	Schefferville	Canada, Québec	3	11	22
	Lac Jeanine	Canada, Québec	1	4	8
	Richelieu	USA, Minnesota	1	4	8
	Spruce Pit	USA, Minnesota	1	4	8
Porphyres (7)	Copper Mountain	Canada, Col.-Britannique	1	3	6
	Ingerbelle	Canada, Col.-Britannique	1	4	8
	Kharmagtai	Mongolie	1	5	9
	Ridgeway	Australie, New South Wales	1	3	6
	Oyu Tulgoi	Mongolie	1	3	6
	Skouries	Grèce	2	8	15
	Bingham Canyon	USA, Utah	1	3	6
VMS (3)	Aldermac	Canada, Québec	1	2	3
	Normétal	Canada, Québec	1	2	4
	Ansil	Canada, Québec	2	6	12
Skarns (4)	Klanch	Canada, Col.-Britannique	1	3	6
	Chandman Uul	Mongolie	1	3	6
	Oyut Ovov	Mongolie	1	5	9
	Iron Hill	Canada, Col.-Britannique	1	2	4
Ni-Cu (3)	Sudbury	Canada, Ontario	2	6	12
	Blue Lake	Canada, Québec	1	3	6
	Voisey's Bay	Canada, Labrador	2	5	10
Fe-Ti (2)	GE mine	Canada, Québec	1	4	8
	Lablache	Canada, Québec	1	2	4
Cr (1)	Coleraine	Canada, Québec	1	2	3
GRAND TOTAL			61	210	412

la limite de détection particulière à chacun des éléments analysés. Les analyses qui étaient sous la limite de détection se sont vue attribuée la valeur de la limite, et donc se situent sur la ligne L.D.

4.2.1) Gîtes IOCG

Les oxydes de fer des gîtes de type IOCG (Olympic Dam, Ernest Henry, Candelaria et Alemao) présentent une relative uniformité à l'échelle du gîte (Figure 1). Les éléments caractéristiques des IOCG sont des teneurs en V-Ti sous les 1000 ppm, ainsi que des teneurs en Al et Si autour de 1000 ppm ou plus.

Olympic Dam et Candelaria montrent des variations importantes au niveau des teneurs en Nb, K, et P. Certaines analyses semblent également plus riches en Ti. Ernest Henry se démarque des autres IOCG par ses teneurs en Ti, Al et Si plus basses.

4.2.2) Gîtes de type Kiruna

Les gîtes de type Kiruna (Figure 2) sont caractérisés par des teneurs en V et Ti proche ou supérieur à 1000 ppm, ainsi que des teneurs en Ni parfois légèrement supérieur à la limite de détection de 170 ppm. Les teneurs en Ti à Kiruna sont

Tableau 2 : Méthodologie à la microsonde et limites de détection

Éléments analysés	Crystal	Ligne	Baseline	Sinus Theta	Décalage	Temps de comptage (s)	Temps de comptage bruit de fond (s)	Voltage (kV)	Ampérage (nA)	Limite de détection (ppm)
SiO ₂	TAP	Ka	560	27737	+600	20	10	15	20	137
TiO ₂	LPET	Ka	1129	31414	-600	20	10	15	20	133
Al ₂ O ₃	TAP	Ka	560	32462	+600	20	10	15	20	132
V ₂ O ₃	LLIF	Ka	617	62197	+600	20	10	15	20	284
Cr ₂ O ₃	LIF	Ka	600	56874	-600	20	10	15	20	550
Fe total	LLIF	Ka	953	48084	-500	20	10	15	20	482
MgO	TAP	Ka	560	38502	+600	20	10	15	20	169
CaO	LPET	Ka	741	38387	-600	20	10	15	20	105
NiO	LIF	Ka	1207	41173	-500	20	10	15	20	1138
Cu	LIF	Ka	1348	38256	-500	30	10	15	100	233
Zn	LIF	Ka	1494	35625	-500	30	10	15	100	319
Ni	LIF	Ka	1207	41173	-500	20	10	15	100	166
Co	LIF	Kb	1252	40241	-500	30	10	15	100	808
Cr	LIF	Ka	600	56874	-600	30	10	15	100	81
Ti	LIF	Ka	560	68283	-600	30	10	15	100	84
Te	LPET	La	776	37581	+500, -600	30	10	15	100	65
Sb	LPET	La	708	39301	+500	20	10	15	100	65
Mo	LPET	Lb	560	59214	+600	25	10	15	100	134
Au	LPET	Ma	560	66797	+600	30	10	15	100	122
Ag	LPET	La	560	47492	+700, -600	25	10	15	100	57
Bi	LPET	Ma	560	58516	+700, -700	30	10	15	100	91
Nb	LPET	La	560	65431	+600	30	10	15	100	80
Pb	LPET	Ma	560	60446	+750, -800	30	10	15	100	94
P	LPET	Ka	560	70378	+600	30	10	15	100	19
Al	TAP	Ka	560	32462	+600	30	10	15	100	20
Si	TAP	Ka	560	27737	+600	30	10	15	100	21
Mg	TAP	Ka	560	38502	+600	30	10	15	100	25
As	TAP	La	560	37657	+600	30	10	15	100	73
Ce	LIF	La	593	63623	+600, -650	30	10	15	100	250
La	LIF	La	560	66208	+600, -600	30	10	15	100	251
Ba	LIF	La	560	68492	+650	30	10	15	100	296
V	LIF	Ka	617	62190	+500	30	10	15	100	92
Mn	LIF	Ka	833	52202	-600	30	10	15	100	107
Y	LPET	La	560	73760	+500	30	10	15	100	74
K	LPET	Ka	574	42742	+500, -600	30	10	15	100	16
Th	LPET	Ma	560	47277	+600	30	10	15	100	111
Zr	LPET	La	560	69412	+600	30	10	15	100	70
Rb	TAP	La	560	28487	+300, -200	30	10	15	100	103
Se	TAP	La	560	43988	+500, -600	30	9	15	100	74

cependant sous la limite de détection. Ils sont généralement pauvres en Al et Si, avec des teneurs en Si autour de 100 ppm et de teneurs en Al sous les 1000 ppm. Les deux gîtes du Missouri (Pea Ridge et Pilot Knob) ainsi que Savage River possèdent cependant des teneurs de Si autour de 1000 ppm, alors que Rektor, Kiruna et El Romeral montrent des teneurs presque 10 fois inférieures. Cette dichotomie est difficile à expliquer, cependant une seule analyse à Savage River (analyse 2a) suffit pour faire monter

la moyenne en Si à près de 630 ppm; sinon celle-ci se situe à 110 ppm lorsqu'on ne tient pas compte de cette analyse. Les grains d'hématite provenant de Pea Ridge et Pilot Knob concordent mieux avec les autres analyses de Kiruna que les grains de magnétite. Peut-être cet enrichissement en Si est il particulier aux gîtes de cette région du Missouri.

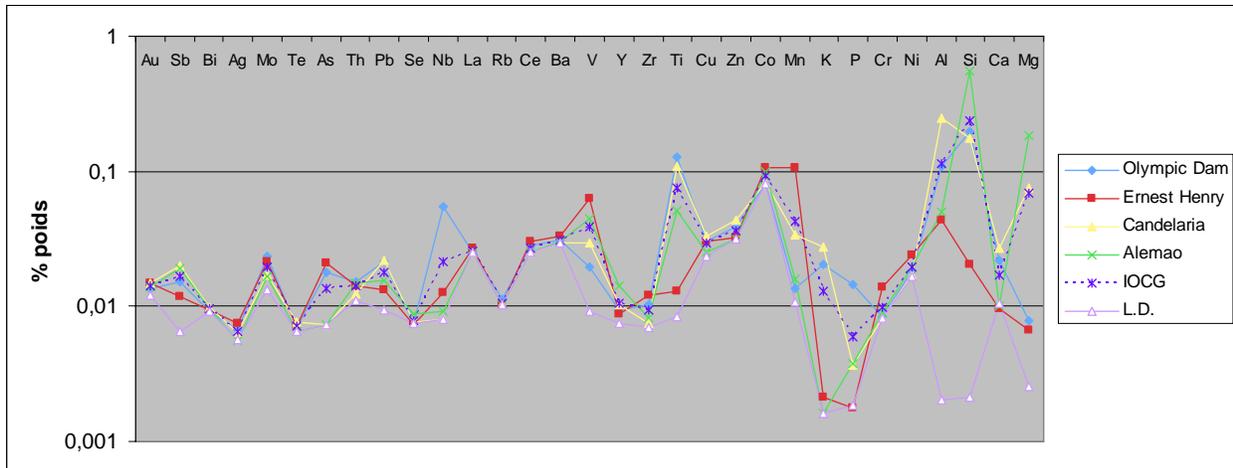


Figure 1 : Gîtes de type IOCG

4.2.3) Gîtes de fer (BIF)

La signature caractéristique des gîtes BIF montre des teneurs très faibles en V et Ti (Figure 3). Les autres éléments sont presque tous sous la limite de détection, sauf pour Al, Si et Mg, qui montrent des variations importantes mais non constantes. Le gîte de Lac Jeanine est particulier puisqu'il contient uniquement de l'hématite et montre un fort enrichissement en Mn et un fort appauvrissement en Si. L'échantillon 1094 de Schefferville, composé uniquement d'hématite, montre un patron semblable avec des teneurs en Si très faibles. Il est à ce stade toujours impossible de déterminer la cause de ces variations importantes des teneurs en Si.

4.2.4) Gîtes de type porphyres à Cu-Au et Cu-Mo

Les gîtes de type porphyre ont une signature relativement uniforme (Figure 4). Ils se caractérisent par des valeurs en V et Ti élevées, particulièrement pour le V qui se situe presque toujours à 1000 ppm ou plus. Les teneurs en Al et Si sont généralement élevées; l'Al se situe généralement entre 1000 et 2000 ppm, alors que les teneurs en Si sont plus variables. Certains gîtes (Ridgeway, Oyu Tulgoi et Khargmatai) contiennent également des analyses de magnétite riches en Mg, celles-ci sont aussi généralement les plus enrichies en Al et Si. Des teneurs en Cr quelques fois plus élevées sont également enregistrées, notamment à Khargmatai où trois analyses rapportent 1030, 1020 et 880 ppm Cr.

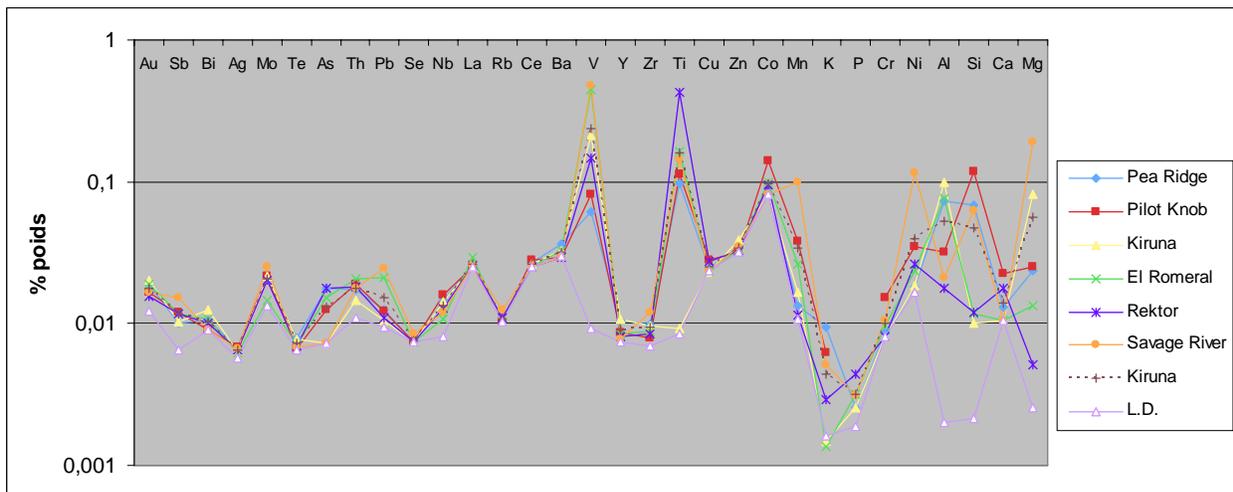


Figure 2 : Gîtes de type Kiruna

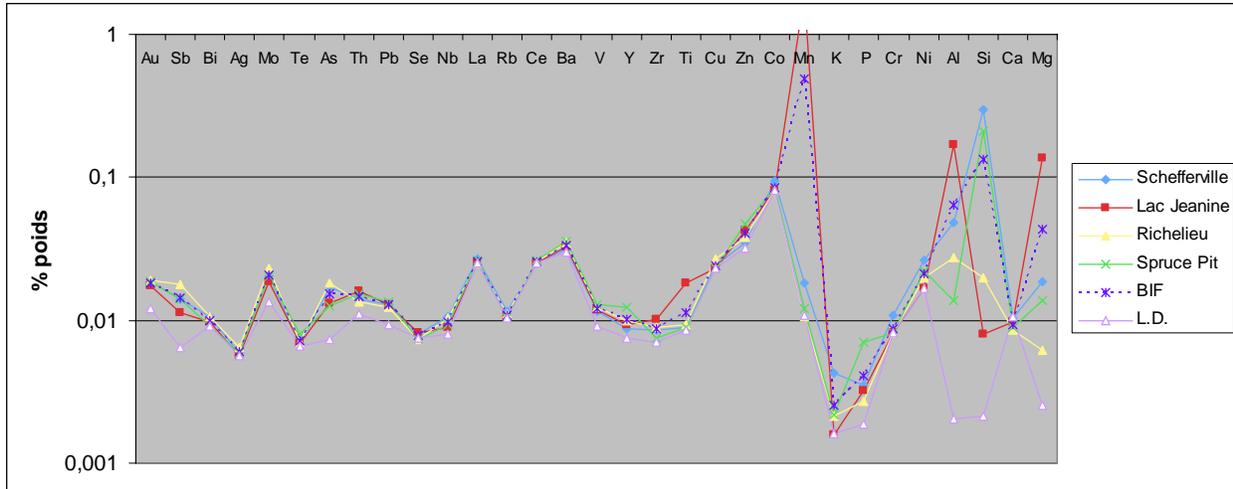


Figure 3 : Gîtes BIF

4.2.5) Gîtes de types skarn ferrifère et à Cu-Au

Les gîtes de type skarn (Figure 5) montrent une grande variation des teneurs de plusieurs éléments. Il est possible que cela soit causé par les styles de minéralisation particuliers à chacun des gîtes. En effet, les gîtes de Colombie-Britannique (Iron Hill et Klanch) sont des skarns calciques à Fe, alors que les gîtes de Mongolie (Oyut Ovo et Chandman Uul) sont des skarns à Cu-Au. Les teneurs en Si et Ca sont généralement élevées, proche ou au-dessus de 1000 ppm, et les teneurs en Ca et Mg sont également élevées dans les skarns à Ca-Fe de la Colombie-Britannique.

4.2.6) Gîtes de types Ni-Cu

Les gîtes de Ni-Cu de la Figure 6 (Sudbury, Blue Lake, Voisey's Bay) montrent des teneurs en V-Ti généralement faibles (sous les 1000 ppm) sauf à Voisey's Bay, où les échantillons provenant de deux zones différentes (Eastern Deeps et Ovoid) ont des patrons dissimilaires. Des teneurs de Ni entre 200 et 500 ppm est une des caractéristiques principales des gîtes de Ni-Cu, en plus de teneurs en Cr entre 200 et 400 ppm (sauf à Voisey's Bay, où la zone Eastern Deeps n'a pas de Cr, et la zone Ovoid a des teneurs 3500 et 5300 ppm de Cr). Il est à noter qu'un échantillon d'une zone à oxyde-apatite provenant de Sudbury contenant de la titano-magnétite apparaît avec les gîtes Fe-Ti (Figure 7) puisque sa signature y correspondait parfaitement.

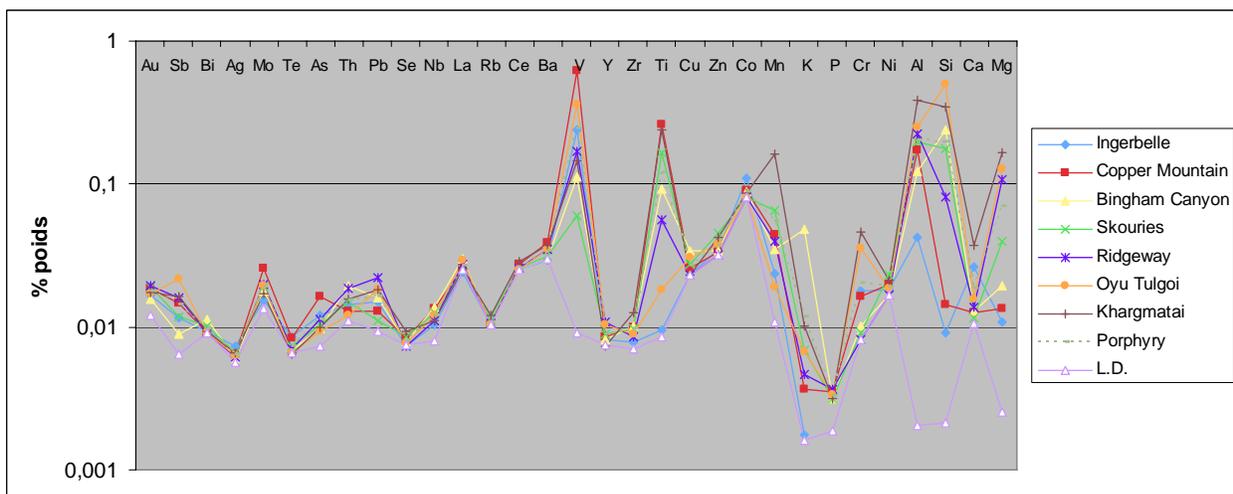


Figure 4 : Gîtes de type porphyre

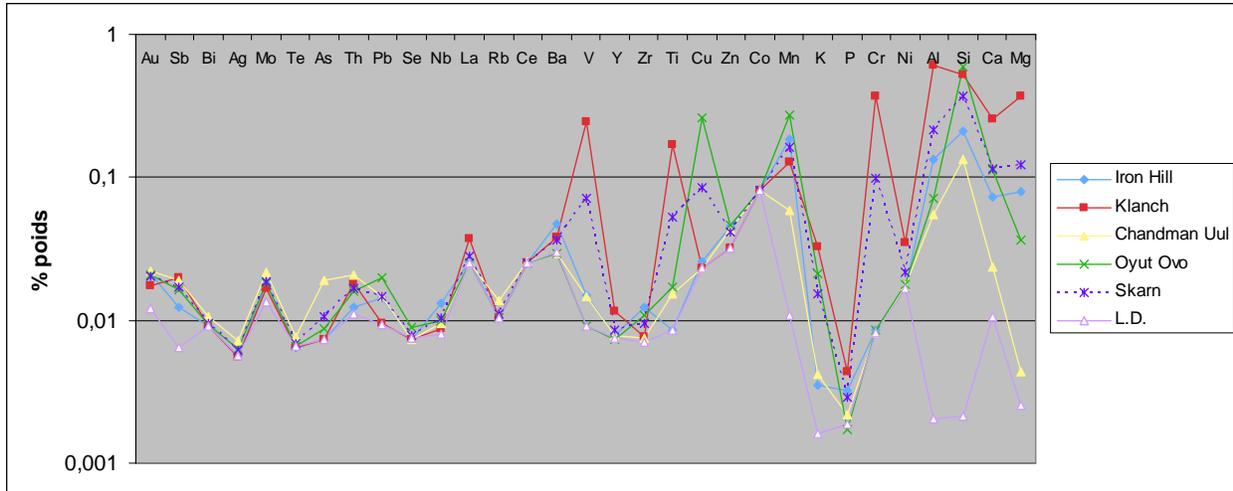


Figure 5 : Gîtes de type skarn

4.2.7) Gîtes de types Fe-Ti et chromite

Ces deux types de gîtes sont représentés sur la Figure 6. Les gîtes de Fe-Ti tels que la mine General Electric (GE) et l'indice de La Blache sont représentés par des teneurs en Ti supérieures à 10 000 ppm, et des teneurs en V proches de 10 000 ppm. Ceci s'explique par le fait que la magnétite analysée dans ce type de gîte montre des exsolutions d'ulvospinel (il s'agit alors de titano-magnétite). Les gîtes de Fe-Ti montrent également de forts enrichissements en Cr et en Mg (près de 800 ppm). Enfin, le gîte de chrome de Coleraine montre une signature très appauvrie en proche de la limite de détection pour presque tous les éléments, avec cependant des teneurs élevées en Cr supérieures à

20 000 ppm, en plus de teneurs en La autour de 600 ppm.

4.2.8) Gîtes de type SMV

Enfin, les gîtes de type SMV (Figure 7) démontrent une certaine variation d'un gîte à l'autre. Les gîtes d'Ansil et d'Aldermac sont cependant très riches en Si. Les teneurs en V-Ti sont généralement faibles. La présence d'un pic en V à Aldermac est peut-être due au fait que la magnétite semble avoir co-précipité avec la sphalérite et les autres sulfures. L'absence de Si à Normétal pourrait être expliqué par le fait que la magnétite analysée est à un stade avancé de remplacement par les sulfures.

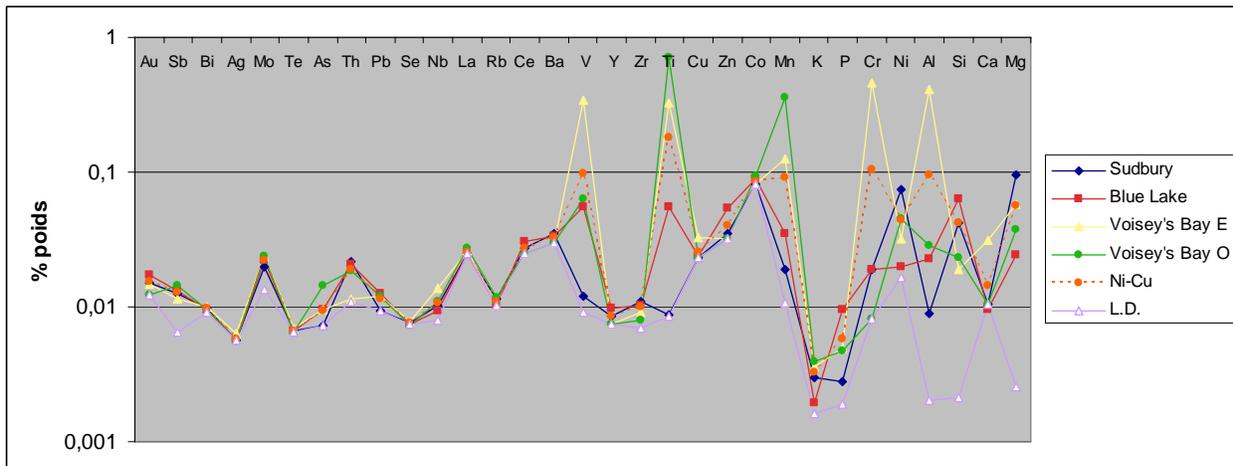


Figure 6 : Gîtes de Ni-Cu

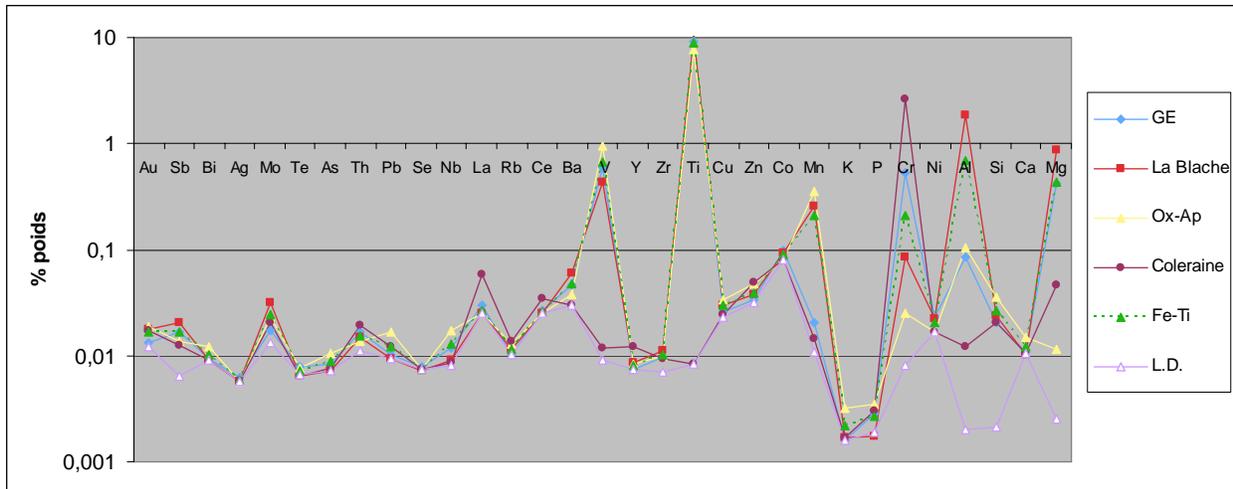


Figure 7 : Gîtes de types Fe-Ti et Cr

5) Discussion

5.1) Routine d'analyse optimale

Les éléments pouvant servir à la définition d'une signature géochimique sont soulignés au chapitre 4. Il s'agit des éléments suivants : V, Ti, Mn, Cr, Ni, Si, Al, Ca et Mg. Afin d'obtenir la limite de détection la plus basse possible, ces éléments devraient tous être analysés à 100 nA et 15 kV, avec un temps de comptage de 30 secondes sur pic et 10 secondes sur bruit de fond.

5.2) Définition d'une signature géochimique

Les diagrammes multiéléments des moyennes par types de gîte permettent de définir une signature chimique des oxydes de fer pour plusieurs types de gîte.

Le Tableau 3 présente un résumé des variations des éléments clés avec un symbole indiquant l'ordre de grandeur relatif des teneurs. L'absence de symbole indique que les teneurs se situent dans la moyenne générale. Les éléments qui ne figurent pas au Tableau 3 ne montrent pas de variations suffisantes pour entrer dans une catégorie, où se retrouvent généralement sous la limite de détection. Ce sont donc ces éléments qui définissent la composition chimique des oxydes de fer et qui permettent d'établir la signature géochimique (voir en 5.2).

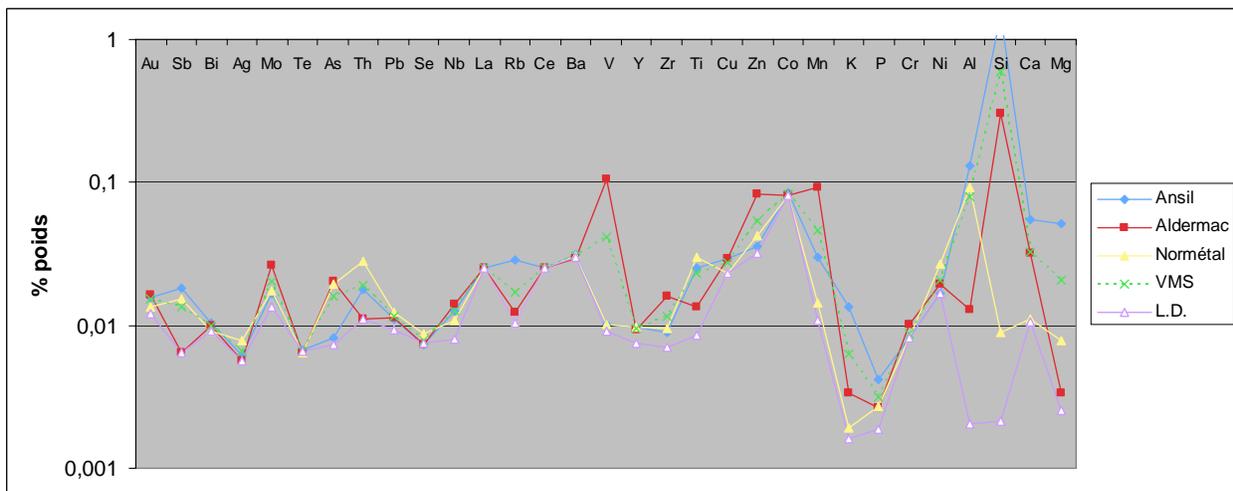


Figure 8 : Gîtes de type VMS

Tableau 3 : variations relatives de la signature chimique

	V	Ti	Mn	Cr	Ni	Si	Al	Ca	Mg
IOCG	-	+		--	--	++	+	--	
Kiruna	++	++		--	+	+	-	--	
BIF	--	--	++	--	--	+	-	--	
Porphyre	++	++		-	--	++	++	-	
Skarn	+	+		+	--	++	++	++	+
Fe-Ti	+++	+++	+	++	--	-	+++	--	++
Chrome	--	--	-	+++	--	-	--	--	
Ni-Cu	-	-		-	+	+	--	--	
SMV	-	-		--	--	++	-	+	-

- teneurs très faibles proches de la limite de détection
- teneurs faibles, sous la moyenne des teneurs moyennes par gîte
- + teneurs au-dessus de la moyenne des teneurs moyennes par gîte
- ++ teneurs élevées, >1000 ppm
- +++ teneurs très élevées, >10 000 ppm

Les Figures 9, 10 et 11 permettent d'identifier les éléments qui définissent la signature chimique caractéristique d'un type de gîte. La Figure 9 présente les types de gîtes caractérisés par des teneurs très faibles en V-Ti pour le BIF et les gîtes de chrome, et des valeurs faibles pour les VMS et les Ni-Cu. Les autres pics définissent chacun un type de gîte particulier, soit le pic en Mn pour les BIFs (lié à la présence importante d'hématite), le pic en Cr pour les gîtes de chrome, le pic en Ni pour les gîtes de Ni-Cu et le pic en Si pour les SMV.

La Figure 10 illustre les différences entre les gîtes de type IOCG et Kiruna. Les gîtes de type IOCG se distinguent par des teneurs en V-Ti plus élevées que pour les gîtes de types BIF, Ni-Cu, VMS et Chrome (Figure 9), mais plus faibles que les gîtes de type Kiruna. Ces derniers montrent des teneurs faibles en Si comparativement aux IOCG.

Les gîtes de type porphyre, skarn et Fe-Ti (Figure 11). Les Fe-Ti sont très bien séparés par leurs teneurs très élevées en V-Ti (particulièrement en Ti), ainsi

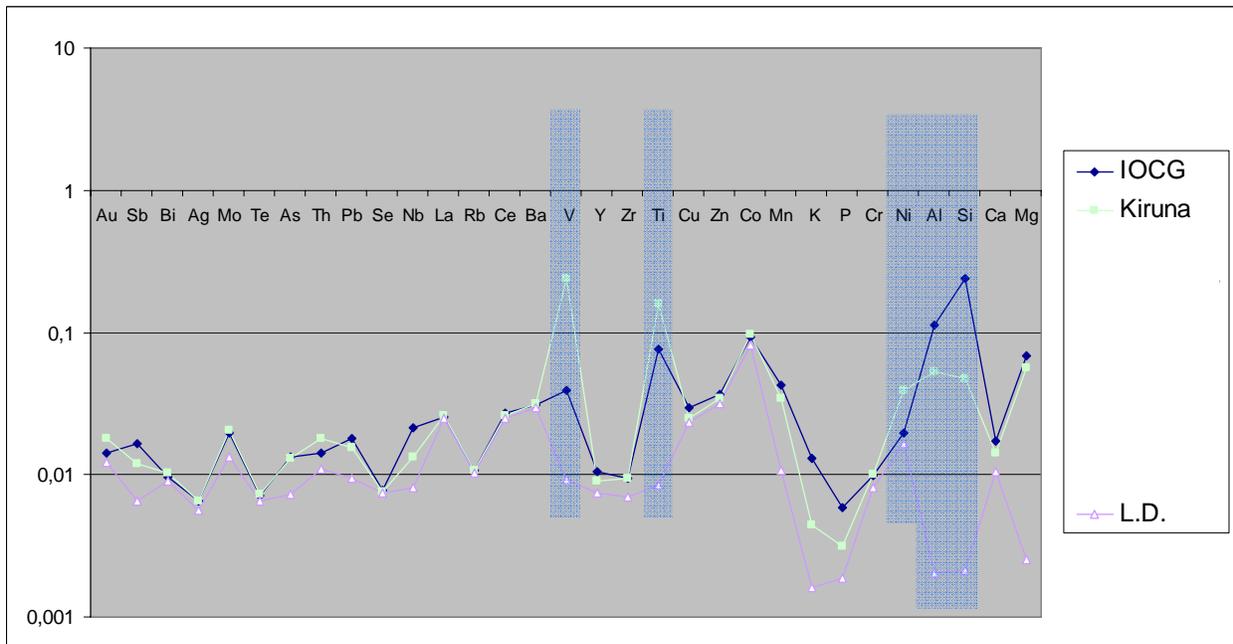


Figure 9 : Signature géochimique des gîtes avec faibles valeurs en V-Ti

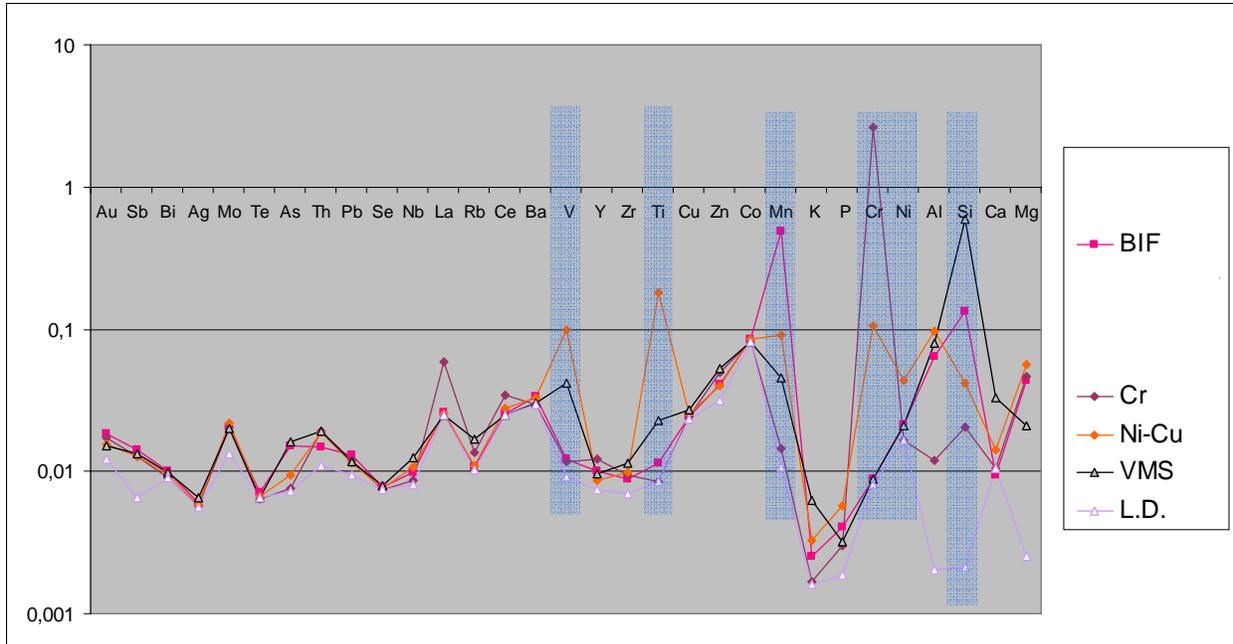


Figure 10 : Signature géochimique des IOCG vs Kiruna

qu'en Al et Mg. Les porphyres montrent des pics en V-Ti similaires aux Kiruna, alors que les skarns montrent des teneurs de V-Ti semblables aux gîtes IOCG. Les teneurs en Al et Si des porphyres sont cependant plus élevées que dans les gîtes de type Kiruna, alors que les teneurs en Al, Si, Ca et Mg des skarns sont relativement élevées.

5.2) Diagramme discriminant

Les Figures 1 à 8 illustrent bien que les moyennes des teneurs en vanadium et en titane varient selon le type de gîte. Il est donc logique d'utiliser un ratio Ti+V qui permettra de différencier

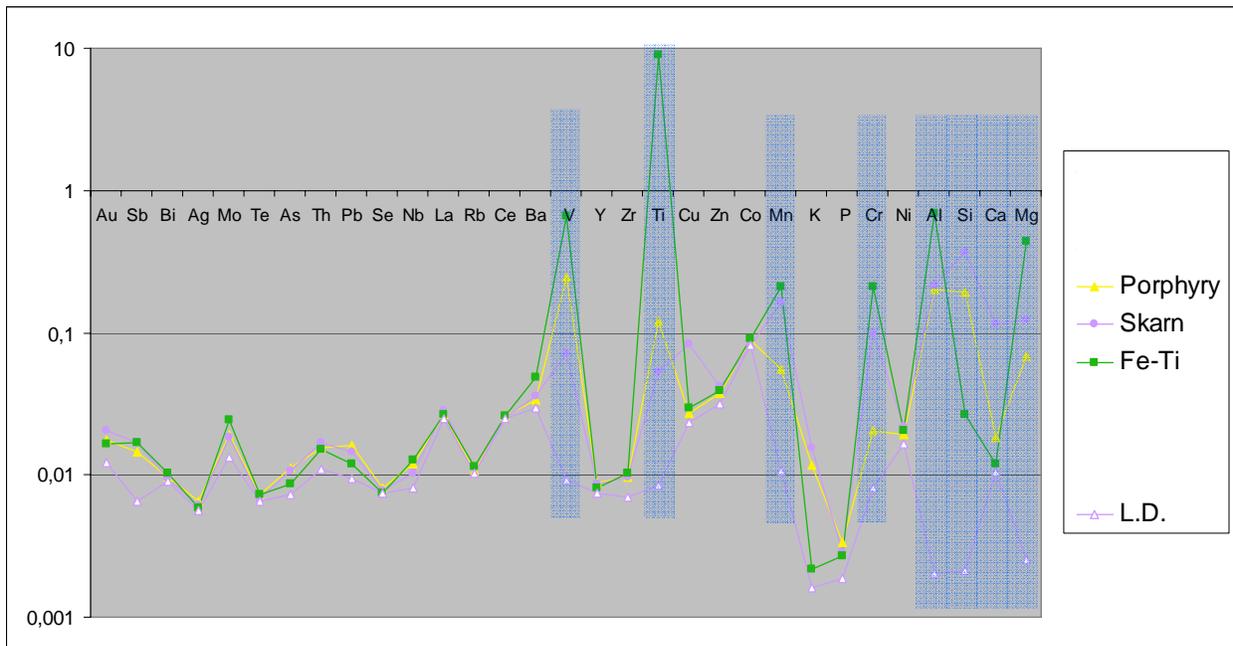


Figure 11 : Signature géochimique des gîtes de types porphyre, skarn et Fe-Ti

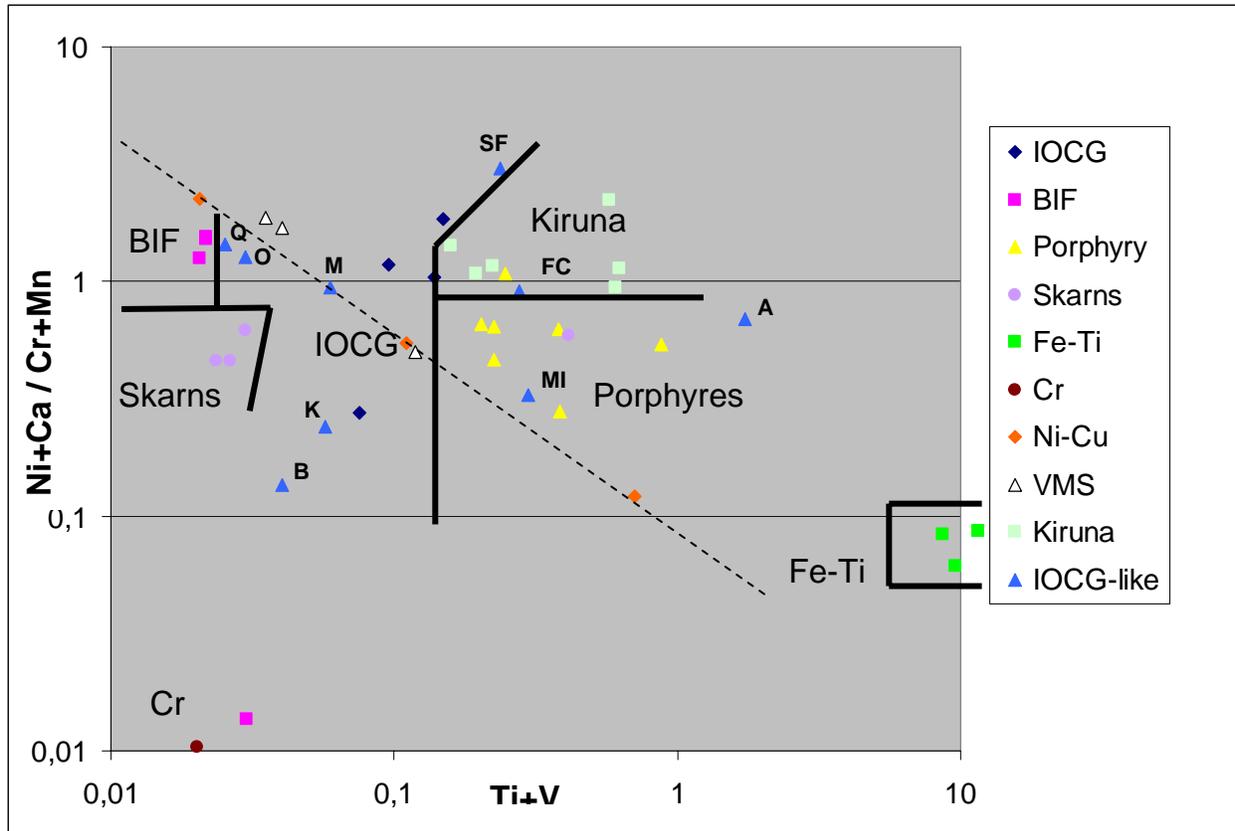


Figure 12 : Définition de champs de composition des oxydes de fer en fonction du type de gîte

les types de gîte dans un diagramme discriminant. Un deuxième ratio a été calculé en utilisant les éléments enrichis et appauvris dans les gîtes de type Kiruna, soit : $Ni+Ca / Cr+Mn$.

Le diagramme de la Figure 12 illustre l'utilisation possible de ces ratios. Il permet de caractériser des champs de composition des oxydes de fer par type de gîte. Certains champs sont relativement bien définis, comme le champ des porphyres et des gîtes de Fe-Ti. Le champ des BIF est très limité, cependant le point représentant le gîte de Lac Jeanine se retrouve très bas dû à son fort enrichissement en Mn. Les skarns forment également un champ bien défini, quoique le gîte de Klanch, avec 2 analyses possédant des teneurs élevées en Ti et V, soit déporté dans le champ des porphyres. Les champs des Kiruna et IOCG se chevauchent partiellement, indiquant peut-être une affinité génétique. Le gîte d'Ernest Henry est le seul IOCG qui se démarque du groupe, avec ses faibles teneurs en Ti. L'utilisation de ce diagramme pour les gîtes de types Ni-Cu et SMV reste à déterminer, cependant les moyennes individuelles de ces gîtes s'alignent néanmoins sur une droite (ligne tiretée).

Les gîtes classés dans la catégorie des IOCG-like se départagent entre les champs des gîtes de type IOCG, Kiruna et BIF. Les gîtes de San Fernando (SF) et du Mont-de-l'Aigle (M) tombent bien dans les champs des IOCG. Leurs teneurs en V et Ti peuvent s'apparenter aux gîtes de type IOCG, et leurs teneurs en Al et Si sont supérieures à 1000 ppm. Kwyjibo (K) et Bayan Obo (B) se retrouvent proche de Ernest Henry sur la Figure 12, et leur signature respective (voir les diagrammes multiéléments de l'Annexe 2) est caractérisée par de faibles teneurs en V et Ti. Le gîte de Fort Constantine (FC) se retrouve dans le champ des Kiruna, cependant Amargosa (A) et Murdie Island (MI), dont les diagrammes multiéléments (Annexe 2) sont très proches des gîtes de type Kiruna, sont décalés par rapport à ce champ : une des magnétites d'Amargosa est très riche en Ti (environ 45 000 ppm et explique ce décalage, alors qu'à Murdie Island le Mn semble être plus riche. Enfin, Queylus (Q) et Osborne (O) tombent tout proche des gîtes BIF; leurs teneurs en V et Ti sont très faibles, cependant Queylus montre des teneurs élevées en K et P semblables aux gîtes de type IOCG d'Olympic Dam et Candelaria.

6) Conclusions

Cette étude préliminaire a permis d'établir que la composition chimique des oxydes de fer est variable, et ce notamment en fonction du type de gîte auquel les oxydes sont associés. Certains éléments montrent une plus grande variabilité que d'autres : V, Ti, Mn, Cr, Ni, Al, Si, Ca et Mg. Ces éléments servent à caractériser la signature géochimique des oxydes, et l'opposition des ratios Ti+V vs (Ni+Ca / Cr+Mn) permet de définir des champs de composition précis par type de gîte.

Le nombre limité d'échantillons par gîte (1 à 3), l'impossibilité de connaître la zonalité précise du gîte et d'où proviennent les échantillons, ainsi que le nombre limité de gîtes échantillonnés par type sont autant de facteurs qu'il faut considérer avant de formuler des guides d'exploration. Néanmoins, il semble qu'il existe tout de même des variations significatives de la composition des oxydes de fer par type de gîte.

Les différences de composition observées entre l'hématite et la magnétite, plus particulièrement l'enrichissement en Ti et l'appauvrissement en Si, restent à expliquer.

Enfin, les auteurs recommandent d'effectuer plus d'analyses sur un plus grand nombre de gîtes, et d'analyser les variations de composition des oxydes de fer en fonction de la distance par rapport aux zones minéralisées.

7) Remerciements

Les auteurs de ce rapport aimeraient remercier les nombreux donateurs d'échantillons : Doug Kirwin (Ivanhoe Mines Ltd.), Mark Cruise (Cardero Resources Corp.), Peter Lightfoot (Inco Technical Services Ltd.), Larry Meinert (Smith College), Marc Constantin (Université Laval), Michel Gauthier (UQAM), Renan Furic (UQAM) et Marjorie Simard (Université Laval). Marc Choquette, responsable du laboratoire de micrographie de l'Université Laval, fut d'une aide précieuse pour les analyses à la microsonde. Enfin, merci à Éric David pour son aide technique et sa production de lames minces polies malgré les délais serrés.

8) Références

Barrett, T.J., Cattalani, S., Chartrand, F. et Jones, P. (1991). Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec : II. The Aldermac mine. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 28, pp. 1301-1327.

Carlson, C.J. (2000). Iron oxide systems and base metal mineralization in northern Sweden, dans Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 283-296.

Clark, T. (2001). Distribution and exploration potential of platinum-group elements in Québec. *Géologie Québec*, Ministère des Ressources Naturelles du Québec, PRO 2001-06, 13 p.

Cliff, R.A., Rickard, D. et Blake, K. (1990). Isotope systematics of the Kiruna magnetite ore, Sweden: Part I, Age of the ore. *Economic Geology*, vol. 85, pp. 1770-1776.

Cunningham, C.G., Austin, G.W., Naeser, C.W., Rye, R.O., Ballantyne, G.H., Stamm, R.G. et Barker, C.E. (2004). Formation of a paleothermal anomaly and disseminated gold deposits associated with the Bingham Canyon porphyry Cu-Au-Mo system, Utah. *Economic Geology*, vol. 99, pp. 789-806.

Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (1997). *Rock-forming minerals*, Vol. 5B: Non-silicates: sulphates, carbonates, phosphates, halides, Geological Society, London.

Dymek, R.F. et Owens, B.E. (2001). Petrogenesis of apatite-rich (nelsonites and oxide-apatite gabbro-norites) associated with massif anorthosites. *Economic Geology*, vol. 96, pp. 797-816.

Edfelt, A., Armstrong, R.N., Smith, M. et Martinsson, O. (2005). Alteration paragenesis and mineral chemistry of the Tjarrojakka apatite-iron and Cu (-Au) occurrences, Kiruna area, northern Sweden. *Mineralium Deposita*, vol. 40, pp. 409-434.

Furic, R.R. et Jébrak, M. (2005). Archaean IOCG deposit in a fluidized dilational job (Chibougamau, Abitibi, Canada). *Geological Society of America Abstracts with Programs*, vol. 37, no. 7.

Galley, A.G., Jonasson, I.R. et Watkinson, D.H. (2000). Magnetite-rich calc-silicate alteration in relation to synvolcanic intrusion at the Ansil volcanogenic massive sulfide deposit, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada. *Mineralium Deposita*, vol. 35, pp. 619-637.

Gauthier, M., Chartrand, F., Cayer, A. et David, J. (2004). The Kwyjibo Cu-REE-U-Au-Mo-F property, Quebec : A Mesoproterozoic polymetallic iron oxide deposit in the northeastern Grenville Province. *Economic Geology*, vol. 99, pp. 1177-1196.

Geijer, P. (1950). The Rektor ore body at Kiruna, Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C, Avhandlingar och Uppsatser, vol.12, no.514, 18 pp.

Ivanhoe Mines Ltd. (site web: <http://www.ivanhoe-mines.com/s/Kharmagtai.asp>).

Kroll, T., Mueller, D., Seifert, T., Herzig, P.M. et Schneider, A. (2002). Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chalkidiki, Greece. *Mineralium Deposita*, vol. 37, pp. 137-144.

Lafrance, B., Mueller, W.U., Daigneault, R. et Dupras, N. (2000). Evolution of a submerged composite arc volcano ; volcanology and geochemistry of the Normetal volcanic complex, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Precambrian Research*, vol. 101, pp. 277-311.

- Li, C. et Naldrett, A.J. (1994). A numerical model of the compositional variations of Sudbury sulfide ores and its application of exploration. *Economic Geology*, vol. 89, pp. 1599-1607.
- Li, C. et Naldrett, A.J. (1993). Sulfide capacity of magma : a quantitative model and its application to the formation of sulfide ores at Sudbury, Ontario. *Economic Geology*, vol. 88, pp. 1253-1260.
- Lopez, G., Gutierrez, R., Shin, H.C., Hitzman, M. et Cruise, M. (2005). IOCG style alteration and mineralization at the San Fernando prospect, Baja California Norte, Mexico. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, vol. 37, no. 7.
- Macaykey, T.N. (1973). Geology of the Ingerbelle and Copper Mountain deposits at Princeton, B.C. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin (Canadian Institute of Mining and Metallurgy)*, vol. 66, pp. 105-112.
- MacIntyre, T.J., Eckberg, E., Morgan, C., Enns, S., Cruise, M. et Hitzman, M. (2005). Amargosa prospect, Baja California Norte, Mexico: Intense regional metasomatism as a result of IOCG-style alteration. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, vol. 37, no. 7.
- Mark, G., Oliver, N.H.S., Williams, P.J., Valenta, R.K., Crookes, R.A. (2000). The evolution of the Ernest Henry Fe-Oxide-(Cu-Au) hydrothermal system, *dans* Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 123-136.
- Marschik, R. et Fontboté, L. (2001). The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au-(Zn-Ag) deposits, Chile. *Economic Geology*, vol. 96, pp. 1799-1826.
- Mathur, R., Marschik, R., Ruiz, J., Munizaga, F., Lèveillé, R.A. et Martin, W. (2002). Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes. *Economic Geology*, vol. 97, pp. 59-71.
- Matzat, H.W. (1986). Mineralogical, petrological and geochemical features of the ore formation of Savage River, Tasmania, (Australia) (including a comparison with the Kiruna-Iron Mtn. type of iron ore deposits), *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen*, vol.1, 317 pp.
- Meinert, L.D. (1984). Mineralogy and petrology of iron skarns in western British Columbia, Canada. *Economic Geology*, vol. 79, pp. 869-882.
- Morey, G.B. (1999). High-grade iron ore deposits of the Mesabi Range, Minnesota; product of a continental-scale Proterozoic ground-water flow system. *Economic Geology*, vol. 94, pp. 133-142.
- Morin, Y., Hébert, R. et Bédard, J. (1992). Setting and origin of the Hall chromitite orebody in the Thetford Mines ophiolite complex, Quebec. *AGU 1992 spring meeting, EOS, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 73, no. 14, supplément, p. 343.
- Nystrom, 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*, vol. 89, pp. 820-839.
- Oreskes, N., et Einaudi, M.T. (1992). Origin of hydrothermal fluids at Olympic Dam : Preliminary results from fluid inclusion and stable isotopes. *Economic Geology*, vol. 87, pp. 64-90.
- Perrele, J., Cox, D., Garamjav, D., Sanjdorj, S., Diakov, S., Schissel, D., Munkhbat, T.-O. et Oyun, G. (2001). Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulphidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket. *Economic Geology*, vol. 96, pp. 1407-1428.
- Ressources Appalaches (site web: <http://www.ressourcesappalaches.com/>).
- Ripley, E.M., Li, C. et Shin, D. (2002). Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador : $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, and Se/S evidence. *Economic Geology*, vol. 97, pp. 1307-1318.
- Ronzê, P.C., Soares, A.D.V., dos Santos, M.G.H. et Barriera, C.F. (2000). Alemao copper-gold(U-REE) deposit, Carajas, Brasil, *dans* Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 191-202.
- Seeger, C.M. (2000). Southeast Missouri iron metallogenic province: characteristics and general chemistry, *dans* Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 237-248.
- Simard, M., Beaudoin, G., Hupé, A. et Bernard, J. (en préparation). Metallogeny of the Mont-de-l'Aigle IOCG deposit, Gaspé Peninsula, Québec. *Mineralium Deposita*.
- Smith, M. et Chengyu, W. (2000). The geology and genesis of the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit: A review, *dans* Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 272-282.
- Williams, G.E. et Schmidt, P.W. (2004). Paleomagnetism of the 1.88-Ga Sokoman Formation in the Schefferville-Knob Lake area, Quebec, Canada, and implication for the genesis of iron oxide deposits in the Central New Quebec orogen. *Precambrian Research*, vol. 128, pp. 167-188.
- Williams, P.J. et Skirrow, R.G. (2000). Overview of iron oxide-copper-gold deposits in the Curnamona Province and Cloncurry district (eastern Mount Isa Block), Australia, *dans* Porter, T.M. (ed.), *Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective*, vol. 1; PGC publishing, pp. 105-122.
- Wilson, A.J., Cooke, D.R. et Harper, B.L. (2003). The Ridgeway gold-copper deposit: a high-grade alkalic porphyry deposit in the Lachlan fold belt, New South Wales, Australia. *Economic Geology*, vol. 98, pp. 1637-1666.