
La filière plutonique comme outil d'exploration pour les IOCG : Applications en Abitibi

Projet 2009-05

Par : Benoit Lafrance

Mai 2009



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 :

Lafrance, B. 2009. La filière plutonique comme outil d'exploration pour les IOCG : application en Abitibi. Projet CONSOREM 2009-05, 64p.

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

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca

Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce projet a permis de développer une méthodologie pour l'exploration des gisements de fer-oxydes polymétalliques (IOCG) au Québec. L'emphase a surtout été placée sur le développement d'un guide d'exploration d'échelle régionale, la piste retenue étant la caractérisation géochimique des plutons génétiquement associés à ces gisements. Les plus récentes classifications permettent de distinguer les minéralisations d'IOCG *sensu stricto* (ex. : Olympic Dam, Cloncurry, Carajas Brésil, Chili) des autres minéralisations à fer-oxydes. Cette classification plus restrictive permet de faire ressortir l'association avec la suite intrusive « monzodiorite – monzodiorite quartzifère – monzonite quartzifère – granite ». Afin de caractériser géochimiquement cette suite intrusive, une base de données lithogéochimiques des plutons des secteurs d'Olympic Dam et de Cloncurry en Australie, de Carajas au Brésil et du Chili a été compilée. Ces roches sont calco-alcalines potassiques (Ca-K) ou shoshonitiques selon leur contenu en potassium (K_2O vs SiO_2) et alcalines-calciques ou légèrement alcalines selon leur contenu en K_2O+Na_2O-CaO vs SiO_2 . Les roches en contexte d'arc continental, comme celles du Chili, peuvent aussi être calco-alcalines. Les roches plutoniques favorables aux IOCG sont présentes dans les contextes géodynamiques intracratoniques ou d'arcs continentaux et absentes dans les contextes de ride océanique ou syncollisions sur la base du digramme Y+Nb vs Rb.

Une revue de littérature effectuée dans le cadre de ce projet a également permis de comparer les caractéristiques des IOCG avec celles des porphyres à Cu-Au qui sont des gisements de types apparentés et souvent confondus. Géochimiquement, les résultats suggèrent que les plutons associés aux IOCG sont les mêmes que ceux associés aux gisements de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins. Ces deux types de minéralisation se distinguent cependant selon d'autres critères, notamment sur la profondeur de mise en place des intrusions et la typologie des minéralisations et des altérations. De plus, les intrusions temporellement et génétiquement associées aux IOCG sont généralement ni altérées ni minéralisées à l'opposé des porphyres. Un guide de discrimination entre ces deux types de minéralisation a été développé et synthétisé sous forme de tableau.

Le nouveau guide d'exploration basé sur la géochimie des plutons, a été utilisé pour localiser les secteurs favorables dans la Sous-province de l'Abitibi. Une méthode de traitement appliquée à la base de données lithogéochimiques CONSOREM de l'Abitibi (données provenant des partenaires et du SIGEOM) a été développée avec l'aide de l'outil logiciel Lithomodeleur du CONSOREM afin d'isoler les intrusions favorables. Un total de 882

analyses lithogéochimiques ont ainsi été identifiées. Ces analyses ont par la suite été mises en relation spatiale avec différents critères clés associés aux IOCG dont : les unités lithologiques, la carte du champ magnétique, les failles, la présence de magnétite et d'hématite, les gains de masse en sodium et potassium dans les volcanites ainsi que la présence de gîtes et indices à Cu-Au. Cette analyse permet d'identifier 33 plutons ou parties de pluton qui sont jugés favorables pour les minéralisations d'IOCG *sensu stricto* ou de porphyres alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins à Cu-Au en Abitibi.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| Avertissement | i |
| RÉSUMÉ | ii |
| Table des matières..... | iv |
| 1 Introduction et objectifs | 1 |
| 2 Méthodologie | 1 |
| 3 Caractéristiques des IOCG | 2 |
| 3.1 La classification des IOCG et gîtes apparentés | 2 |
| 3.2 Les gisements d'oxydes de fer polymétalliques (IOCG) <i>sensu stricto</i> | 5 |
| 4 Comparaison IOCG et Porphyres à Cu-Au | 7 |
| 4.1 Environnement tectonique | 9 |
| 4.1.1 Les gisements de fer-oxydes polymétallique de rift intracratonique | 12 |
| 4.1.2 Les gisements de fer-oxydes polymétalliques de rift d'arc continental..... | 17 |
| 4.2 Type et géométrie des intrusions reliées aux IOCG et aux porphyres alcalins | 22 |
| 4.3 Typologie des minéralisations..... | 28 |
| 4.4 Altérations | 32 |
| 5 Développement d'un outil d'exploration à l'échelle régionale..... | 35 |
| 5.1 Caractérisation géochimique des plutons génétiquement associés aux IOCG | 35 |
| 5.2 Comparaison des intrusions associées aux IOCG et aux porphyres cuprifères | 40 |
| 6 Méthode de traitement de la banque lithogéochimique des intrusions de la Sous-province de l'Abitibi pour le potentiel en IOCG et porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins | 44 |
| 7 Favorabilité pour les minéralisations d'IOCG et porphyre à Cu-Au de l'Abitibi | 53 |
| 8 CONCLUSION | 59 |
| 9 RÉFÉRENCES | 60 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Classification des gisements magmatiques-hydrothermales de fer-oxydes et des gisements à Cu-Au associés. | 3 |
| Figure 2. Classification des minéralisations à fer-oxydes selon Groves <i>et al.</i> (2010). | 5 |
| Figure 3. Distribution mondiale des principaux gisements de fer-oxydes mono et polymétallique..... | 6 |
| Figure 4. Illustration schématique des différents types de gisements en contexte cratonique..... | 10 |
| Figure 5. Illustration schématique des différents types de gisements en contexte de subduction océan-continent..... | 11 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| Figure 6. | Illustration schématique des différents types de gisements en contexte de subduction océan-océan. | 11 |
| Figure 7. | Schéma de l'environnement tectonique de la section centrale des Andes pour le nord et le centre du Chili..... | 13 |
| Figure 8. | Carte simplifiée du Craton de Gawler et la position du district d'Olympic Dam sur sa marge nord-est. Les minéralisations à fer-oxydes polymétalliques sont situées dans le district d'Olympic Dam (carte du coin supérieur droit) et de Moonta Wallaroo (Mnta; coin sud-est) en association avec certains plutons de la suite Hiltaba (pluton rouge)..... | 14 |
| Figure 9. | Géologie interprétée des roches pré-néoprotérozoïques du district d'Olympic Dam avec la position des gisements et indices d'IOCG..... | 15 |
| Figure 10. | Carte géologique simplifiée de la province minière de Carajás. | 16 |
| Figure 11. | Les ceintures cuprifères des Andes avec une sélection de gisements et dépôts avec leur type génétique | 18 |
| Figure 12. | Contexte structural de la ceinture cuprifère du Jurassique moyen au Crétacé précoce du nord du Chili montrant les différents types de gisements et le système de failles d'Atacama. | 20 |
| Figure 13. | Carte schématique du district de Manto Verde au Chili. | 21 |
| Figure 14. | Carte géologique du secteur de Candelaria-Punta del Cobre (modifiée de Marschik et Fontboté, 2001)..... | 22 |
| Figure 15. | Carte de la géologie du socle pré-Néoprotérozoïque et de l'altération du district de Moonta-Wallaroo (modifiée de Skirrow <i>et al.</i> , 2007). | 24 |
| Figure 16. | Carte de la géologie du socle pré-Néoprotérozoïque d'une partie de la fenêtre de Mount Woods..... | 25 |
| Figure 17. | Figure schématique montrant les relations approximatives entre les dépôts de fer-oxydes à Cu-Au archéens et les granites du district de Carajás au Brésil. | 25 |
| Figure 18. | Section schématique d'un système hydrothermal de style Olympic Dam..... | 26 |
| Figure 19. | Section schématique d'un gisement porphyrique mis en place dans un granite plus ancien..... | 27 |
| Figure 20. | Figure synthèse comparant les gisements de fer-oxydes polymétalliques avec les porphyres alcalins à Cu-Au..... | 28 |
| Figure 21. | Différents modèles de gisements de type fer-oxydes (IOCG) le long de zones de déformation et en association distale avec des intrusions (tirée de Jébrak et Marcoux, 2008)..... | 29 |
| Figure 22. | Diagramme schématique d'un système porphyrique cuprifère calco-alcalin classique situé à la base d'un stratovolcan andésitique. | 30 |
| Figure 23. | Exemples de minéralisations de type fer-oxydes polymétalliques (A-D) et porphyriques (E-H).. | 31 |
| Figure 24. | Figure synthèse de la séquence paragénétique des altérations et des types de minéralisations associées aux gisements de Sossego-Sequeirinho du district de Carajás au Brésil (photos tirées de Monteiro <i>et al.</i> 2008b). | 32 |
| Figure 25. | Figure synthèse de la séquence paragénétique des altérations et des types de minéralisations associées aux gisements du district d'Olympic Dam (photos tirées de Bastrakov <i>et al.</i> , 2007)..... | 33 |
| Figure 26. | Carte simplifiée de la géologie et des altérations associées aux gisements de Sossego et Sequeirinho au Brésil. | 34 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figure 27. | Diagramme de Large <i>et al.</i> (2001) modifié par le Consorem (2009) permettant de discriminer les échantillons non altérés des plutons de référence..... | 37 |
| Figure 28. | Diagramme de Middlemost, (1985) permettant la classification pour les roches plutoniques de référence. | 38 |
| Figure 29. | Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976) montrant le caractère potassique des roches plutoniques de référence. Les échantillons chevauchent les champs calco-alcalin potassique et shoshonitique. | 39 |
| Figure 30. | Diagramme de Frost <i>et al.</i> (2001) montrant le caractère alcalin des roches plutoniques de référence. | 39 |
| Figure 31. | Diagramme de Pearce <i>et al.</i> , (1984) permettant la discrimination d'environnements tectoniques pour les roches granitiques.. | 40 |
| Figure 32. | Diagramme de Streckeisen pour les intrusions associées aux minéralisations porphyriques. | 41 |
| Figure 33. | Diagramme de Streckeisen pour les plutons de référence, associées aux IOCG. Les minéraux normatifs (CIPW) ont été calculés à partir d'analyses chimiques compilées de la littérature..... | 42 |
| Figure 34. | Échantillons d'intrusions associées aux IOCG reportés sur le diagramme QAP de Streckeisen avec les différentes suites granitiques de Lameyre et Bowden (1982). | 43 |
| Figure 35. | Analyses des intrusions de composition intermédiaires ou felsiques ($\text{SiO}_2 > 52\%$; (n= 14 132) contenue dans la banque de données lithogéochimiques Consorem de la Sous-province de l'Abitibi (données des partenaires et du SIGEOM, MRNF, 2009). Géologie de Goutier et Melançon (2010) pour le Québec et de la Commission géologique de l'Ontario (OGS, 2005)..... | 44 |
| Figure 36. | Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976) pour le caractère potassique de l'ensemble des analyses de plutons intermédiaires et felsiques de l'Abitibi (n=14 132). | 45 |
| Figure 37. | Sélection des analyses de plutons intermédiaires et felsiques calco-alcalins potassiques et shoshonitiques de l'Abitibi selon leur contenu en K_2O et SiO_2 (n=2 358). Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976). | 46 |
| Figure 38. | Diagramme de classification de Middlemost (1985) pour les roches plutoniques intermédiaires et felsiques calco-alcalins potassiques et shoshonitiques de l'Abitibi (n=2 358)..... | 47 |
| Figure 39. | Extraction de la banque de données des compositions favorables aux IOCG et porphyres à Cu-Au calco-alcalins potassiques ou légèrement alcalins. Les compositions choisies à partir des champs du diagramme de Middlemost (1985) sont les monzodiorites, monzonites, monzonites quartzifères et granites (n=1 940). | 47 |
| Figure 40. | Élimination de la banque de données des monzonites qui contiennent plus de 8,5 % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ et des granites subalcalins contenant plus de 78 % SiO_2 (cadres rouges)..... | 48 |
| Figure 41. | Diagramme de classification selon le caractère alcalin des roches (Frost <i>et al.</i> , 2001) pour les intrusions sélectionnées.. | 49 |
| Figure 42. | Diagramme de discrimination de l'environnement tectonique pour les intrusions sélectionnées (Pearce <i>et al.</i> , 1984)..... | 49 |
| Figure 43. | Diagramme discriminant pour l'altération de Large <i>et al.</i> (2001) modifié par le Consorem (2009) et utilisé pour éliminer les roches altérées de la banque de données. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figure 44. Figure synthèse des 882 analyses identifiées comme favorables aux minéralisations de types fer-oxydes polymétalliques ou porphyres à Cu-Au calco-alcalins potassiques ou légèrement alcalins de l'Abitibi.)..... | 51 |
| Figure 45. Distribution spatiale des analyses considérés favorables aux minéralisations d'IOCG ou de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins pour l'Abitibi selon la méthode de discrimination lithogéochimique des intrusions intermédiaires à felsiques. | 52 |
| Figure 46. Carte du secteur de Selbaie-Matagami montrant la géologie (Goutier et Melançon, 2010), les failles et couloirs de déformation (Daigneault <i>et al.</i> , 2004) et la localisation des analyses lithogéochimiques des intrusions..... | 54 |
| Figure 47. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan (étalement de bleu pâle à rouge blanchâtre en fonction de l'intensité magnétique) et la présence de magnétite et d'hématite.. | 55 |
| Figure 48. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et les gains en sodium dans les volcanites..... | 56 |
| Figure 49. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et les gîtes et indices..... | 56 |
| Figure 50. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et l'indice de Lac Quévillon Nord.. | 57 |
| Figure 51. Carte de l'Abitibi avec les 33 plutons ou parties de plutons qui sont considérés comme favorables aux minéralisations IOCG (géologie modifiée du Sigeom, MRNF, 2009 et OGS, 2005). | 58 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Tableau comparatif des caractéristiques associées aux gisements d'IOCG <i>sensu stricto</i> et des porphyres alcalins à Cu-Au (ce qui inclus les porphyres alcalins-calciques potassiques et les porphyres alcalins). | 8 |
| Tableau 2. Provenance des analyses de roches plutoniques de référence associées aux IOCG..... | 36 |

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les plus récentes classifications et descriptions des gisements IOCG montrent que ces minéralisations possèdent certaines caractéristiques récurrentes : *minéralisations bréchiques ou en veines massives avec oxydes de fer; altérations sodique et potassique, etc.* Cependant, les mêmes classifications montrent également qu'il existe des différences importantes pour les minéralisations classifiées comme IOCG :

- *signature magnétique variable (magnétite vs hématite dominante);*
- *grande variabilité des encaissants,*
- *contenu métallique différent (Cu, Au, U, ETR, etc.).*

Cette variabilité au sein même du groupe des IOCG fait en sorte qu'il est difficile d'établir une stratégie d'exploration unique pour tous les types d'IOCG, particulièrement à l'échelle régionale. De plus, un fort lien de parenté entre les IOCG et les gisements porphyriques est reconnu dans la plupart des études de synthèse (ex. : Williams *et al.*, 2005; Seedorff *et al.*, 2005; Hitzman, 2000) et il existe souvent une confusion entre l'appartenance d'un indice ou d'un gîte minéral à un type de gisement plutôt qu'à l'autre.

Dans un premier temps, il a donc été nécessaire de revoir les différentes classifications proposées pour les gisements de fer-oxydes polymétalliques afin de caractériser la variabilité de ce groupe de gisements, la seule présence d'oxydes de fer ne justifiant probablement pas le regroupement de tous ces gisements dans la même famille. Certains indices minéralisés contenant de la magnétite ou de l'hématite peuvent être en première approximation associés aux IOCG mais dépendamment de leurs caractéristiques ils peuvent plutôt appartenir à d'autres types de minéralisations reliées à des porphyres, des syénites ou des carbonatites. Ceci est particulièrement vrai pour certains gisements porphyriques qui sont communément confondus avec les IOCG. Pour cette raison, ces deux types de gisements ont été plus particulièrement comparés à partir d'une revue de la littérature. La première partie de ce document présente donc leurs caractéristiques respectives selon une approche thématique (environnement tectonique, intrusions associées, altération, etc.), ceci afin de clarifier les critères diagnostiques qui seront utiles pour l'exploration des IOCG.

La synthèse et le traitement des informations a permis de développer une stratégie d'exploration à l'échelle régionale s'appliquant à toutes les variantes de gisements fer-oxydes polymétalliques. Ceci permet de localiser les secteurs favorables à l'échelle régionale pour ensuite passer à des critères d'exploration d'échelle locale. La piste retenue dans le cadre du projet comme guide d'exploration à l'échelle régionale a été la caractérisation géochimique des plutons génétiquement associés aux gisements de fer-oxydes polymétalliques. Cette approche sera décrite dans la deuxième partie de ce document pour ensuite être appliquée à définir le potentiel de minéralisation de type IOCG au sein de la Sous-province de l'Abitibi dans la troisième et dernière partie du rapport.

2 METHODOLOGIE

Une revue de la littérature visant à décrire la classification des minéralisations de fer-oxydes polymétalliques ainsi que de certains cas types a été réalisée. Les principaux districts d'IOCG à l'échelle mondiale ayant été compilés et analysés sont :

- les secteurs du craton de Gawler en Australie (Olympic Dam, Prominent Hill),
- le district de Cloncurry en Australie (Ernest Henry),
- le district de Carajas au Brésil (Salobo, Sossego, Cristalino) et
- le district de Candelaria au Chili (Candelaria, Manto Verde).

On y a fait ressortir les caractéristiques diagnostiques et les critères clés pouvant être retenus dans le cadre d'une stratégie d'exploration. Cet exercice a permis de déterminer que toutes ces minéralisations sont génétiquement associées à l'échelle régionale à un type particulier d'intrusion

(Pollard, 2006). Cependant, les différentes études disponibles n'utilisent pas les mêmes diagrammes de classification ce qui rend les comparaisons difficiles d'un district à l'autre.

Une base de données de référence regroupant les analyses lithogéochimiques de ces plutons a donc été construite afin de caractériser géochimiquement sur les mêmes diagrammes de classification la suite intrusive favorable. Seules les intrusions où le lien génétique avec la minéralisation a été bien établi (Pollard, 2006) ont été retenues (67 analyses). Ces données de référence ont servi à caractériser la composition, l'alcalinité, le caractère potassique et l'environnement tectonique de la suite intrusive. Elles ont également été utilisées à des fins de comparaison avec les intrusions associées aux minéralisations porphyriques.

Une méthode permettant d'isoler les analyses d'intrusions possédant les caractéristiques recherchées dans les grandes banques de données lithogéochimiques a été mise au point. Cette méthode a été développée avec le logiciel de traitement de données lithogéochimiques Lithomodeleur développé par le CONSOREM (Projet 2009-01, Trépanier, 2009).

La Sous-province de l'Abitibi a été choisie comme secteur d'applications considérant la présence de plusieurs indices minéralisés pouvant potentiellement être rattachés au type IOCG et profitant d'une vaste banque d'analyses (provenance des membres du CONSOREM et du SIGEOM, MRNF, 2009) contenant près de 25 000 analyses de roches intrusives.

La reconnaissance de plutons favorables permet de définir un premier critère de favorabilité d'échelle régionale. Cette favorabilité est par la suite couplée à d'autres types d'informations clés dans le but de définir des cibles à l'échelle plus locale. Les couches d'informations utilisées à l'échelle de l'Abitibi sont :

- la nature et la distribution des unités lithologiques,
- la carte du champ magnétique,
- les failles et linéaments,
- la présence de magnétite ou d'hématite,
- les gains de masse en sodium ou potassium calculés à partir de la méthode des précurseurs modélisés du CONSOREM, et
- la présence de gîtes et indices.

3 CARACTERISTIQUES DES IOCG

3.1 La classification des IOCG et gîtes apparentés

Il existe encore une confusion concernant la classification des IOCG à savoir si ces gisements forment réellement une classe distincte ou s'ils représentent seulement des variantes associées à d'autres classes de gisements (Porter, 2000; Williams *et al.*, 2005; Corriveau, 2007; Groves *et al.*, 2010). Hitzman *et al.* (1992) ont établi dès le départ que les gisements à oxydes de fer-apatite de type Kiruna étaient un sous-type des gisements à fer-oxydes polymétalliques. Les gisements monométalliques à magnétite-apatite de type Kiruna ne sont maintenant plus considérés comme des IOCG (Williams *et al.*, 2005). Ils partagent cependant certaines caractéristiques avec les IOCG comme :

- leur coexistence conjointe dans certains districts,
- de larges systèmes d'altération alcaline (principalement sodique),
- leur contenu en Cu, Au, P, F, REE, U.

La classification des fer-oxydes polymétalliques à Cu-Au (Ag, REE, U, Bi, Co) est encore débattue (Hitzman, 2000; Williams *et al.*, 2005) et est devenue, jusqu'à un certain point, de plus en plus complexe au fur et à mesure que plusieurs gisements contenant des oxydes de fer ont été ajoutés

dans le groupe. Le fait de regrouper des gisements sur la seule présence de magnétite ou d'hématite a augmenté la confusion plutôt que d'apporter des éclaircissements. Il est bien documenté que la magnétite et l'hématite sont présentes dans plusieurs styles de minéralisations pourtant fort différents comme :

- les porphyres alcalins à Cu-Au (Sillitoe, 2000),
- les skarns ferrifères (Meinert et al., 2005),
- les gîtes du plutonisme alcalin comme les syénites, pyroxénites et carbonatites (Jébrak et Marcoux, 2008).

Ceci a même conduit à inclure des gisements qui ne contiennent ni or, ni cuivre dans le type IOCG (p.ex. Bayan Obo). Récemment, Gandhi (2004) a proposé pour le « World Minerals Geoscience Database Project » une classification en six sous-types (**Figure 1**). Cette classification est basée, dans un premier temps, sur la proximité de la minéralisation par rapport à du magmatisme calco-alcalin ou alcalin-carbonatitique.

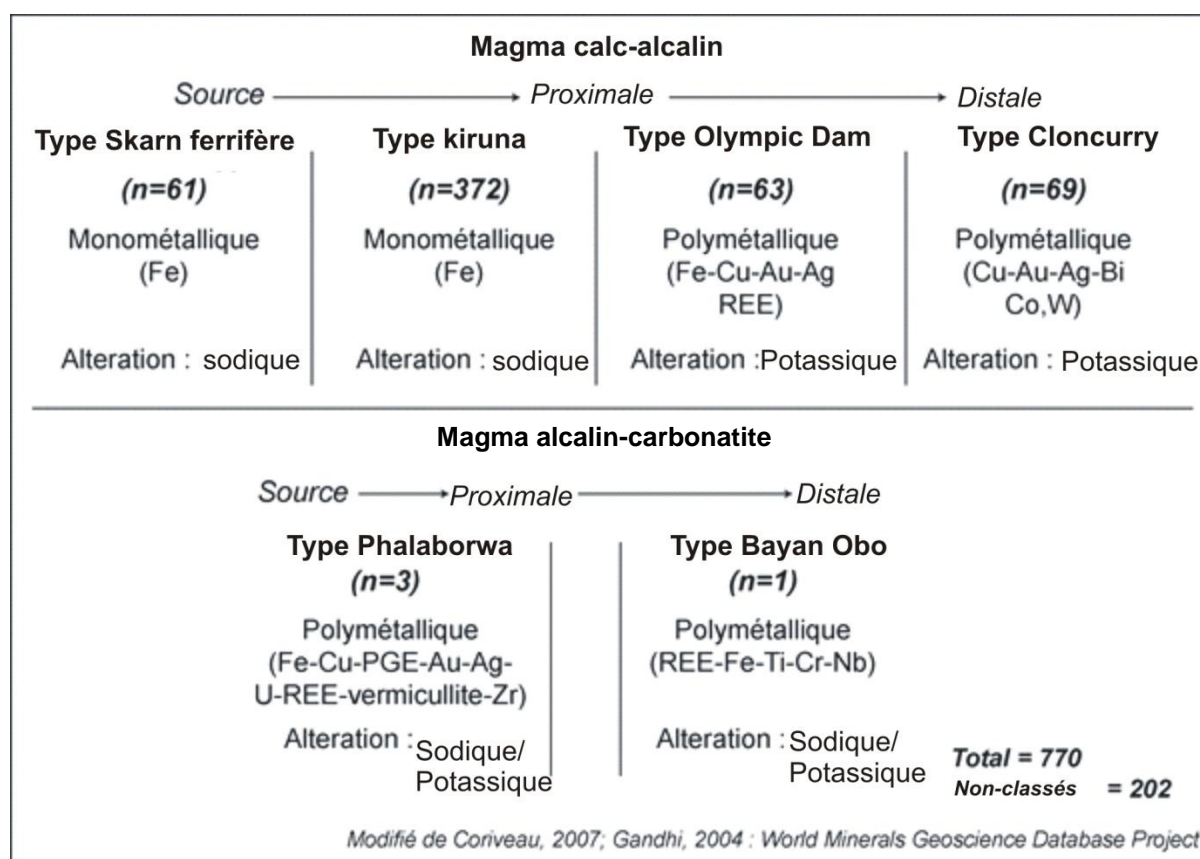


Figure 1. Classification des gisements magmatiques-hydrothermales de fer-oxydes et des gisements à Cu-Au associés selon Gandhi (2004; modifiée de Coriveau, 2007). Seuls les types Olympic Dam et Cloncurry de cette classification sont considérés dans cette étude et aussi par Williams et al. (2005), comme des gisements de fer-oxydes polymétalliques à Cu-Au (IOCG).

Or, il appert que les sous-types associés au magmatisme alcalin ne regroupent en fait dans la base de données que trois gisements pour le sous-type Phalaborwa (tous du même secteur) et qu'un gisement pour le sous-type Bayan Obo. Le gisement de Phalaborwa (850 Mt @ 0,5 % Cu) est intimement associé à une carbonatite et la minéralisation cuprifère est incluse dans l'intrusion elle-même (Viereicher et al., 2000). Cette dernière caractéristique d'inclusion de la minéralisation dans

l'intrusion n'est pas observée dans le cas des gisements de fer-oxydes, sauf peut-être pour Olympic Dam (discuté plus loin). Cette dernière caractéristique est suffisamment diagnostique pour exclure les gisements associés aux carbonatites du groupe des IOCG (Williams *et al.*, 2005). Le gisement de Bayan-Obo est encore mal compris mais les travaux de Smith et Chengyu (2000) montrent que plusieurs intrusions de carbonatites sont présentes dans le secteur de la minéralisation riche en terres-rares et niobium. Ces gisements sont par ailleurs aussi décrits comme faisant partie des minéralisations associées au magmatisme alcalin par certains auteurs (Jensen et Barton, 2000; Jébrak et Marcoux, 2008). Il ne semble donc pas souhaitable d'inclure ces gisements dans le clan des gisements à fer-oxydes polymétalliques (Williams *et al.*, 2005). De la même façon, les skarns ferrifères sont très bien connus dans la littérature (Meinert *et al.*, 2005) et ne devrait pas être inclus dans la classification des fer-oxydes (Williams *et al.*, 2005).

Plus récemment, Groves *et al.* (2010) arrivent à la même conclusion que la présente étude, soit que plusieurs gisements décrits comme IOCG dans la littérature ne devraient pas être classifiés comme tel. Un exemple frappant de mauvaise classification déjà observé dans le cadre de ce projet, est le gisement de Raul-Condestable au Pérou qui contient des oxydes de fer mais qui est spatialement associé avec un porphyre de diorite quartzifère et qui possède toutes les altérations typiques aux systèmes porphyriques (voir Williams *et al.*, 2005; de Haller et Fontboté, 2009). Ce genre d'observations ont conduit Groves *et al.* (2010) à proposer une classification avec, d'une part, les gisements fer-oxydes polymétalliques (IOCG) **sensu stricto** (p.ex. Olympic Dam, Salobo, Ernest Henry, Candelaria, etc.) et, d'autre part, quatre sous-groupes de gisements qui contiennent des oxydes de fer mais qui ne sont pas des gisements de fer-oxydes polymétalliques (**Figure 2**). Étrangement, bien que Groves *et al.* (2010) soulignent que le gisement de Raul-Condestable ne soit pas un IOCG, il est tout de même présent dans le sous-groupe 1 (IOCG sensu stricto) de leur tableau de classification (**Figure 2**).

La stratégie d'exploration développée dans le cadre du présent projet visera donc à identifier les secteurs favorables aux minéralisations d'**IOCG sensu stricto** tel que défini par la classification de Groves *et al.* (2010).

| Age | Subgroup 1 IOCC sensu stricto | Subgroup 2 Iron-oxide (P) | Subgroup 3 Alkaline Intrusion/ carbonatite/iron-oxide lithophile elements | Subgroup 4 Skarn | Subgroup 5 High-grade Au (Cu) |
|------------------|---|---|--|---|--|
| Cenozoic | | El Laco Cerro de Mercado | | Iron Springs Cortez, Yerington | |
| Mesozoic | Candelaria Manto Verde Raul-Condestable | Chilean iron belt Peruvian iron belt | | <i>Hangkow</i> Cornwall, Grace Korshunovsk, Tagar | |
| Paleozoic | | | | Kachar, Sarbai, Sokolovsk Teyskoe, Ampalyskoe Tashtagol Magnitogorsk Goroblagodat, Peschansk Chogart | |
| Neoproterozoic | | <i>Kasempa</i> | | <i>Jabal Isas</i> | |
| Mesoproterozoic | Olympic Dam Ernest Henry (Boss-Bixby 70mt) <i>Stanhilum</i> Mt. Elliot/SWAN | Benson Mines Pea Ridge Acropolis | <i>Bayan Obo</i> <i>O'OKIEP</i> | (Dover 26mt) (<i>Osbourne</i> 11mt) | Starra <i>Tick Hill</i> |
| Paleoproterozoic | | Kiruna MalMBERGET Svappavaara | <i>Vergenoeg</i> PALABORA | Grangesberg | Warrego Nobels Nob White Devil Peko |
| Neoproterozoic | Salobo Cristallino Sossego-Sequerinho Alemao-Igarape Bahia | | | | |

Figure 2. Classification des minéralisations à fer-oxydes selon Groves *et al.* (2010). Seul le sous-groupe 1 contient les gisements d'IOCG au sens strict. Seuls les gisements de plus de 100 t sont exposés à l'exception des sous-groupes à hautes-teneurs; les noms en italiques indiquent une incertitude dans l'association; les noms en majuscule dans le sous-groupe 3 indiquent les membres finaux magmatiques potentiels.

3.2 Les gisements d'oxydes de fer polymétalliques (IOCG) *sensu stricto*

Bien que les gisements de fer-oxydes soient distribués un peu partout dans le monde (**Figure 3**), il y a quatre principaux districts du point de vue économique :

- Carajas au Brésil (Néoarchéen);
- Gawler et Cloncurry en Australie (Paléo à Mésorotérozoïque) et
- la cordillère côtière du Chili-Pérou (Crétacé).

Ce sont les observations associées à ces grands districts qui serviront à caractériser les gisements de fer-oxydes polymétalliques dans cette étude.



Figure 3. Distribution mondiale des principaux gisements de fer-oxydes mono et polymétallique. Les quatre districts à fer-oxydes polymétallique les plus importants économiquement sont : Carajas, Gawler, Conclurry et la ceinture côtière du Chili-Pérou. Les noms de gisements choisis des différents districts sont en lettres italiques (modifiée de Corriveau, 2007).

La plupart des études et synthèses s'entendent sur les principales caractéristiques qui définissent les gisements de fer-oxydes polymétalliques au sens strict (Groves *et al.*, 2010; Hitzman, 2000; Sillitoe, 2003; Williams *et al.*, 2005; etc.) et qui sont :

- Abondance de Magnétite et/ou Hématite avec bas titane (<0,5 %) et/ou de silicate riche en fer (actinote, grunérite, fayalite), globalement >20 % de fer;
- Cu et Au en abondance économique souvent associés à des brèches;
- Fort tonnage (>100 Mt) faibles teneurs (<2 % Cu, <1 g Au/t);
- Suite d'éléments et de métaux enrichis en proportions variables d'un gisement à l'autre: F, P, Cu, Au, ÉTR, U, Ag, Co, Bi, W;
- Absence ou très peu de Zn, Pb;
- Sulfures de basse sulfuration (chalcopyrite-bornite-chalcosite-pyrrhotine), absence de stockwerks de pyrite et veinules à quartz-sulfures (typique des porphyres);
- Vaste système d'altération hydrothermale sodique et calco-sodique précoce;
- Altération potassique plus restreinte, tardive et associée à la minéralisation Cu-Au;
- Contextes de rift intracratonique ou de rift d'arc continental avec croûte épaisse;
- Association avec des failles crustales profondes;
- Période Néoarchéen, paléo et méso-Protérozoïque et Crétacé précoce;
- Indépendant du type de roches encaissantes (différent des skarns);
- Généralement la minéralisation n'a pas de proximité physique directe avec les plutons syn-minéralisation (différent des porphyres et skarns).

4 COMPARAISON IOCG ET PORPHYRES A CU-AU

Depuis la classification proposée par Hitzman *et al.* (1992), il existe un consensus pour dire que les IOCG, tout comme les gisements porphyriques, représentent un type de gisement faisant partie de la grande classe des gisements magmatiques-hydrothermaux (Pollard, 2000; Sillitoe, 2003; Gandhi, 2004; Williams *et al.*, 2005). Cette association génétique avec le magmatisme fait en sorte que les caractéristiques des IOCG et des porphyres à Cu-Au sont parfois très proches (Pollard, 2000; Jensen et Barton, 2000; Sillitoe, 2000). D'un autre côté, tel que décrit dans la littérature, il existe d'autres caractéristiques qui permettent de distinguer les deux types de minéralisation, notamment dans la province cuprifère des Andes où des gisements d'IOCG et de porphyres à Cu-Au se retrouvent dans le même district (Sillitoe, 2003; Sillitoe et Perelló, 2005).

Les gisements porphyriques ont été récemment divisés par Seedorff *et al.* (2005) en cinq classes principales selon le métal dominant (Au, Cu, Mo, W, Sn). Bien sûr, il n'existe pas de confusion entre les IOCG et les porphyres à Mo, W et Sn, qui de par leur contenu métallique et leurs caractéristiques géologiques sont assez différents. Par contre une comparaison entre les porphyres à Cu et les IOCG est nécessaire pour tenter de cerner leurs différences. Les mêmes auteurs, Seedorff *et al.* (2005) ont divisés les porphyres à Cu en quatre sous-classes. Deux sous-classes sont caractérisées par des roches calco-alcalines :

- 1) les porphyres à Cu-(Au-Mo) de la suite tonalite-granodiorite et
- 2) les porphyres à Cu-(Mo) de la suite monzodiorite à quartz-granodiorite.

Les deux autres sous-classes sont caractérisées par des roches alcalines-calciques ou alcalines :

- 3) les porphyres à Cu-(Mo-Au) monzonitique et
- 4) les porphyres à Cu-(Au) syénitiques.

La plupart de ces porphyres à Cu-Au, qu'ils soient d'affinité calco-alcaline, alcaline-calcique ou alcaline, contiennent beaucoup de magnétite et parfois de l'hématite (Sillitoe, 2000). De plus, ils possèdent également des altérations potassiques et même calco-sodiques dans le cas des porphyres potassiques (shoshonitiques) ou à tendance alcaline (Jensen et Barton, 2000; Seedorff *et al.*, 2005). Ce dernier point montre que la ressemblance est particulièrement forte entre les IOCG et les porphyres potassiques (shoshonitiques) et alcalins à Cu-Au. Pour ce qui est des porphyres à Cu-(Mo) calco-alcalins, nous verrons plus loin qu'ils sont associés à des magmas directement dérivés d'une composante de subduction et leur chimie est différente de celle associée aux IOCG et aux porphyres alcalins où la composante magmatique mantellique est plus importante.

C'est donc les caractéristiques des IOCG *sensu stricto* et des porphyres alcalins à Cu-Au qui sont synthétisées et comparées au **Tableau 1** afin d'identifier leurs similitudes et leurs différences. Ces éléments de comparaison seront discutés dans les prochaines sections dans le but de faire ressortir les éléments d'identification d'un type de gisement par rapport à l'autre. Ce guide de caractéristiques pourra être utilisé comme guide de discrimination et comme outil en exploration.

Tableau 1. Tableau comparatif des caractéristiques associées aux gisements d'IOCG *sensu stricto* et des porphyres alcalins à Cu-Au (ce qui inclut les porphyres alcalins-calciques potassiques et les porphyres alcalins).

| Caractéristiques | Fer-oxydes polymétalliques (IOCG <i>sensu stricto</i>) | Porphyres alcalins à Cu-Au |
|---|---|--|
| Environnement tectonique | <p>1- <i>Rift d'arc continental</i> : extension associée à de la subduction (ex. Chili)</p> <p>2- <i>Rift intracratonique</i> : extension d'un craton stable (ex. Carajas, Brésil)</p> | <p>1- <i>Rift d'arc continental</i> : extension associée à de la subduction (ex. Bingham)</p> <p>2- <i>Rift d'arc océanique</i> : extension associée à de la subduction (ex. Almalıyk)</p> <p>3- <i>Compression océan-océan ou océan-continent</i> : compression associée à de la subduction, gisements géants (ex. Ok Tedi, Grasberg)</p> |
| Volcanisme synchrone | Pas de volcanisme actif synchrone | Porphyres situés à la racine des volcans actifs synchrones |
| Contrôle structural pour la genèse des gisements | Important, failles crustales majeures | Non diagnostique, mais souvent présent |
| Gisements associés | <p>1- <i>Rift d'arc continental</i> : porphyres à Cu, Cu-Au et Cu-Mo, épithermaux, mantos, skarns, fer-apatite, SMV</p> <p>2- <i>Rift intracratonique</i> : Fer-apatite, sedex, Cu-Ni igné lité, BIF, grès à cuivre ou uranium, greisen à Cu-Au (W, Sn, Bi), granite anorogénique à U-Zr-Nb-ETR-F</p> | <p>1 - <i>Rift d'arc continental</i> : porphyres à Cu et Cu-Mo, IOCG, épithermaux, mantos, skarns, fer-apatite, SMV</p> <p>2 - <i>Rift d'arc océanique</i> : porphyres à Cu, épithermaux, mantos, skarns, SMV</p> <p>3 - Compression d'arc : porphyres à Cu et Cu-Mo, skarns, or orogénique, granite et pegmatites à U-W-Sn-Li</p> |
| Type et géométrie de l'intrusion reliée à la minéralisation | Batholites polyphasés (plurikilométriques), équi-granulaire moyens à grossiers, perthitique, granophyrique, rapakivi, rarement porphyrique | Intrusions multiples hypabyssales et porphyriques . Stocks ou cheminées (1-2 km vertical par 100 m à 1 km de diamètre), dykes et essaim de dykes connectés en profondeur à un batholite |
| Composition et affinité magmatique de l'intrusion | <ul style="list-style-type: none"> - Monzodiorite, monzodiorite quartzifère, monzonite quartzifère, granite - Calco-alcalin potassique ou shoshonitique - Alcalin calcique, alcalin - Pas de syénite - Pas de granodiorite | <ul style="list-style-type: none"> - Monzonite quartzifère calco-alcaline potassique (shoshonite) - Monzonite et syénite alcaline - Pas de granodiorite et granite |
| Relation intrusion/altération/minéralisation | Intrusions rarement altérées, non minéralisées* | Porphyres altérés et minéralisés |
| Profondeur de mise en place de l'intrusion reliée à la minéralisation | 6-10 km | 1-4 km |

| | | |
|--|--|--|
| Typologie de la minéralisation | Brèches, veines, stockwerks et remplacements. | Stockwerks de veinules, disséminations (jusqu'à 4 km ³) |
| Métaux et teneurs | 0,5 à 2 % Cu, < 1 g/t Au, 0,5 % ETR, Ag, U, Co, Bi Absence de Zn, Pb, Mo | 0,2 à 1,5 % Cu, < 1 g/t Au, Ag, Mo, Pb, Zn Absence de ETR, U, Co |
| Enveloppe d'altération | > 20 km ³ jusqu'à + de 100 km ³ (dizaines de km en surface) | Jusqu'à 10 km ³ (± 2 km en surface) |
| Altération sodique albite-hématite | Dominante, régionale et précoce, proximale à l'intrusion | Non présente |
| Altération sodi-calcique actinote-albite-magnétite | Étendue, centrée sur minéralisation en magnétite- apatite, recoupe sodique, entre proximale et distale p/r à l'intrusion | Peut-être présente en profondeur, précoce, proximale à l'intrusion |
| Altération potassique feldspath-K et/ou biotite-quartz- magnétite | Plus locale, associée à Cu-Au-Fe- U-ETR, recoupe sodique et calco- sodique, entre proximale et distale p/r à l'intrusion | Dominante, associée à Cu-Au, proximale et à l'intérieur même de l'intrusion, stockwerk de veinules de qtz |
| Altération argileuse-intermédiaire séricite-illite-hématite-chlorite- calcite-smectite | Distale par rapport à l'intrusion, peut contenir beaucoup d'hématite qui remplace la magnétite, associée à Cu-Au-U- ETR | Étendue partie supérieur de l'intrusion, recoupe l'altération potassique |
| Altération séricitique séricite-pyrite | Non décrite | Commune au sommet des intrusions, recoupe les altérations potassiques et argileuse-intermédiaire, transition vers épithermaux |
| Altération propylitique chlorite-épidote-albite-calcite | Non décrite | Halo distal aux altérations sodiques et potassiques, dans l'encaissant seulement |

* sauf peut-être Olympic Dam, discuté plus loin.

4.1 Environnement tectonique

Les IOCG sont présents dans deux contextes géotectoniques extensifs différents : les rifts intracratoniques (**Figure 4**) et les rifts d'arcs continentaux (**Figure 5**; Hitzman, 2000; Williams *et al.*, 2005; Groves *et al.*, 2010). Les gisements porphyriques, pour leur part, sont exclusivement associés aux contextes de subduction active (Seedorff *et al.*, 2005) ou postsubduction (Richards, 2011). Il peut s'agir de périodes d'extension en contexte d'arc continental (**Figure 5**; subduction océan-continent), de périodes d'extension en contexte d'arc océanique (**Figure 6**; subduction océan-océan) ou en contexte de contraction avec épaissement de la croûte (**Figure 7c**; compression océan-continent ou océan-océan; Sillitoe et Perelló, 2005).

Il y a donc seulement en contexte de rift d'arc continental que l'on retrouve à la fois des IOCG et des porphyres dans le même district menant quelques fois à la difficulté de distinguer les deux types de gisements. Cette situation est la mieux décrite pour les gisements Crétacés de la ceinture côtière du Chili-Pérou (Sillitoe, 2003; Sillitoe et Perelló, 2005).

Peu importe l'environnement tectonique, il semble que les gisements soient toujours associés à une époque d'extension (délamination en mouvement normal ou transtension en cisaillement) le long de structures crustales majeures qui favorisent la mise en place de plutons alcalins potassiques. Dans le détail, les gisements sont communément localisés le long de structures de deuxième ordre parallèles à la structure majeure comme dans le cas du district de Cloncurry (Pollard *et al.*, 1998), de Mantoverde (Sillitoe, 2003) et de Candelaria-Punta del Cobre (Marschik et Fontboté, 2001).

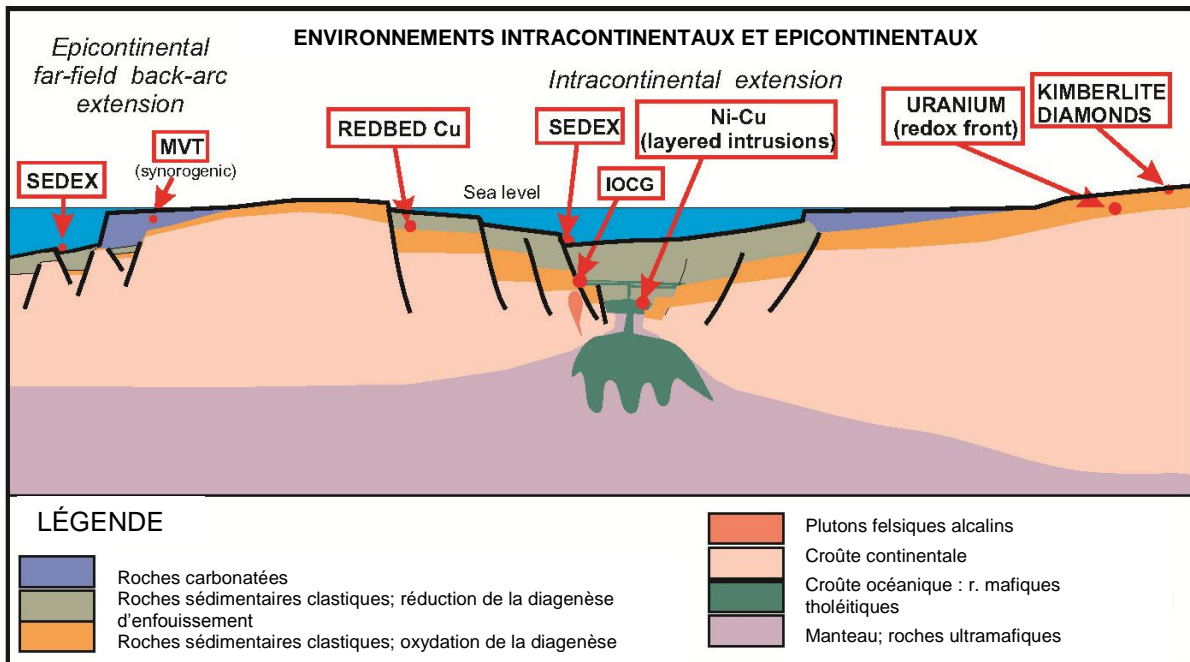


Figure 4. Illustration schématique des différents types de gisements en contexte cratonique (modifiée de Lydon, 2007). Les gisements de fer-oxydes polymétalliques (IOCG) sont localisés le long de failles crustales en association avec du plutonisme felsique alcalin. Notez l'absence de gisement porphyrique.

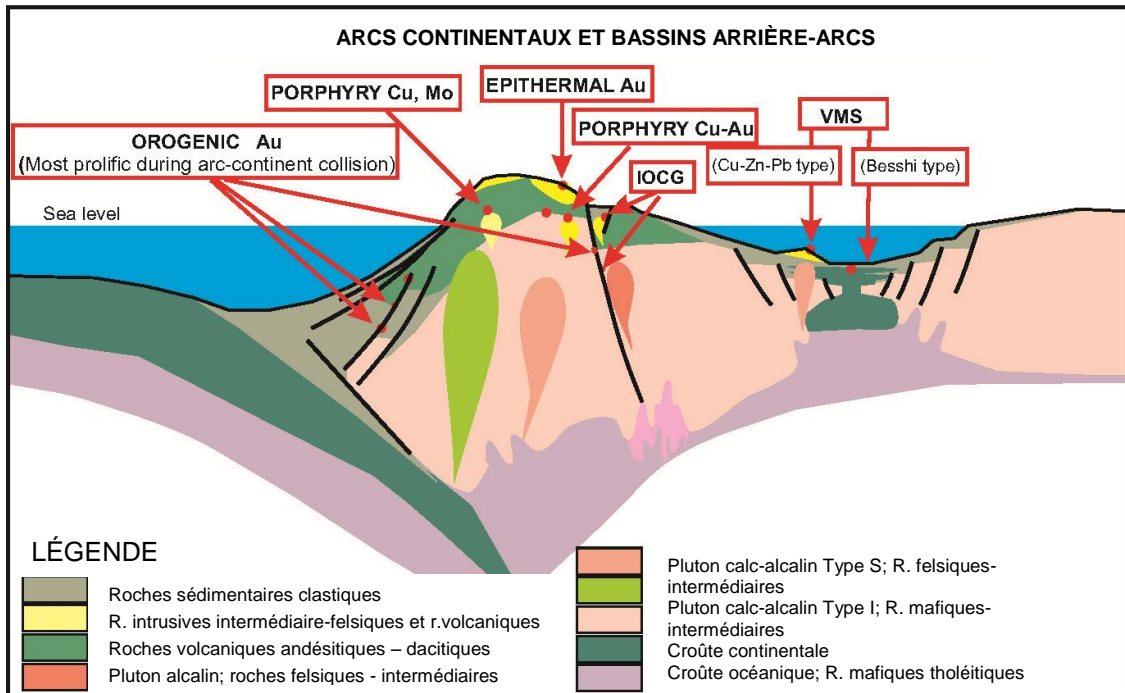


Figure 5. Illustration schématique des différents types de gisements en contexte de subduction océan-continent (modifiée de Lydon, 2007). Les gisements de fer-oxydes polymétalliques (IOCG) sont localisés le long de failles crustales en association avec du plutonisme intermédiaire-felsique alcalin. On retrouve associé aux IOCG, dans le même contexte extensif, des porphyres à Cu-Au et des gisements épithermaux. Les porphyres à Cu-Mo sont associés au magmatisme calco-alcalin dans un contexte compressif sans volcanisme associé.

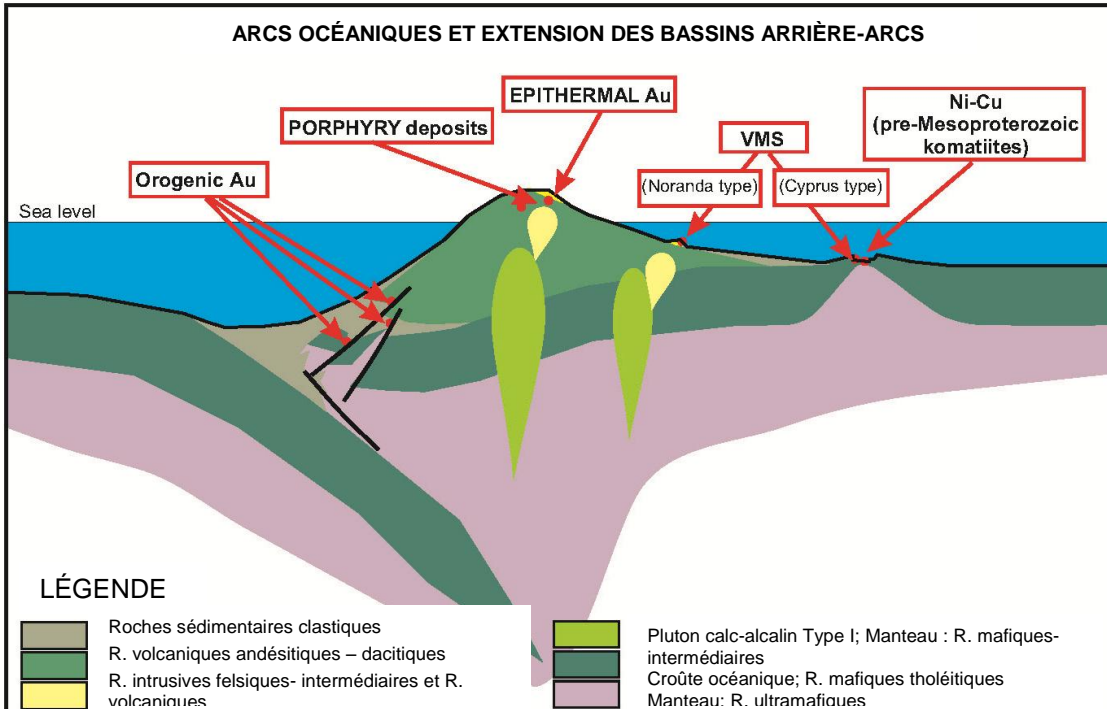


Figure 6. Illustration schématique des différents types de gisements en contexte de subduction océan-océan (modifiée de Lydon, 2007). Les gisements de fer-oxydes polymétalliques (IOCG) n'ont pas été décrits dans ce contexte. On retrouve en contexte extensif, des porphyres à Cu-Au et des gisements épithermaux d'affinité non seulement calco-alcaline comme illustré, mais aussi d'affinité shoshonitique ou alcaline.

4.1.1 Les gisements de fer-oxydes polymétallique de rift intracratonique

Les IOCG en contexte intracratonique se mettent en place le long de failles crustales qui découpent la croûte continentale qui est généralement de composition tonalitique, ou du moins felsique. Les gisements sont localisés au-dessus de plutons alcalins. Les autres types de minéralisations qui peuvent accompagner les IOCG dans ce contexte sont les gisements de fer-apatite (type Kiruna), les SEDEX, les Cu-Ni de complexe igné lité et les grès à cuivre ou uranium (**Figure 4**). Vu l'absence de subduction, il n'y a pas de gisements porphyriques et épithermaux dans ce contexte.

Les principaux districts où un environnement intracratonique a été décrit sont ceux de Carajás au Brésil (Grainger *et al.*, 2008) et de Cloncurry en Australie (Hitzman, 2000). L'environnement tectonique du district d'Olympic Dam est encore débattu et récemment certains auteurs (Ferris *et al.*, 2002; Hand *et al.*, 2007) ont suggéré un environnement de bassin arrière-arc développé sur une croûte continentale plutôt que le modèle de rift continental anorogénique (Flint, 1993). Quoi qu'il en soit, le modèle de bassin arrière-arc localise ce bassin à quelques 200 km de l'arc, ce qui se rapproche d'un contexte cratonique puisque l'influence de la subduction sur le magmatisme serait moins importante à cette distance. L'environnement correspondrait donc à celui du bassin arrière-arc continental de la **Figure 5** et non pas à celui d'arc avec porphyre à Cu-Au de la même figure. Pour cette raison le contexte du district d'Olympic Dam est présenté dans cette section.

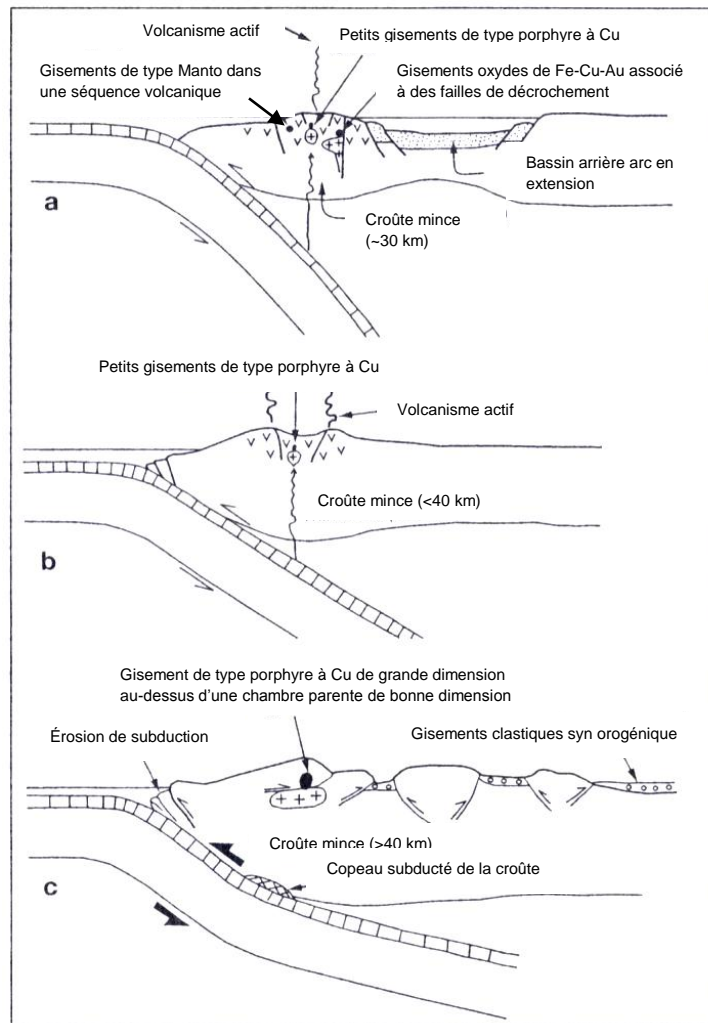


Figure 7. Schéma de l'environnement tectonique de la section centrale des Andes pour le nord et le centre du Chili. A) Arc en extension ou transtension (Jurassique à Crétacé précoce) caractérisé par du volcanisme actif, des bassins arrière-arc, une croûte mince et une subduction à fort angle. Les gisements de fer-oxydes polymétalliques et de type manto dominant par rapport aux petits porphyres à Cu. B) Arc neutre à légèrement extensif (Paléocène à Éocène précoce) caractérisé par du volcanisme andésitique, une croûte mince et des petits porphyres cuprifères de basse teneur. C) Arc en contraction (Éocène moyen à Oligocène précoce et Miocène précoce à Pliocène) caractérisé par l'absence de volcanisme, un épaississement de la croûte, une subduction à angle faible, et des porphyres cuprifères géants et à haute teneur (modifiée de Sillitoe et Perelló, 2005).

Le contexte tectonique du district d'Olympic Dam est seulement résumé ici et est décrit en détails par Hand *et al.* (2007). Ce district est localisé sur la marge est du pluton archéen de Gawler dans le sud de l'Australie à l'intérieur d'une séquence de roches protérozoïques (**Figure 8**). Dans le secteur, tous les gisements sauf Olympic Dam, sont encaissés dans les roches paléoprotérozoïques (~1850-1740 Ma.; **Figure 9**). Dans le cas d'Olympic Dam, la brèche minéralisée est encaissée dans le Granite de Roxby Down qui fait partie de la Suite intrusive mésoprotérozoïque d'Hiltaba (1595-1575 Ma; **Figure 9**). Or, le lien génétique entre la suite intrusive d'Hiltaba et la minéralisation en fer-oxydes de la marge est du craton de Gawler a été établi par datation relative et absolue (Pollard, 2006; Creaser et Cooper, 1993), ce qui fait qu'Olympic Dam serait le seul exemple où la minéralisation est encaissée dans le pluton responsable de cette minéralisation. Cette relation unique sera discutée plus en détails dans une prochaine section. Dans les autres cas de minéralisations de ce district

(Wirdda Well, Oak Dam), il existe généralement $\pm 150-200$ Ma entre l'âge des roches encaissantes les plus jeunes et la mise en place de la suite intrusive responsable de la minéralisation. Comme c'est généralement le cas, la localisation des gisements est contrôlée par des systèmes de failles à différentes échelles (**Figure 9**).

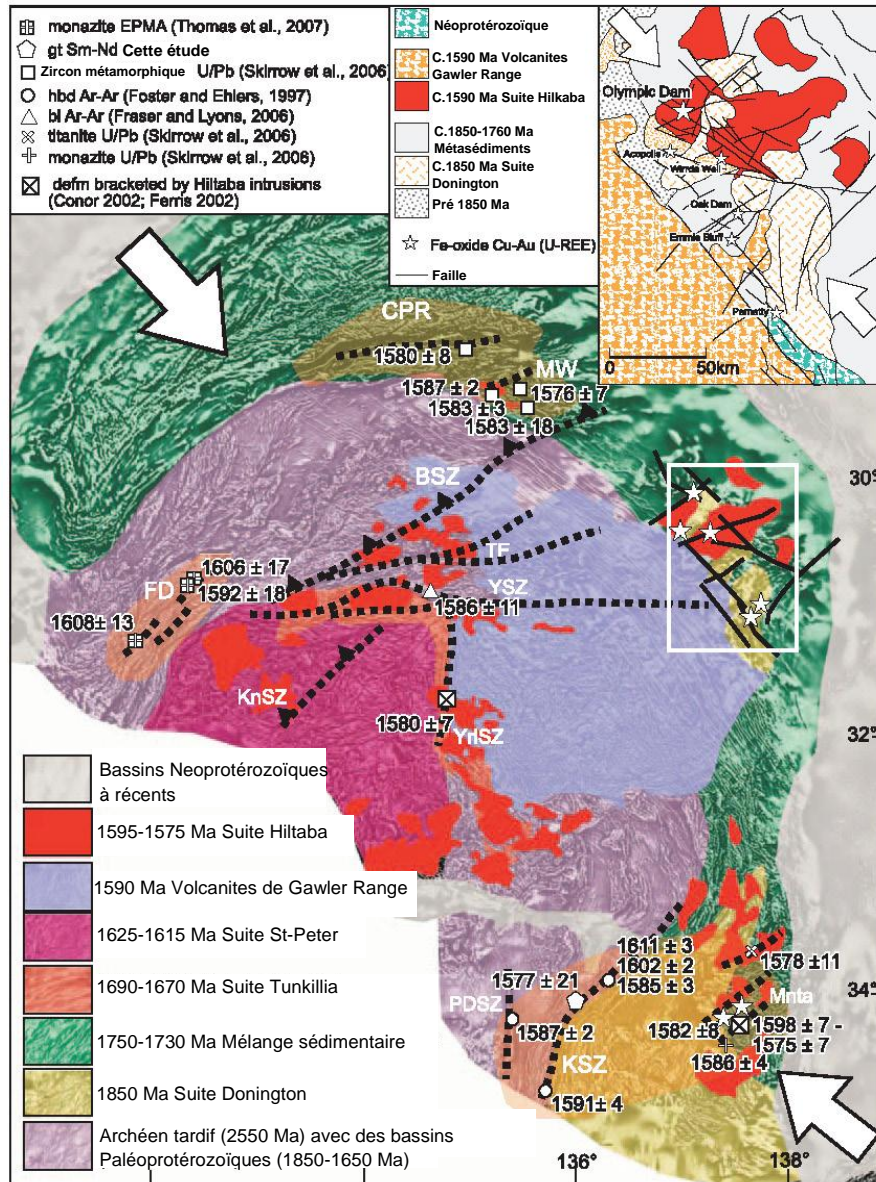


Figure 8. Carte simplifiée du Craton de Gawler et la position du district d'Olympic Dam sur sa marge nord-est. Les minéralisations à fer-oxydes polymétalliques sont situées dans le district d'Olympic Dam (carte du coin supérieur droit) et de Moonta Wallaroo (Mnta; coin sud-est) en association avec certains plutons de la suite Hiltaba (pluton rouge). Le réseau de failles nord-ouest sud-est du secteur d'Olympic Dam possède une orientation préférentielle pour accommoder la dilatation pendant le régime compressif (flèches blanches; modifiée de Hand et al., 2007).

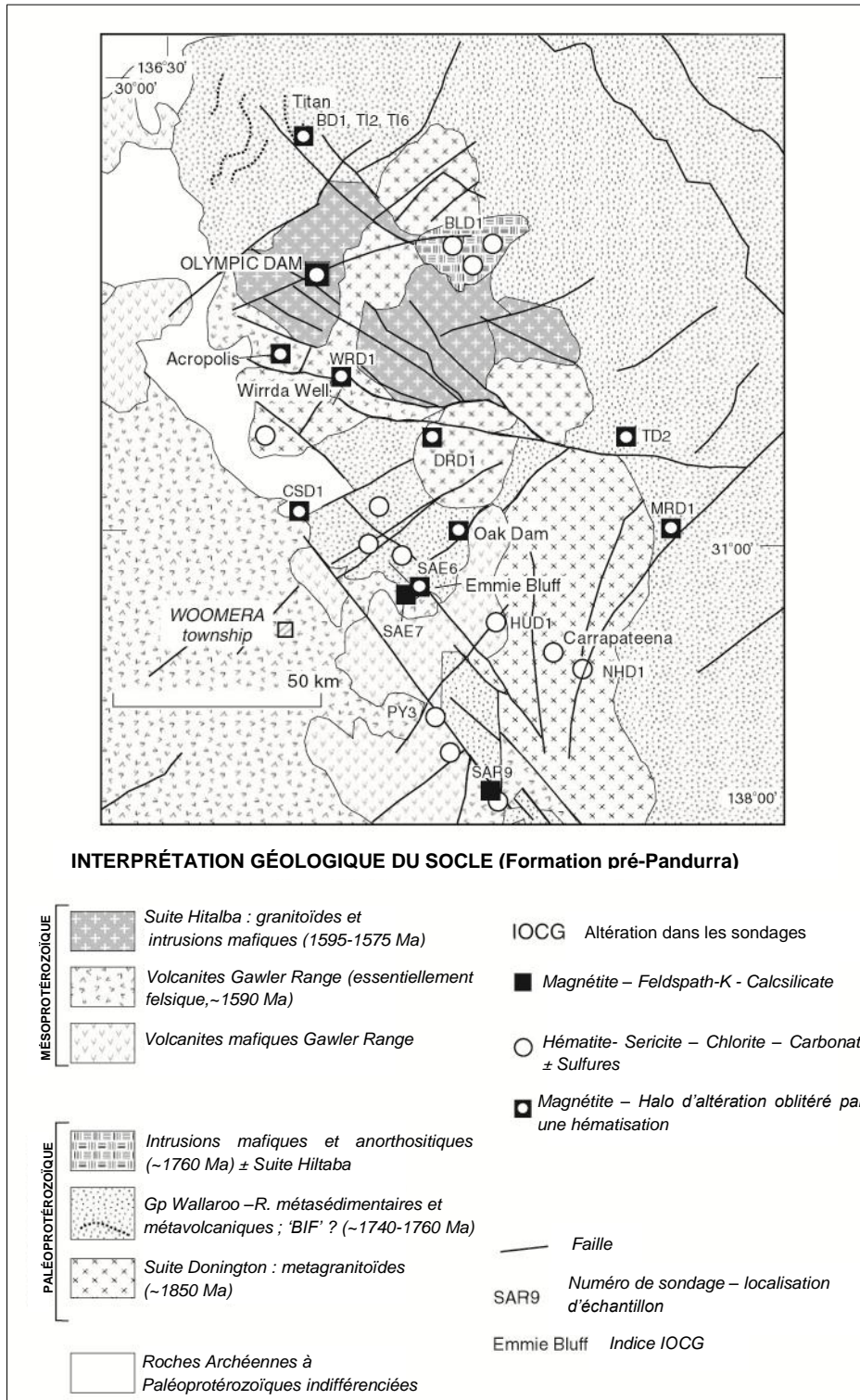


Figure 9. Géologie interprétée des roches pré-néoprotérozoïques du district d'Olympic Dam avec la position des gisements et indices d'IOCG. Ces unités sont actuellement recouvertes par 300 m d'unités sédimentaires d'âge Néoprotérozoïques et Cambrien (modifiée de Bastrakov *et al.*, 2007).

De récentes études dans la Province minière de Carajás au Brésil ont permis de bien comprendre le contexte tectonique du secteur (Monteiro *et al.*, 2008a, 2008b; Grainger *et al.*, 2008; Requia *et al.*,

2003). Les gisements d'IOCG du district (Salobo, Sossego, Cristalino, etc.) sont localisés dans un bassin volcano-sédimentaire sur la marge sud-est du craton archéen d'Amazonie (**Figure 10**). Les roches archéennes sont en contact à l'est avec une ceinture néoprotérozoïque. Le socle du district, les migmatites et gneiss tonalitiques du Complexe de Xingu (> 2,85 Ga.), sont surmontés par la séquence volcano-sédimentaire du Supergroupe d'Itacaiúnas (> 2,7 Ga.) et par la séquence sédimentaire continentale de la Formation d'Águas Claras (2,7-2,6 Ga.). Les assemblages de volcanites, quartzites, arkoses, formations de fer du Supergroupe d'Itacaiúnas et les grès et siltstones fluviaux de la Formation d'Águas Claras témoignent du caractère continental du bassin. Ces unités sont recoupées par deux systèmes de cisaillements senestres ductiles-fragiles, le système archéen de Cinzento (2,5 Ga.) et le système protérozoïque de Carajás (**Figure 10**; Pinheiro et Holdsworth, 1997). Associés à ces cisaillements se mettent en place les granites alcalins, métalumineux et intra-plaques de Old Salobo (2573 Ma.) et Itacaiúnas et les granites alcalins, métalumineux et anorogéniques protérozoïques (1,8-1,9 Ma.) comme Young Salobo, Cigano, Central Carajás. Requía *et al.* (2003) ont démontré le lien génétique entre le granite archéen Old Salobo (2573 Ma.) et le gisement de Salobo. Il existe donc, comme dans le district d'Olympic Dam, de 200 à 300 Ma. entre la mise en place des granites minéralisateurs et les séquences encaissantes. Les gisements majeurs de fer-oxydes à Cu-Au (Mo-Ag-U-ETR) du district (Salobo, Cristalino, Igarapé Bahia et Sossego; **Figure 10**) sont accompagnés par des gisements protérozoïques à Cu-Au (W-Sn-Bi). Ces derniers sont de type veines ou greisen, contiennent peu d'oxydes de fer et sont associés aux granites protérozoïques de type A (Grainger *et al.*, 2008). Les exemples incluent les gisements de Breves, Gameleira et Águas Claras (**Figure 10**). Enfin le secteur est aussi reconnu pour les minéralisations de fer de type BIF avec comme exemples les gisements N1, N4, N5 et Serra Sul (Williams *et al.*, 2005).

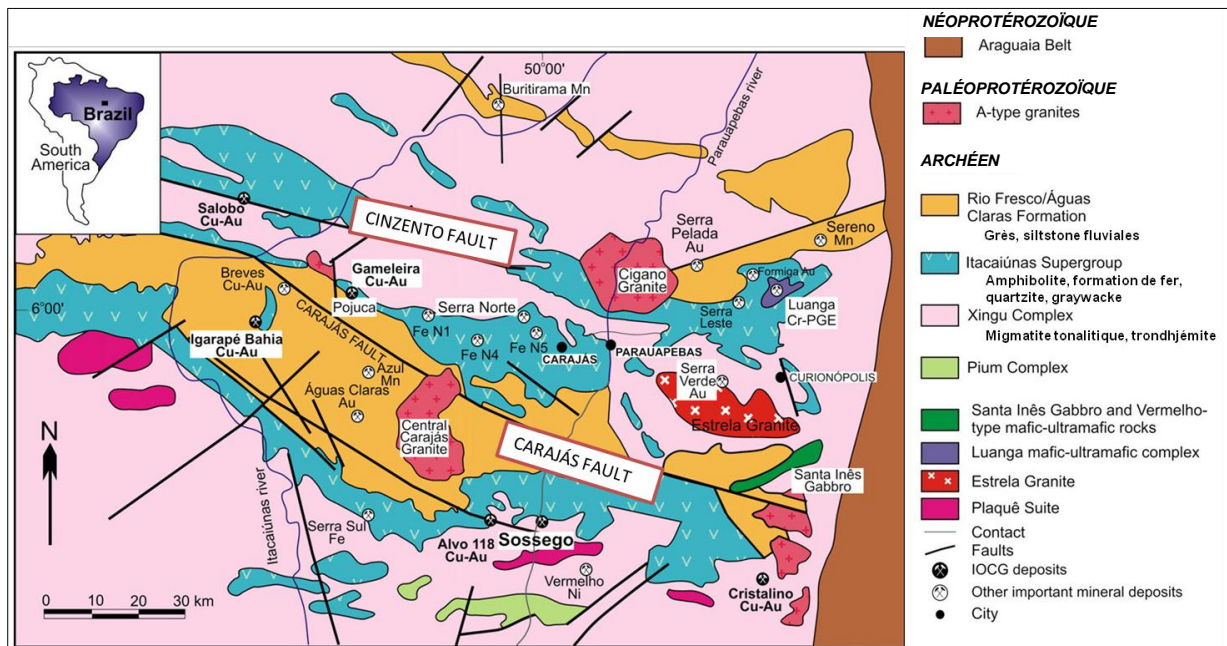


Figure 10. Carte géologique simplifiée de la province minière de Carajás (modifiée de Monteiro *et al.*, 2008a). Le bassin volcano-sédimentaire continental est recoupé par des cisaillements senestres archéens et protérozoïques avec intrusion de plutons alcalins associés.

4.1.2 Les gisements de fer-oxydes polymétalliques de rift d'arc continental

Les IOCG en contexte de rift d'arc continental sont associés à des systèmes de failles crustales qui découpent les séquences calco-alcalines de l'arc plus ancien (**Figure 5**). Les types de gisements que l'on retrouve dans cet environnement, mis à part les IOCG, sont les porphyres à Cu, Cu-Au et Cu-Mo, les gîtes épithermaux, les mantos, les skarns, les fer-apatite (type Kiruna) et les sulfures massifs volcanogènes (**Figure 5**).

La région type pour décrire cet environnement tectonique est la partie centrale des Andes qui est caractérisée par plusieurs chaînes cordillères parallèles qui rajeunissent vers l'est suivant la migration du front de subduction (**Figure 11**). Ce secteur, qui est le plus important district cuprifère du monde, est formé de quatre ceintures cuprifères d'âge jurassique à miocène qui s'étendent sur plus de 2 300 km du sud du Pérou au nord du Chili (**Figure 11**; Sillitoe et Perelló, 2005). Les trois ceintures les plus jeunes (Paléocène à Pliocène), donc les plus à l'est, sont dominées par des gisements cuprifères porphyriques avec les gisements épithermaux, mantos et skarns qui leur sont associés. Ces porphyres cuprifères sont associées à des périodes de contraction et d'épaississement de la croûte (**Figure 7c**) et contiennent les gisements porphyriques à Cu et Cu-Mo géants comme Chuquicamata, Escondida, El Teniente, Bajo de la Alumbrera, Antamina (Sillitoe et Perelló, 2005; Jébrak et Marcoux, 2008). Les IOCG ne sont pas associés à cette période.

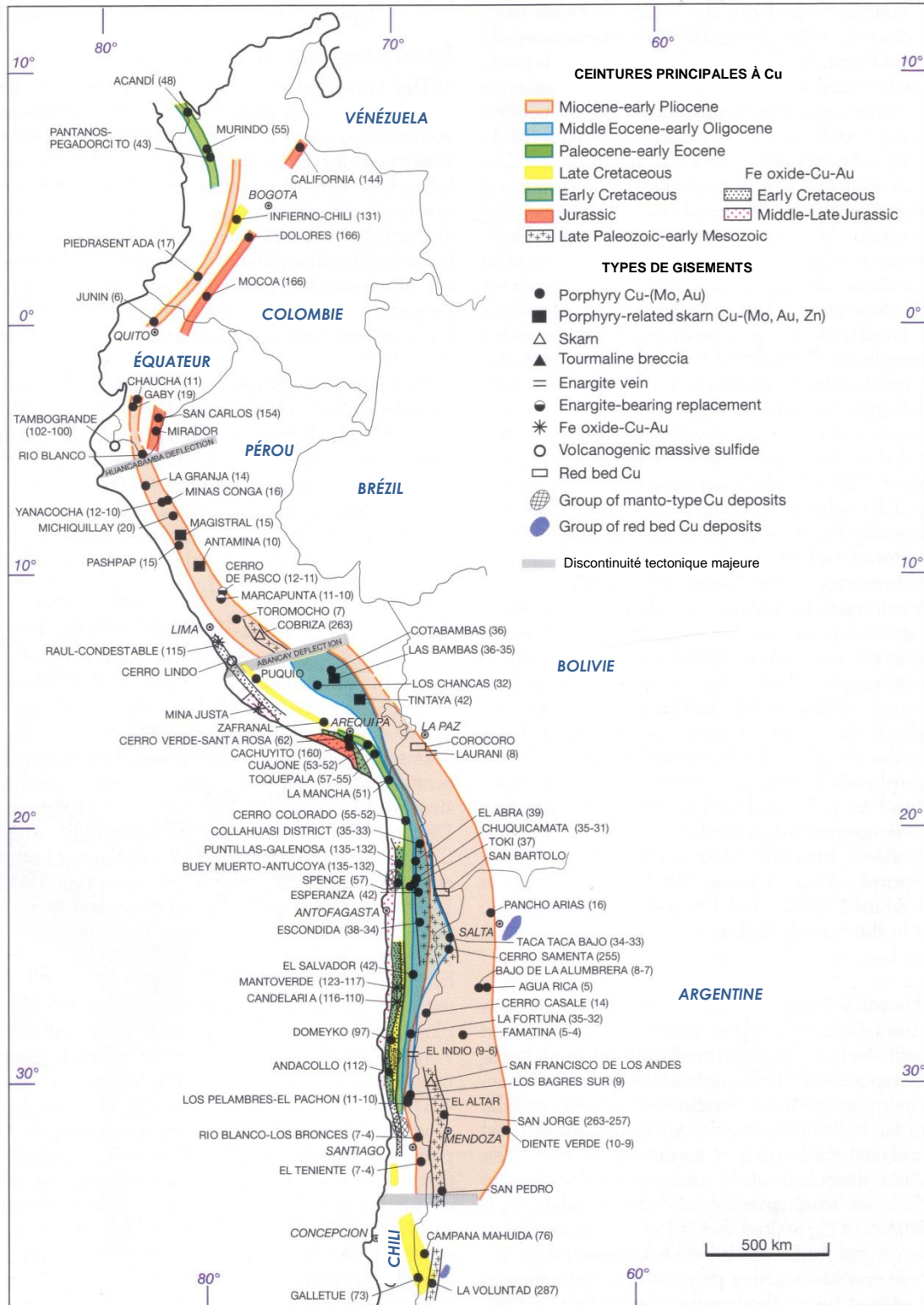


Figure 11. Les ceintures cuprifères des Andes avec une sélection de gisements et dépôts avec leur type génétique (modifié de Sillitoe et Perelló, 2005). Les minéralisations de fer-oxydes à Cu-Au sont localisées dans la ceinture la plus ancienne et la plus à l'ouest (Jurassique à Crétacé) alors que les porphyres sont localisés dans les trois ceintures suivantes vers l'est (Paléocène-Éocène, Éocène-Oligocène, Miocène-Pliocène). Les chiffres entre parenthèses après les noms de gisements sont les âges isotopiques compilés de la littérature.

C'est plutôt la ceinture cuprifère côtière, qui est la plus vieille (Jurassique à Crétacé tardif) et la plus à l'ouest, qui est caractérisée par des minéralisations à fer-oxydes polymétalliques de classe mondiale comme Candelaria-Punta del Cobre et Mantoverde. Cette ceinture d'une trentaine de kilomètres de largeur contient, en plus des gisements de fer-oxydes polymétalliques, des porphyres à Cu de taille plus modeste comme Andacollo et des gisements de type manto comme El Soldado (**Figure 12**; Sillitoe et Perelló, 2005). Dans la portion chilienne, la majorité des gisements importants sont associés au système de failles d'Atacama qui s'étend sur plus de 1000 km sur une largeur de 50 km (**Figure 12**). Ce système de failles est constitué de structures ductiles et fragiles avec des mouvements normaux Jurassique-Crétacé précoce et de transtension senestre Crétacé précoce de seulement quelques kilomètres (Sillitoe, 2003). La relation entre les gisements d'IOCG et les failles est particulièrement bien illustrée pour le secteur de Mantoverde où les gisements sont confinés dans un bloc bordé par deux failles de décrochement senestre créant de l'extension (**Figure 13**; Sillitoe, 2003).

Ce district permet aussi de documenter le lien génétique entre les minéralisations à fer-oxydes polymétallique et le plutonisme. Le lien temporel entre les gisements de Candelaria-Punta del Cobre et les plutons shoshonitiques de Copiapó a été établi par Marschik et Söllner (2006; **Figure 14**). Ces plutons d'âge Crétacé précoce (± 115 Ma) recoupent les roches sédimentaires du Groupe de Chañarcho (135-115 Ma; Marschik et Söllner, 2006). Il existe donc seulement environ 20 Ma entre la mise en place des plutons et la sédimentation, une période beaucoup plus courte que pour les gisements protérozoïques précédemment décrits. Quoi qu'il en soit, la différence d'âge est suffisante pour qu'il y ait du métamorphisme de contact décrit dans le secteur de Candelaria-Punta del Cobre (Marschik et Fontboté, 2001). Ces observations montrent l'importance génétique de ces intrusions par rapport à la formation des gisements d'IOCG, ce qui est discuté plus en détails dans la prochaine section.

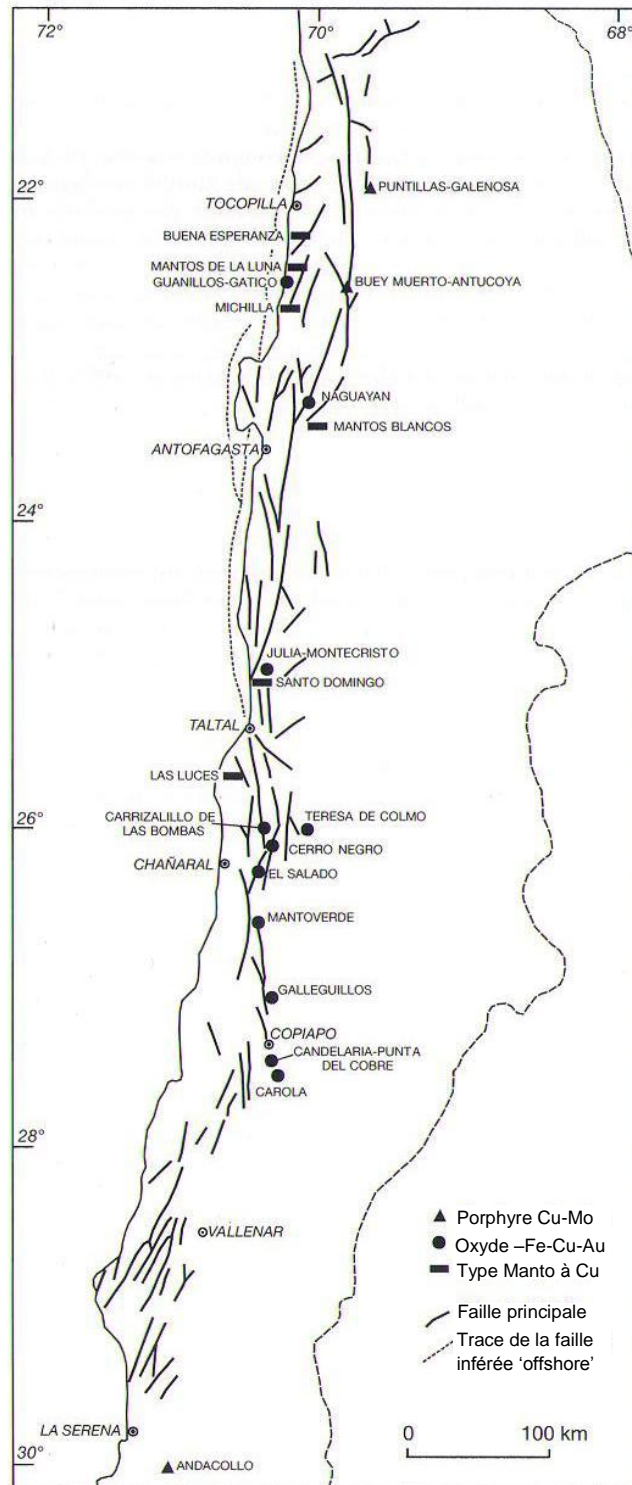


Figure 12. Contexte structural de la ceinture cuprifère du Jurassique moyen au Crétacé précoce du nord du Chili montrant les différents types de gisements et le système de failles d'Atacama. Les gisements crétacés sont synchrones au mouvement senestre le long des failles (modifié de Sillitoe et Perelló, 2005).

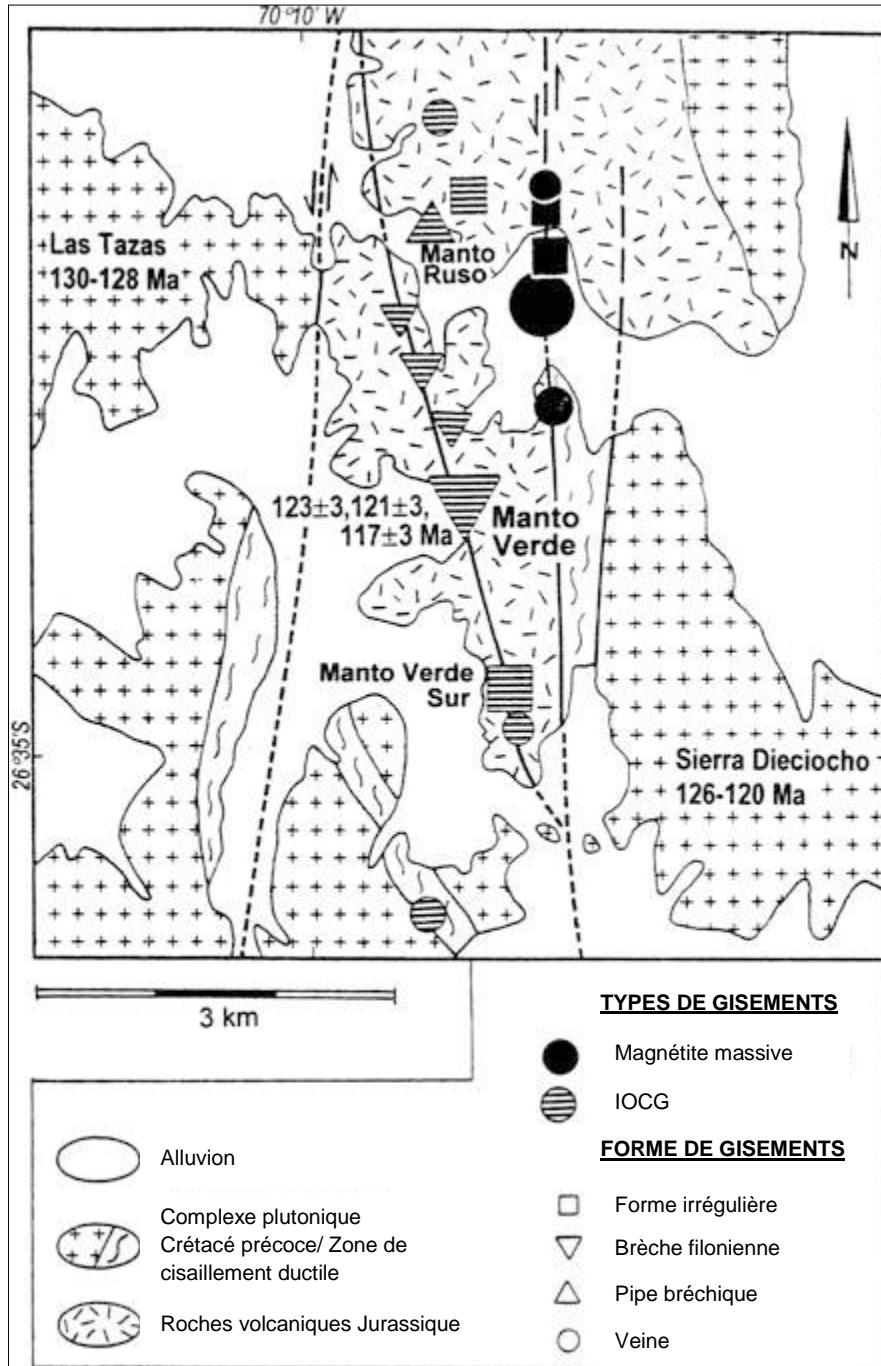


Figure 13. Carte schématique du district de Manto Verde au Chili. Les gisements sont confinés à un bloc de roches volcaniques jurassiques qui est bordé par les failles en transtension du système d'Atacama. Les âges isotopiques ainsi que les typologies des gisements sont montrés (modifiée de Sillitoe, 2003).

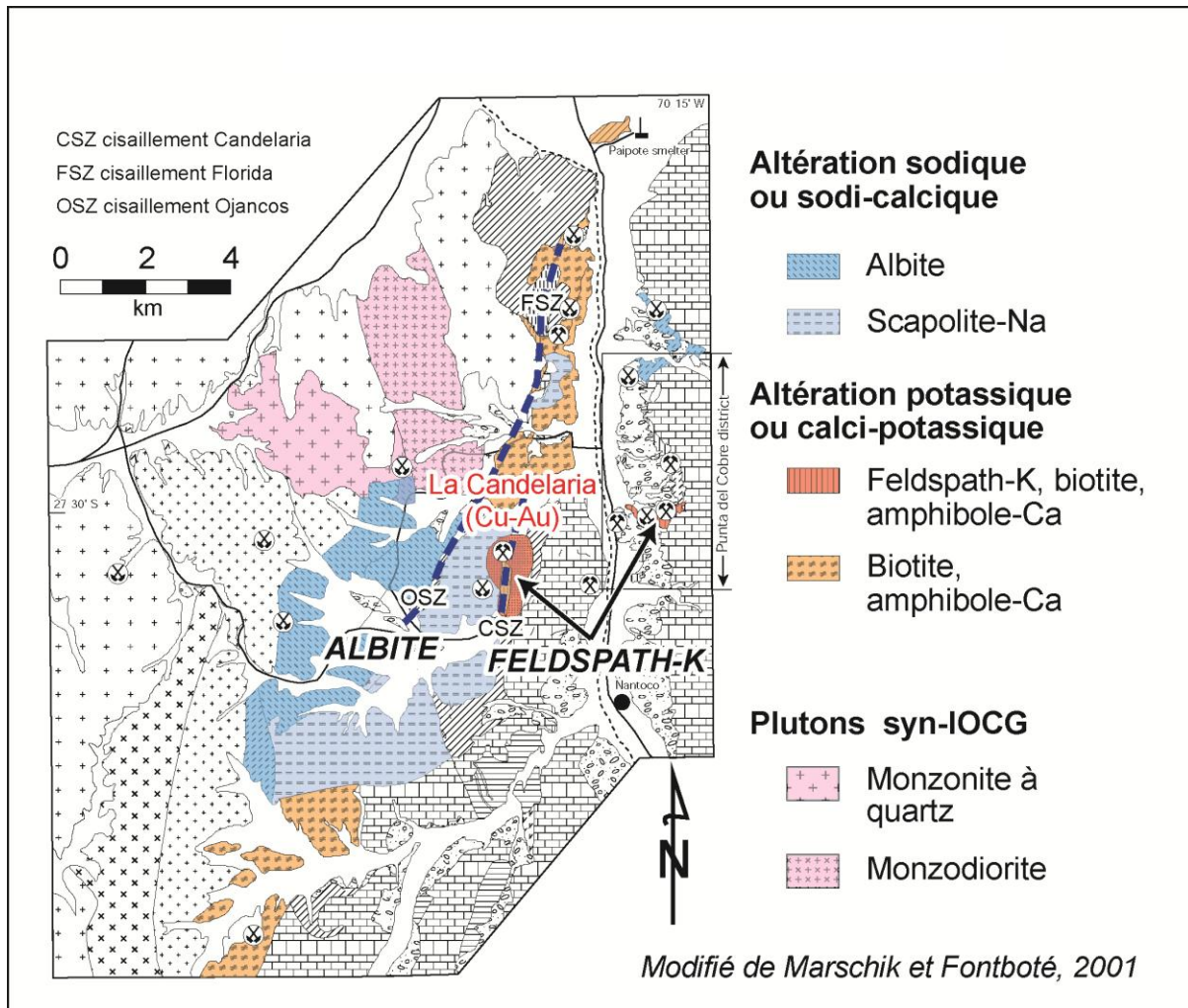


Figure 14. Carte géologique du secteur de Candelaria-Punta del Cobre (modifiée de Marschik et Fontboté, 2001). Les plutons synchrones aux gisements de Candelaria et qui appartiennent à la suite de Copiapó sont montrés en rose. Les altérations sodiques, sodi-calciques et potassiques sont également illustrées. On observe que les gisements sont localisés à quelques kilomètres des plutons en association avec l'altération potassique.

4.2 Type et géométrie des intrusions liées aux IOCG et aux porphyres alcalins

Il existe des différences significatives au niveau de la typologie des intrusions minéralisatrices associées aux IOCG et aux porphyres alcalins (**Tableau 1**). Les IOCG sont caractérisés par leur association avec des batholites polyphasés plurikilométriques qui ne sont pas en contact direct avec les zones minéralisées. Cette relation est observée entre autres sur la marge est du Craton de Gawler, où la suite intrusive d'Hiltaba est associée aux IOCG dans le district de Moonta-Wallaroo (**Figure 15**) et de la fenêtre de Mount Woods (**Figure 16**; Skirrow *et al.*, 2007). La même relation existe aussi dans le district de Carajás au Brésil où les IOCG archéens sont associés à des plutons archéens alcalins comme le pluton Old Salobo (**Figure 17**; Grainger *et al.*, 2008; Requía *et al.*, 2003). Le district de Candelaria-Punta del Cobre au Chili constitue un autre exemple (**Figure 14**; Marschik et Fontboté, 2001).

Le cas d'Olympic Dam pourrait être différent puisque la brèche minéralisée est incluse dans le granite de Roxby Down (1590 Ma.; Johnson et Cross, 1995), un granite qui est géochimiquement semblable à la Suite d'Hiltaba, soit la suite syngénétique aux IOCG (Creaser, 1996). Cependant, la brèche contient des blocs kilométriques de roches volcanoclastiques et se serait donc formée près de la surface (Oreskes et Einaudi, 1990; Reeve *et al.*, 1990). Ceci est peu compatible avec la grande taille et la granulométrie moyenne à grossière du Granite de Roxby Down et suggère plutôt une mise en place plus profonde pour le granite, suivi d'une remontée et finalement de la bréchification près de la surface. Donc, bien que les âges de la minéralisation et du granite se superposent, il semble plus plausible que la minéralisation, et donc que la brèche, soit plus jeune. Ce modèle avec minéralisation plus jeune que le granite avait déjà été proposé par Oreskes et Einaudi (1990) et est supporté par Skirrow *et al.* (2007) qui suggèrent qu'une partie du pluton ait été rapidement exhumée avant le volcanisme et la minéralisation bréchique. D'ailleurs, plusieurs modèles publiés montrent que les fluides hydrothermaux recoupent le pluton et qu'il ne s'agit donc pas de la concentration des fluides dans l'apex du pluton comme pour un système porphyrique. Par exemple, le modèle de Skirrow *et al.* (2002) propose la présence d'un autre pluton alumineux et oxydant qui est intrusif dans le granite de Roxby Down et qui agit comme source d'une partie des fluides hydrothermaux (**Figure 18**). Il pourrait donc y avoir une phase du pluton de Roxby Down qui aurait agi seulement comme encaissant et une autre phase syn-minéralisation plus jeune.

Par définition, les porphyres alcalins sont caractérisés par des intrusions hypabyssales porphyriques à mésostase aplitique et saccharoïde qui se présentent sous forme de stocks, cheminées, dykes ou essaim de dykes multiphasés (pré-minéral, inter-minéral, post-minéral). Le contenu en phénocristaux est abondant et varie de 35 à 55 % (Seedorff *et al.*, 2005). Les stocks et cheminées sont allongés verticalement jusqu'à 1-2 kilomètres et ont un diamètre qui varie de 100 m à 1 km (Sillitoe, 2000). Le volume de dykes porphyriques minéralisés peut être aussi bas que 1 % comme à Butte ou former un essaim de plusieurs dykes (Seedorff *et al.*, 2005). Ces intrusions porphyriques sont rattachées en profondeur à un batholite et passent généralement à un édifice volcanique en surface (**Figure 19**, Seedorff *et al.*, 2005).

Au contraire des plutons associés aux IOCG, les intrusions des systèmes porphyriques sont elles-mêmes altérées et minéralisées. La minéralisation et l'altération de l'intrusion semble donc être une des caractéristiques les plus déterminantes pour distinguer les systèmes porphyriques des systèmes de fer-oxydes polymétalliques (Sillitoe, 2003).

Les différentes études et les différents modèles suggèrent que les plutons associés aux IOCG se mettent en place à une profondeur de 6 à 10 kilomètres sous la surface alors que les stocks, cheminées ou dykes porphyriques se retrouvent à des profondeurs de seulement 1 à 4 kilomètres sous les édifices volcaniques (**Figures 18 et 19**; Williams *et al.*, 2005; Seedorff *et al.*, 2005). En fait, la profondeur de mise en place de l'intrusion génétiquement associée à la minéralisation semble être le facteur déterminant pour expliquer les différences : 1) de granulométrie entre les intrusions associés aux IOCG et les porphyres, 2) de minéralisation à l'intérieur ou l'extérieur de l'intrusion, 3) des différentes altérations. Une figure synthèse produite dans le cadre de la présente étude montre à une échelle uniforme la profondeur de mise en place des systèmes intrusifs associés aux IOCG et aux porphyres alcalins (**Figure 20**).

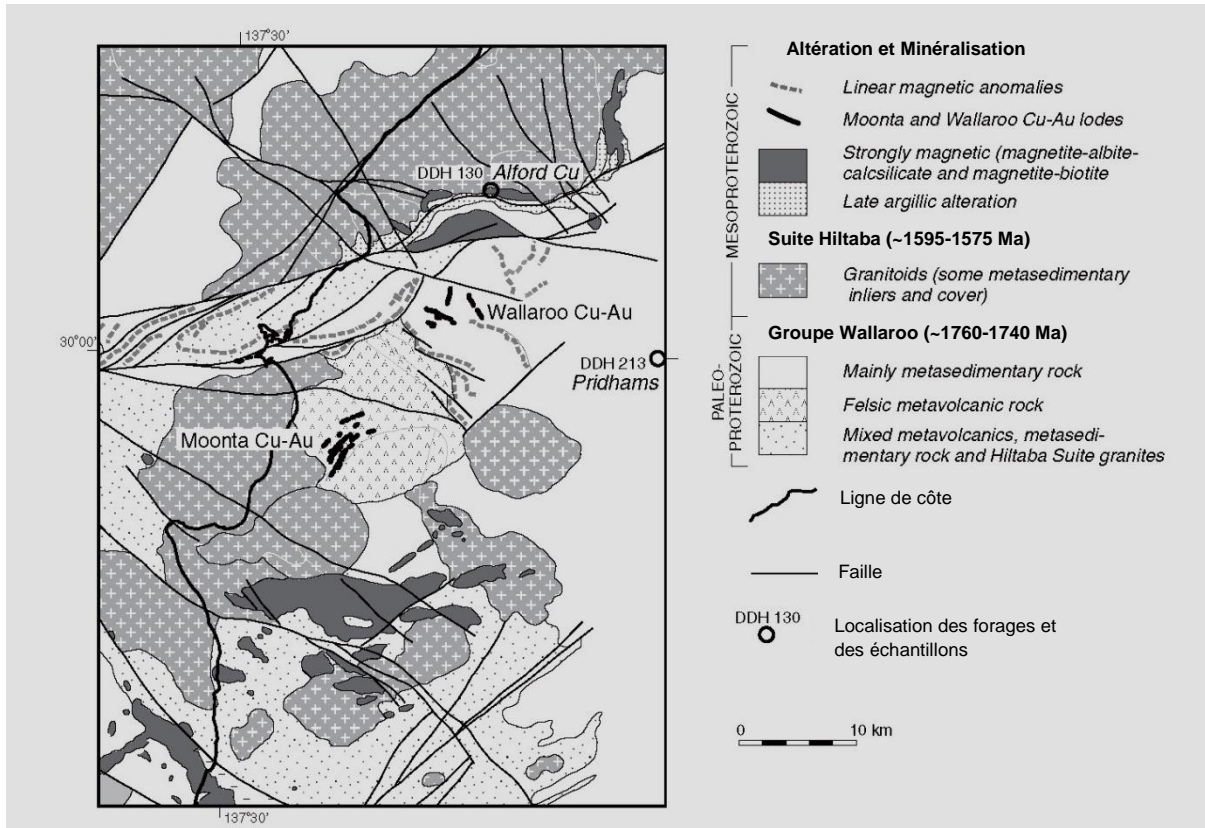


Figure 15. Carte de la géologie du socle pré-Néoprotérozoïque et de l'altération du district de Moonta-Wallaroo (modifiée de Skirrow *et al.*, 2007). On note la localisation éloignée de 2 à 10 kilomètres des lentilles minéralisées par rapport aux plutons de la Suite d'Hiltaba.

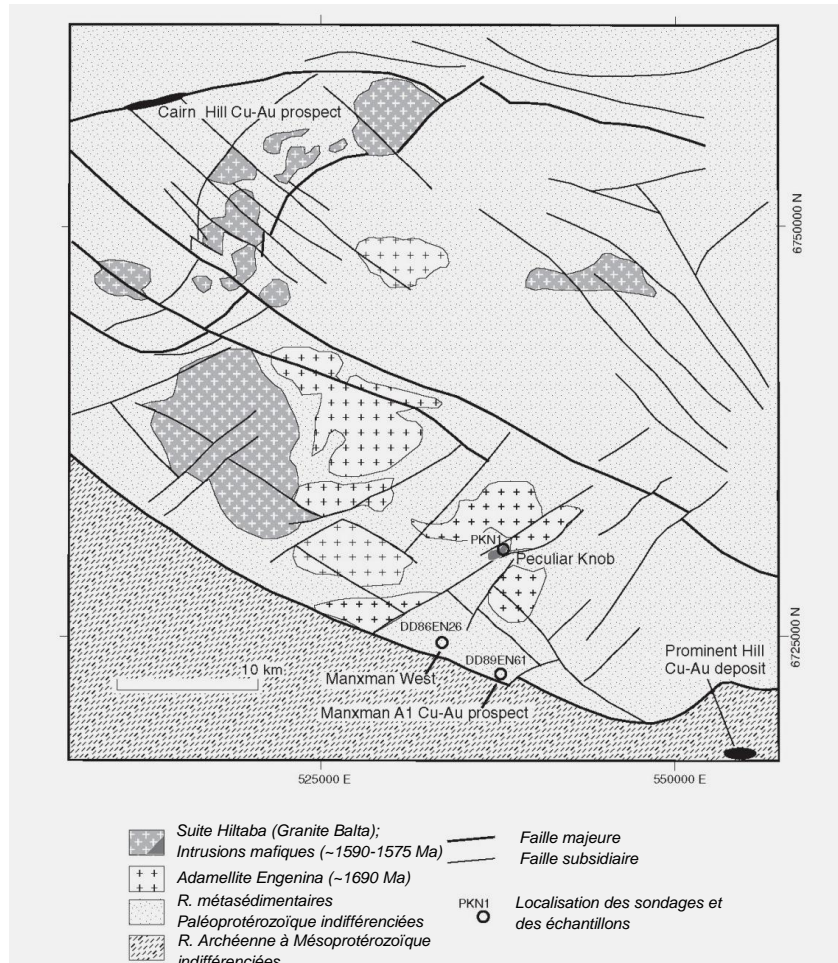


Figure 16. Carte de la géologie du socle pré-Neoproterozoïque d'une partie de la fenêtre de Mount Woods. On peut observer la relation de non-contact entre les minéralisations et les plutons de la Suite d'Hiltaba (modifiée de Skirrow *et al.*, 2007). On note également le fort contrôle structural sur la localisation des minéralisations.

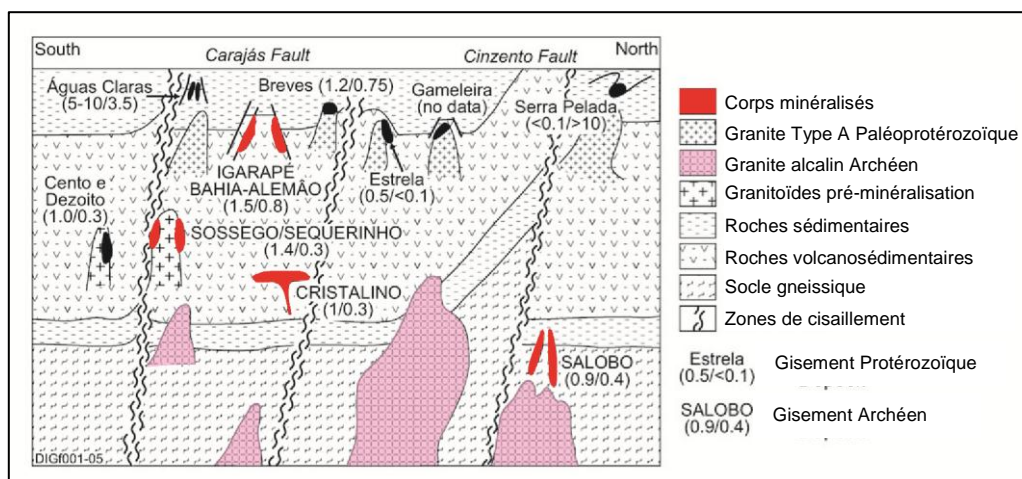


Figure 17. Figure schématique montrant les relations approximatives entre les dépôts de fer-oxides à Cu-Au archéens et les granites du district de Carajás au Brésil. Les gisements d'IOCG (identifiés par les lettres majuscules) sont localisés à une bonne distance des granites alcalins archéens syn-minéralisation. Les gisements paléoprotérozoïques de type greisen (lettres minuscules) sont aussi

montrés. Les chiffres entre parenthèses à côté des noms de gisements sont le contenu en Cu (%) et en Au (g/t). Modifiée de Grainger *et al.* (2008).

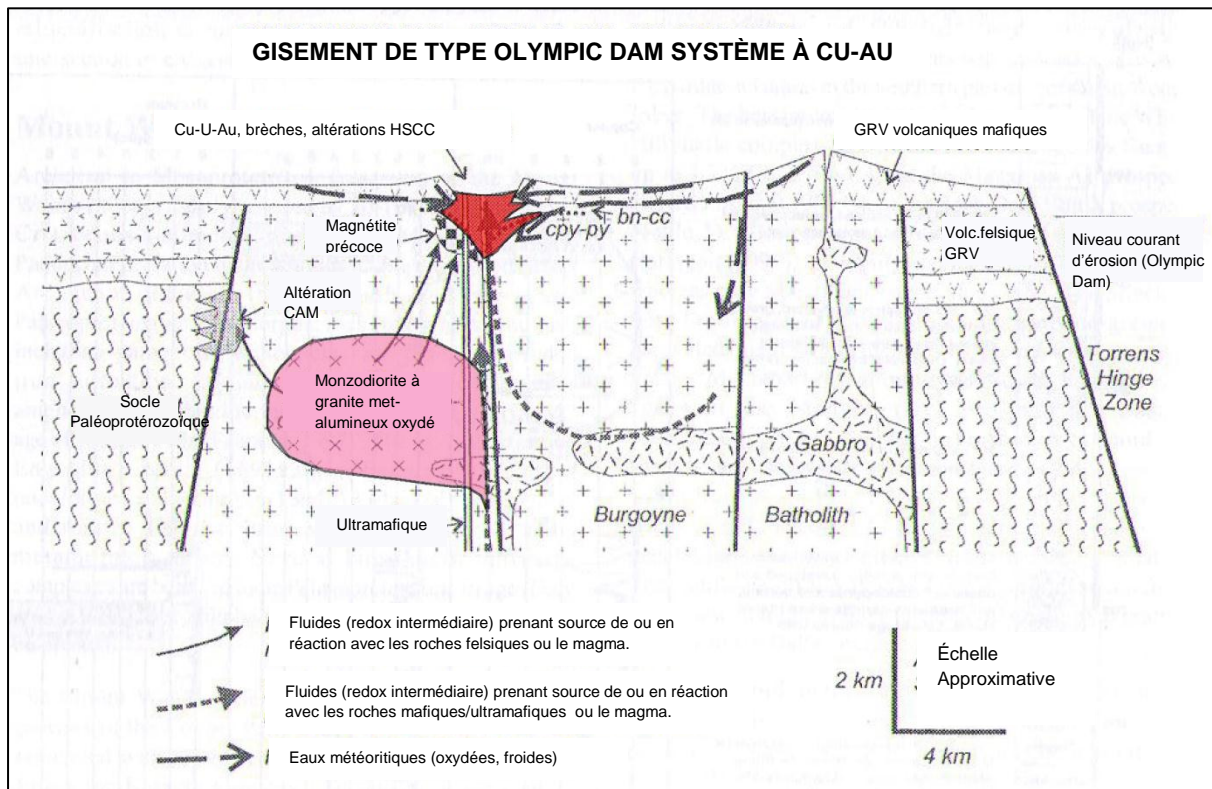


Figure 18. Section schématique d'un système hydrothermal de style Olympic Dam. La minéralisation en Cu-U-Au est associée à l'altération à hématite-séricite-chlorite-carbonate (HSCC). Les parties plus profondes du système sont caractérisées par une altération à calcosilicate-feldspath potassique-magnétite (CAM). Le modèle suggère que la minéralisation soit postérieure au pluton encaissant (Batholite de Burgoyne) et **qu'elle** soit plutôt associée au pluton de monzodiorite à granite métallumineux et oxydé qui est situé à environ 3 kilomètres sous la surface (modifiée de Skirrow *et al.*, 2002).

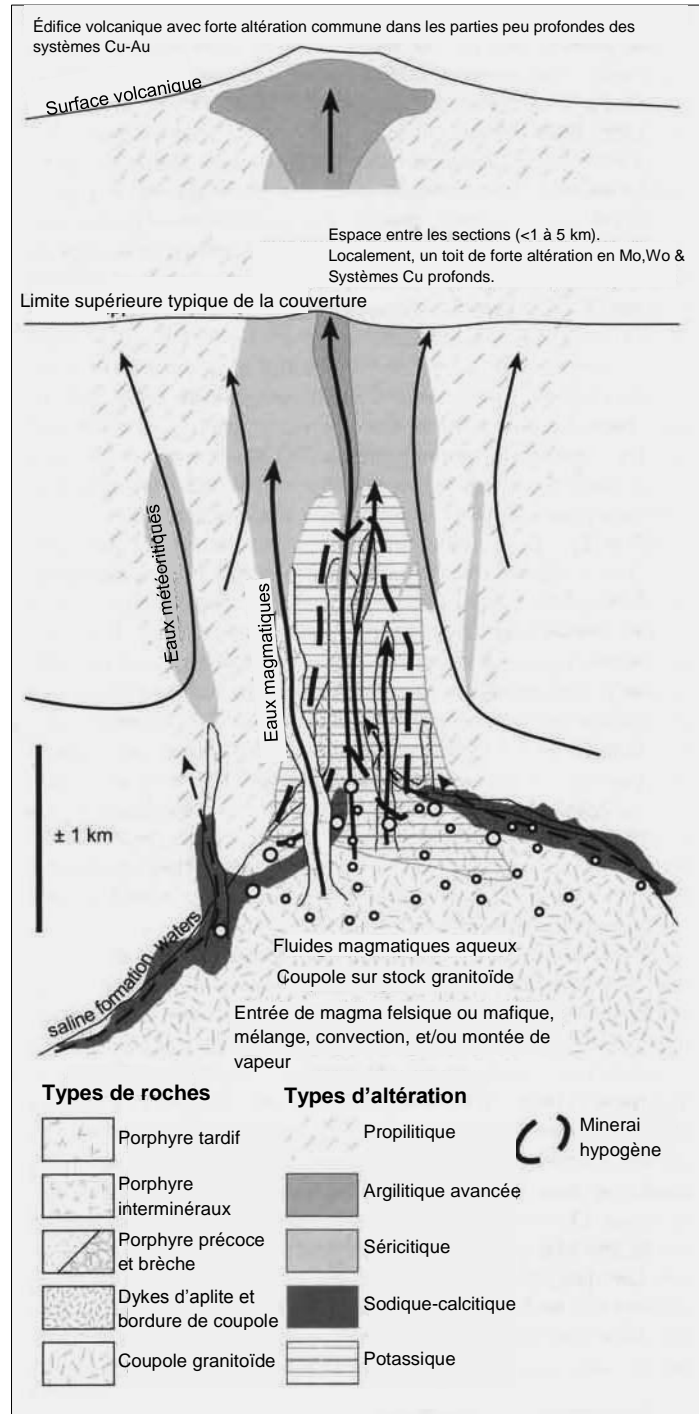


Figure 19. Section schématique d'un gisement porphyrique mis en place dans un granite plus ancien. La figure illustre la géométrie et la séquence paragenétique des intrusions et des altérations ainsi que les sources des fluides hydrothermaux. Le contenu en sulfures est généralement le plus élevé dans la zone à séricite qui est riche en pyrite, est moins élevé dans la zone potassique et est le moins élevé dans les zones propylitiques et sodi-calciques. Les systèmes porphyriques à Cu-Au peu profonds passent à des systèmes épithermaux et des zones d'altération argileuse avancées en surface (modifiée de Sedorff *et al.*, 2005).

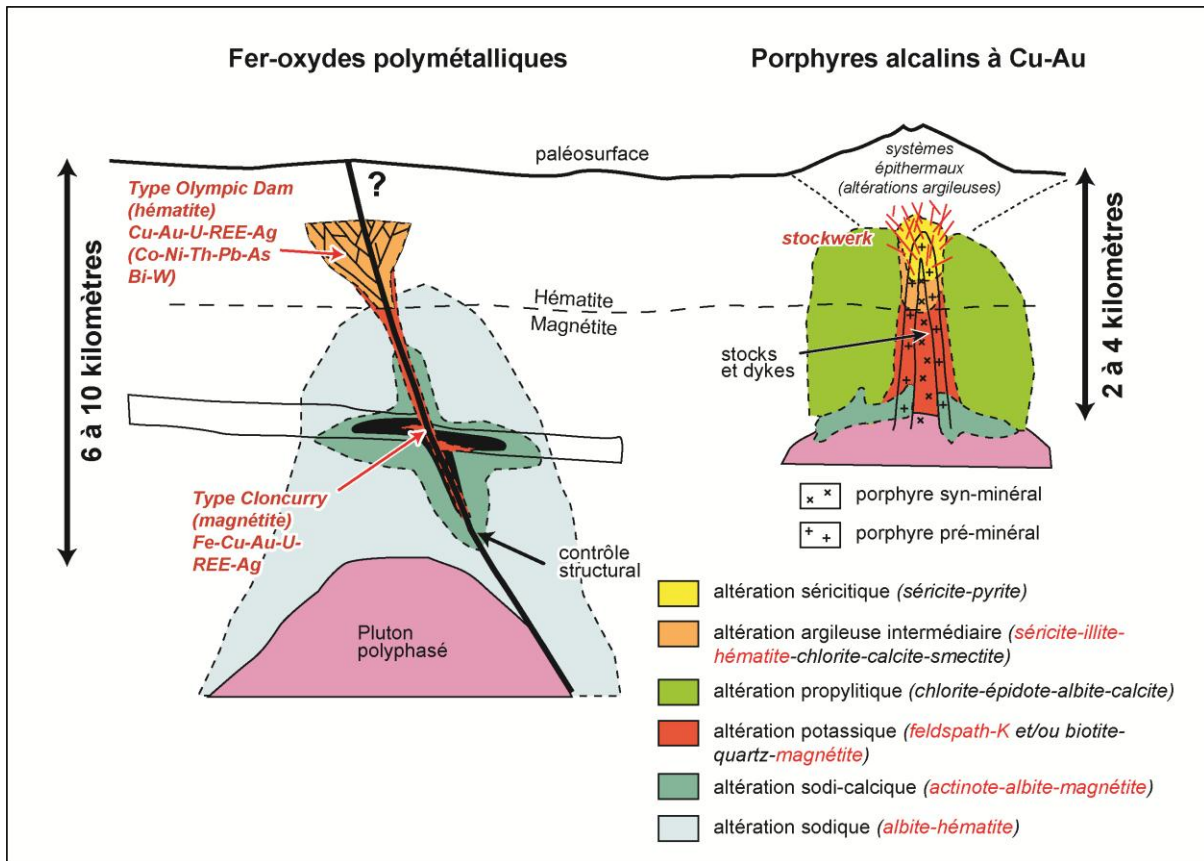


Figure 20. Figure synthèse comparant les gisements de fer-oxydes polymétalliques avec les porphyres alcalins à Cu-Au (inspirée et modifiée de Jébrak et Marcoux, 2008; Sillitoe, 2000; Seedorff *et al.*, 2005). Les deux types se distinguent par la profondeur de mise en place des plutons associés au système hydrothermal. Les intrusions sont soit des plutons polyphasés profonds non altérés et non minéralisés (fer-oxydes polymétalliques) ou des stocks et dykes peu profonds, altérés et minéralisés (porphyres). En volume, les altérations sodiques et sodi-calciques sont dominantes pour les fer-oxydes polymétalliques alors que les altérations potassiques et propylitiques dominent pour les porphyres. Les minéralisations en Cu-Au sont cependant associées dans les deux cas aux stades d'altération potassique ou argileuse intermédiaire. Les porphyres possèdent des zones à séricite-pyrite qui ne sont pas présentes pour les fer-oxydes polymétalliques. Le sommet des systèmes porphyriques est caractérisé par des gîtes épithermaux alors qu'aucun type de gîte n'est reconnu au-dessus des fer-oxydes polymétalliques (maars et diatrèmes alcalins aurifère ?).

4.3 Typologie des minéralisations

Il existe certaines similitudes, mais aussi des caractéristiques distinctives dans la typologie des minéralisations associées aux IOCG et aux porphyres alcalins à Cu-Au (**Tableau 1**). Les deux types de minéralisations contiennent des teneurs semblables de moins de 2 % en cuivre et de moins de 1 g/t en or. Les deux types contiennent aussi généralement quelques g/t d'argent. Par contre la plupart des IOCG contiennent des terres-rares et peuvent contenir de l'uranium (p.ex. 0,04 % U_3O_8 à Olympic Dam), du cobalt (p.ex. district de Cloncurry) ou du bismuth (Tennant Creek; Williams *et al.*, 2005; Corriveau, 2007), ce qui n'est pas le cas pour les porphyres. D'un autre côté, les porphyres peuvent contenir du molybdène et des systèmes de veines et mantos périphériques à Pb-Zn (Sinclair, 2007), ce qui n'est pas reconnu, ou plutôt rare pour les IOCG.

Les corps minéralisés de IOCG se présentent soit sous forme de cheminées ou de veines discordantes à textures bréchiques, parfois massives le long de failles, de contacts intrusifs ou en

remplacements concordants de certains horizons stratigraphiques (**Figure 21**; Hitzman *et al.*, 1992 ; Jébrak et Marcoux, 2008). Les gisements porphyriques se présentent plutôt sous forme de stockwerk de veinules ou de disséminations à l'apex des stocks, cheminées ou dykes porphyriques (**Figure 22**; Sinclair, 2007; Seedorff *et al.*, 2005).

La minéralogie des IOCG est surtout constituée d'oxydes de fer (hématite en surface, magnétite en profondeur) mais aussi de chalcopryrite, pyrite et parfois de bornite et de chalcocite (Jébrak et Marcoux, 2008). Les gîtes peuvent aussi contenir de l'uraninite (uranium), de la monazite, bastnaésite et de la florencite (terres-rares). La séquence paragénétique est toujours la même avec la concentration des oxydes en premier suivi par les sulfures auxquels sont associées les minéralisations en Cu-Au. Quelques exemples de textures du minerai de gisements d'IOCG sont illustrés à la **Figure 23**.

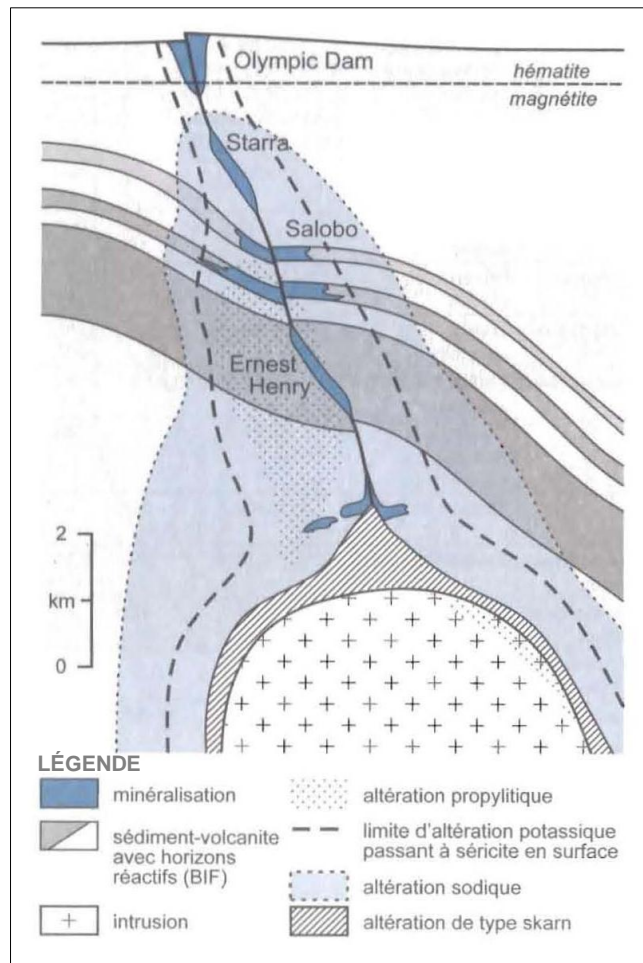


Figure 21. Différents modèles de gisements de type fer-oxydes (IOCG) le long de zones de déformation et en association distale avec des intrusions (tirée de Jébrak et Marcoux, 2008).

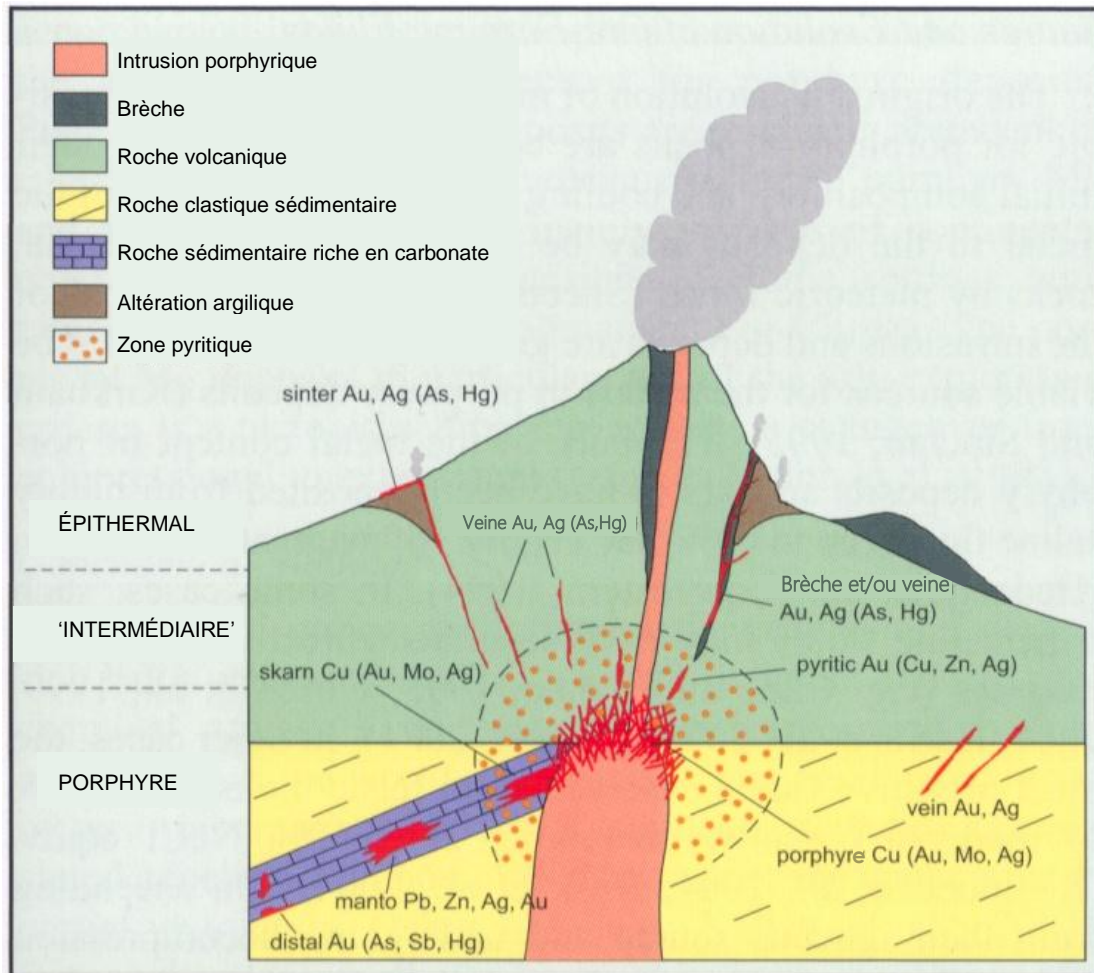


Figure 22. Diagramme schématisé d'un système porphyrique cuprifère calco-alcalin classique situé à la base d'un stratovolcan andésitique. Le gisement porphyrique est localisé à l'apex de l'intrusion avec des gîtes de skarns, mantos et veines qui peuvent lui être associés. Le système passe à des veines à Pb-Zn à des profondeurs intermédiaires et à des minéralisations épithermales près de la surface (modifiée de Sinclair, 2007).

La minéralisation des gisements porphyriques se présente surtout sous forme de stockwerk de veinules mais peut également être associée à des brèches (Sillitoe, 2000; Seedorff *et al.*, 2005). Dans ce cas cependant les brèches sont orthomagmatiques à support de fragments monolithiques et pas très abondantes en volume ce qui est différent des grands volumes de brèches minéralisées à matrice d'oxydes de fer des IOCG.

Les systèmes de veinules avec différentes paragenèses et à chronologie relative qui ont été décrites dans les systèmes porphyriques (voir Sillitoe, 2000 pour une description complète) sont une caractéristique fondamentale qui permet de distinguer les porphyres des IOCG. La présence des systèmes extensifs de veinules à quartz, qui peuvent contenir la chalcopryrite, et des veinules à pyrite avec altération à sérécite sont d'ailleurs un des critères utilisés par Sillitoe (2003) pour discriminer les porphyres des IOCG qui sont présents dans le même district au Chili. Les textures caractéristiques des minéralisations porphyriques sont également présentées à la **Figure 23**.

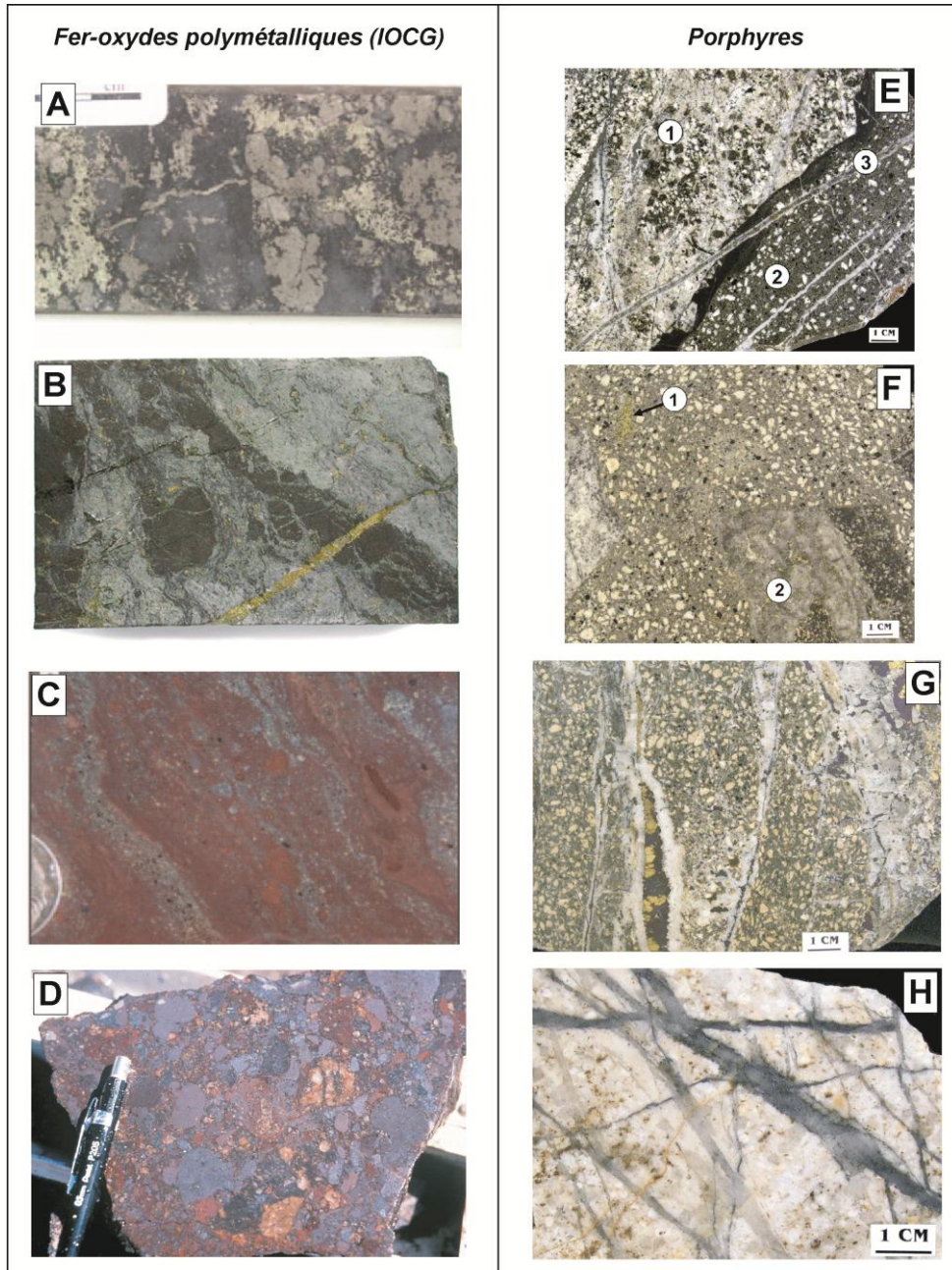


Figure 23. Exemples de minéralisations de type fer-oxydes polymétalliques (A-D) et porphyriques (E-H). A) Pyrite et chalcopryrite massive et en veinule qui remplacent et recoupent la magnétite, indice du district d'Olympic Dam (modifiée de Bastrakov *et al.*, 2007). B) Veinule de chalcopryrite-pyrite qui recoupe la magnétite de remplacement précoce, mine Candelaria, Chili (Marschik et Fontboté, 2001). C) Brèche fortement moulue à matrice d'hématite-fluorite avec des laminations riches en chalcopryrite, gisement de Prominent Hill, Australie (modifiée de Belpeiro *et al.*, 2007). D) Brèche hétérolitique à matrice d'hématite contenant une variété de fragments riche en hématite ou granitiques, Olympic Dam (Reynolds, 2001). E) Relations entre un porphyre altéré en biotite-feldspath potassique contenant des veinules de magnétite et quartz-magnétite (1) qui est recoupé par un dyke de porphyre interminéral avec bordure figée (2); les deux porphyres sont recoupés par une veinule à quartz-bornite-chalcopryrite, gisement cuprifère de Granisle, Colombie-Britannique (modifiée de Sinclair, 2007). F) Brèche intrusive interminérale avec fragment de chalcopryrite partiellement assimilé (1) et un fragment de veine à quartz-chalcopryrite (2), gisement cuprifère de Granisle, Colombie-Britannique (Sinclair, 2007). G) Veines et veinules de quartz-apatite-chalcopryrite-bornite qui recoupent un

porphyre à feldspath-biotite, zone de haut grade, gisement cuprifère de Granisle, Colombie-Britannique (modifiée de Sinclair, 2007). H) Stockwerk de veinules de quartz-molybdénite dans un porphyre granidioritique séricitisé, le recouplement et le déplacement des veinules à quartz et quartz-molybdénite indique la nature multiple de la minéralisation, gisement Kitsault, district d'Alice Arm, Colombie-Britannique (modifiée de Sinclair, 2007).

4.4 Altérations

Récemment la séquence paragénétique des altérations associées aux IOCG a été étudiée par Monteiro *et al.* (2008b) pour les gisements de Sossego-Sequeirinho au Brésil et par Bastrakov *et al.* (2007) pour le district d'Olympic Dam. À partir de ces travaux, et de la littérature, une séquence d'altération synthétisée en quatre stades est proposée (Figures 24 et 25). La comparaison des altérations en termes de volume et de minéralogie est illustrée à la Figure 20.

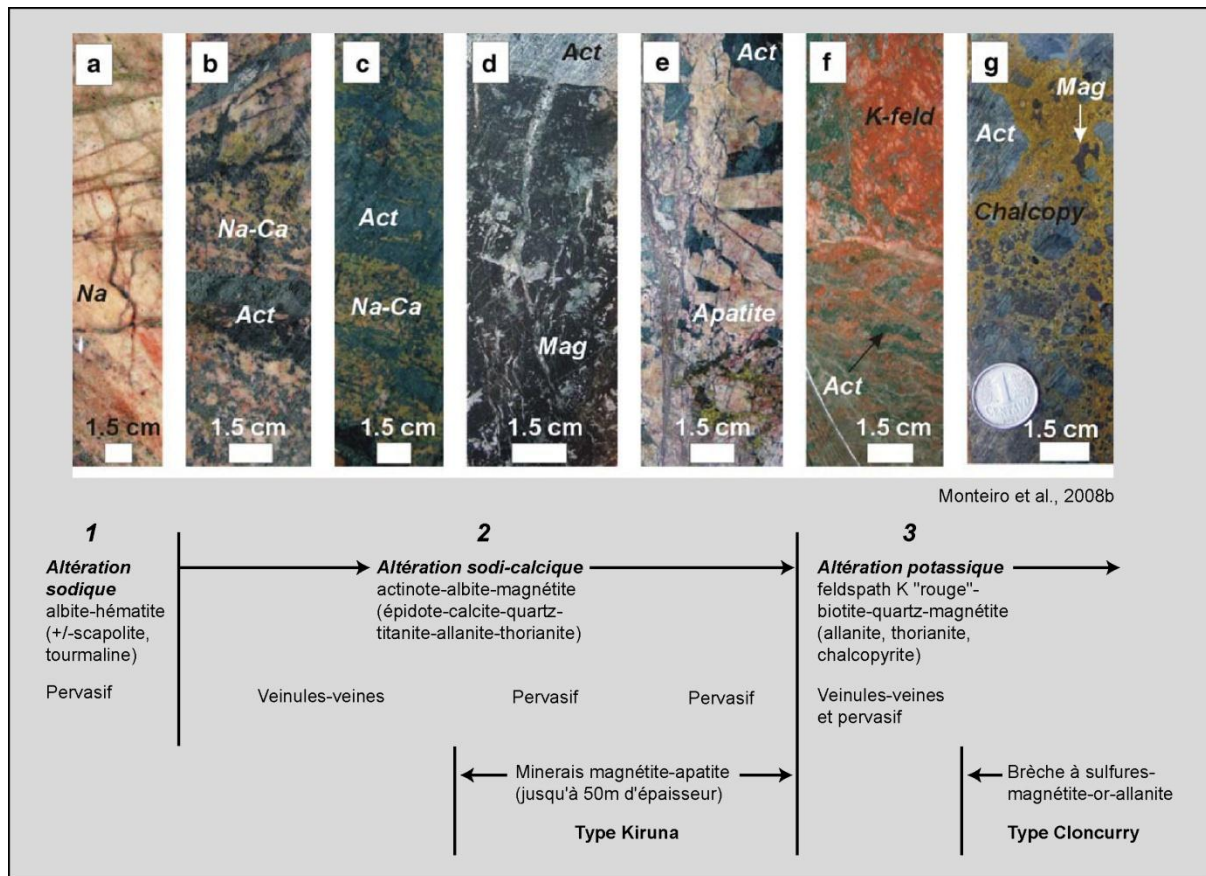


Figure 24. Figure synthèse de la séquence paragénétique des altérations et des types de minéralisations associées aux gisements de Sossego-Sequeirinho du district de Carajás au Brésil (photos tirées de Monteiro *et al.* 2008b).

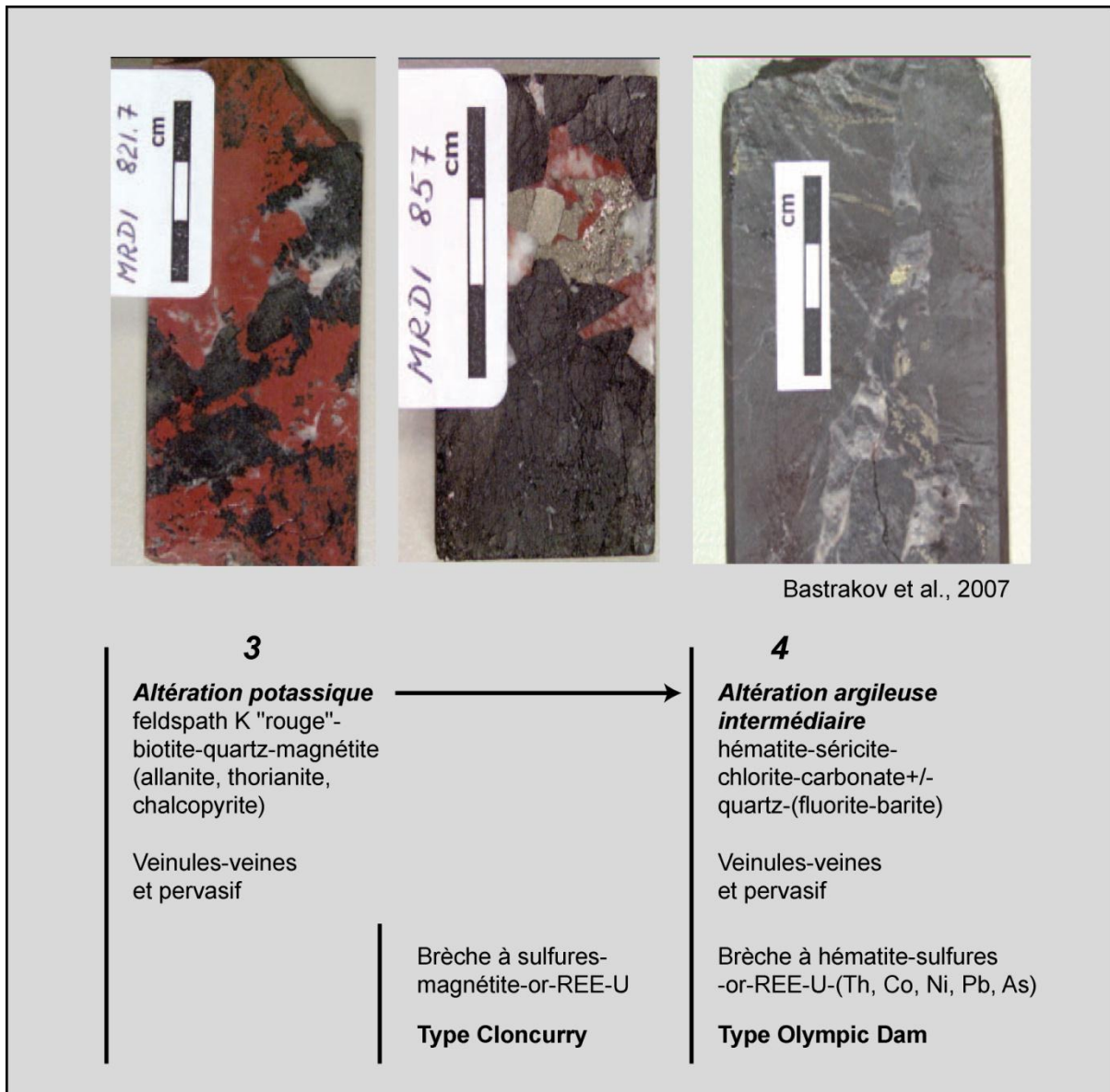


Figure 25. Figure synthèse de la séquence paragenétique des altérations et des types de minéralisations associées aux gisements du district d'Olympic Dam (photos tirées de Bastrakov *et al.*, 2007).

La séquence d'altération associée aux IOCG débute par des zones d'altération sodique (**Figure 24**) qui possèdent une ampleur plurikilométriques (**Figures 14 et 20**). Ces grandes zones d'altération pervasive à albite-hématite sont particulièrement bien développées, que ce soit pour les IOCG monométalliques comme Kiruna ou polymétalliques comme Sequeirinho (**Figure 26**). Cette altération n'est par contre pas observée dans les systèmes porphyriques (**Figure 20**). Cette altération sodique est recoupée par des zones kilométriques d'altération sodi-calciques (**Figures 20 et 26**) qui se caractérisent par des veines ou des remplacements massifs à actinote-albite-magnétite (**Figure 24**). Ces zones sont associées aux minéralisations de magnétite-apatite massives (fer-oxyde monométallique de type Kiruna). Les zones d'altération sodi-calciques sont aussi présentes dans les porphyres alcalins à Cu-Au mais de façon limitée dans la partie profonde du système et avec aucune minéralisation associée (**Figure 20**).

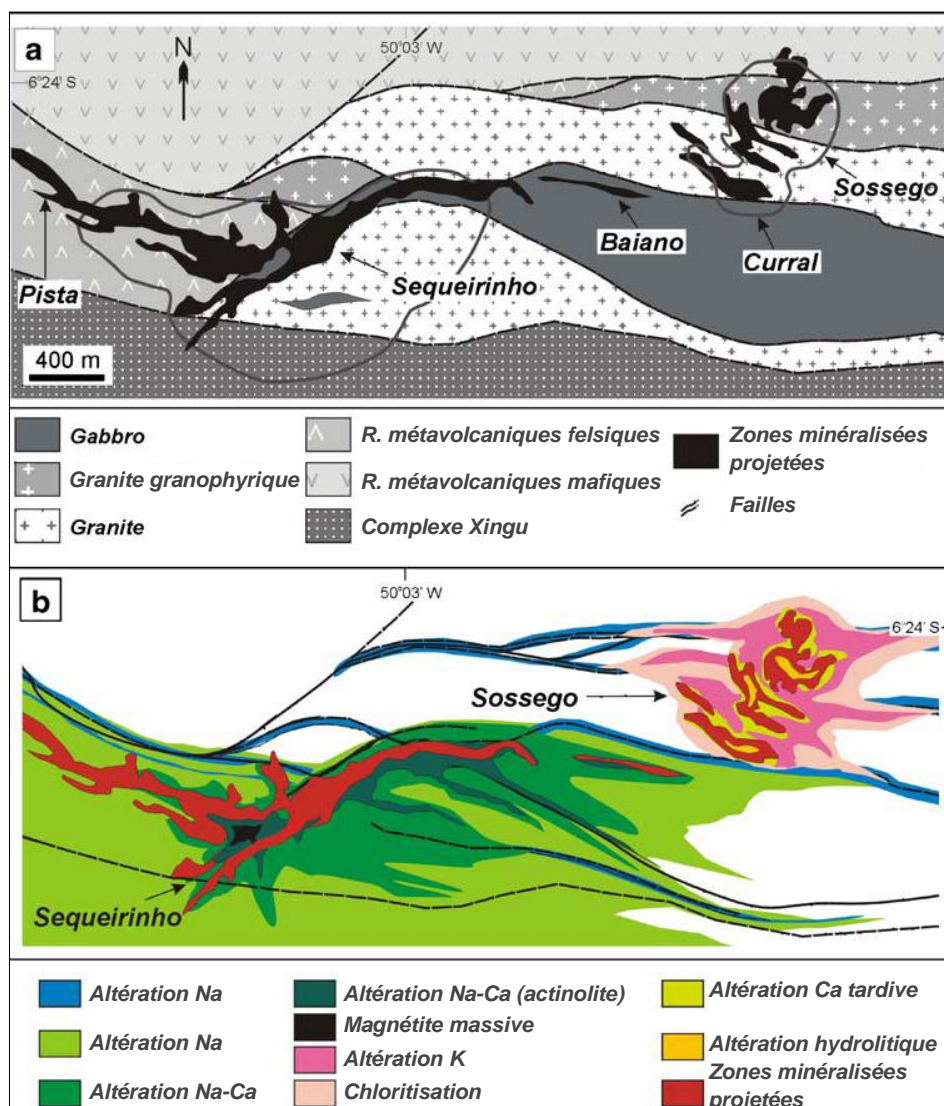


Figure 26. Carte simplifiée de la géologie et des altérations associées aux gisements de Sossego et Sequeirinho au Brésil. A) Carte géologique simplifiée et localisation des différents corps minéralisés. B) Distribution schématique des différentes zones d'altération associées aux minéralisations (modifiée de Monteiro *et al.*, 2008b).

Une caractéristique commune aux gisements de fer-oxydes polymétalliques et de porphyres alcalins est la présence de zones d'altération potassique qui sont synchrones aux minéralisations à Cu-Au (**Figures 24 et 25**). Dans le cas des IOCG, les zones potassiques d'une dizaine à des centaines de mètres, recoupent sous forme pervasive et de veines ou veinules de feldspath potassique avec quartz et magnétite (**Figures 24 et 25**) les altérations sodiques et sodi-calciques (**Figures 14 et 20**). Les gisements d'IOCG à Cu-Au (ETR-Ag) associés avec la magnétite (type Cloncurry) sont associés à cette altération potassique. Dans les systèmes porphyriques, l'altération potassique est dominante et affecte le porphyre lui-même en plus de son encaissant immédiat (**Figures 19 et 20**). L'assemblage minéralogique est généralement biotite-quartz-magnétite mais peut aussi être feldspath potassique-quartz-magnétite dans le cas des porphyres de monzonite, monzonite quartzifère et syénite (Sillitoe, 2000). Le réseau de différentes générations de veinules de quartz (stockwerk) qui accompagne l'altération potassique est une caractéristique distinctive et fondamentale des gisements porphyriques (**Figure 23e-h**).

L'altération la plus tardive et la moins profonde qui est reconnue dans les systèmes d'IOCG est l'assemblage à hématite-séricite-carbonate-chlorite+/-quartz-(fluorite-barite) dans des proportions variables (**Figure 25**). Les gisements d'IOCG à Cu-Au-U-ETR-Ag avec hématite (type Olympic Dam) sont associés à cette altération qui se présente sous forme de veinules ou de remplacement pervasif, notamment dans les brèches (**Figure 23c-d**). Cette altération passe en profondeur à l'altération potassique précédemment décrite (Hitzman *et al.*, 1992 ; Williams *et al.*, 2005). Il est proposé ici que ce faciès d'altération corresponde à l'altération argileuse intermédiaire (séricite-illite-chlorite-calcite-smectite-hématite) qui est décrite dans le cas des gisements porphyriques aurifères (**Figure 20**; Sillitoe, 2000).

Le sommet des systèmes porphyriques aurifère est marqué par une altération séricitique matérialisée par un stockwerk de veinules à séricite-quartz-pyrite (Sillitoe, 2000) qui n'est pas reconnu dans le cas des fer-oxydes polymétalliques (**Figure 20**). Enfin soulignons que les systèmes porphyriques passent verticalement à des systèmes épithermaux vers la surface. Aucun équivalent à ces gisements peu profonds n'a été décrit ou reconnu dans le cas des fer-oxydes polymétallique (**Figure 20**). Cependant on pourrait penser que certains gisements comme les filons à cinq éléments (Bi-Co-Ni-Ag-U), dans un contexte intracratonique, ou les maars et diatrèmes alcalins aurifères, en contexte de subduction, pourraient être génétiquement reliés aux IOCG.

5 DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'EXPLORATION A L'ECHELLE REGIONALE

Tel que mentionné en introduction, la caractérisation géochimique des plutons génétiquement associés aux gisements d'IOCG *sensu stricto* est la piste qui a été retenue pour développer un outil d'exploration applicable à l'échelle régionale. L'association particulière entre un type de plutonisme et les minéralisations de fer-oxydes polymétalliques (IOCG) n'a pas été reconnue au départ (Hitzman, 2000) puisque généralement il n'y a pas de proximité physique entre les intrusions et les minéralisations (**Figures 14 à 17**). Il aura fallu attendre des travaux basés sur les signatures isotopiques des fluides hydrothermaux, pour montrer qu'il existe bel et bien un lien entre les gisements et le plutonisme sans par contre avoir les données de datation pour appuyer cette proposition (Pollard, 2000). Selon les travaux de ce dernier dans le district de Cloncurry (Pollard *et al.*, 1998), les minéralisations de type IOCG et porphyres à Cu-Au seraient associées à des suites intrusives potassiques, faiblement alcalines, ayant des compositions de diorite à granite et appartenant à la série à magnétite. Ces résultats ont été appuyés plus récemment par Pollard (2006) qui a compilé les données géochimiques disponibles pour différents plutons provenant de districts où le lien génétique entre intrusions et minéralisation a été démontré par datation isotopique en plus des signatures des fluides. Les données originales proviennent des secteurs d'Olympic Dam (Creaser, 1996) et Cloncurry (Pollard *et al.*, 1998; Mark, 1999) en Australie, de Salobo au Brésil (Lindenmayer, 1990) et de Candelaria au Chili (Marschik *et al.*, 2003). Toutes ces études n'emploient cependant pas les mêmes diagrammes de classification et de discrimination géochimique et il était nécessaire de recompiler ces analyses dans une base de données unique afin de caractériser géochimiquement les intrusions selon les mêmes critères.

5.1 Caractérisation géochimique des plutons génétiquement associés aux IOCG

La base de données des plutons considérés génétiquement associés aux IOCG contient 67 analyses de référence (**Tableau 2**). Le traitement des données a été effectué avec l'aide de la version 1.0 du logiciel Lithomodeleur développé par le CONSOREM (projet 2009-01). Les diagrammes présentés dans ce rapport ont tous été générés à partir de diagrammes prédéfinis dans le logiciel. Le traitement visait à développer une méthode permettant de discriminer facilement ces roches dans les grandes

bases de données lithogéochimiques. Cette étude démontre que ceci est possible en utilisant cinq diagrammes faisant appel à des éléments chimiques couramment analysés.

Étant donné que la caractérisation vise à définir l'affinité géochimique des plutons, le traitement des données a été divisé en 5 étapes. *L'étape 1* du traitement consiste à vérifier si les échantillons sont relativement peu altérés. C'est le diagramme de Large *et al.* (2001, modifié par le Consorem, 2009) qui a été utilisé puisqu'il permet de visualiser en une seule étape la présence d'altérations à albite (sodique), séricite-feldspath potassique (potassique), épidote-carbonate et chlorite-pyrite. Les analyses reportées sur le diagramme montrent que les roches sont peu altérées (**Figure 27**) et que l'on peut donc utiliser d'autres diagrammes utilisant des éléments réputés mobiles avec une relative confiance. Ce résultat vient appuyer les modèles géologiques qui montrent que les plutons génétiquement associés aux IOCG sont généralement non minéralisés et non altérés.

Tableau 2. Provenance des analyses de roches plutoniques de référence associées aux IOCG.

| Régions | Districts miniers | Unités intrusives | Nombre d'échantillons | Références |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Gawler Craton, Australie | Olympic Dam district | Wirrda Suite | 15 | Creaser, 1996 |
| Mount Isa Block, Australie | Cloncurry district | Mt Angelay et Wiley Complex | 18 | Pollard et al., 1998 |
| | | Mt Angelay igneous Complex | 24 | Mark, 1999 |
| Carajas region, Brésil | Salobo district | Old Salobo Granite | 3 | Lindenmayer, 1990 |
| Chili | Candelaria district | Copiapo plutonic complex | 7 | Marschik et al., 2003 |
| TOTAL | | | 67 | |

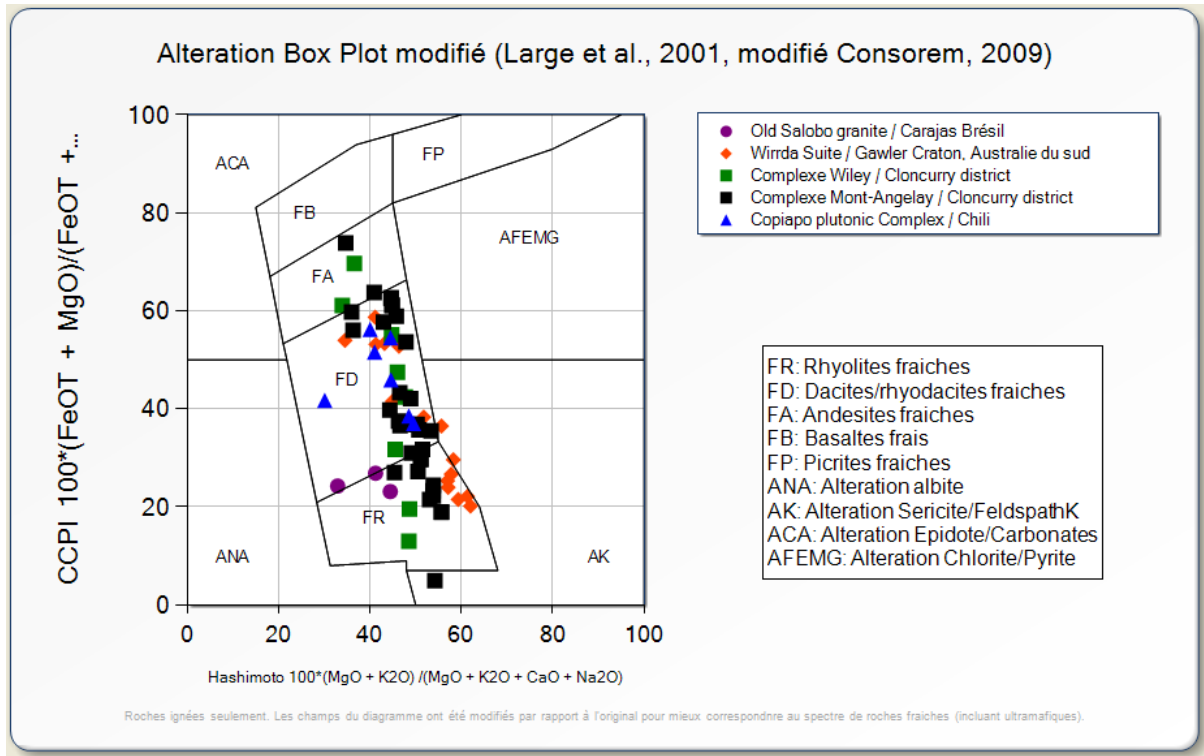


Figure 27. Diagramme de Large *et al.* (2001) modifié par le Consorem (2009) permettant de discriminer les échantillons non altérés des plutons de référence. Les échantillons sont regroupés dans les champs de roches fraîches.

L'étape 2 vise à reporter les analyses sur le diagramme de Middlemost (1985) qui permet de déterminer le type de roche en plus de discriminer de façon approximative les différentes suites intrusives. Le diagramme de Middlemost (1985), qui utilise des éléments majeurs, est préféré par rapport au diagramme QAP de Streckeisen (1976) qui utilise des quantités modales observées ou normatives calculées (CIPW) puisque le traitement est plus rapide avec les grandes bases de données. La **Figure 28** montre que selon ce diagramme, les analyses sont confinées aux compositions de monzodiorite, monzonite, monzonite quartzifère et granite, soit une suite subalcaline à légèrement alcaline. Il faut cependant noter que sur ce graphique le champ monzonite devrait être divisé en deux parties : la partie inférieure subalcaline (où sont localisé la majorité des échantillons) représente plutôt des compositions de monzodiorite quartzifère selon le diagramme QAP de Streckeisen (décrit plus loin). La partie supérieure contient les « vrais » monzonites qui sont associées aux syénites. Le diagramme permet donc de voir que les monzonites-syénites ne sont pas associées aux IOCG. Le terme « roches alcalines » pour décrire les roches associées aux IOCG devrait donc être utilisé avec prudence puisqu'il s'agit plutôt de roches subalcalines à légèrement alcalines selon ce diagramme.

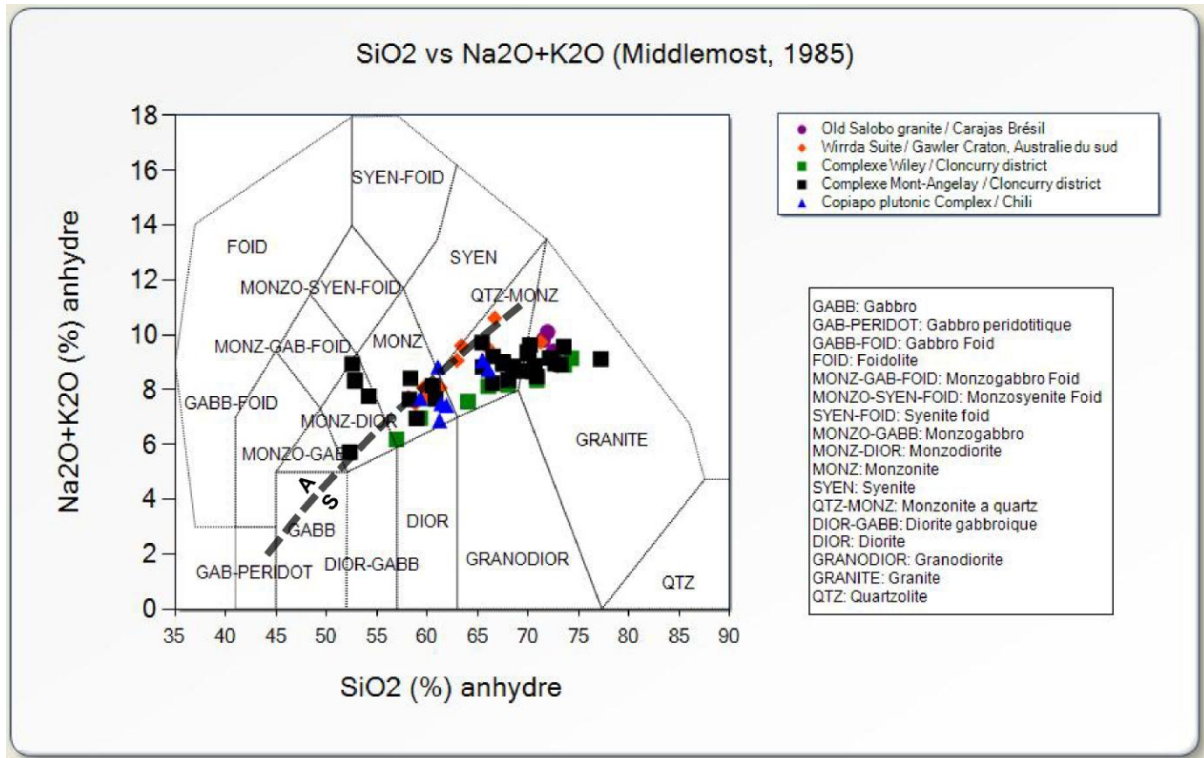


Figure 28. Diagramme de Middlemost, (1985) permettant la classification pour les roches plutoniques de référence. Les échantillons forment une suite de composition monzodiorite-monzonite-monzonite à quartz-granite. Les échantillons sont subalcalins à légèrement alcalins selon la limite alcalin / subalcalin de Irvine et Baragar (1971).

L'étape 3 consiste à définir le caractère potassique des roches, ce qui est exprimé avec l'aide du diagramme de Pecerrillo et Taylor (1976) qui met en relation K_2O et SiO_2 . On observe que les échantillons chevauchent les divisions calco-alcalines potassiques (CA-K) et shoshonitiques (**Figure 29**). Les roches calco-alcalines et tholéïtiques ne possèdent donc pas de potentiel IOCG selon ce diagramme.

L'étape 4 vérifie l'alcalinité des roches avec le diagramme de Frost *et al.* (2001) qui utilise les éléments K_2O , Na_2O , CaO et SiO_2 . À la **Figure 30**, les échantillons sont regroupés en majorité dans le champ alcalin-calcique avec quelques échantillons dans le champ alcalin. Les échantillons provenant du Chili ont une légère tendance calco-alcaline témoignant de leur contexte d'arc continental. Encore une fois, la majorité des échantillons chevauchent les champs alcalins et subalcalins.

Le caractère légèrement différent des roches du Chili, est aussi visible sur le diagramme de discrimination d'environnements tectoniques de Pearce *et al.* (1984; **Figure 31**). Sur ce graphique, les roches du Chili sont regroupées dans le champ des granites d'arc volcaniques alors que les autres, qui proviennent d'environnements intracratoniques, sont bel et bien classifiées comme des granites intra-plaques. Ce diagramme permet aussi d'éliminer certaines roches alcalines (monzonites, syénites, granites) qui peuvent être associées à la déformation (granites syn-collision) par rapports aux roches associées aux IOCG, ce qui représente la 5^e étape du traitement.

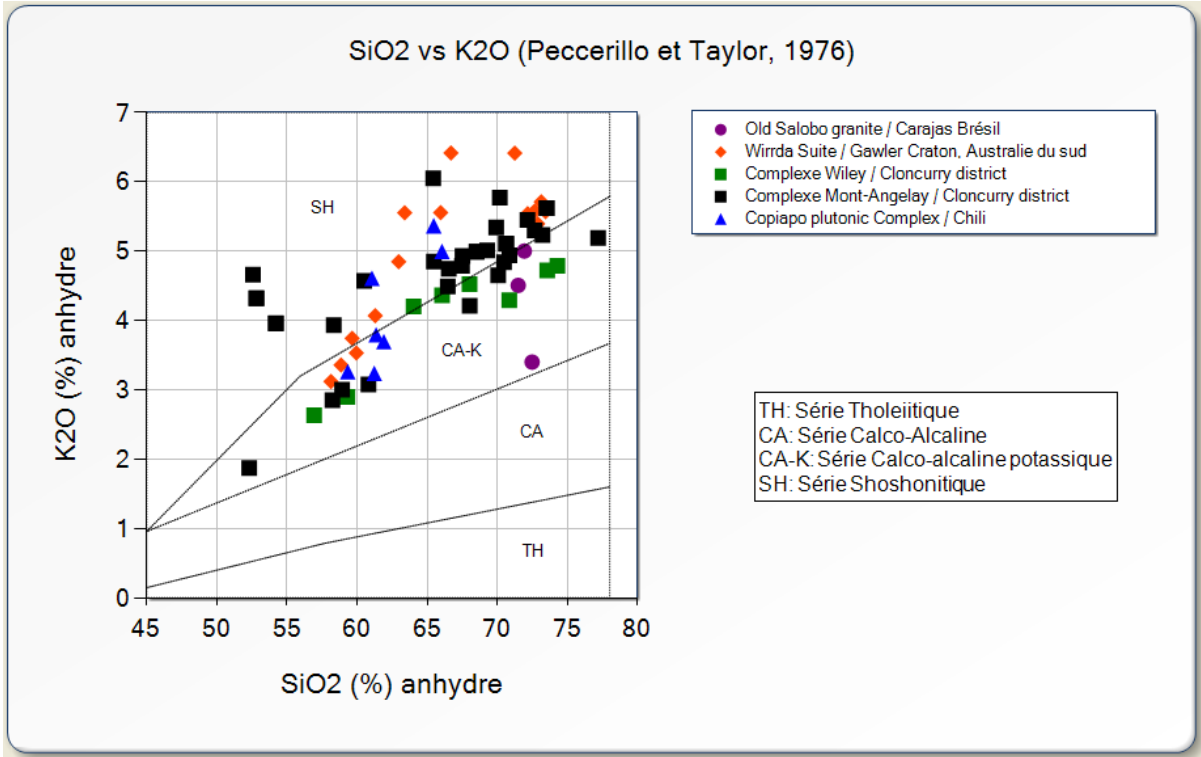


Figure 29. Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976) montrant le caractère potassique des roches plutoniques de référence. Les échantillons chevauchent les champs calco-alcalin potassique et shoshonitique.

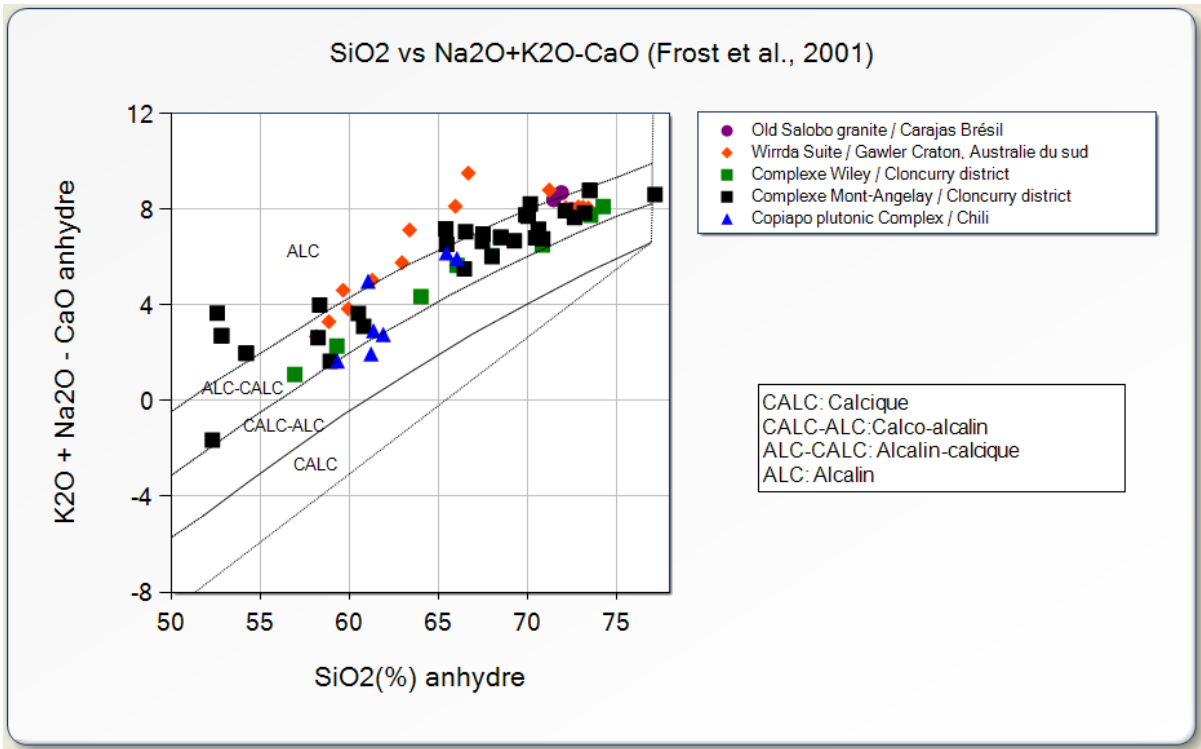


Figure 30. Diagramme de Frost *et al.* (2001) montrant le caractère alcalin des roches plutoniques de référence. La majorité des échantillons chevauchent les champs alcalin-calcique et alcalin avec quelques échantillons du Chili qui se classent légèrement dans le champ calco-alcalin.

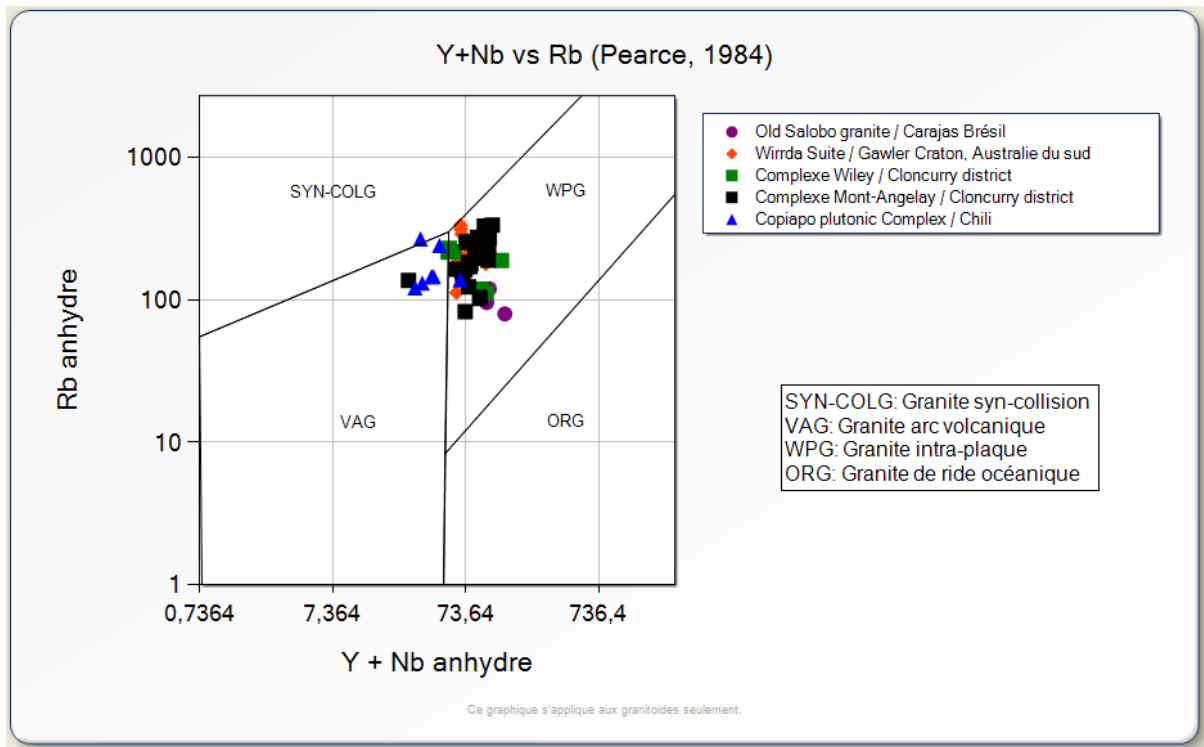


Figure 31. Diagramme de Pearce *et al.*, (1984) permettant la discrimination d’environnements tectoniques pour les roches granitiques. Les échantillons provenant du Brésil et de l’Australie sont regroupés dans le champ des granites intra-plaques alors que les échantillons du Chili sont majoritairement regroupés dans le champ des granites d’arc volcaniques.

En résumé il appert que les roches plutoniques qui sont génétiquement associées aux gisements de fer-oxydes polymétalliques font partie de la suite intrusive monzodiorite - monzodiorite à quartz - monzonite à quartz - granite. Ces roches sont calco-alcalines potassiques (CA-K) ou shoshonitiques selon leur contenu en potassium (K_2O vs SiO_2) et alcalines-calciques ou légèrement alcalines selon leur contenu en K_2O+Na_2O-CaO vs SiO_2 . Les roches en contexte d’arc continental, comme celles du Chili, peuvent aussi être légèrement calco-alcalines selon leur contenu en K_2O+Na_2O-CaO vs SiO_2 . Les roches plutoniques favorables aux IOCG sont présentes dans les contextes intracratoniques ou d’arcs continentaux et exclus les granites de ride océanique ou syn-collision comme confirmé sur le diagramme Y+Nb vs Rb.

Ce traitement lithogéochimiques en cinq étapes a donc permis de caractériser les roches plutoniques favorables aux IOCG. Cette méthodologie peut donc être appliquée à différentes bases de données dans le but d’isoler les échantillons qui possèdent ces mêmes caractéristiques et donc de cibler des secteurs à fort potentiel pour les minéralisations IOCG. Cette démarche sera appliquée aux roches plutoniques de l’Abitibi dans la dernière section de ce rapport.

5.2 Comparaison des intrusions associées aux IOCG et aux porphyres cuprifères

Comme il est possible de caractériser géochimiquement les plutons associés aux IOCG, on peut se demander si ces caractéristiques sont distinctives de plutons associés aux porphyres cuprifères. Une comparaison entre les plutons associés aux gisements porphyriques et ceux associées aux IOCG s’avère donc nécessaire vu les grandes similitudes entre les deux types de minéralisations.

Une compilation géochimique des plutons associés aux minéralisations porphyriques a été publiée par Seedorff *et al.* (2005). Ces auteurs divisent leurs données selon sept types de porphyres : porphyres à molybdène, porphyres à tungstène, porphyres à étain et quatre sous-types de porphyres à cuivre. Les différents types sont présentés sur le diagramme Quartz vs Orthose vs Albite+Anorthite de Streckeisen (1976) selon leur contenu en minéraux normatifs calculés avec la norme CIPW (**Figure 32**). La comparaison effectuée ici concernera évidemment seulement les porphyres cuprifères.

À la **Figure 32**, les quatre sous-types de porphyres cuprifères ont été séparés par des limites de champ établies visuellement à partir de la figure originale de Seedorff *et al.* (2005). Ces limites séparent les types de porphyres suivants :

- 1) Cu-(Au-Mo) de tonalite – trondhjémite -granodiorite;
- 2) Cu-(Mo) de monzodiorite quartzifère – granodiorite - monzogranite;
- 3) Cu-(Mo-Au) de monzodiorite quartzifère - monzonite quartzifère - monzogranite;
- 4) Cu-(Au) de monzonite - syénite.

Les échantillons provenant des plutons de référence associés aux IOCG ont aussi été reportés sur le même diagramme (**Figure 33**). On voit sur cette figure que les échantillons favorables aux IOCG sont regroupés dans le même champ de composition (champ 3) que les porphyres à Cu-(Mo-Au) constitués de monzodiorite quartzifère - monzonite quartzifère - monzogranite. Cette comparaison permet également de souligner la différence entre les IOCG et les porphyres à Cu-Mo du champ numéro 2 qui regroupe les porphyres géants associés aux époques compressifs d'arc continentaux comme par exemple Chuquicamata ou La Escondida (Chili; Sillitoe et Perelló, 2005).

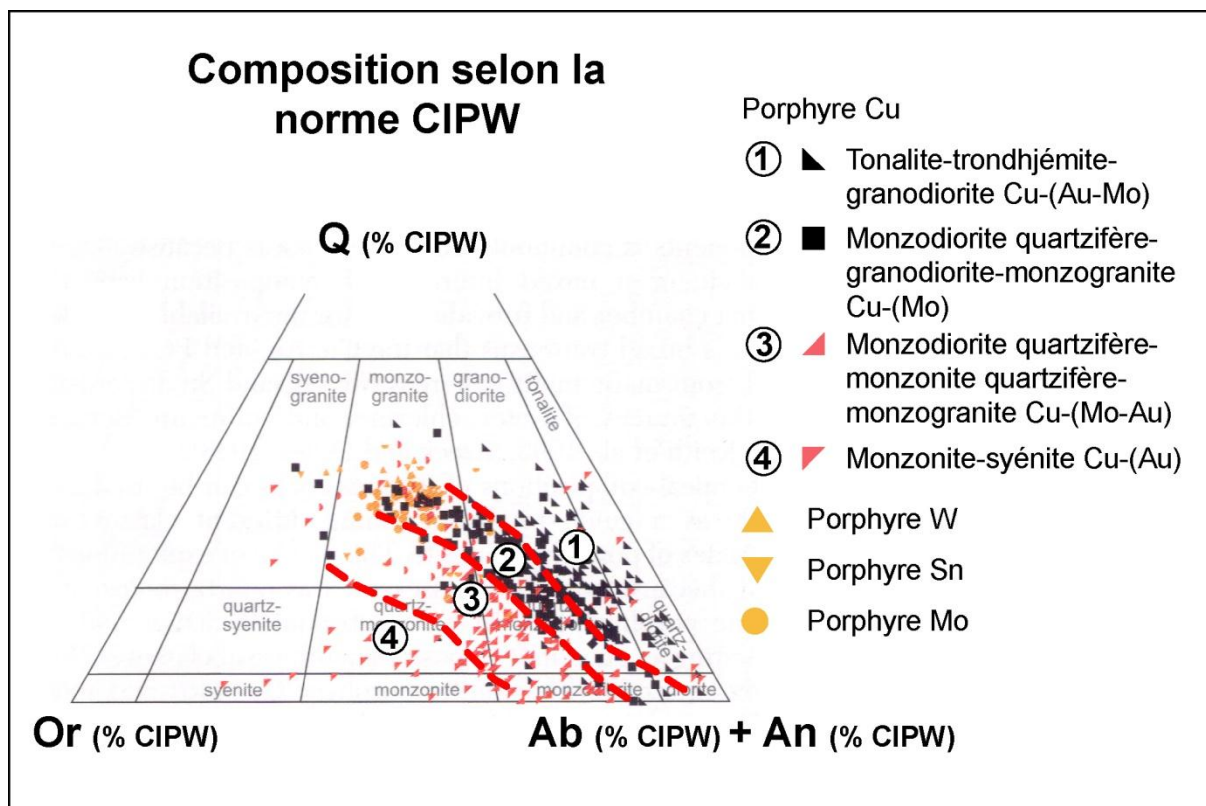


Figure 32. Diagramme de Streckeisen pour les intrusions associées aux minéralisations porphyriques. Les minéraux normatifs (CIPW) ont été calculés à partir d'analyses chimiques compilées de la littérature. Les limites de champs pour séparer les différents porphyres cuprifères ont été modifiées de Seedorff *et al.* (2005).

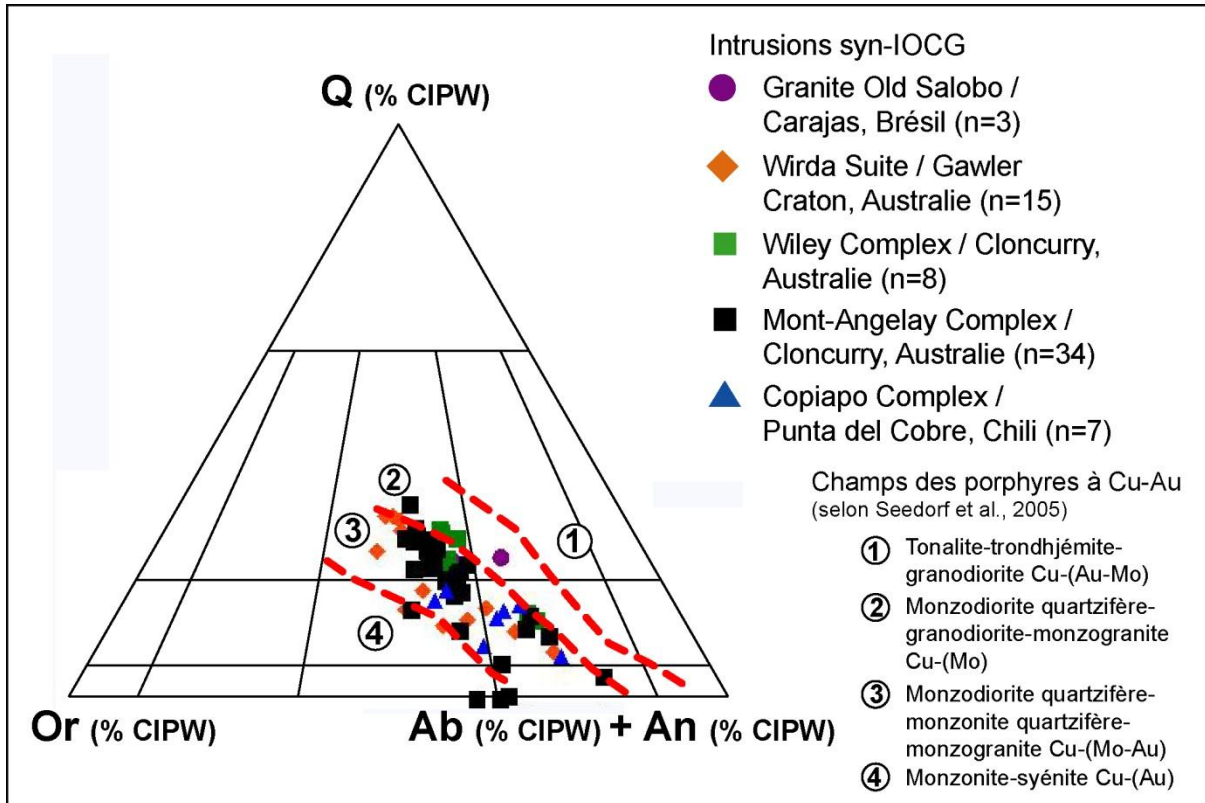


Figure 33. Diagramme de Streckeisen pour les plutons de référence, associées aux IOCG. Les minéraux normatifs (CIPW) ont été calculés à partir d'analyses chimiques compilées de la littérature. Les limites de champs pour les porphyres à Cu-Au sont celles tracées à partir de la figure 31. Les plutons associés aux gisements d'IOCG sont en général à l'intérieur du même champ que les porphyres à Cu-(Mo-Au) de la suite monzodiorite quartzifère-monzonite quartzifère-monzogranite.

Ces différents champs de composition basés sur la minéralogie des intrusions peuvent également être comparés en termes de séries géochimiques. La **Figure 34** montre les six suites intrusives (A à F) telles que défini par Lameyre et Bowden (1982) reportées sur le diagramme de composition modale QAP de Streckeisen (1976). Puisqu'il s'agit d'un diagramme de composition modale cette fois-ci, seuls les échantillons tirés de la littérature dont les compositions modales en quartz/orthose+albite/anorthite étaient disponibles sont présentés sur le diagramme. Il existe donc une différence entre les échantillons présentés aux **Figures 32 et 33** avec ceux de la **Figure 34**. La différence majeure entre les deux diagrammes est que l'albite normative se retrouve sur le pôle de droite (**Figure 32**) alors que l'albite modale est sur le pôle de gauche (**Figure 34**) ayant pour effet de déplacer légèrement les échantillons vers la gauche à la **Figure 34**. Néanmoins, une comparaison des **Figures 32 et 34** permet d'associer les différents types de porphyres cuprifères avec des séries géochimiques particulières.

À la **Figure 34**, les intrusions favorables aux IOCG semblent suivre deux lignes telles que définie par Lameyre et Bowden (1982); une première est bien centrée sur la lignée D (monzonitique quartzifère calco-alcaline potassique) alors que l'autre est située entre les lignées C (granodioritique calco-alcaline) et D. Par contre la majorité de ces derniers échantillons tombent dans les champs de compositions de monzodiorite quartzifère et monzogranite (peu de granodiorite), ce qui est compatible avec les limites du champ 3 de la **Figure 32**. Ceci confirme que les intrusions favorables aux IOCG sont de la suite monzodiorite - monzodiorite quartzifère - monzonite quartzifère - granite et sont d'affinité calco-alcalines potassiques ou légèrement alcalines. Elles sont donc associées à des

périodes extensives avec une composante magmatique mantellique dominante sur la composante crustale ou de subduction. Ceci est en accord avec le modèle de magmatisme postsubduction (Richards, 2011) qui est associé aux porphyres à Cu-Au légèrement alcalins.

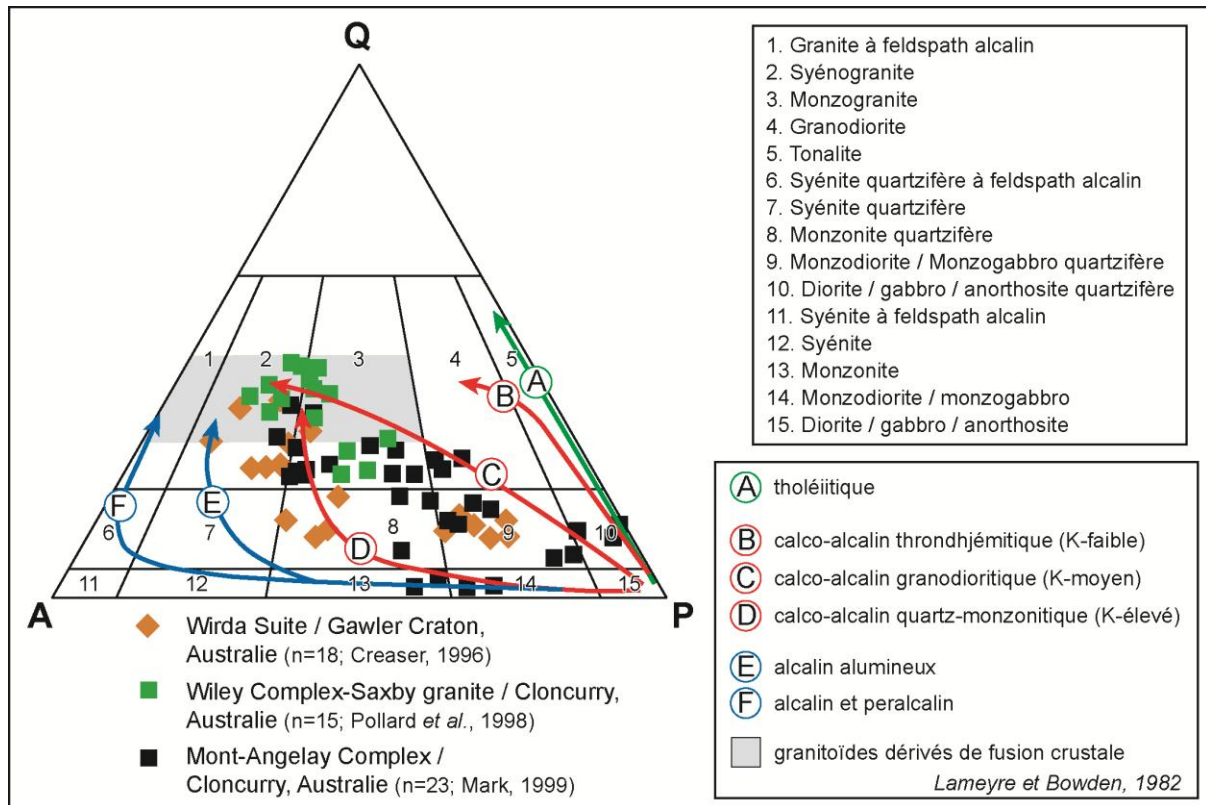


Figure 34. Échantillons d'intrusions associées aux IOCG reportés sur le diagramme QAP de Streckeisen avec les différentes suites granitiques de Lameyre et Bowden (1982). Les quantités modales observées des minéraux ont été utilisées. Il faut noter que l'albite se trouve sur le pôle de gauche du triangle lorsque l'on utilise les quantités modale plutôt que normatives comme pour les figures 31 et 32. Les lignées des suites granitiques ont été tracées à partir de la figure originale (modifiée de Lameyre et Bowden, 1982).

En résumé, l'identification de zones de favorabilités pour les IOCG, basée sur la géochimie des intrusions, sera donc également propice à la découverte de systèmes de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins de la suite des monzodiorite - monzodiorite quartzifère - monzonite quartzifère - granite comme par exemple les gisements de Bingham (Utah), Almalyk (Ouzbékistan) ou Grasberg (Indonésie) tel que documenté dans la littérature (Jensen et Barton, 2000; Sillitoe, 2000).

6 METHODE DE TRAITEMENT DE LA BANQUE LITHOGEOCHIMIQUE DES INTRUSIONS DE LA SOUS-PROVINCE DE L'ABITIBI POUR LE POTENTIEL EN IOCG ET PORPHYRES A CU-AU ALCALINS-CALCIQUES POTASSIQUES OU LEGEREMENT ALCALINS

La méthode de caractérisation des intrusions associées aux minéralisations de type IOCG et de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins, développée dans le cadre de cette étude, a été appliquée aux intrusions de la Sous-province de l'Abitibi dans le but de localiser les zones de favorabilité. Le traitement, effectué avec l'aide de la version 1.0 du logiciel Lithomodeleur du Consorem a été appliqué à la banque de données lithogéochimiques Consorem de l'Abitibi (analyses provenant des partenaires et du SIGEOM, MRNF, 2009). Cette banque de données contient plus de 24 600 analyses de roches intrusives.

La première étape du traitement consiste à extraire seulement les intrusions de compositions intermédiaires et felsiques ($\text{SiO}_2 > 52\%$) puisque les intrusions mafiques associées aux minéralisations recherchées ne sont généralement pas décrites dans la littérature. Le résultat de cette requête, qui peut être effectuée dans la base de données Access ou directement dans un SIRS (ex : MapInfo), montre que la banque contient 14 132 analyses d'intrusions de composition intermédiaire ou felsique (**Figure 35**). Toutefois, peu ou pas d'analyses sont disponibles pour un grand secteur de la portion sud-est de l'Abitibi (Massif de Lapparent et entre Val-d'Or et Quévillon). Pourtant, ce secteur est constitué de gneiss tonalitiques qui sont recoupés par des intrusions felsiques plus jeunes, un contexte favorable aux minéralisations IOCG.

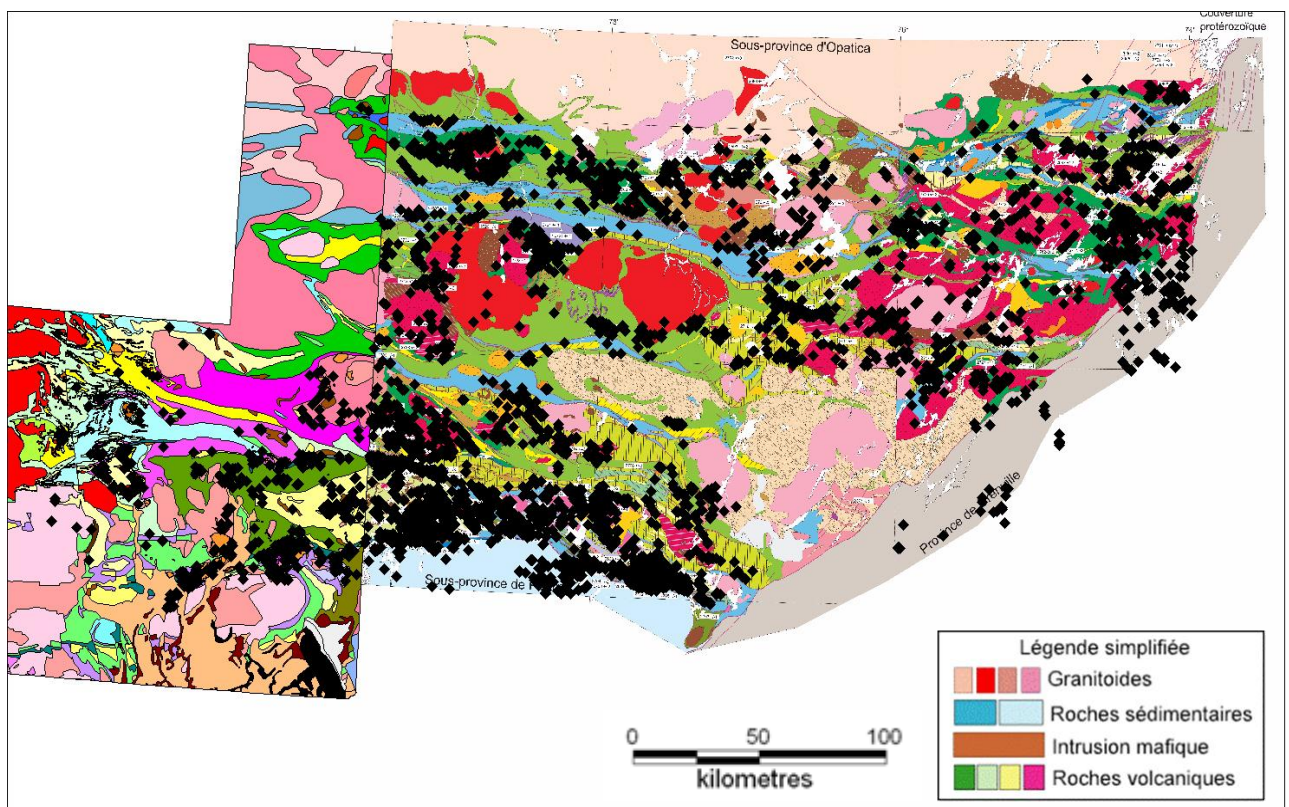


Figure 35. Analyses des intrusions de composition intermédiaires ou felsiques ($\text{SiO}_2 > 52\%$; $n = 14\ 132$) contenue dans la banque de données lithogéochimiques Consorem de la Sous-province de l'Abitibi (données des partenaires et du SIGEOM, MRNF, 2009). Géologie de Goutier et Melançon (2010) pour le Québec et de la Commission géologique de l'Ontario (OGS, 2005).

L'étape 2 du traitement consiste à extraire les roches calco-alkalines potassiques et shoshonitiques en utilisant le diagramme de quantification du caractère potassique de Peccerillo et Taylor (1976). L'ensemble des intrusions intermédiaires et felsiques sont présentées à la **Figure 36**. On peut voir sur cette figure que les caractères tholéitique et calco-alkalin dominant pour les intrusions de l'Abitibi mais qu'il y a tout de même une bonne quantité de roches calco-alkalines potassiques et shoshonitiques. Avec l'outil Lithomodeleur, il est facile de générer une nouvelle colonne dans notre base de données. Cette colonne contiendra l'appartenance à un des quatre différents champs du diagramme (tholéitique, calco-alkalin, calco-alkalin potassique ou shoshonitique) pour chaque échantillon. Il est donc facile par la suite d'extraire seulement les 2 358 échantillons appartenant aux champs calco-alkalin potassique ou shoshonitique (**Figure 37**).

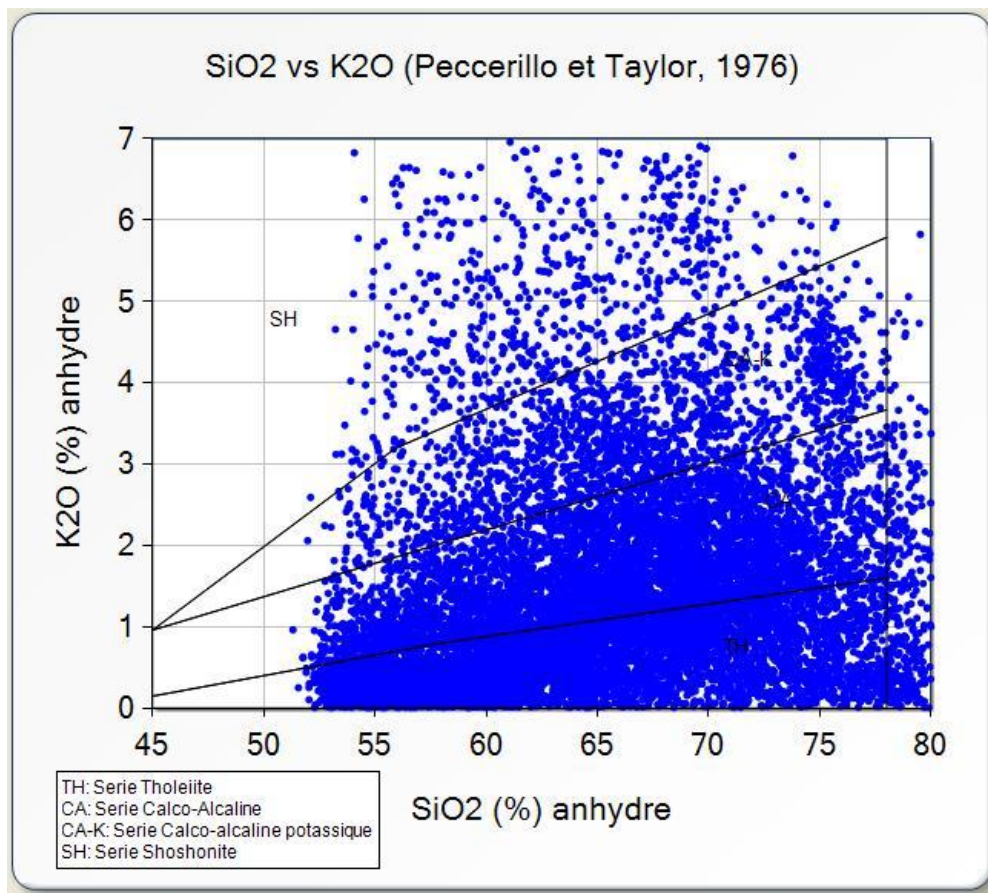


Figure 36. Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976) pour le caractère potassique de l'ensemble des analyses de plutons intermédiaires et felsiques de l'Abitibi (n=14 132).

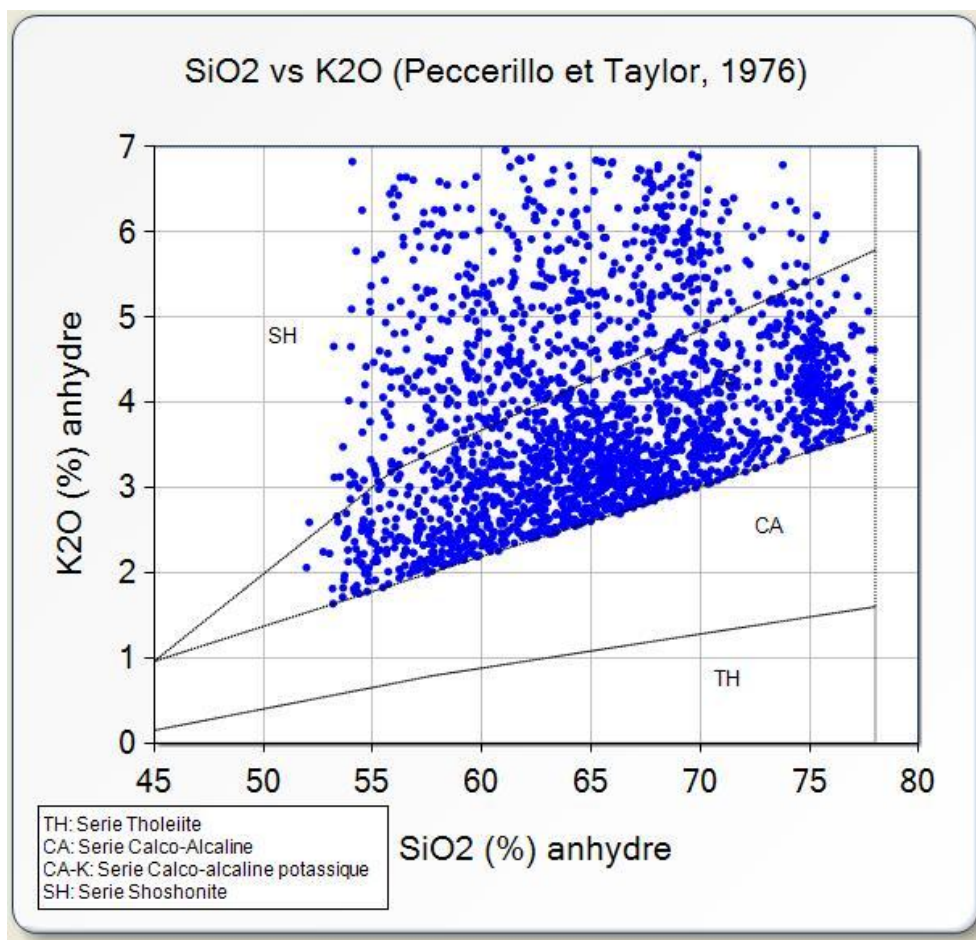


Figure 37. Sélection des analyses de plutons intermédiaires et felsiques calco-alkalins potassiques et shoshonitiques de l'Abitibi selon leur contenu en K₂O et SiO₂ (n=2 358). Diagramme de Peccerillo et Taylor (1976).

Cette sélection d'analyses est par la suite reportée sur le diagramme de classification de Middlemost (1985) à l'étape 3 du traitement afin d'isoler les bonnes compositions d'intrusions (**Figure 38**). Avec l'aide de Lithomodeleur, il est facile d'extraire les analyses de composition de monzodiorite, monzonite, monzonite quartzifère et granite et d'ajouter un code de couleur (**Figure 39**).

Cependant, tel que discuté dans la section précédente, le champ monzonite de ce diagramme contient en fait les vrais monzonites (partie supérieure) mais aussi les monzodiorites quartzifères (partie inférieure). Il faut donc retirer de la base de données les monzonites qui sont associées aux syénites. Une teneur de plus de 8,5 % K₂O+Na₂O a été choisie comme limite pour cette division (**Figure 40**). Le nom de « monzonite » sera donc utilisé dans les légendes associées aux différents graphiques même si ces roches sont probablement plutôt des monzodiorites quartzifères. Les granites subalcalins contenant plus de 78 % SiO₂ sont également retirés de la banque d'analyses favorables (**Figure 40**). Il est à souligner que les champs monzodiorite, monzonite et granite sont maintenant divisés dans la version 2.0 de Lithomodeleur afin de pouvoir sélectionner directement les bonnes compositions.

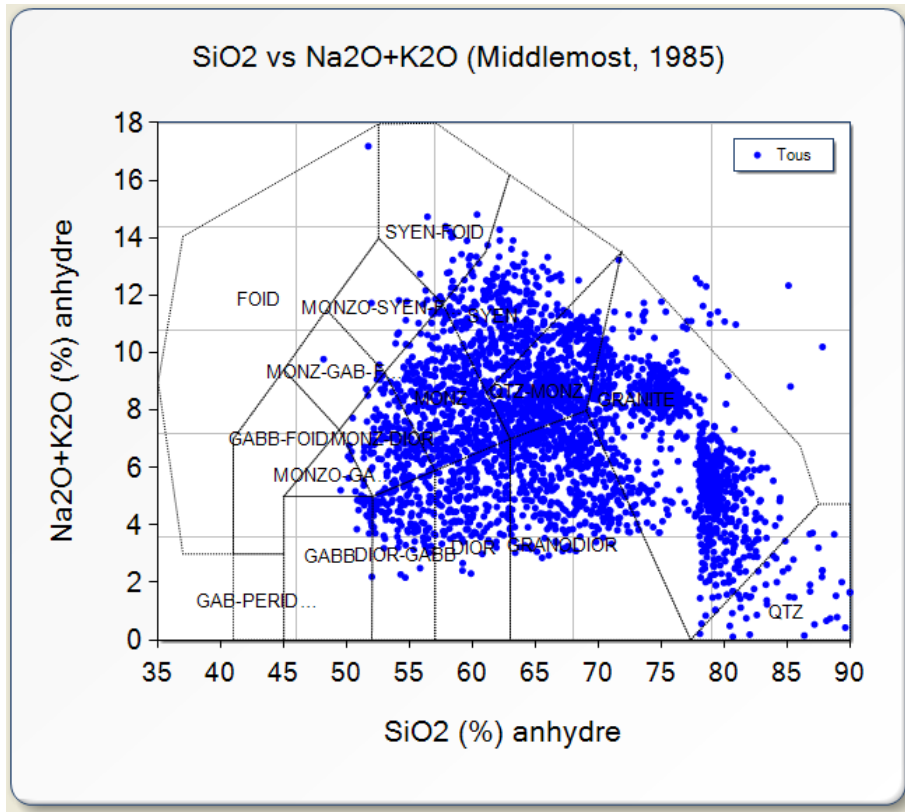


Figure 38. Diagramme de classification de Middlemost (1985) pour les roches plutoniques intermédiaires et felsiques calco-alcalins potassiques et shoshonitiques de l'Abitibi (n=2 358).

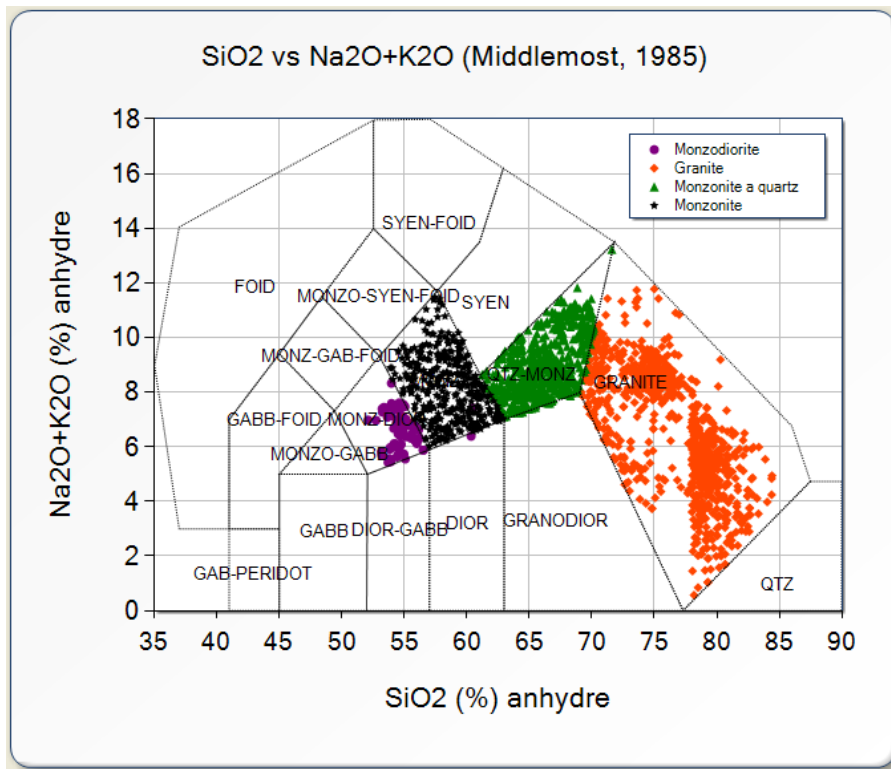


Figure 39. Extraction de la banque de données des compositions favorables aux IOCG et porphyres à Cu-Au calco-alcalins potassiques ou légèrement alcalins. Les compositions choisies à partir des

champs du diagramme de Middlemost (1985) sont les monzodiorites, monzonites, monzonites quartzifères et granites (n=1 940).

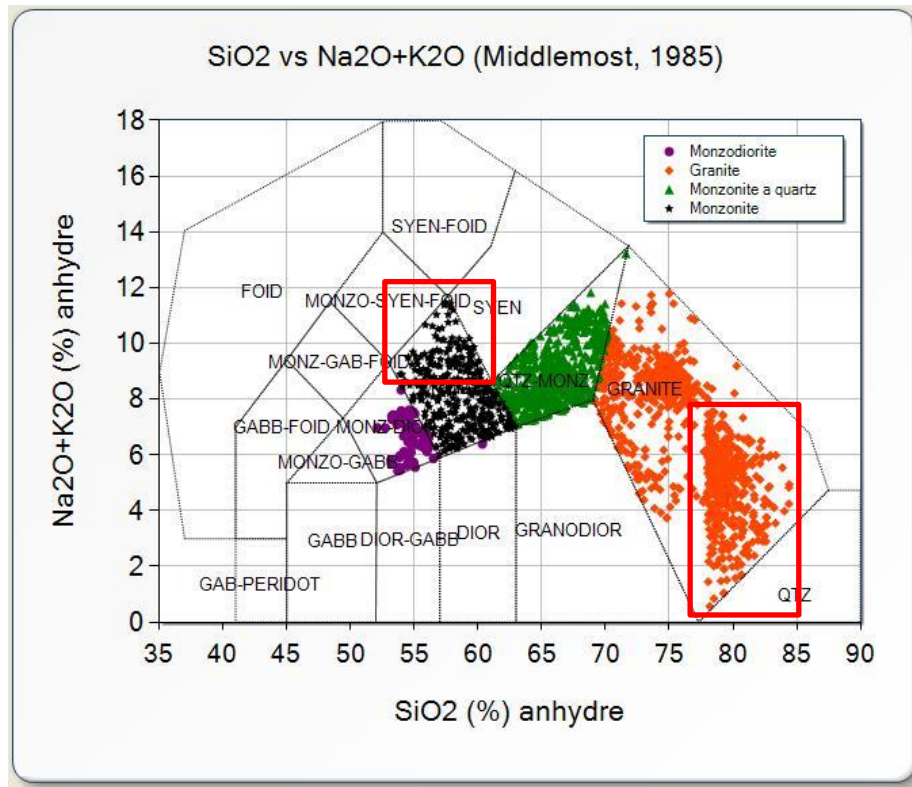


Figure 40. Élimination de la banque de données des monzonites qui contiennent plus de 8,5 % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ et des granites subcalcaires contenant plus de 78 % SiO_2 (cadres rouges).

L'étape 4 consiste à utiliser le diagramme de Frost *et al.* (2001) pour retirer les intrusions calciques et les granites calciques alcalins basé sur le contenu de $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}$ vs SiO_2 (Figure 41).

L'étape 5 consiste à reporter les analyses sur le diagramme de Pearce *et al.* (1984) pour éliminer les intrusions syn-déformation et garder les intrusions d'arc volcanique et intra-plaques (Figure 42). On voit sur ce graphique que, tel qu'anticipé, l'Abitibi contient presque exclusivement des plutons d'arc volcaniques et pas de plutons intra-plaques.

Enfin la 6e et dernière étape consiste à éliminer les roches trop altérées à l'aide du diagramme de Large *et al.* (2001) modifié par le Consorem (Figure 43). Cette étape aurait également pu être effectuée au tout début du traitement.

Suite à ce traitement en six étapes, 882 analyses provenant de plutons intermédiaires ou felsiques de l'Abitibi possèdent des caractéristiques géochimiques favorables aux minéralisations de types IOCG ou porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins. Les 882 analyses sélectionnées sont montrés sur les quatre principaux graphiques utilisés pour la caractérisation lithogéochimique à la Figure 44.

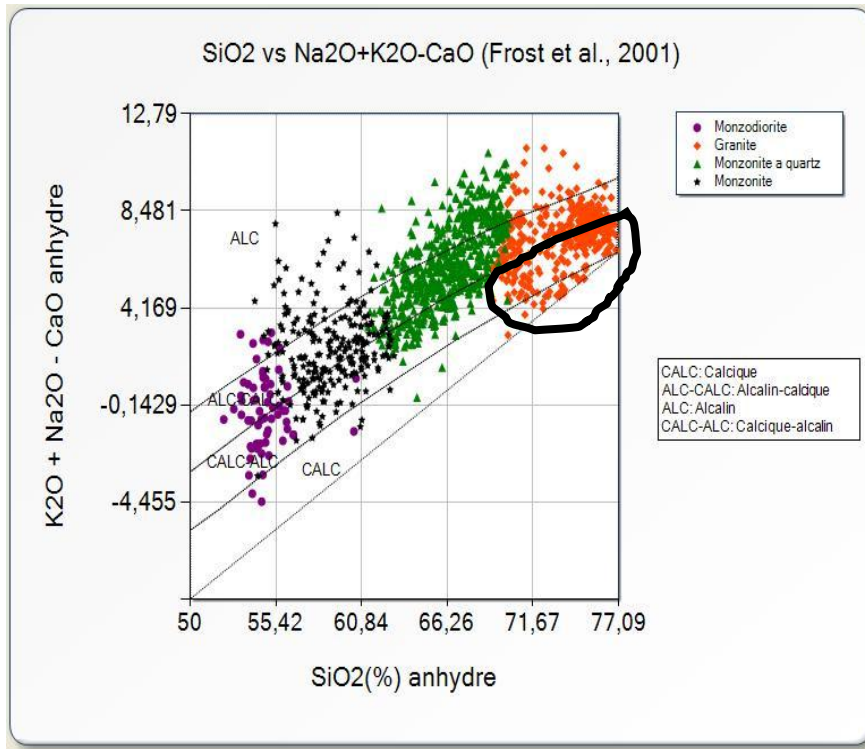


Figure 41. Diagramme de classification selon le caractère alcalin des roches (Frost *et al.*, 2001) pour les intrusions sélectionnées. Le diagramme est utilisé pour éliminer toutes les intrusions calciques ainsi que les granites calciques-alcalins qui ne sont pas des compositions favorables aux minéralisations recherchées (cercle noir).

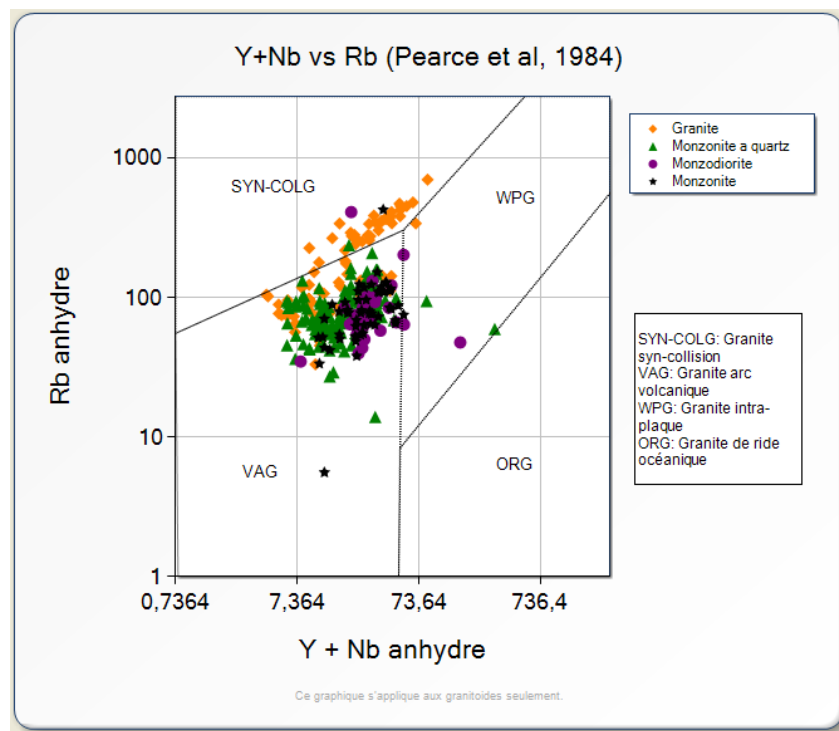


Figure 42. Diagramme de discrimination de l'environnement tectonique pour les intrusions sélectionnées (Pearce *et al.*, 1984). Le diagramme est utilisé pour éliminer les intrusions syn-collision qui sont non-favorables.

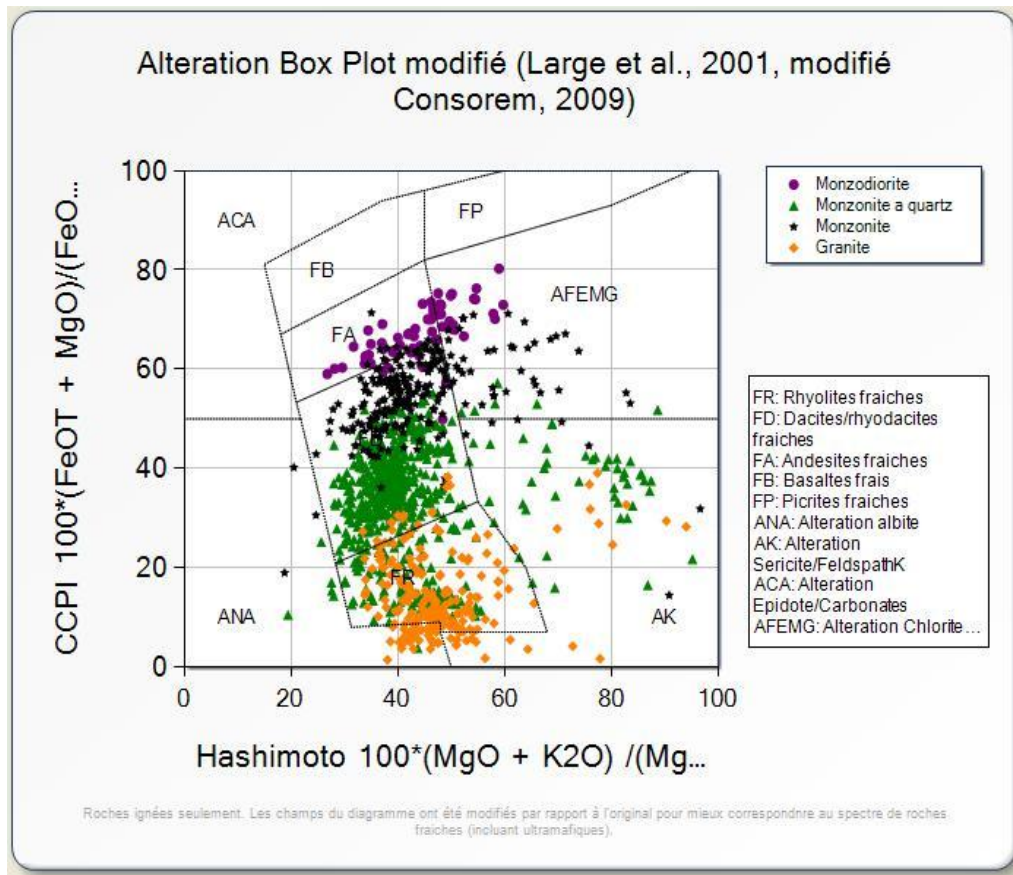


Figure 43. Diagramme discriminant pour l'altération de Large *et al.* (2001) modifié par le Consorem (2009) et utilisé pour éliminer les roches altérées de la banque de données.

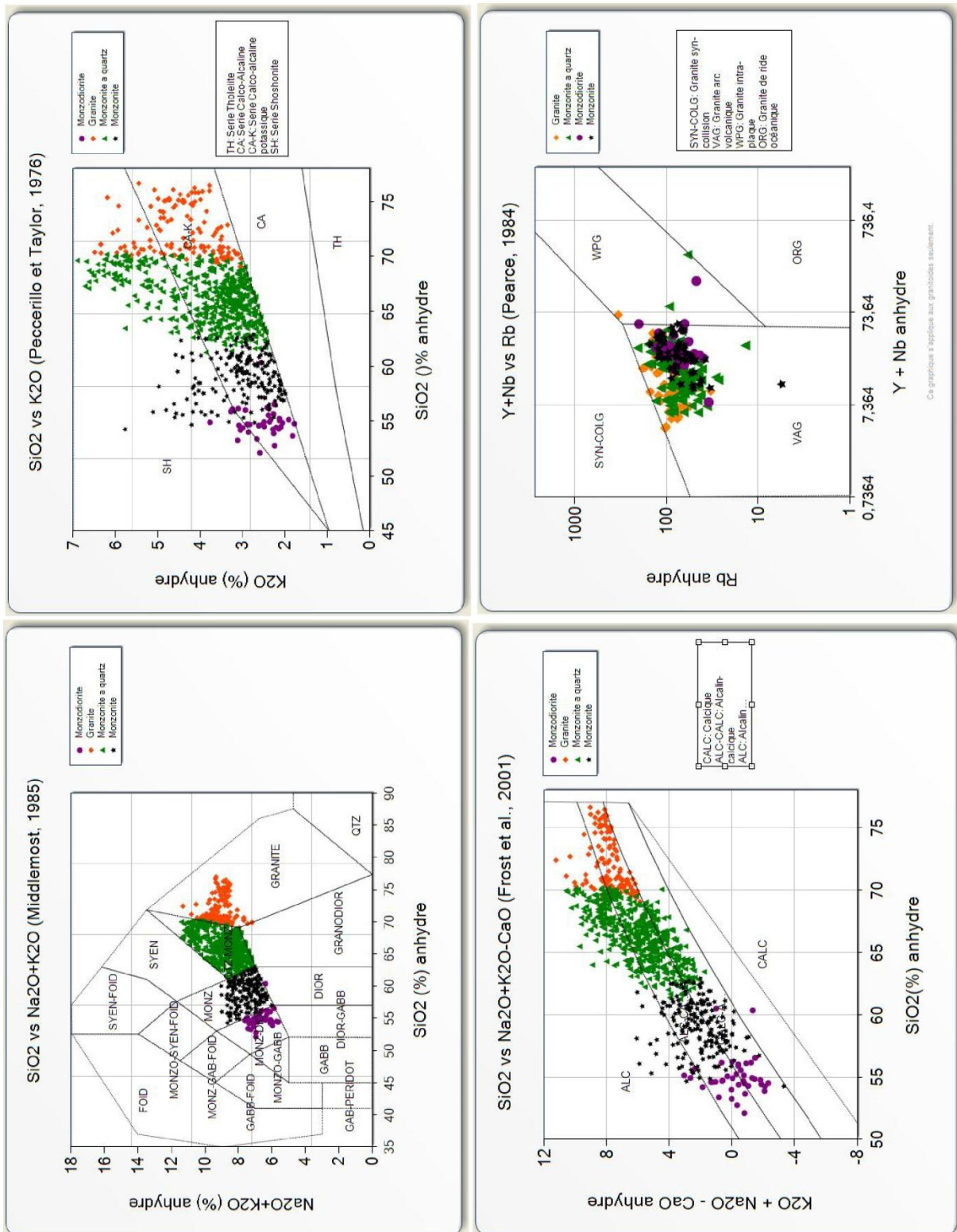


Figure 44. Figure synthèse des 882 analyses identifiées comme favorables aux minéralisations de types fer-oxides polymétalliques ou porphyres à Cu-Au calco-alcalins potassiques ou légèrement alcalins de l'Abitibi. L'identification des analyses favorables est effectuée avec l'aide des diagrammes de composition de Middlemost (1985), du caractère alcalin de Frost *et al.* (2001), du caractère potassique de Peccerillo et Taylor (1976) et du diagramme de discrimination de l'environnement tectonique de Pearce *et al.* (1984).

La distribution spatiale de ces analyses à l'échelle de la Sous-province de l'Abitibi montre que les secteurs favorables se retrouvent aussi bien dans le nord que le sud de la région (**Figure 45**). Il y a cependant dans la zone sud une bonne proportion des « monzonites » (monzodiorites quartzifère) et monzonites quartzifères qui sont plutôt des dykes associés aux porphyres de syénites, de granodiorite ou de diorite le long des deux principaux couloirs de déformation de Destor-Porcupine et de Cadillac-Larder Lake. Ces caractéristiques (dykes plutôt que pluton, associés aux porphyres) sont des contextes propices aux systèmes de porphyres orogéniques calco-alcalins potassiques ou alcalins (p.e. camps de Kirkland Lake, Larder Lake, Timmins, Malartic) plutôt que favorable aux fer-oxides polymétalliques. Ces minéralisations, par rapport aux IOCG, sont plus riches en or et sont directement associées aux roches porphyriques. Une certaine confusion entre les deux types de minéralisation peut cependant survenir puisque les porphyres les plus alcalins (syénite), tout comme les IOCG, peuvent posséder une altération à oxydes de fer, comme par exemple pour le gisement Upper Beaver près de Kirkland Lake (8,31 g/t Au, 1,03 % Cu; Kontak *et al.*, 2008). La **Figure 45** montre donc, comme mentionné auparavant, des zones de favorabilité à la fois pour les gisements de IOCG et de porphyres alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins. Les zones de favorabilité plus spécifiques aux IOCG seront décrites dans la section suivante.

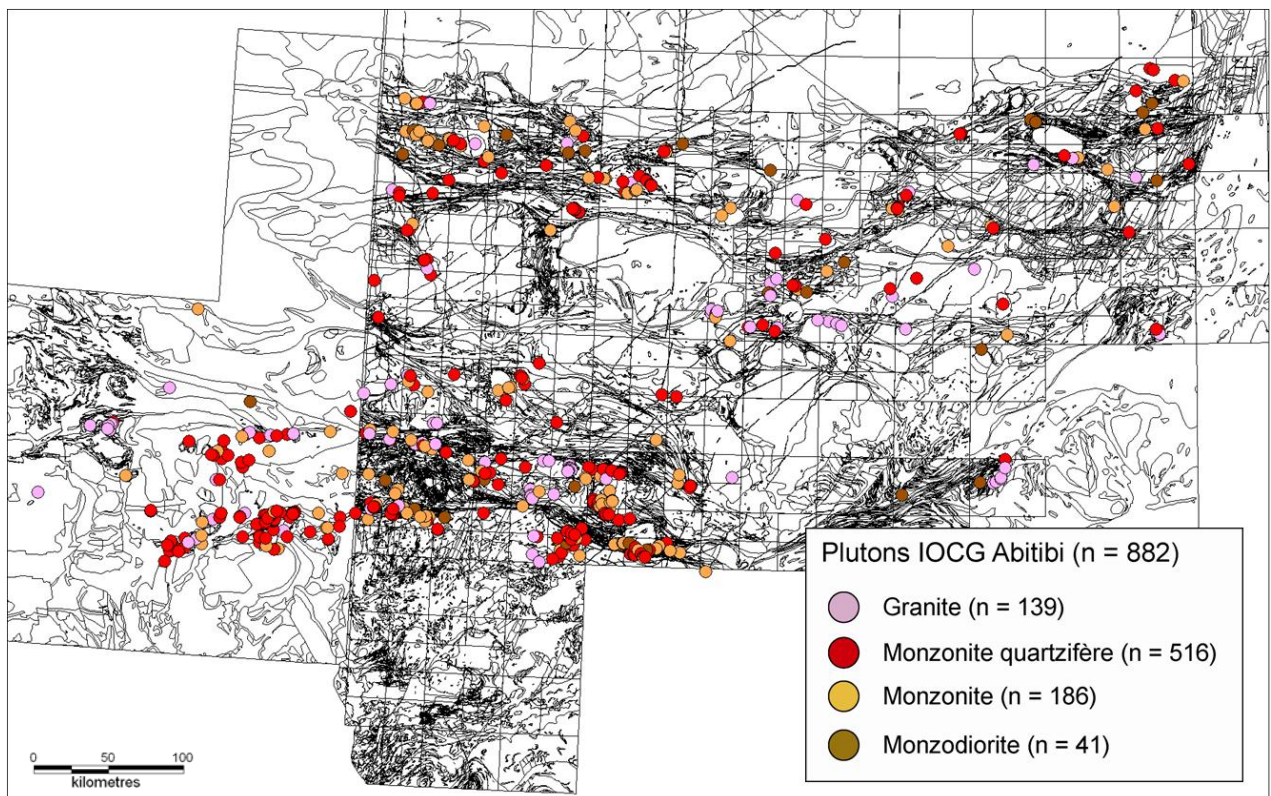


Figure 45. Distribution spatiale des analyses considérés favorables aux minéralisations d'IOCG ou de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins pour l'Abitibi selon la méthode de discrimination lithogéochimique des intrusions intermédiaires à felsiques.

7 FAVORABILITE POUR LES MINERALISATIONS D'IOCG ET PORPHYRE A CU-AU DE L'ABITIBI

L'analyse finale pour définir la favorabilité pour les minéralisations d'IOCG et de porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins de l'Abitibi a été réalisé en utilisant comme point de départ la localisation des analyses d'intrusions favorables décrite à la section précédente. Ces analyses favorables ont par la suite été misent en relation avec plusieurs autres couches d'informations géoréférencées. L'observation de l'ensemble des critères a finalement permis de localiser les plutons ou certaines parties de plutons qui sont interprétés comme étant les plus favorables à être associés à des minéralisations de fer-oxydes polymétalliques. Un effort a été fait lors de la sélection finale pour tenter d'éliminer les secteurs qui semblaient plutôt favorables à des minéralisations de type porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins (surtout les grands couloirs de déformation). Les plutons retenus devraient donc être associés à des IOCG sans par contre qu'une association avec des minéralisations de type porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques ou légèrement alcalins ne soit totalement exclue.

Les informations utilisées pour localiser les plutons sont :

- 1) Carte géologique géoréférencée de la portion québécoise de l'Abitibi (Goutier et Melançon, 2010) et la géologie de la Commission Géologique de l'Ontario pour la portion ontarienne (OGS, 2005).
- 2) La carte du champ magnétique de l'Abitibi (fournie par Xstrata).
- 3) Les failles et linéaments (Daigneault *et al.*, 2004; SIGEOM, MRNF, 2009 modifié par Consorem).
- 4) La présence de magnétite et/ou d'hématite observées en affleurement ou en carotte (partenaires et SIGEOM, MRNF, 2009).
- 5) Les gains de masse en sodium et potassium dans les volcanites calculés par la méthode de modélisation des précurseurs du CONSOREM à partir de la banque de données Consorem de l'Abitibi (partenaires et SIGEOM, MRNF, 2009).
- 6) Carte des gîtes et indices (SIGEOM, MRNF, 2009).

C'est le recoupement entre l'ensemble de ces critères qui a permis d'identifier les plutons favorables. Les informations relatives aux plutons identifiés (nom, âge, composition, etc.) proviennent de la base de données des plutons de l'Abitibi du Consorem (projet 2006-02).

Avant de commencer à identifier les secteurs cibles, il a été nécessaire de visualiser le genre de contexte géologique et de géométrie qu'il fallait rechercher. Les exemples mondiaux comme le district de Candelaria au Chili (**Figure 13**, Marschik et Fontboté, 2001) ou de Moonta-Wallaro et Mount Woods en Australie (**Figures 14-15**, Skirrow *et al.*, 2007) montrent qu'il faut rechercher :

- 1) Des intrusions tardi à post tectoniques plurikilométriques (typiquement 2 à 10 kilomètres de diamètre) qui possèdent les bonnes compositions (monzodiorite, monzodiorite quartzifère, monzonite quartzifère, granite);
- 2) Des zones d'altération sodique également plurikilométriques;
- 3) Des zones d'altération potassique kilométriques directement associées aux gisements;

4) Des zones de failles connectées aux intrusions. De plus la présence de magnétite et d'hématite dans les zones d'altération et de minéralisations fait en sorte que les intrusions et les zones de failles favorables sont la plupart du temps modérément à fortement magnétique (Williams *et al.*, 2005; Corriveau, 2007).

Les secteurs de Selbaie-Matagami et de Lebel-sur-Quévillon servent d'exemples pour illustrer la démarche d'analyse qui a été effectuée dans le but de localiser les plutons favorables. Le premier critère est la composition favorable des intrusions qui est déterminée par la présence des analyses lithogéochimiques d'intrusions favorables et la géologie. Par exemple, basé sur les analyses et la géologie, il est possible de discriminer les plutons de Turgeon, Grasset, Orvilliers et Cavalier du secteur de Selbaie-Matagami puisqu'ils contiennent des analyses favorables et qu'ils sont identifiés comme plutôt tardifs sur la carte géologique de Goutier et Melançon (2010; **Figure 46**). Ces plutons favorables sont différents des plutons synvolcaniques (analyses identifiées par un losange noir; Brouillan, Mistaouac, Mclvor) et des syénites (cercle bleu; Douay) qui ne sont pas favorables aux IOCG.

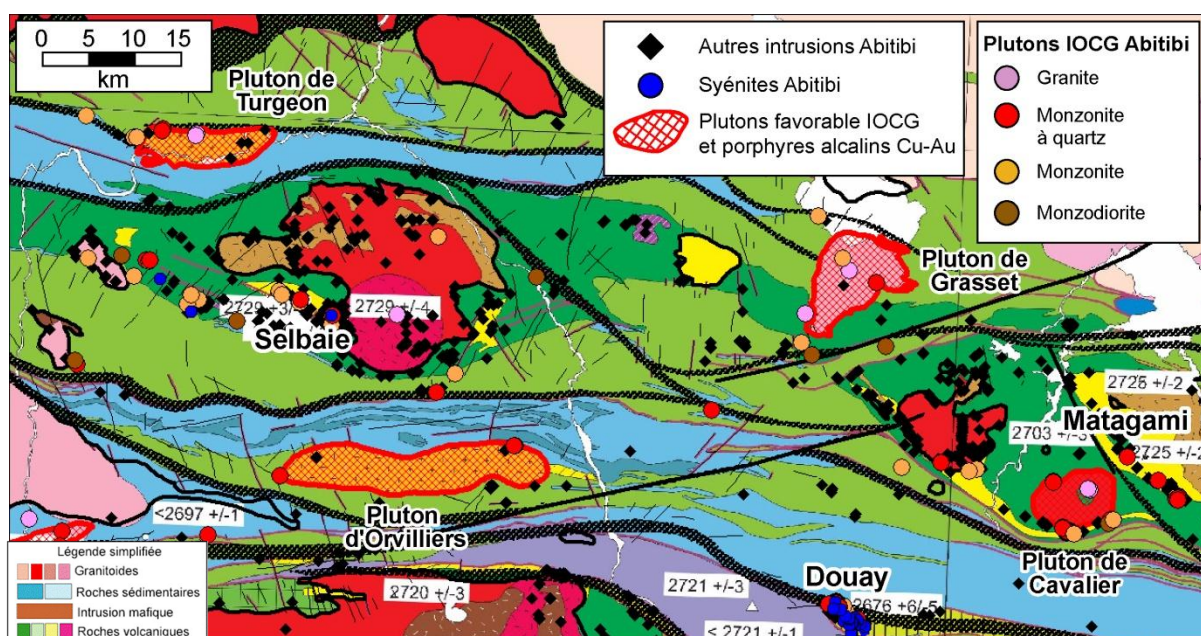


Figure 46. Carte du secteur de Selbaie-Matagami montrant la géologie (Goutier et Melançon, 2010), les failles et couloirs de déformation (Daigneault *et al.*, 2004) et la localisation des analyses lithogéochimiques des intrusions. Dans ce secteur, les plutons de Turgeon, Orvilliers, Grasset et Cavalier sont jugés favorables aux IOCG basé sur leurs compositions déterminées par la lithogéochimie (monzodiorite, « monzonite », monzonite quartzifère, granite) ainsi que leur nature tardive. Ces plutons se distinguent notamment des plutons synvolcaniques associés aux gisements de Selbaie et Matagami et des syénites du gisement de Douay.

L'analyse peut aussi être faite en utilisant la carte magnétique de l'Abitibi comme couche de fond en relation avec les analyses favorables, les failles et la présence de magnétite ou d'hématite comme pour l'exemple du secteur de Lebel-sur-Quévillon (**Figure 47**). Dans ce secteur, plusieurs plutons plurikilométriques (Comtois, Rapide des Cèdres, Lequev, Kamichigama, Quever, Coribelle) possèdent les bonnes compositions géochimiques et une signature de haut magnétique sur leur pourtour qui peut être interprétée comme étant des zones d'altérations à magnétite. On peut également observer la présence de magnétite ou d'hématite près des plutons, comme pour les

plutons de Comtois et de Rapide des Cèdres. Enfin, la présence de magnétite ou d'hématite le long des failles est également un critère très favorable.

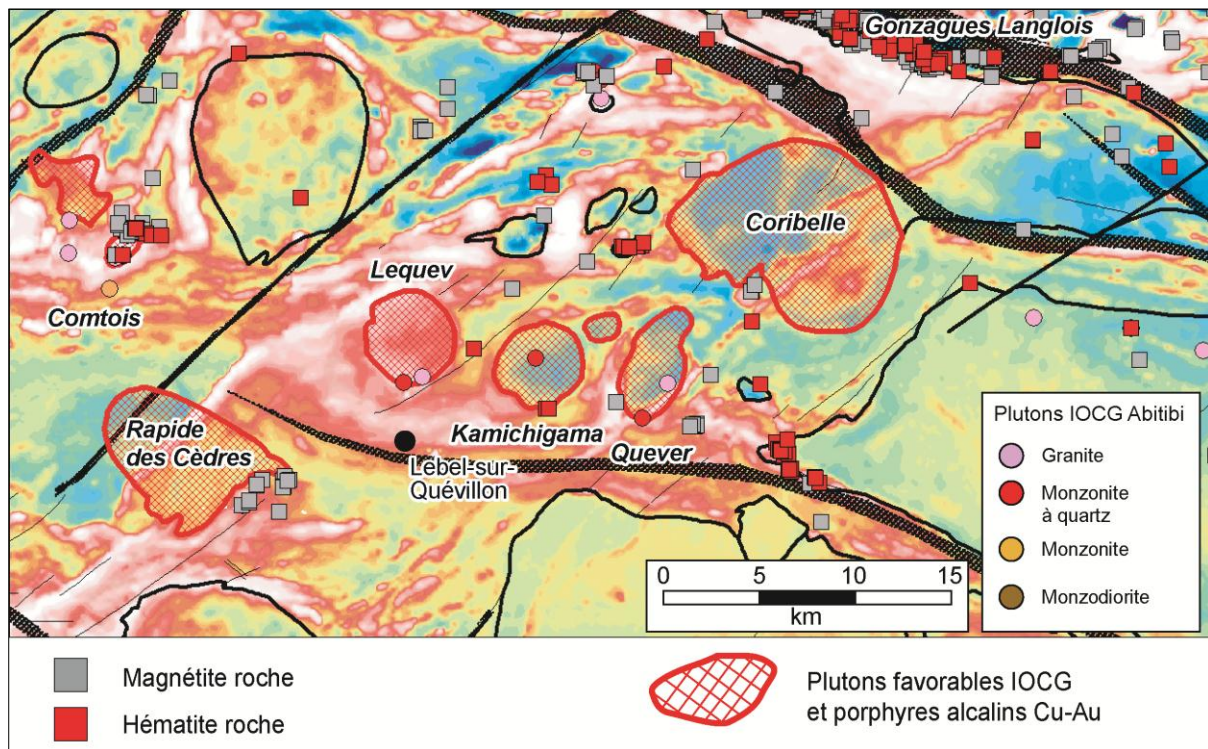


Figure 47. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan (étalement de bleu pâle à rouge blanchâtre en fonction de l'intensité magnétique) et la présence de magnétite et d'hématite. La présence de magnétite et d'hématite en affleurement ou en carotte est identifiée respectivement par les carrés gris et les carrés rouges. Les analyses avec les compositions favorables sont aussi montrées. On observe que les plutons favorables sont associés à des signatures de haut magnétisme sur leur pourtour et à des zones à magnétites plurikilométriques.

Le gain en sodium dans les roches volcaniques calculé par la méthode de modélisation des précurseurs est par la suite superposé aux couches d'informations déjà décrites (**Figure 48**). Sur cette carte, on peut observer une coïncidence spatiale entre des zones à magnétite ou hématite et des gains en sodium à l'échelle plurikilométrique. Ces secteurs peuvent être interprétés comme représentant les zones d'altérations sodiques ou sodi-calciques associées au système minéralisateur (**Figure 20**) ce qui souligne les secteurs particulièrement intéressants, comme les plutons de Comtois et de Rapide des Cèdres.

Il existe plusieurs gîtes et indices de Cu, Au-Cu, Au-Cu-Ag dans ce secteur (**Figure 49**). Bien que ces indices ne sont pas nécessairement tous de types IOCG, plusieurs méritent d'être revisités en ayant un modèle de minéralisation IOCG en tête. Par exemple l'indice de Lac Quévillon Nord est décrit comme une minéralisation en amas, filonnets ou disséminations de chalcopryrite (1,6 % Cu et 0,8 g/t Au) contenue dans une brèche métrique composée de calcite-quartz-épidote-chlorite-magnétite et chalcopryrite (**Figure 50**). La corrélation spatiale de cet indice à Cu-Au contenant de la chalcopryrite et de la magnétite avec les plutons de Lequev et Kamichigama et la bordure d'un haut magnétique en font un indice particulièrement intéressant.

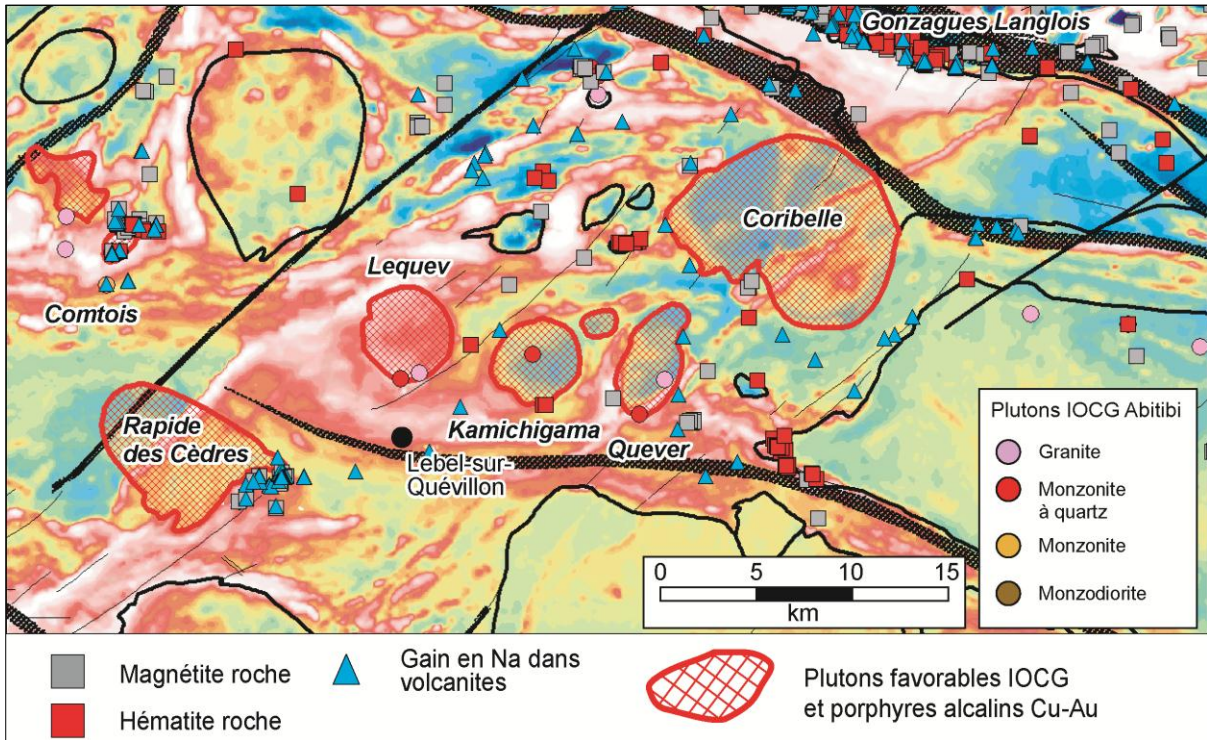


Figure 48. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et les gains en sodium dans les volcanites. La coïncidence spatiale entre la présence de magnétite ou d'hématite avec un gain en sodium peut être interprétée comme des zones d'altérations sodiques et sodi-calciques plurikilométriques associées aux systèmes minéralisateurs.

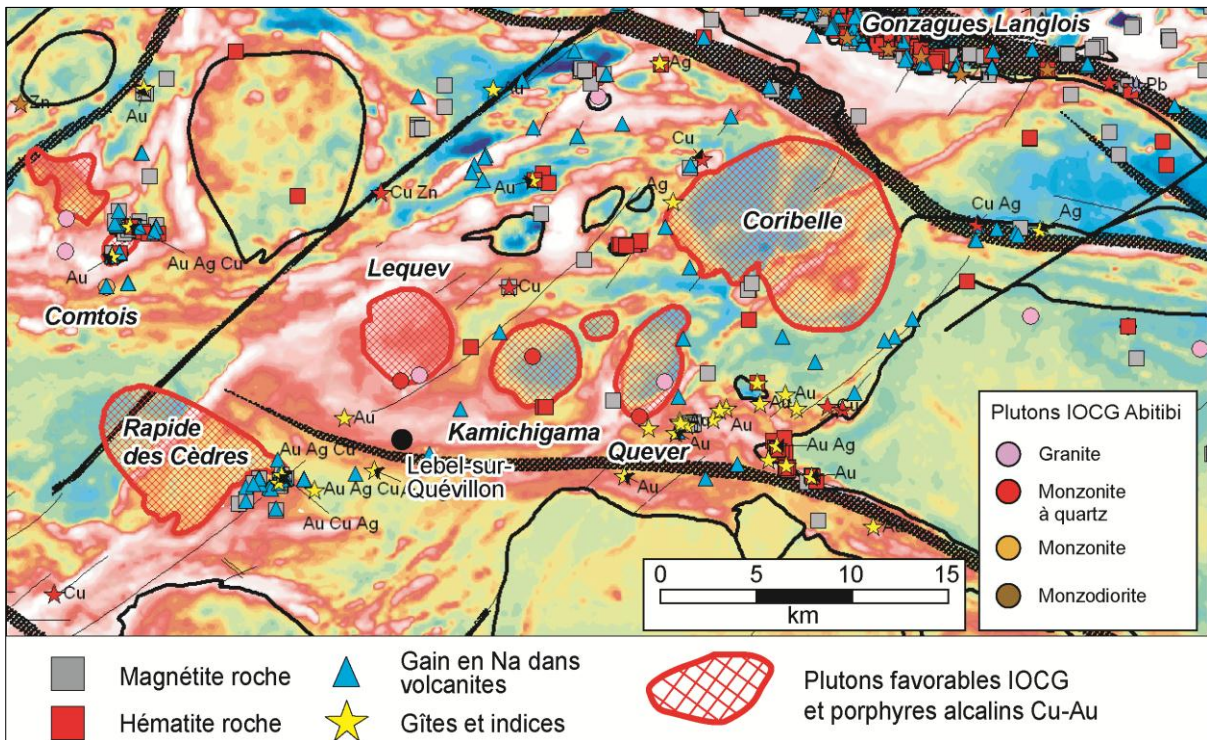


Figure 49. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et les gîtes et indices. Plusieurs des indices à Cu, Au-Cu ou Au-Cu-Ag sont spatialement associés aux zones à magnétite ou hématite avec gain en sodium.

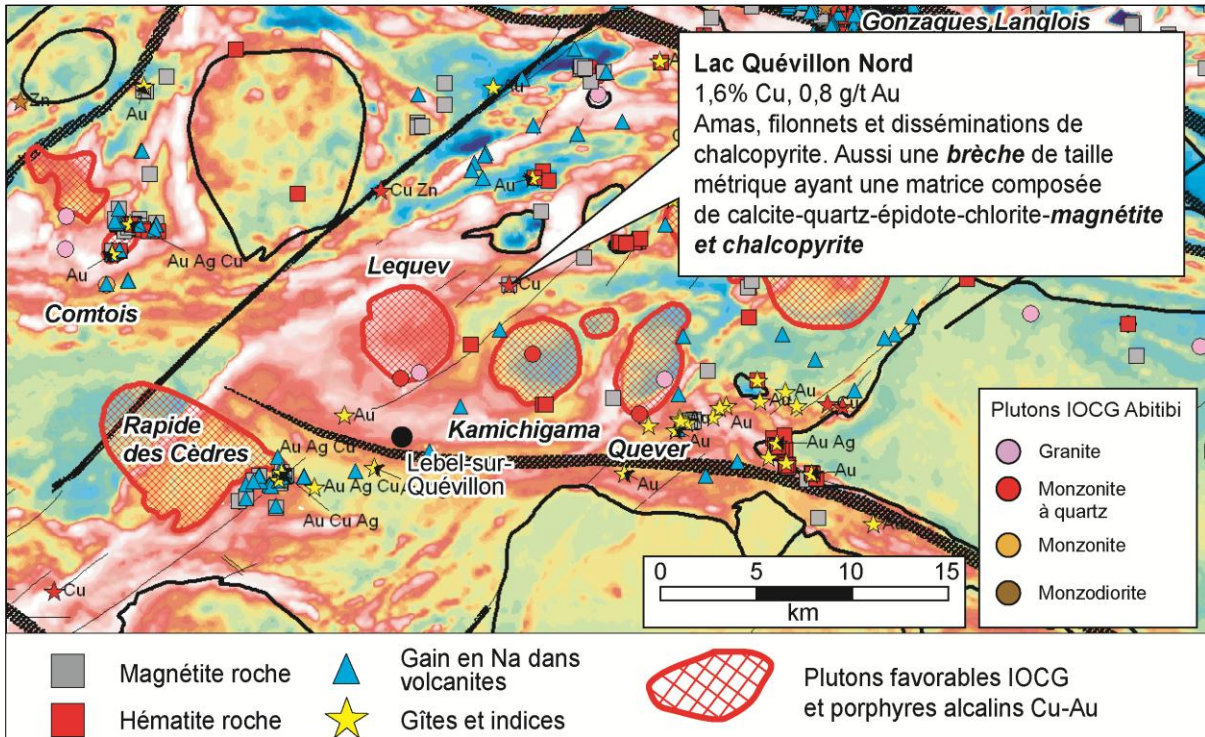


Figure 50. Carte du secteur de Lebel-sur-Quévillon avec la carte magnétique (Xstrata) en arrière-plan et l'indice de Lac Quévillon Nord. Cet indice à Cu-Au est particulièrement intéressant vu sa proximité avec les plutons de Lequev et Kamichigama et sa localisation sur la marge d'un haut magnétique.

Cette démarche a été reproduite à l'échelle de l'Abitibi, ce qui a conduit à l'identification de 33 plutons ou parties de plutons qui sont considérés comme étant favorables aux minéralisations de type fer-oxydes polymétalliques (**Figure 51**). Cette liste représente un minimum puisqu'il y a beaucoup de plutons qui ne sont pas ou très peu échantillonnés et que la démarche repose sur la présence de données ponctuelles (analyses lithogéochimiques, présence de magnétite et hématite, gîtes et indices). La présence de ces critères est donc favorable alors que leur absence peut tout simplement représenter l'absence de données au départ.

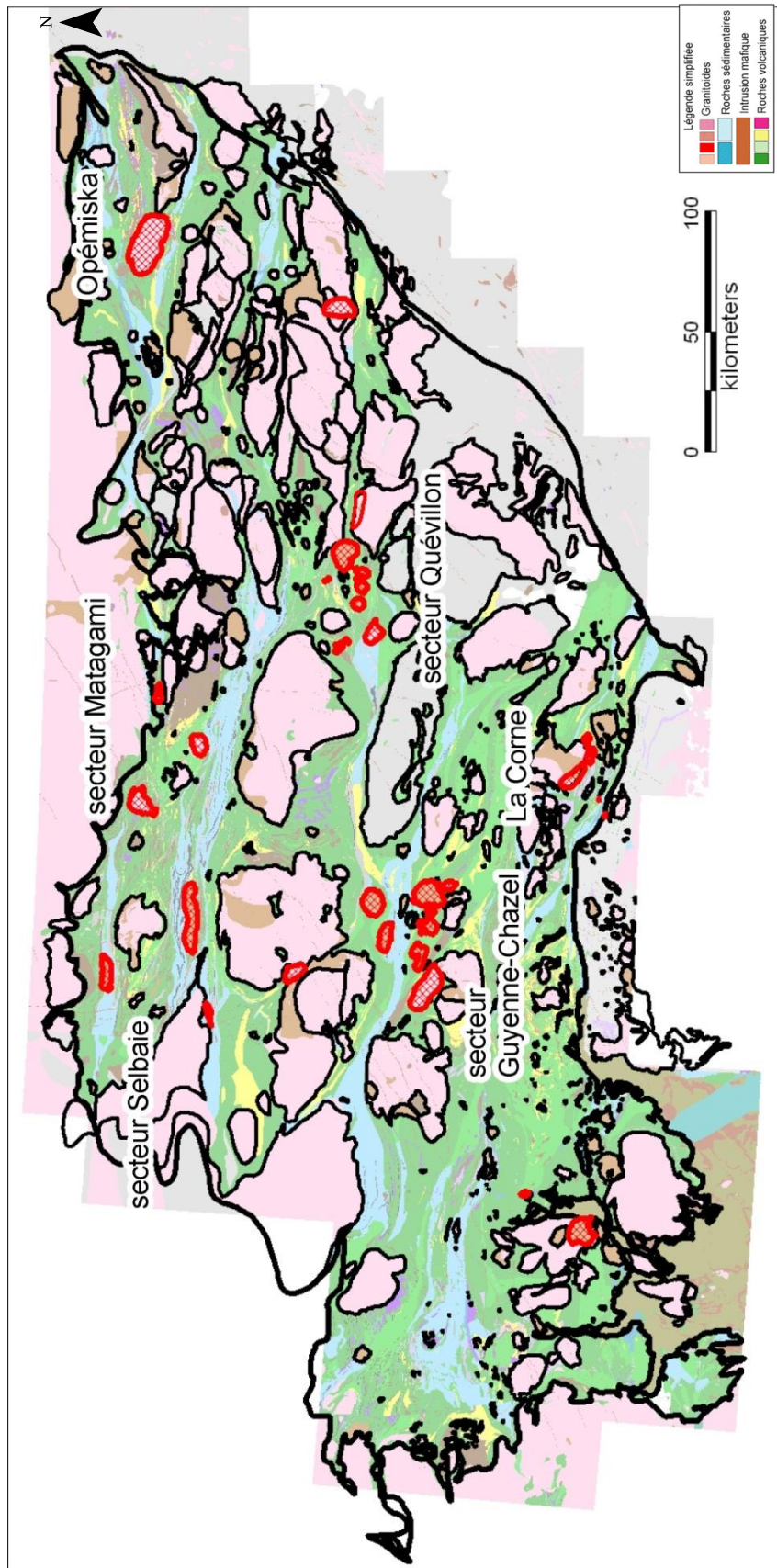


Figure 51. Carte de l'Abitibi avec les 33 plutons ou parties de plutons qui sont considérés comme favorables aux minéralisations IOCG (géologie modifiée du Sigeom, MRNF, 2009 et OGS, 2005). Les secteurs de Guyenne-Chazel et de Quévillon possèdent une bonne concentration de ces plutons et sont donc des secteurs prioritaires.

8 CONCLUSION

La reclassification récente des gisements à fer-oxydes en un sous-groupe d'IOCG *sensu stricto* et d'autres sous-groupes apparentés a permis de mieux cerner et de réduire les caractéristiques associées aux IOCG *sensu stricto*. Cette définition plus restrictive permet, au contraire des classifications antérieures, de voir une certaine homogénéité pour ce groupe. La comparaison des IOCG *sensu stricto* avec les porphyres à Cu-Au alcalins-calciques potassiques à légèrement alcalins montre un lien de parenté évident mais il en demeure que certaines caractéristiques, notamment en ce qui a trait à la géométrie des intrusions, à l'altération et aux minéralisations, permettent de les différencier. L'élément clé qui explique ces différences semble être la profondeur de mise en place des intrusions. Ce facteur a des conséquences sur la typologie des minéralisations qui sont plutôt sous forme de brèches et veines à magnétite-hématite avec un fort contrôle structural pour les IOCG et plutôt sous forme de stockwerk à quartz-pyrite et de disséminations pour les porphyres. De plus les intrusions temporellement et génétiquement associées aux IOCG ne sont ni altérées ni minéralisées aux contraires des porphyres. Un tableau de comparaisons entre les IOCG *sensu stricto* et les porphyres à Cu-Au alcalins a été développé dans le cadre de ce projet et peut être utilisé comme guide de discrimination et comme outil en exploration.

La présente étude montre que l'utilisation des caractéristiques géochimiques des plutons génétiquement associés aux gisements d'IOCG *sensu stricto* est un outil d'exploration utilisable à l'échelle régionale. Basé sur une compilation d'analyses de référence de la littérature provenant d'intrusions intermédiaires-felsiques associées aux IOCG *sensu stricto*, il est démontré que les monzodiorites, monzodiorites quartzifères, monzonites quartzifères et certains granites sont favorables à la présence de minéralisations d'IOCG ou de porphyres à Cu-Au. Cette suite intrusive est d'affinités calco-alcaline potassique (CA-K) ou shoshonitique selon le contenu en potassium et alcaline-calcique ou légèrement alcaline selon le contenu en alcalis.

Une méthodologie discriminante pour le traitement de vastes banques de données a été développée avec l'aide de la version 1.0 du logiciel Lithomodeleur développé par le CONSOREM (projet 2009-01). L'application de cette méthode aux données lithogéochimiques de la Sous-province de l'Abitibi a permis d'identifier au-delà de 800 analyses possédants les caractéristiques recherchées. L'analyse spatiale de la localisation de ces analyses lithogéochimiques favorables avec la géologie, la signature magnétique, les zones de failles, la présence de magnétite ou d'hématite, les gains en sodium ou potassium dans les volcanites et les gîtes et indices de Cu-Au a fait ressortir 33 plutons ou partie de plutons de l'Abitibi qui sont favorables aux minéralisations d'IOCG ou de porphyres à Cu-Au.

9 RÉFÉRENCES

- Bastrakov., E.N., Skirrow, R.G. et Davidson, G.J., 2007. Fluid Evolution and Origins of Iron Oxide Cu-Au Prospects in the Olympic Dam District, Gawler Craton, South Australia. *Economic Geology*, 102 : 1415-1440.
- Belperio, A., Flint, R. et Freeman, H., 2007. Prominent Hill: A Hematite-Dominated, Iron Oxide Copper-Gold System. *Economic Geology*, 102 : 1499-1510.
- Corriveau, L., 2007. Iron oxide copper-gold deposits: A Canadian perspective. *Dans*: Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Association Géologique du Canada, Division des Gîtes Minéraux, Publication Spéciale No. 5, pp. 307-328.
- Creaser, R.A., 1996. Petrogenesis of a Mesoproterozoic quartz latite-granitoid suite from the Roxby Downs area, South Australia. *Precambrian Research*, 79 : 371-394.
- Creaser, R.A. et Cooper, J.A., 1993. U-Pb Geochronology of Middle Proterozoic Felsic Magmatism Surrounding the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag and Moonta Cu-Au-Ag Deposits, South Australia. *Economic Geology*, 88 : 186-197.
- Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown, E.H., 2004. Abitibi greenstone belt plate tectonics; the diachronous history of arc development, accretion and collision. *Dans*: Eriksson, P.G., Alterman, W., Nelson, D.R., Mueller, W.U. et Catuneanu, O., eds., *The Precambrian Earth; tempos and events, Developments in Precambrian Geology 12*, Elsevier, pp. 88-103.
- de Haller, A. et Fontboté, L., 2009. The Raúl-Condestable Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Central Coast of Peru: Ore and Related Hydrothermal Alteration, Sulfur Isotopes, and Thermodynamic Constraints. *Economic Geology*, 104 : 365-384.
- Faure, S., 2000. Analyse des linéaments géophysiques en relation avec les minéralisations en or et métaux de base de l'Abitibi. Consorem, projet 2000-03A, 32 p.
https://consorem.uqac.ca//production_scien
- Ferris, G.M., Schwarz, M.P. et Heitersay, P., 2002. The Geological Framework, Distribution and Controls of Fe-Oxide Cu-Au Mineralisation in the Gawler Craton, South Australia: Part I – Geological and Tectonic Framework. *Dans*: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*: PGC Publishing, Adelaide, v. 2, pp. 9-31.
- Flint, R.B., 1993. Mesoproterozoic. *Dans*: Drexel, J.F., Preiss, W.V. et Parker, A.J. eds., *The Geology of South Australia*, volume 1, The Precambrian. *South Australian Geological Survey Bulletin* 54, 106-169.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J. et Frost, C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42 : 2033-2048.
- Gandhi, S.S., 2004. Magmatic-hydrothermal Fe Oxide±Cu±Au deposits: Classification for a digital database and an overview of selected districts. IAVCEI General Assembly 2004, Pucón, Chile, CD-ROM, Abstracts 01a_pt_169.
http://iavcei2004.free.cl/abstracts/Gandhi1_ibxobhffgsnpoxphrspm.doc.
- Goutier, J. et Melançon, M., 2010. Compilation Géologique de la Sous-province de l'Abitibi (version préliminaire). Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, RP 2010-04, 1 p., carte et légende, échelle 1/500 000.

- Grainger, C.J., Groves, D.I., Tallarico, F.H.B. et Fletcher I.R., 2008. Metallogensis of the Carajas Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil : Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 33: 451-489.
- Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D. et Hitzman, M.W., 2010. Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. *Economic Geology*, 105 : 641-654.
- Hand, M., Reid, A. et Jagodzinski, L., 2007. Tectonic Framework and Evolution of the Gawler Craton, Southern Australia. *Economic Geology*, 102 : 1377-1395.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N. et Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Research*, 58 : 241-287.
- Hitzman, M.C., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why? *Dans*: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*: PGC Publishing, Adelaide, v. 1, pp. 9-25.
- Irvine, T.N. et Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 : 523-548.
- Jébrak, M. et Marcoux, É., 2008. Géologie des ressources minérales. *Ressources naturelles et Faune Québec, Géologie Québec*. MM 2008-01, 667 p.
- Jensen, E.P. et Barton, M.D., 2000. Gold deposits related to alkaline magmatism. *Dans*: Hagemann, S.G. et Brown, P.E., eds., *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, volume 13, Society of Economic Geologist, pp. 279-314.
- Johnson, J.P. et Cross, K.C., 1995. U-Pb geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Economic Geology*, 90 : 1046-1063.
- Kontak, D.J., Dubé, B. et Benham, W.R., 2008. The Upper Beaver Project, Kirkland Lake Area : Investigation of a Syenite-Associated Copper-Gold Deposit with Magnetite-Epidote-Feldspar Alteration. Summary and Field Work and Other Activities 2008, Commission Géologique de l'Ontario, Open File Report 6226, p12-1 à 12-12.
- Lameyre, J. et Bowden, P., 1982. Plutonic Rock Types Series : Discrimination of Various Granitoid Series and related Rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14 : 169-186.
- Large, R.R., Gemmill, J.B. et Holger, P., 2001. The alteration box plot; a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96 : 957-971.
- Lindenmayer, Z.G., 1990. Salobo sequence, Carajas, Brazil : geology, geochemistry and metamorphism. Thèse de doctorat non publiée, University of Western Ontario, 405 p.
- Lydon, J.W., 2007. An Overview of the Economic and Geological Contexts of Canada's Major Mineral Deposit Types. *Dans*: Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Association Géologique du Canada, Division des Gîtes Minéraux, Publication Spéciale No. 5, pp. 3-48.
- Mark, G., 1999. Petrogenesis of Mesoproterozoic K-rich granitoids, southern Mt Angelay igneous complex, Cloncurry district, northwest Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46 : 933-949.
- Marschik, R. et Fontboté, L., 2001. The Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Cu-Au(-Zn-Ag) Deposits, Chile. *Economic Geology*, 96 : 1799-1826.

- Marschik, R. et Söllner, F., 2006. Early Cretaceous U-Pb zircon ages for the Copiapo plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile. *Mineralium Deposita*, 41 : 785-801.
- Marschik, R., Fontignie, D, Chiaradia, M. et Voldet, P., 2003. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotope composition of granitoids of the Early Cretaceous Copiapo plutonic complex (27°30'S), Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 16 : 381-398.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. et Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. *Dans* : Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. et Richards, J.P., eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, pp. 299-336.
- Middlemost, E.A.K., 1985. *Magma and magmatic rocks; an introduction to igneous petrology*. Longman Group, Londres, Royaume-Uni, 266 p.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R. et de Carvalho, E.R., 2008a. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34 : 317-336.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., de Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., de Souza Filho, C.R. et Torresi, I., 2008b. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brasil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, 43 : 129-159.
- MRNF, 2009. SIGÉOM (ressource électronique), système d'information géominière à référence spatiale. Regroupement des données géoscientifiques aux échelles 1:20 000 et 1:50 000, Ministère des Ressources naturelles et de la faune Québec, Géologie Québec.
http://sigeom.mrnf.gouv.qc.ca/signet/classes/11102_indexAccueil?l=f
- OGS, 2005. Integrated GIS Compilation of Geospatial Data from the Abitibi Greenstone Belt, North-eastern Ontario; Discover Abitibi Project. Commission géologique de l'Ontario, Miscellaneous Release Data, MRD 186.
http://www.geologyontario.mndm.gov.on.ca/mndmaccess/mndm_dir.asp?type=pub&id=MRD186
- 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.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. et Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25, part 4 : 956-983.
- Peccerillo, A. et Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 : 63-81.
- Pinheiro, R.V.L. et Holdsworth, R.E., 1997. Reactivation of Archean strike-slip fault system. Amazon region, Brazil. *Journal of the Geological Society*, 154 : 99-103.
- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita*, 41 : 179-187.
- Pollard, P.J., 2000. Evidence of a magmatic fluid source for iron oxide-Cu-Au mineralization. *Dans*: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*: PGC Publishing, Adelaide, v. 1, pp. 27-41.
- Pollard, P.J., Mark, G. et Mitchell, L.C., 1998. Geochemistry of Post-1540 Ma Granites in the Cloncurry District, Northwest Queensland. *Economic Geology*, 93 : 1330-1344.
- Porter, T.M., 2000. Hydrothermal Iron-Oxide copper-gold & related ore deposits. *Dans*: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*: PGC Publishing, Adelaide, v. 1, pp. 3-5.

- 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.
- Reeve, J.S., Cross, K.C., Smith, R.N. et Oreskes, N., 1990. Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit. *Dans*: Hugues, F.E., ed., *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, pp. 1009-1035.
- Reynolds, L.J., 2001. Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit. *MESA journal*, 23, October, 8 p.
- Richards, J., 2011. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products or remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, 37: 247-250.
- Seedorff, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A. et Barton, M.D., 2005. Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *Dans*: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists*, pp. 371-405.
- Sillitoe, R.H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38 : 787-812.
- Sillitoe, R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits; descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Dans*: Hagemann, S.G. et Brown, P.E., eds., *Gold in 2000, Reviews in Economic Geology*, volume 13, 315-345.
- Sillitoe, R.H. et Perello, J., 2005. Andean Copper Province: Tectonomagmatic Settings, Deposit Types, Metallurgy, Exploration, and Discovery. *Dans*: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists*, pp. 845-890.
- Sinclair, W.D., 2007. Porphyry Deposits. *Dans*: Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallurgy, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Association Géologique du Canada, Division des Gîtes Minéraux, Publication Spéciale No. 5, pp. 223-244.
- Skirrow, R.G., Bastrakov, E.N., Barovich, K., Fraser, G.L., Creaser, R.A., Fanning, C.M., Raymond, O.L. et Davidson, G.J., 2007. Timing of Iron Oxide Cu-Au-(U) Hydrothermal Activity and Nd Isotope Constraints on Metal Sources in the Gawler Craton, South Australia. *Economic Geology*, 102 : 1441-1470.
- Skirrow, R.G., Bastrakov, E., Davidson, G., Raymond, O.L. et Heitersay, P., 2002. The Geological Framework, Distribution and Controls of Fe-Oxide Cu-Au Mineralisation in the Gawler Craton, South Australia: Part II – Alteration and Mineralisation. *Dans*: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective: PGC Publishing, Adelaide*, v. 2, pp. 33-47.
- 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 and Related Deposits: A Global Perspective: PGC Publishing, Adelaide*, v. 1, pp. 271-281.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12 : 1-33.
- Trépanier, S., 2009. Outil logiciel pour le traitement de données lithogéochimiques. Logiciel interne, Consorem, projet 2009-01.
- Vielreicher, N.M., Groves, D.I. et Vielreicher, R.M., 2000. The Phalaborwa (Palabora) deposit and its potential connection to iron-oxide copper-gold deposits of Olympic Dam type. *Dans*: Porter,

T.M., ed., Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective: PGC Publishing, Adelaide, v. 1, pp. 321-330.

Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., DeHaller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S. et Marschik, R., 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible mode of origin. *Dans*: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., Economic Geology 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists, pp. 371-405.