

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
JULIEN MERIC

LE RUTHENIUM (Ru), IRIDIUM (Ir), OSMIUM (Os) ET RHODIUM (Rh) ET LES  
ELEMENTS TRACES DANS DES CHROMITES DE KOMATIITES ISSUES DE LA  
ZONE ALEXO ET DE LA ZONE HART, (ABITIBI, ONTARIO) – UN OUTIL  
DIAGNOSTIQUE POUR L'EXPLORATION DE SYSTEMES FERTILES

FÉVRIER 2018

## RÉSUMÉ

Les gisements de sulfures de Ni-Cu-(PGE) associés à des komatiites ne laissent généralement qu'une faible empreinte géophysique et deviennent de plus en plus difficiles à trouver, spécialement dans les ceintures de roches vertes archéennes et protérozoïques qui sont recouvertes et peu exposées. C'est pourquoi le développement d'outils lithogéochimiques est important pour découvrir de nouveaux gisements. La chromite est un minéral accessoire commun dans les roches ultramafiques et peut-être utilisée pour discriminer les roches associées à un environnement minéralisé de roches associées à un environnement stérile.

Plusieurs études ont montré qu'en l'absence de liquide sulfuré, les éléments du groupe du platine (EGP), et plus particulièrement le Ru, entrent préférentiellement dans la chromite, et en présence de liquide sulfuré, ils entrent préférentiellement dans les sulfures. C'est pourquoi il a été suggéré qu'une meilleure compréhension du comportement du Ru dans les systèmes komatiitiques peut mener au développement de nouvelles stratégies d'exploration pour les gisements magmatiques de sulfures de Ni-Cu-PGE. Des chromites issues de différents faciès lithologiques (cumulat d'olivine, spinifex d'olivine, sulfures disséminés et massifs) provenant de deux komatiites associées à des gisements de Ni-Cu-PGE dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi (zone de la mine Alexo et zone de la mine Hart) ont été analysées par microsonde électronique (EMP, éléments majeurs) et par ablation laser (LA-ICP-MS, éléments traces et EGP). La zone Alexo a été sélectionnée car elle abrite des komatiites bien préservées (faciès prehnite-pumpellyite), mais en partie serpentinisées. Quelques échantillons ont été sélectionnés de la zone Hart (komatiites au

faciès schiste vert à amphibolite) afin d'observer l'effet de l'altération sur la composition des chromites et sur la distribution du Ru dans les chromites.

Nos résultats montrent que pour les chromites de la zone Alexo les valeurs en  $Cr\# = 100*[Cr/(Cr+Al)]$  et  $Fe^{2+\#} = 100*[Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)]$  sont typiques de komatiites fraîches. Les chromites dans les échantillons de sulfures massifs montrent des valeurs très élevées en  $Cr\#$  et  $Fe^{2+\#}$ , elles sont appauvries en Al, Ni et Mg et enrichies en Ti, Zn, Mn, Fe et V par rapport aux chromites des échantillons sans sulfures. Les chromites des échantillons avec sulfures disséminés sont légèrement enrichies en Mn et Zn, légèrement appauvries en Co et appauvries en Ni et Cu par rapport aux chromites des échantillons sans sulfures. Les chromites des échantillons altérés montrent un appauvrissement en Mg et un enrichissement en Zn, Co, Mn et Fe. Les échantillons sans sulfures, avec sulfures et altérés peuvent être distingués les uns des autres en projetant la composition des chromites dans des graphiques binaires présentant Ni/Mn versus Ni/Cr ou bien Ni/Zn versus Ni/Cr. Les chromites de la zone Alexo et de la zone Hart présentent des contenus en Ru, Os, Ir et Rh élevés alors que ce sont des systèmes komatiitiques considérés comme minéralisés. De plus, une grande partie des chromites des échantillons contenant des sulfures disséminés présentent des concentrations élevées en Ru, Os, Ir et Rh. Seules les chromites des échantillons à sulfures massifs sont systématiquement appauvries en Ru, Os, Ir et Rh. Ces résultats impliquent qu'une partie des chromites ont cristallisé avant la ségrégation en sulfure du magma (chromites riches en Ru, Os, Ir et Rh) puis ont continué à cristalliser pendant la ségrégation en sulfures (chromites pauvres en Ru, Os, Ir et Rh). Le calcul de bilans de masses montre que les chromites des échantillons sans sulfures de la zone Alexo contrôlent en moyenne environ 34% du budget roche totale en Ru ; Os  $\approx$  9% ; Ir  $\approx$  6% ; Rh

$\approx 7\%$ , pour un minimum de Ru  $\approx 12\%$  ; Os  $\approx 3\%$  ; Ir  $\approx 2\%$  ; Rh  $\approx 2\%$ , jusqu'à un maximum de Ru  $\approx 69\%$  ; Os  $\approx 19\%$  ; Ir  $\approx 14\%$  ; Rh  $\approx 19\%$ . Ces résultats montrent que les chromites contrôlent en partie les budgets en Ru mais elles ne contrôlent pas les budgets de Os, Ir et Rh, d'autres phases sont donc nécessaires pour expliquer les contenus en Os, Ir et Rh de la roche. Enfin, le Ru, et dans une moindre mesure, le Cu dans les chromites de certains échantillons sans sulfures semblent montrer des variations de concentrations par rapport à la distance à la minéralisation.



## REMERCIEMENTS

Mon premier remerciement va à mon directeur Philippe Pagé qui m’a proposé ce projet de maîtrise, et qui tout au long de ces années a toujours été disponible lorsque j’en avais besoin et ce malgré mes longs moments d’absence et de silence, ton « lâche-pas » que tu me disais régulièrement m’a plusieurs fois aidé à continuer jusqu’au bout et terminer enfin ce mémoire, donc un grand merci à toi Philippe pour ta patience et ta sincérité et bonne continuation pour la suite.

Mon second remerciement va à ma codirectrice Sarah-Jane Barnes pour son support, sa disponibilité et son professionnalisme en toute circonstance.

Je tiens ensuite à remercier Michel Houlé de la Commission Géologique du Canada, qui a contribué au financement et à l’élaboration du projet, et pour le prêt des échantillons. Merci également de m’avoir permis de partir sur le terrain observer toutes ces belles komatiites.

Merci à Dany Savard et Sadia Mehdi du LabMaTer de l’Université du Québec à Chicoutimi, pour toutes ces analyses et ces longues heures parfois passées au laboratoire.

Merci à tous les jeunes géologues et autres étudiants et amis qui ont croisé ma route à l’UQAC, entre les longues heures dans le bureau, mais aussi les vins-fromages et autres événements, citer tous les noms serait trop long mais je pense que tous se reconnaîtront.

Enfin mon dernier remerciement va à ma compagne Sandra, pour m'avoir soutenu, toujours, même dans les plus bas moments, et sans qui je n'aurais pas terminé. Merci pour sa patience et son amour, ce mémoire est en partie le sien.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	ii
REMERCIEMENTS .....	v
TABLE DES MATIÈRES .....	vii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
CHAPITRE 1 .....	1
INTRODUCTION ET PRÉSENTATION .....	1
1.1 Présentation du projet.....	1
1.1.1 Présentation et contexte.....	1
1.1.2 Pourquoi la chromite dans les komatiites.....	2
1.2 Problématique .....	6
1.2.1 Les komatiites .....	6
1.2.1.1 Historique et définition .....	6
1.2.1.2 Les chromites dans les komatiites .....	8
1.2.2 Les éléments du groupe du platine.....	10
1.2.2.1 Les éléments du groupe du platine dans un magma silicaté .....	10
1.2.2.2 Les EGP dans les komatiites .....	11
1.2.2.3 Les EGP dans la chromite .....	13
1.3 Objectifs de l'étude et organisation du manuscrit.....	15
1.3.1 Objectifs de l'étude .....	15
1.3.2 Organisation du manuscrit .....	17
CHAPITRE 2 .....	19
GÉOLOGIE ET ÉCHANTILLONNAGE .....	19
2.1 Les komatiites dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi .....	19
2.2 La zone Alexo : géologie et échantillonnage .....	21
2.2.1 Géologie générale.....	21
2.2.2 Position des échantillons .....	24
2.3 La zone Hart : géologie et échantillonnage.....	30
CHAPITRE 3 .....	32
PÉTROGRAPHIE ET MÉTHODOLOGIE .....	32
3.1 Pétrographie .....	32
3.1.1 La zone Alexo .....	32

3.1.1.1 Les komatiites péridotitiques.....	33
3.1.1.2 Les komatiites pyroxénitiques .....	34
3.1.1.3 Les sulfures massifs.....	36
3.1.2 La zone Hart.....	36
3.1.3 Les chromites .....	37
3.2 Méthodologie .....	40
3.2.1 Introduction et historique .....	40
3.2.2 Analyses sur roche totale .....	42
3.2.3 Analyses minérales.....	42
3.2.4 Génération des résultats des analyses au LA-ICP-MS.....	46
CHAPITRE 4 .....	48
RÉSULTATS .....	48
4.1. Introduction et présentation des résultats .....	48
4.2. Analyses sur roche totale .....	50
4.2.1 Éléments majeurs et mineurs .....	50
4.2.2 Éléments du groupe du platine.....	56
4.3. Analyses des chromites .....	61
4.3.1 Les éléments majeurs .....	61
4.3.2 Les éléments mineurs et traces dans les chromites .....	64
4.3.2.1 Résultats.....	65
4.3.2.2 Résumé et discussions .....	75
4.3.3 Les EGPI et le Rh dans les chromites .....	81
4.3.3.1 Résultats.....	81
4.3.3.2 Résumé et discussions .....	85
4.4 Analyses des chromites comparées aux analyses sur roche totale et discussions .....	89
4.4.1 Éléments majeurs et mineurs dans la chromite versus MgO roche totale.....	89
4.4.2 EGPI et Rh dans la chromite versus MgO, Cr et S roche totale.....	93
4.4.3 Le Ru dans la chromite versus données roche totale.....	98
CHAPITRE 5 .....	105
DISCUSSIONS .....	105
5.1 Aspect pétrologique : le comportement des EGP dans un magma komatiitique et le rôle de la chromite .....	105

5.1.1 Contrôle de la chromite sur les budgets en EGPI et Rh dans les komatiites de la zone Alexo.....	105
5.1.2 Comportement des EGP dans un magma komatiitique en l'absence de sulfures : comparaison avec d'autres études .....	109
5.1.3 La zone Alexo, un cas particulier de magma déjà fractionné en EGP .....	117
5.1.4 Discussion sur la solubilité des EGPI et du Rh dans la chromite.....	120
5.1.4.1 Causes de la solubilité des EGPI et du Rh dans les chromites de komatiites.....	121
5.1.4.2 Comparaison avec un système à fugacité d'oxygène élevée.....	125
5.2 Aspect exploration : la chromite un indicateur potentiel de la présence de sulfures .....	127
5.2.1 Diagrammes binaires pour l'exploration.....	127
5.2.2 Le Ru dans la chromite comme indicateur de la présence de sulfures .....	131
5.2.2.1 Comparaison avec les chromites de Locmelis et al. (2013) .....	131
5.2.2.2 Le Ru et le Cu sensibles à la distance par rapport à la minéralisation .....	135
5.3 Discussion de l'impact de l'altération sur la géochimie des chromites durant le métamorphisme à partir de cartographies géochimiques de chromites.....	140
5.3.1 Introduction et présentation.....	140
5.3.2 Observation et description de cartographies géochimiques de chromites.....	141
5.3.3 Discussion et synthèse.....	144
CHAPITRE 6 .....	147
CONCLUSION.....	147
6.1 Introduction.....	147
6.2 Géochimie des chromites dans les komatiites.....	147
6.2.1 Éléments majeurs mineurs et traces .....	147
6.1.2 Éléments du groupe du platine .....	148
6.3 Aspect exploration .....	150
6.3.1 Éléments majeurs mineur et traces.....	150
6.3.2 Le Ruthénium.....	150
RÉFÉRENCES.....	152
<u>ANNEXE 1</u> : Analyses minéralogiques (chromites).....	158
<u>ANNEXE 2</u> : Analyses sur roche totale (éléments majeurs) .....	180
<u>ANNEXE 3</u> : Analyses sur roche totale (éléments traces).....	181
<u>ANNEXE 4</u> : Analyses sur roche totale (S et EGP).....	185

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1 :</b> Corrélations positives entre les concentrations sur roche totale en Ir (ppb) et de Cr (ppm), Pour A) une suite de roches mafiques à ultramafiques, pauvres en sulfures appartenant aux faciès plutoniques de l’ophiolite de Thetford Mines. Et pour B) une suite de roches mafiques à ultramafiques, appartenant aux faciès plutoniques de l’intrusion litée du complexe de Stillwater (modifiée d’après Pagé et al., 2012).....	3
<b>Figure 1.2 :</b> Corrélations positives entre les concentrations sur roche totale en Os (A), Ir (B) et Ru (C) et les concentrations en Cr de différents types de laves (MORB, Basalte de plateau, Kimberlite, Lave d’Hawaï, Komatiite). On peut noter une plus large distribution pour l’Os et l’Ir pour des valeurs en Cr élevées (flèches en pointillés) ce qui est principalement dû aux données des komatiites. Cette distribution plus large reflète des proportions variables en Os-Ir. Noter que ce phénomène n’est pas observé pour le Ru (modifiée d’après Pagé et al., 2012). .....	4
<b>Figure 1.3 :</b> Résultats des calculs de bilans de masse montrant les parts des budgets en a) Os, b) Ir, c) Ru et d) Rh de roches magmatiques contrôlés par les chromites. KOM = komatiite, provient d’un échantillon d’Alexo avec des chromites qui contiennent $\approx 290$ ppb de Ru et contrôlent $> 75\%$ du budget en Ru de la roche (tirée de Pagé et Barnes, 2016).....	5
<b>Figure 1.4 :</b> Schéma simplifié illustrant l’effet du métamorphisme sur une chromite (Tirée de Barnes, 2000). .....	10
<b>Figure 1.5 :</b> Modèle des changements de concentration de différents métaux dans un magma silicaté durant la cristallisation fractionnée. Deux courbes représentent le Ni, une où il n’y a pas eu d’extraction de sulfure ( $D = 4$ ) et une où il y a eu une extraction de sulfure ( $D = 6$ ). Il est à noter que l’extraction combinée de sulfure et d’olivine ne modifie pas de façon significative la teneur en Ni du liquide. Deux courbes sont présentées pour montrer la variation des concentrations en EGP au cours du fractionnement, l’une avec un $D^{\text{EGP/sul}} = 10\,000$ (bulk $D = 100$ ), et une avec $D^{\text{EGP/sul}} = 40\,000$ (bulk $D = 400$ ), (Tirée de Barnes et Lightfoot, 2005). Ci = concentration dans le liquide initial, Cf = concentration dans le liquide fractionné. ....	11
<b>Figure 1.6 :</b> Concentrations en Ir, Os et Ru des komatiites de Gorgona représentées par les points noirs dans un diagramme en trois dimensions. Les valeurs associées aux points représentent des teneurs en MgO en % poids, (tirée de Borisov, 2005 et modifiée d’après Brüggmann et al., 1987). 12	
<b>Figure 1.7 :</b> Diagrammes présentant les concentrations sur roche totale du Ru en fonction du Cr. Avec en A), des komatiites minéralisées qui ne présentent pas de corrélation et en B), des komatiites non minéralisées qui présentent une corrélation positive (Tirée de Fiorentini et al., 2008). .....	13
<b>Figure 1.8 :</b> Spectres d’analyses de chromites par LA-ICP-MS présentés en coups par seconde en fonction du temps (millisecondes). Avec en A), l’analyse d’une chromite de komatiite du secteur de la mine Alexo (Ontario). Noter que le signal du Ru est constant et bien marqué, alors que pour l’Os et l’Ir on se rapproche des limites de détection (Pagé et al., 2012). En B), l’analyse d’une chromite de chromitite du manteau. Le pic associé à la présence de l’inclusion est visible pour Ir, Os et Ru suggérant la présence d’un alliage ou bien d’un MGP comme une laurite $\text{Ru}(\text{Os}, \text{Ir})\text{S}_2$ (Pagé et al., 2012). .....	15
<b>Figure 1.9 :</b> Schéma du comportement du Ru dans un magma komatiitique sous-saturé en sulfures (à gauche) et saturé en sulfure (à droite).....	16

<b>Figure 2.1 :</b> Carte géologique de la sous-province de l'Abitibi et localisation des zones d'échantillonnage (étoiles rouges) (modifiée d'après Thurston et al., 2008).....	21
<b>Figure 2.2 :</b> Carte géologique simplifiée du district de Dundonald dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi. La carte présente les principales unités géologiques ainsi que la localisation des sites d'étude, (étoiles rouges) (modifiée d'après Houlé et al., 2012) . Section ES (Section Est : Mine Alexo) correspond à la localisation de la colonne stratigraphique présentée à la figure 2.3. ....	23
<b>Figure 2.3 :</b> A ) Colonne stratigraphique schématique du district de Dundonald (d'après Houlé et al., 2008). B) Stratigraphie simplifiée de la Formation de Dundonald au niveau de la mine Alexo. Elle présente les localisations des gisements et indices de minéralisations en Ni-Cu et EGP associés à des komatiites, ainsi que la localisation des sites d'études (flèches rouges) (modifiée d'après Houlé et al., 2008). ....	24
<b>Figure 2.4 :</b> A) Coupe transversale du Main Pit (unité Alexo) au niveau de la mine Alexo montrant la position des échantillons, B) Coupe transversale du Small Pit (unité Empire), C) et D) Coupes transversales simplifiées pour respectivement Olivine Flow et Pyroxene Flow (unité Dundonald sud) (modifié d'après Barnes, 1983) . ....	27
<b>Figure 2.5 :</b> Cartographie géologique de la zone décapée (stripped area) de la mine Alexo (exagération verticale de 1,5X) avec la position des échantillons (modifiée d'après Houlé et al., 2011). ....	29
<b>Figure 2.6 :</b> Carte géologique simplifiée du Shaw Dome, situé au sud de la ville de Timmins (Ontario). L'étoile rouge montre la position de la mine Hart (modifiée d'après Houlé et al., 2011). ....	31
<b>Figure 3.1 :</b> À gauche, colonne stratigraphique schématique simplifiée d'une unité komatiitique (échelle non respectée). À droite photos de chromites de différentes morphologies en fonction de leur position stratigraphique pour les zones Alexo et Hart. A) Chromite squelettique dans les lithologies à texture spinifex (zone Alexo) ; B) Chromites automorphes dans les lithologies à cumulat d'olivine (zone Alexo) ; C) Chromite automorphe altérée, caractérisée par un cœur de chromite préservé et entouré par une bordure de magnétite dans un cumulat d'olivine (zone Hart) ; D) Chromites automorphes dans un horizon de sulfures massifs à la base d'une coulée komatiitique (zone Alexo). Abréviations: Chr = chromite; Sil = silicate; Ol = olivine; Mt = magnétite; sulf = sulfure.....	39
<b>Figure 3.2 :</b> A) Traitement des analyses par ablation laser présentées en coups par seconde en fonction du temps. Les signaux présentés sont le Cr, le V et le Ti, et également le Ru, l'Ir et l'Os. B) Photo d'une chromite de komatiite après une analyse par ablation laser.....	47
<b>Figure 4.1 :</b> Légende utilisée pour distinguer les différentes catégories d'échantillons contenant les chromites. SS = sans sulfure, AS = avec sulfure, Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spfx = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt=altéré.....	49
<b>Figure 4.2 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) CaO vs MgO (% poids), (B) Ga (ppm) vs MgO (% poids), (C) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs MgO (% poids), (D) Sc (ppm) vs MgO (% poids), (E) TiO <sub>2</sub> vs MgO (% poids), (F) V (ppm) vs MgO (% poids). La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo. R <sup>2</sup> = coefficient de corrélation. ...	53
<b>Figure 4.3 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) SiO <sub>2</sub> vs MgO (% poids), (B) Zn (ppm) vs MgO (% poids), (C) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> vs MgO (% poids), (D) Cu (ppm) vs MgO (% poids), (E) Ni (ppm) vs MgO (% poids), (F)	

Co (ppm) vs MgO (% poids). La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.

..... 54

**Figure 4.4 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) MnO vs MgO (% poids), (B) Cr (ppm) vs MgO (% poids), (C) S vs MgO (% poids). ..... 55

**Figure 4.5 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des EGP en fonction de MgO. (A) Os (ppb) vs MgO (% poids), (B) Ir (ppb) vs MgO (% poids), (C) Ru (ppb) vs MgO (% poids), (D) Rh (ppb) vs MgO (% poids), (E) Pt (ppb) vs MgO (% poids), (F) Pd (ppb) vs MgO (% poids). La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation. .... 59

**Figure 4.6 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des EGP en fonction du Cr. (A) Os (ppb) vs Cr (ppm), (B) Ir (ppb) vs Cr (ppm), (C) Ru (ppb) vs Cr (ppm), (D) Rh (ppb) vs Cr (ppm), (E) Pt (ppb) vs Cr (ppm), (F) Pd (ppb) vs Cr (ppm). La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation. .... 60

**Figure 4.7 :**  $Cr\# = (100 * Cr / (Cr + Al))$  versus  $Fe^{2+\#} = (100 * Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg))$  des chromites des komatiites de la zone Alexo et de la zone Hart comparées aux champs de compositions des chromites de komatiites dans le monde (tirés de la base de données de Barnes et Roeder, 2001). Champ gris foncé = toutes les données de chromites de komatiites du faciès schiste vert à amphibolite (n = 4095) ; Champ gris pâle = chromites de komatiites au faciès schiste vert ou inférieur (n = 1036). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré. .... 63

**Figure 4.8 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Mg (ppm) vs Cr#, (B) Mn (ppm) vs Cr#, (C) Co (ppm) vs Cr#. .... 70

**Figure 4.9 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Zn (ppm) vs Cr#, (B) Cu (ppm) vs Cr#, (C) Ni (ppm) vs Cr#. .... 71

**Figure 4.10 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Ti (ppm) vs Cr#, (B) Ga (ppm) vs Cr#, (C) Sc (ppm) vs Cr#, (D) V (ppm) vs Cr#. La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation. .... 72

**Figure 4.11 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du  $Fe^{2+\#}$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Mn (ppm) vs  $Fe^{2+\#}$ , (B) Co (ppm) vs  $Fe^{2+\#}$ , (C) Zn (ppm) vs  $Fe^{2+\#}$ , (D) Cu (ppm) vs  $Fe^{2+\#}$ , (E) Ni (ppm) vs  $Fe^{2+\#}$ . La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation. ... 73



<b>Figure 4.12 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du $\text{Fe}^{2+}\#$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Ti (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ , (B) Ga (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ , (C) Sc (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ . ....	74
<b>Figure 4.13 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du $\text{Fe}^{2+}\#$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) V (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ , (B) Al (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ , (C) Cr (ppm) vs $\text{Fe}^{2+}\#$ . La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo. $R^2$ = coefficient de corrélation.....	75
<b>Figure 4.14 :</b> Diagrammes multi-élémentaires présentant les compositions de chromites normalisées à la composition des chromites de MORB (Pagé et Barnes, 2009). Le champ gris regroupe les données des chromites des échantillons des lithofaciès non minéralisés en sulfures et peu altérés (zone Alexo). Ces données sont comparées en A avec les chromites des échantillons minéralisés en sulfures (zone Alexo) : A1 pour les échantillons des sulfures disséminés et A2 pour les échantillons des sulfures massifs. Les données sont comparées en B avec des chromites altérées (zone Hart). Chr = chromite, alt = altéré, sulfs = sulfures, diss = disséminés.....	78
<b>Figure 4.15 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites. La partie de gauche (X1) présente dans l'ordre Os, Ir, Ru et Rh en fonction du Cr#. La partie de droite (X2) présente dans l'ordre Os, Ir, Ru et Rh en fonction du $\text{Fe}^{2+}\#$ . ....	84
<b>Figure 4.16 :</b> Diagrammes multi-élémentaires présentant les compositions de chromites normalisées au manteau primitif (valeurs de McDonough et Sun, 1995). Le champ gris regroupe les données de chromites des faciès lithologiques non minéralisés en sulfures et peu altérés (zone Alexo, cumulat et spinifex). Ces données sont comparées en A avec les chromites des faciès lithologiques minéralisés en sulfures (sulfures massifs et disséminés de la zone Alexo). Les données sont comparées en B avec des chromites des échantillons altérés de la zone Hart. Chr = chromite, PM = manteau primitif.....	88
<b>Figure 4.17 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , MgO, Sc, Ti, V et Ga en fonction du MgO roche totale. (A) $\text{Cr}_2\text{O}_3$ (% poids chr) vs MgO (% poids RT), (B) Ti (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (C) MgO (% poids chr) vs MgO (% poids RT), (D) V (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (E) $\text{SiO}_2$ (% poids chr) vs MgO (% poids RT), (F) Sc (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (G) $\text{Al}_2\text{O}_3$ (% poids chr) vs MgO (% poids RT), (H) Ga (ppm chr) vs MgO (% poids RT). La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des cumulats à olivine de la zone Alexo. $R^2$ = coefficient de corrélation.....	91
<b>Figure 4.18 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en S, Mn, Co, Ni, Cu et Zn en fonction du MgO roche totale. (A) S (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (B) Mn (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (C) Ni (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (D) Co (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (E) Cu (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (F) Zn (ppm chr) vs MgO (% poids RT). ....	92
<b>Figure 4.19 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du MgO roche totale. (A) Os (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (B) Ir (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (D) Rh (ppb chr) vs MgO (% poids RT).....	94
<b>Figure 4.20 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du Cr roche totale. (A) Os (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (B) Ir (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (C) Ru (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (D) Rh (ppb chr) vs Cr (ppm RT). Non min = non minéralisé.....	96

<b>Figure 4.21 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du S roche totale. (A) Os (ppb chr) vs S (% poids RT), (B) Ir (ppb chr) vs S (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs S (% poids RT), (D) Rh (ppb chr) vs S (% poids RT). Non min = non minéralisé. ....	98
<b>Figure 4.22 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{TiO}_2$ , $\text{SiO}_2$ , Sc, V et Ga roche totale. (A) Ru (ppb chr) vs $\text{Al}_2\text{O}_3$ (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs $\text{SiO}_2$ (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs $\text{TiO}_2$ (% poids RT), (D) Ru (ppb chr) vs V (ppm RT), (E) Ru (ppb chr) vs Sc (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Ga (ppm RT). ....	100
<b>Figure 4.23 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de FeO, Zn, Co, MnO, Ni et Cu roche totale. (A) Ru (ppb chr) vs FeO (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs Zn (ppm RT), (C) Ru (ppb chr) vs Co (ppm RT), (D) Ru (ppb chr) vs MnO (% poids RT), (E) Ru (ppb chr) vs Ni (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Cu (ppm RT). Non min = non minéralisé. ....	102
<b>Figure 4.24 :</b> Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{TiO}_2$ , $\text{SiO}_2$ , Sc, V et Ga roche totale. Seulement les échantillons des faciès à texture spinifex sont représentés. (A) Ru (ppb chr) vs $\text{Al}_2\text{O}_3$ (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs $\text{SiO}_2$ (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs $\text{TiO}_2$ (% poids RT), (D) Ru (ppb chr) vs V (ppm RT), (E) Ru (ppb chr) vs Sc (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Ga (ppm RT), (G) Ru (ppb chr) vs MgO (% poids RT). ....	104
<b>Figure 5.1 :</b> Bilans de masse présentant les proportions en % des budgets en EGPI et en Rh de la roche expliquées par la chromite pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. Les traits orange correspondent aux valeurs maximales et minimales, et le trait bleu correspond à la moyenne. A) Les résultats pour les échantillons non minéralisés. B) Les résultats pour les échantillons minéralisés avec sulfures disséminés. ....	109
<b>Figure 5.2 :</b> Diagrammes binaires présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008). Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004) ; A) Le Pt versus MgO ; B) Le Pd versus MgO. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex. ....	111
<b>Figure 5.3 :</b> Diagramme binaire présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008), pour le Rh versus le MgO. Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). La droite en tirets noirs correspond à une extrapolation graphique pour déterminer la concentration en Rh dans l'olivine. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex. ....	113
<b>Figure 5.4 :</b> Diagrammes binaires présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini, 2008 ; A) Ir versus MgO ; B) Os versus MgO. La figure présente les droites empiriques de la composition du liquide et les droites de mélange entre liquide et olivine pour Dir olivine/liquide = 0,5 (Modifiées et tirées de Barnes et Fiorentini, 2008). Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex. ....	115
<b>Figure 5.5 :</b> Diagramme binaire présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008), pour le Ru versus le MgO. Les compositions du pôle	

chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex. ....	117
<b>Figure 5.6 :</b> Diagramme multi-élémentaire, présentant les concentrations sur roche totale en EGP normalisées aux chondrites (données chondrites issues de McDonough et Sun, 1995) pour les échantillons de la zone Alexo et de Dundonald. ....	120
<b>Figure 5.7 :</b> Diagrammes binaires présentant les EGPI et le Rh versus $100 \cdot \text{Fe}^{3+}/\text{R}^{3+}$ , avec en A) Os, B) Ir, C) Ru, D) Rh. ....	123
<b>Figure 5.8 :</b> Diagramme présentant la solubilité de l'Ir et du Ru en fonction de la température dans un magma silicaté à différentes fugacités d'oxygène (données de Borisov et Palme, 2000). ....	125
<b>Figure 5.9 :</b> Diagramme multi-élémentaire présentant les compositions de chromites normalisées au manteau primitif (valeurs de McDonough et Sun, 1995). Le champ gris regroupe les données de chromites des échantillons non minéralisés en sulfures et peu altérés de la zone Alexo (cumulat et spinifex). Ces données sont comparées aux données de chromites des laves d'Ambae (Park et al., 2012). ....	127
<b>Figure 5.10 :</b> Diagrammes binaires présentant des rapports élémentaires pour toutes les chromites de la zone Alexo et de la zone Hart avec en A) Ni/Ti versus Ni/Cr et en B) Ni/Mn versus Ni/Cr. Chr = chromite. ....	130
<b>Figure 5.11 :</b> Concentrations en Ru des grains de chromite de komatiites, avec en A), les résultats pour l'étude de Locmelis et al. (2013) présentant à gauche les systèmes non minéralisés et à droite les systèmes minéralisés. Les cercles représentent les analyses ponctuelles, les traits représentent la médiane pour les limites de détection et les nombres associés aux carrés représentent le nombre de points en dessous de la médiane des limites de détection (Modifiée d'après Locmelis et al., 2013) ; En B), les résultats pour la zone Alexo et la zone Hart, chaque point correspond à une moyenne des grains de chromites par échantillon (n variant de 3 à 5 grains). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spfx = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré. ....	134
<b>Figure 5.12 :</b> Diagrammes binaires présentant les concentrations en Ru dans les chromites en ppb versus les concentrations en S de la roche en % poids pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. A) Toutes les données sont présentées incluant les échantillons associés aux sulfures. B) Agrandissement de A) représentant uniquement les échantillons sans sulfures de la zone Alexo. Les flèches représentent les coupes (MC, C1 et C2) présentées sur la figure 5.13, et indiquent la direction vers la minéralisation. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré, chr = chromite, RT = roche totale. ....	136
<b>Figure 5.13 :</b> Carte géologique détaillée du gisement de la mine Alexo (Stripped Area). Les échantillons apparaissent en rouge. Les trois flèches rouges désignent les coupes d'où proviennent les échantillons présentés sur les figures 5.12B et 5.14B. Modifiée d'après Houlié et al., 2012. ....	138
<b>Figure 5.14 :</b> Diagrammes binaires présentant les concentrations en Cu dans les chromites en ppm versus les concentrations en S de la roche en % poids pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. A) Toutes les données sont présentées incluant les échantillons associés aux sulfures. B) Agrandissement de A) représentant uniquement les échantillons sans sulfures de la zone Alexo. Les flèches représentent les coupes (MC, C1 et C2) présentées sur la figure 5.13, et indiquent la direction vers la minéralisation. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré, chr = chromite, RT = roche totale. ....	139
<b>Figure 5.15 :</b> Photos de chromites de komatiites et cartographies chimiques au laser correspondantes pour Fe, Ga et Zn. A) chromite non altérée, B) chromite moyennement altérée, C)	

chromite fortement altérée. L'échelle est représentée par les couleurs de l'arc-en-ciel, avec les concentrations les plus faibles en rouge et les plus élevées en violet. Les valeurs présentées sont en ppm et sont semi-quantitatives. Les traits noirs pleins délimitent la portion préservée de chromite. Pour A), l'espace entre le trait plein et les tirets correspond à la portion de surcroissance de magnétite. Pour B) et C), l'espace entre le trait plein et les tirets correspond à la portion de chromite altérée en magnétite. .... 143

**Figure 5.16 :** Photos de chromites de komatiites et cartographies chimiques au laser correspondantes pour le Ru. Ax20 chromite non altérée, AV2T chromite moyennement altérée, AV7TX chromite fortement altérée. L'échelle est représentée par les couleurs noir, rouge et jaune, avec les concentrations les plus faibles en noir et les plus élevées en jaune. Les valeurs présentées sont en ppm et sont semi-quantitatives. Les traits blancs pleins délimitent la portion préservée de chromite. L'espace entre les traits blancs plein et les tirets blancs correspond à la portion de chromite altérée en magnétite. .... 144

**Figure 5.17 :** Schéma simplifié du comportement de différents éléments chimiques dans la chromite pendant l'altération progressive en magnétite lors du métamorphisme. .... 146

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 :</b> Liste des échantillons de la thèse de doctorat de Barnes (1983) et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible. ....	41
<b>Tableau 2 :</b> Liste des échantillons de la thèse de doctorat de Houlié (2008) et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible. ....	41
<b>Tableau 3 :</b> Liste des échantillons de la zone Hart et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible. ....	42
<b>Tableau 4 :</b> Limites de détection des éléments traces analysés au LA-ICP-MS. Le tableau présente les valeurs minimales et maximales obtenues et en caractères gras les valeurs moyennes. LD = Limite de détection.....	45
<b>Tableau 5 :</b> Variations des concentrations roche totale en éléments majeurs, mineurs, traces et EGP pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.....	56
<b>Tableau 6 :</b> Variation de Cr#, Fe <sup>2+</sup> # et les variations des concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.....	64
<b>Tableau 7 :</b> Variations des concentrations en EGPI et Rh pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.	83

## **CHAPITRE 1**

### **INTRODUCTION ET PRÉSENTATION**

#### **1.1 Présentation du projet**

##### **1.1.1 Présentation et contexte**

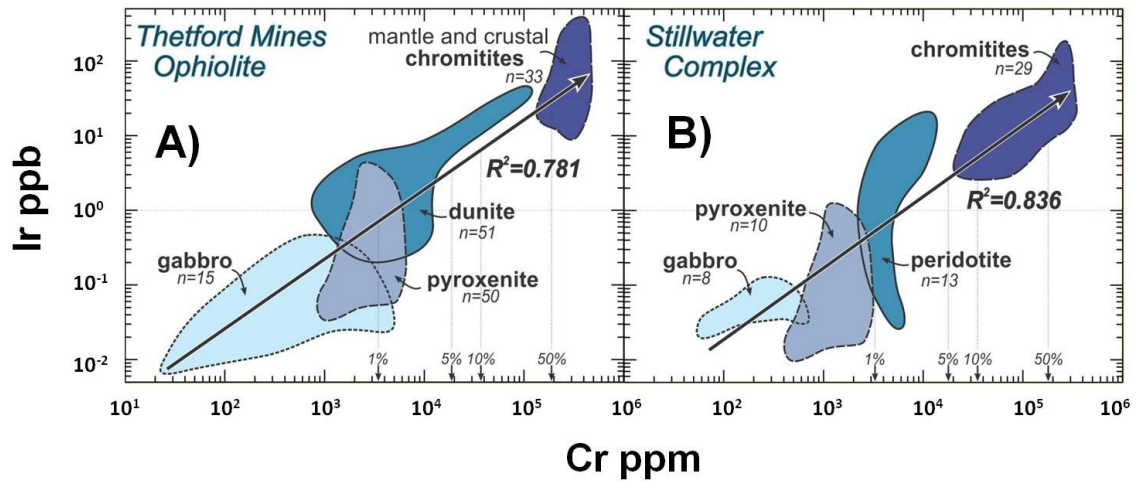
Les travaux de ce projet de maîtrise s'inscrivent dans le cadre d'un projet plus vaste surnommé « Initiatives Géoscientifiques Ciblées 4 » (IGC4) qui est organisé par la Commission Géologique du Canada. Le projet IGC4 vise à améliorer les connaissances géologiques sur la formation des gisements de nickel, cuivre et éléments du groupe du platine (Ni-Cu-EGP) et Cr au Canada, dans le but de trouver de nouvelles pistes et outils pour l'exploration minière.

Ce projet de maîtrise porte sur l'étude de la géochimie des éléments du groupe du platine (EGP) dans des chromites de komatiites provenant de la sous-province de l'Abitibi (Ontario, Québec). Les travaux ont été réalisés à l'Université du Québec à Chicoutimi sous la supervision de Philippe Pagé et de Sarah-Jane Barnes, membres de la Chaire de Recherche du Canada en Métallogénie Magmatique et en partenariat avec Michel Houlé, membre de la Commission Géologique du Canada. Le projet vise à vérifier si la géochimie, et plus spécifiquement la teneur en EGP des chromites de komatiites peuvent enregistrer la présence de minéralisation en sulfures. Le but est à la fois de développer l'utilisation de la chromite comme un minéral indicateur pour l'exploration de gisements de sulfures

magmatiques, et aussi de mieux comprendre le rôle que joue la chromite dans le contrôle géochimique des éléments traces lors la cristallisation d'un magma komatiitique en présence ou bien absence de sulfures.

### **1.1.2 Pourquoi la chromite dans les komatiites**

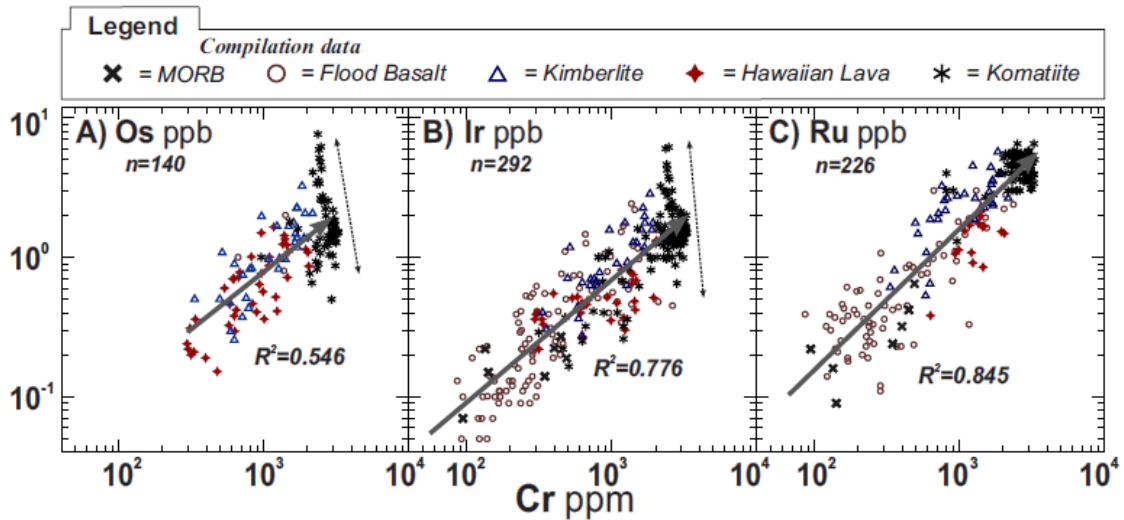
Les chromitites provenant des complexes ophiolitiques et d'intrusions litées sont connues pour être enrichies en Os, Ir et Ru (e.g. Augé, 1985; e.g. Merkle, 1992; Garuti et al., 1999; Maier et al., 1999; El Ghorfi et al., 2008; Gonzalez-Jimenez et al., 2009; Marchesi et al., 2010; Pagé et al., 2012), suggérant un lien possible entre la cristallisation de chromites et Os, Ir et Ru. Les figures 1.1 A et 1.1 B illustrent ce lien en présentant une corrélation positive entre Ir et Cr dans une suite de roches mafiques à ultramafiques, pauvres en sulfures appartenant aux faciès plutoniques de l'ophiolite de Thetford Mines (Fig. 1.1A), ainsi que dans l'intrusion litée de Stillwater (Fig. 1.1B). Ces corrélations suggèrent que la variation en Os, Ir et Ru peut-être contrôlée par une phase riche en Cr, comme la chromite. Ces fortes concentrations en Os, Ir et Ru dans les chromitites ont été expliquées par la présence de minéraux du groupe du platine (MGP) comme la laurite ((Ru, Os, Ir)S<sub>2</sub>) en inclusion dans les chromites.



**Figure 1.1 :** Corrélations positives entre les concentrations sur roche totale en Ir (ppb) et de Cr (ppm), Pour A) une suite de roches mafiques à ultramafiques, pauvres en sulfures appartenant aux faciès plutoniques de l'ophiolite de Thetford Mines. Et pour B) une suite de roches mafiques à ultramafiques, appartenant aux faciès plutoniques de l'intrusion litée du complexe de Stillwater (modifiée d'après Pagé et al., 2012).

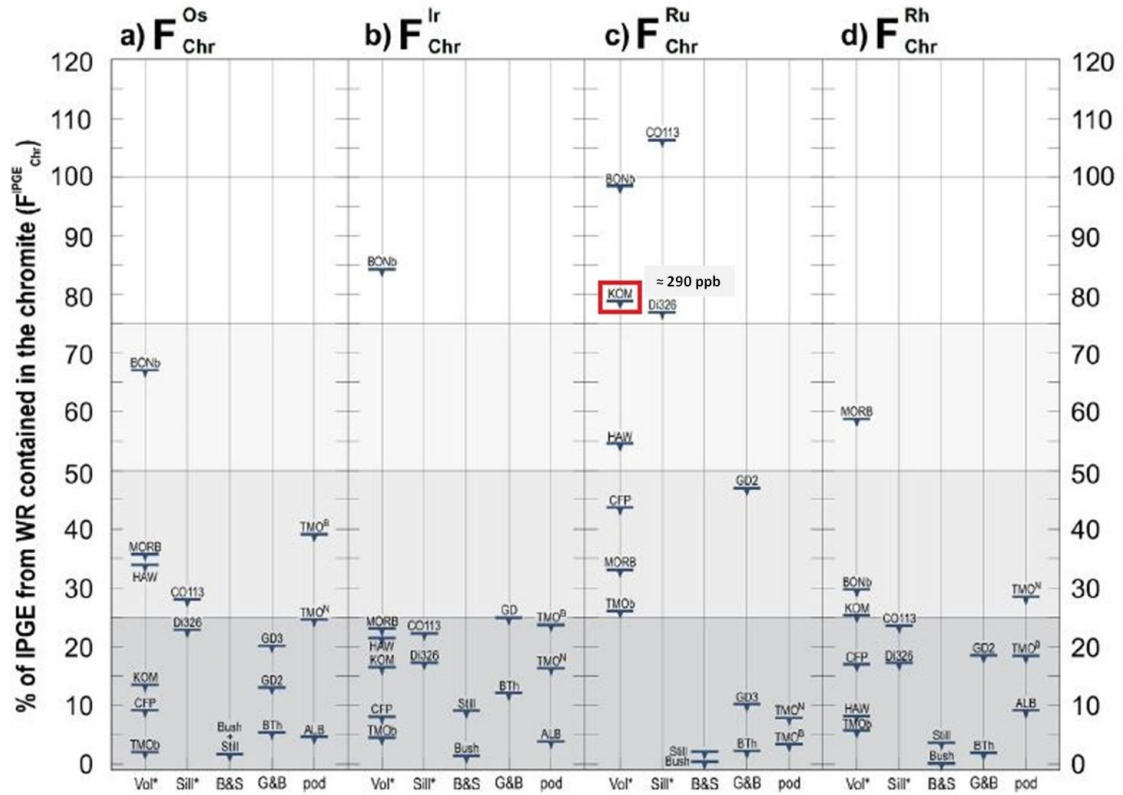
Durant la fusion partielle ou bien lors de la cristallisation fractionnée, les éléments du groupe du platine (EGP) subissent un fractionnement entre l'Os, l'Ir et le Ru (groupe des EGPI) et le Rh, le Pd et le Pt (groupe des EGPP). Les EGPI sont plutôt réfractaires et montrent un comportement compatible, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à incorporer les différentes phases qui cristallisent à haute température. Les EGPP montrent un comportement incompatible, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à rester dans la phase liquide (Crocket, 2002). Des observations faites sur un grand nombre de roches volcaniques mafiques à ultramafiques et pauvres en sulfures, montrent qu'il existe une corrélation positive entre les concentrations sur roche totale en EGPI (Os, Ir et Ru) et les concentrations sur roche totale en Cr (Fig. 1.2), suggérant de nouveau que les EGPI sont contrôlés par une phase riche en Cr comme la chromite.





**Figure 1.2 :** Corrélations positives entre les concentrations sur roche totale en Os (A), Ir (B) et Ru (C) et les concentrations en Cr de différents types de laves (MORB, Basalte de plateau, Kimberlite, Lave d'Hawaï, Komatiite). On peut noter une plus large distribution pour l'Os et l'Ir pour des valeurs en Cr élevées (flèches en pointillés) ce qui est principalement dû aux données des komatiites. Cette distribution plus large reflète des proportions variables en Os-Ir. Noter que ce phénomène n'est pas observé pour le Ru (modifiée d'après Pagé et al., 2012).

Des travaux de Pagé et al. (2012) ainsi que Pagé et Barnes (2016) ont mesuré les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh dans des chromites de différents types de laves et de roches magmatiques. Des bilans de masse ont été calculés pour évaluer le rôle de la chromite sur le contrôle de ces éléments. Il s'avère que pour la plupart des échantillons, les chromites contrôlent moins de 30 % des budgets en Os, Ir et Rh. Pour la majorité des échantillons de roches volcaniques, les chromites contrôlent plus de 50 % des budgets en Ru. Pour les roches plutoniques les chromites contrôlent moins de 10% des budgets en Ru (Fig. 1.3). Donc la chromite semble plutôt avoir un faible contrôle sur Os, Ir et Rh mais un contrôle plus important sur le Ru pour les roches volcaniques (Pagé et Barnes, 2016). Les chromites des komatiites, comme pour les autres laves, ne montrent qu'un faible contrôle sur Os, Ir et Rh, en revanche elles contrôlent plus de 75 % des budgets en Ru (Fig. 1.3C) .



**Figure 1.3 :** Résultats des calculs de bilans de masse montrant les parts des budgets en a) Os, b) Ir, c) Ru et d) Rh de roches magmatiques contrôlés par les chromites. KOM = komatiite, provient d'un échantillon d'Alexo avec des chromites qui contiennent  $\approx 290$  ppb de Ru et contrôlent  $> 75$  % du budget en Ru de la roche (tirée de Pagé et Barnes, 2016).

L'échantillon de komatiite analysé par Pagé et al. (2012) et par Pagé et Barnes (2016) provient d'une komatiite du secteur de la mine Alexo (Ontario) et il est issue d'une coulée à priori non minéralisée en sulfures. D'après les mesures réalisées, on trouve des coefficients de partage entre les chromites analysées et le magma komatiitique estimés à  $D_{Ru}^{chr/kom} \approx 56.2$  ;  $D_{Ir}^{chr/kom} \approx 11,8$  ;  $D_{Os}^{chr/kom} \approx 9,6$  ;  $D_{Rh}^{chr/kom} \approx 18,1$ . Ces éléments sont donc compatibles dans la chromite. Il est connu que ces éléments sont plutôt incompatibles dans les silicates, mais extrêmement compatibles dans les sulfures. Les coefficients de partage de Os, Ir, Ru et Rh pour les sulfures sont très élevés ( $D \geq 10000-100000$ , d'après Mungall et Brenan, 2013). Donc théoriquement, la ségrégation d'une phase sulfurée dans un magma komatiitique devrait donc l'appauvrir drastiquement en EGP et aussi en d'autres

éléments chalcophiles (compatibles dans les sulfures). Ceci signifie que dans un magma saturé en sulfures, les chromites qui cristallisent doivent être moins riches en EGP et en éléments chalcophiles (Ni, Co, Zn, etc.) par opposition à des chromites ayant cristallisé à partir d'un magma sous saturé en sulfures. Ce projet a pour but de vérifier si les contenus en éléments chalcophiles et fortement chalcophiles (Os, Ir, Ru et Rh) de chromites de komatiites peuvent indiquer une saturation précoce en sulfures et donc être utilisés comme indicateurs de la présence de gisements de sulfures de Ni-Cu et EGP qui sont parfois associés aux komatiites.

## **1.2 Problématique**

### **1.2.1 Les komatiites**

#### **1.2.1.1 Historique et définition**

Les komatiites ont été décrites pour la première fois par les frères Viljoen en 1969 en Afrique du Sud, le long de la rivière Komati, près de la ville de Barberton (Viljoen et Viljoen, 1969). Elles ont été interprétées comme des coulées de laves ultramafiques. C'est en 1980 que les komatiites ont été définies comme étant des roches ultramafiques avec un pourcentage poids en MgO supérieur à 18%, et présentant des évidences d'extrusion avec parfois une texture spinifex dans leur partie sommitale (Arndt, 2008). Les komatiites se retrouvent essentiellement dans les ceintures de roches vertes des cratons archéens à protérozoïques, à l'exception des komatiites de l'île de Gorgona qui sont d'âge Mésozoïque. Les phases minérales primaires que l'on retrouve dans les komatiites sont principalement de l'olivine et de la chromite accompagnées par des proportions variables

de verre. Les faciès plus évolués vont aussi contenir du pyroxène et du plagioclase. Les komatiites apparaissent sous la forme de coulées de laves et montrent une grande variété de morphologies. La morphologie schématisée d'une coulée type se présente généralement en deux parties : 1) Une partie supérieure, appelée zone A, à texture spinifex formée de grains squelettiques d'olivine et/ou de pyroxène et de verre ; 2) une partie inférieure, appelée zone B, à cumulat d'olivine (Arndt, 2008).

Les komatiites ont été beaucoup étudiées car elles abritent fréquemment des gisements de sulfures de Ni-Cu et EGP. En effet, les gisements associés aux komatiites représentent près de 14% de la production mondiale en Ni (Arndt, 2008). Le Ni des gisements associés aux komatiites provient de l'exploitation de minéraux sulfurés. Pour générer un gisement de sulfures, il faut que la teneur en S du magma soit suffisamment élevée pour qu'il atteigne la saturation en sulfures. Le magma komatiitique est issu de la fusion partielle du manteau qui contient des concentrations en S entre 125 et 250 ppm (McDonough et Sun, 1995). Après une fusion partielle, qui peut atteindre près de 50% à l'Archéen, on obtient un magma avec des concentrations en S entre 250 et 500 ppm (Leshner et Stone, 1996). Cependant pour atteindre la saturation d'un magma en sulfures il faut des concentrations en S supérieures à 1600 ppm, voir jusqu'à plus de 3000 ppm selon les conditions de température et de pression (Shima et Naldrett, 1975 ; Barnes, 2007). Le magma peut atteindre la saturation en sulfures après un pourcentage important de cristallisation fractionnée, cependant dans ce cas, l'olivine qui cristallise en premier et en quantité importante va s'accaparer une grande partie du Ni disponible dans le magma qui en sera alors appauvri. Ce sont donc principalement des sulfures de Fe qui vont cristalliser et il n'y aura pas de formation de gisement riche en Ni. Pour former un gisement de sulfures de Ni

à partir d'un magma komatiitique, il faut que la ségrégation d'un liquide sulfuré précède la cristallisation massive de l'olivine. Mais pour cela, il est nécessaire d'avoir un apport externe de S par la contamination du magma, notamment par l'assimilation de sédiment lors de sa remontée et/ou sa mise en place.

#### **1.2.1.2 Les chromites dans les komatiites**

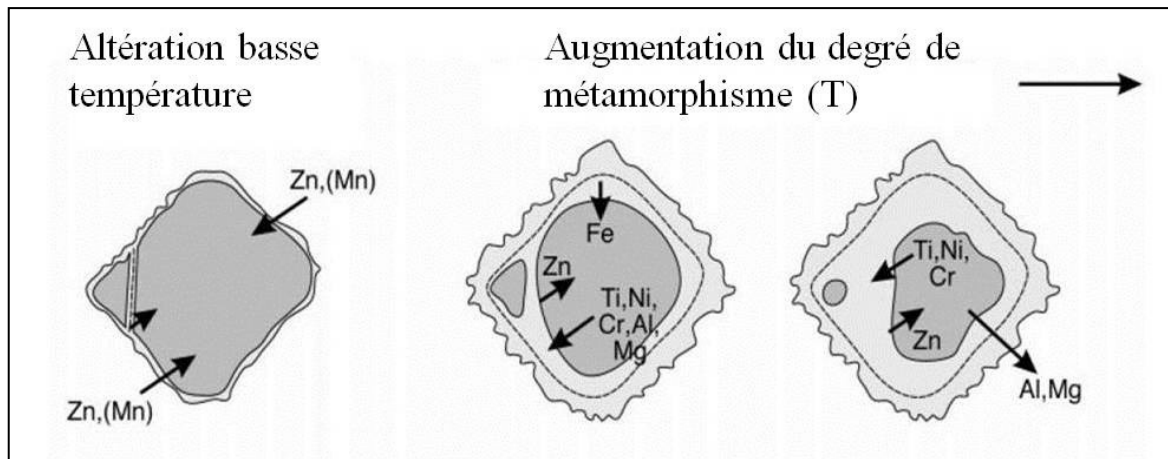
La chromite est un minéral qui appartient au groupe des spinelles. Les spinelles sont souvent utilisés comme indicateurs pétrogénétiques (Irvine, 1965). Les spinelles tirent leur utilité du fait qu'ils cristallisent dans un large éventail de conditions, depuis des magmas mafiques à ultramafiques et dans le cas des chromites, elles constituent un minéral commun dans les komatiites. De plus, la chromite est un minéral relativement réfractaire et résistant à l'altération en comparaison des autres minéraux magmatiques de haute température tel que l'olivine (Barnes et Roeder, 2001).

Dans un magma komatiitique montrant une évolution par simple cristallisation fractionnée, la chromite est généralement la deuxième phase à cristalliser après l'olivine. Il faut que le magma soit saturé en chromite pour qu'elle cristallise et cette saturation dépend de 4 facteurs principaux qui sont :

- la température
- la fugacité d'oxygène
- la composition du magma
- la pression

La chromite dans les komatiites représente rarement plus de 1% modal du total de la roche. On la retrouve presque à tous les niveaux d'une coulée. Les textures des chromites sont en relation étroite avec les faciès volcaniques. On peut résumer que pour une morphologie de coulée komatiitique typique, la partie supérieure à texture spinifex (la zone A) présente des grains de chromite automorphes avec des surcroissances squelettiques et/ou des grains squelettiques (Barnes, 1998). La partie inférieure d'une coulée (la zone B) dominée par des cumulats à olivine, présente des chromites automorphes en amas, en grains lobés et/ou en grains poecilitiques (Barnes, 1998).

Les compositions des chromites de komatiites peuvent être modifiées pendant le métamorphisme. Durant le métamorphisme, les chromites vont s'altérer progressivement en magnétites, ce qui se traduit par la formation d'une couronne de magnétite ou de ferritchromite autour du cœur de chromite préservé (Barnes 2000). La figure 1.4 illustre l'effet que peut avoir le métamorphisme sur la composition des chromites. Dans cette figure, seules les données des cœurs de chromites ou des chromites préservées sont présentées. Même si la chromite est décrite comme plutôt résistante à l'altération, elle peut tout de même se transformer en magnétite durant le métamorphisme. La transformation de chromite en magnétite entraîne la migration de certains éléments comme le Fe, Mg, Al, Ni, Zn, Mn et Ti (Barnes, 2000 ; Fig. 1.4).

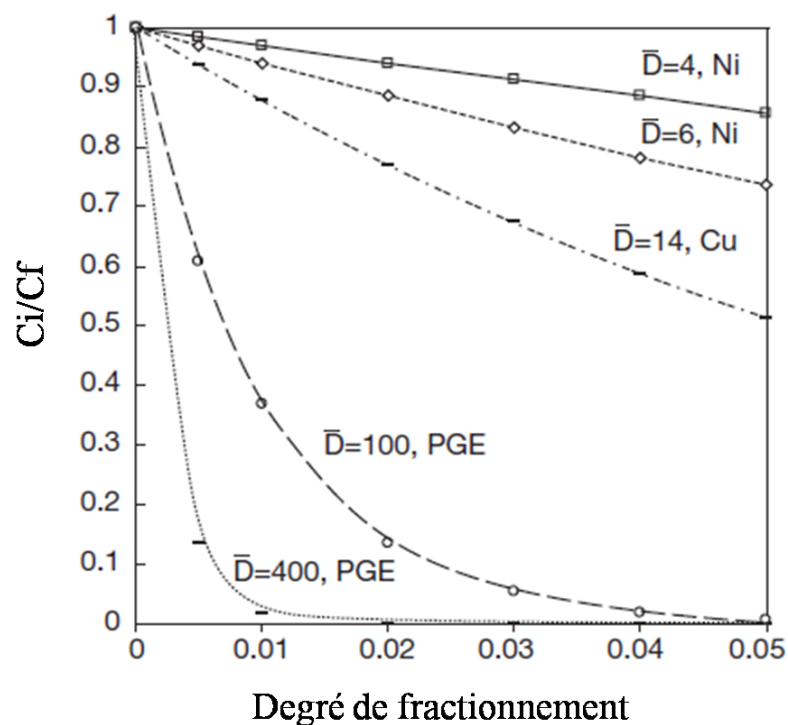


**Figure 1.4** : Schéma simplifié illustrant l'effet du métamorphisme sur une chromite (Tirée de Barnes, 2000).

## 1.2.2 Les éléments du groupe du platine

### 1.2.2.1 Les éléments du groupe du platine dans un magma silicaté

Dans un magma silicaté, les éléments du groupe du platine (EGP) ont un comportement incompatibles dans les silicates, ils cristallisent donc souvent sous la forme d'alliages ou de sulfures de quelques microns appelés les minéraux du groupe de platine (MGP). Ces MGP peuvent servir de nucléus pour la cristallisation des autres phases comme la chromite et l'olivine et se retrouver encapsulés sous formes d'inclusions (Borisov, 2005). Cependant, dans les cas où il y a ségrégation d'un liquide sulfuré, la portion silicatée du magma sera très rapidement appauvrie en EGP, puisqu'ils ont une très grande affinité pour les phases sulfurées. Les EGP sont des éléments sidérophiles, mais en présence de sulfures ils deviennent hautement chalcophiles. Sur la figure 1.5 on peut voir qu'un faible taux d'extraction de sulfures du magma silicaté, moins de 5% de fractionnement suffit à épuiser le magma en EGP (Barnes et Lightfoot, 2005).



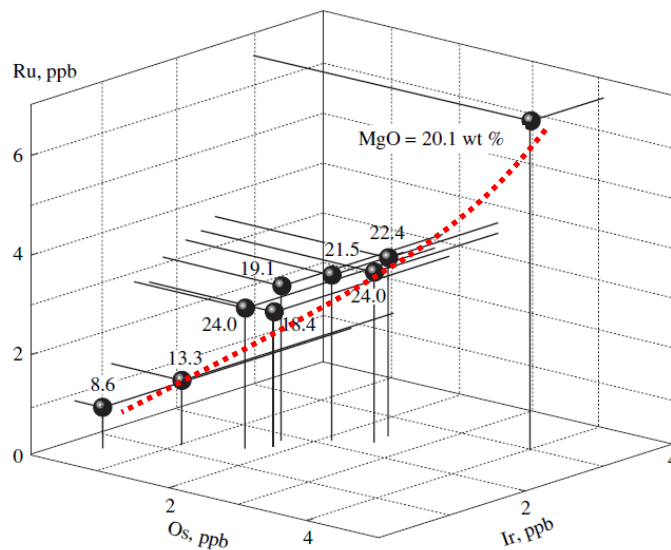
**Figure 1.5 :** Modèle des changements de concentration de différents métaux dans un magma silicaté durant la cristallisation fractionnée. Deux courbes représentent le Ni, une où il n'y a pas eu d'extraction de sulfure ( $D = 4$ ) et une où il y a eu une extraction de sulfure ( $D = 6$ ). Il est à noter que l'extraction combinée de sulfure et d'olivine ne modifie pas de façon significative la teneur en Ni du liquide. Deux courbes sont présentées pour montrer la variation des concentrations en EGP au cours du fractionnement, l'une avec un  $D^{\text{EGP/sul}} = 10\,000$  (bulk  $D = 100$ ), et une avec  $D^{\text{EGP/sul}} = 40\,000$  (bulk  $D = 400$ ), (Tirée de Barnes et Lightfoot, 2005).  $C_i$  = concentration dans le liquide initial,  $C_f$  = concentration dans le liquide fractionné.

### 1.2.2.2 Les EGP dans les komatiïtes

Depuis longtemps les chercheurs se demandent quelles phases contrôlent les EGP dans les komatiïtes dépourvues de minéralisation en sulfure, et de nombreux travaux ont tenté de résoudre ce problème. En l'absence de sulfures, c'est-à-dire en présence d'un liquide silicaté, les EGP réagissent différemment les uns par rapport aux autres. De nombreuses études ont montré que les EGP se fractionnent entre les EGPP (Rh, Pd et Pt) et les EGPI (Os, Ir et Ru) pendant les processus magmatiques. En l'absence de sulfures, les EGPP montrent un comportement incompatible et restent dans le magma, tandis que les EGPI



montrent un comportement plutôt compatible (Keays et al., 1981 ; Barnes et al., 1985 ; Barnes et Naldrett, 1987). Brüggmann et al. (1987) ont observé une corrélation entre les concentrations en Ir, Os et Ru avec celle du MgO, suggérant que l'olivine pourrait être un collecteur potentiel des EGPI (Fig. 1.6). Toutefois, d'autres études ont montré que dans le cas d'un magma pauvre en soufre les EGP étaient incompatibles dans les silicates, mais compatibles dans la chromite (Richter et al., 2004 ; Brenan et al., 2012).

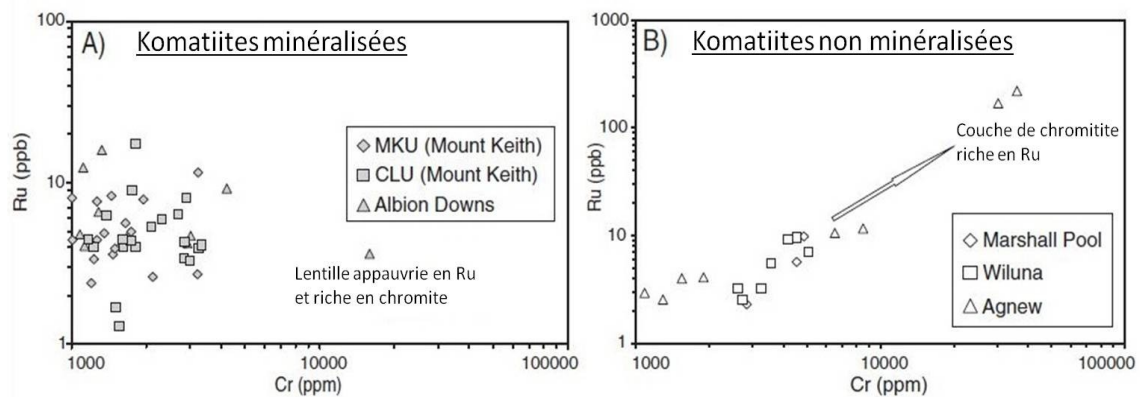


**Figure 1.6 :** Concentrations en Ir, Os et Ru des komatiites de Gorgona représentées par les points noirs dans un diagramme en trois dimensions. Les valeurs associées aux points représentent des teneurs en MgO en % poids, (tirée de Borisov, 2005 et modifiée d'après Brüggmann et al., 1987).

D'après une étude de Barnes et Fiorentini (2008) sur les contenus en EGP dans les komatiites du monde entier, le Pt, Pd et Rh montrent un comportement incompatible, donc ces éléments restent dans le liquide pendant la cristallisation. L'Ir montre un comportement plutôt compatible. Barnes et Fiorentini (2008) mettent en évidence qu'une autre phase que l'olivine, probablement un alliage Ir-Os doit cristalliser pour expliquer la distribution en Ir. Le Ru montre un comportement plutôt neutre avec un coefficient de partage proche de 1. D'après Barnes et Fiorentini (2008), une autre phase que l'olivine doit cristalliser pour

expliquer les distributions en Ru, mais ils proposent que la chromite joue aussi un rôle dans cette distribution.

Une autre étude réalisée par Fiorentini et al. (2008) pour les komatiites, a montré qu'il existait une forte corrélation positive entre le Cr et le Ru lorsque celles-ci ne contiennent pas de minéralisation en sulfure, en revanche cette corrélation n'est pas observée pour les coulées minéralisées (Fiorentini et al. 2008 ; Fig. 1.7). Tous ces travaux suggèrent que la chromite agit comme un minéral collecteur d'EGPI et Rh et plus particulièrement de Ru.



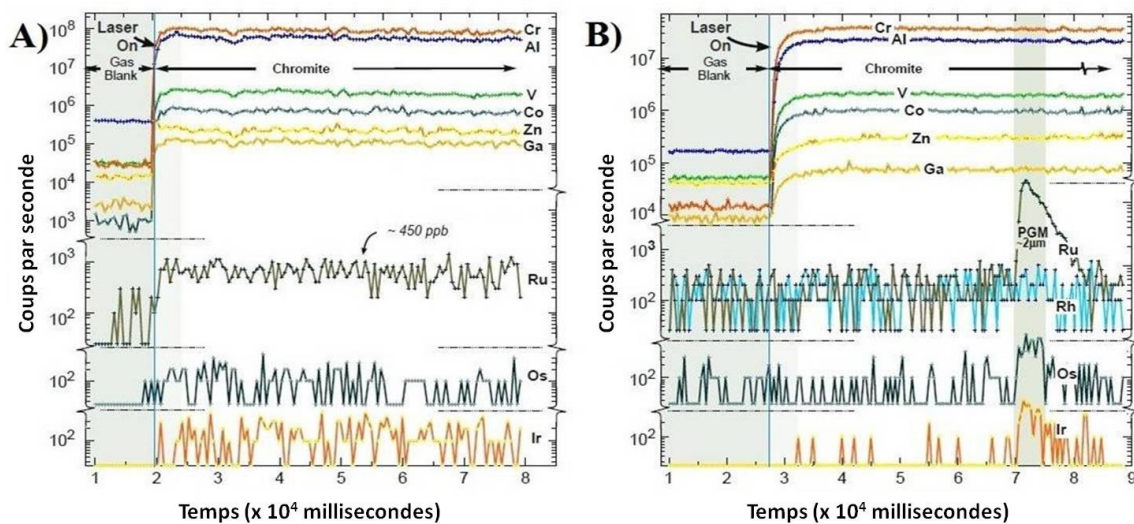
**Figure 1.7 :** Diagrammes présentant les concentrations sur roche totale du Ru en fonction du Cr. Avec en A), des komatiites minéralisées qui ne présentent pas de corrélation et en B), des komatiites non minéralisées qui présentent une corrélation positive (Tirée de Fiorentini et al., 2008).

### 1.2.2.3 Les EGP dans la chromite

Des études expérimentales sur le fractionnement des EGP entre un magma silicaté et des spinelles ont montré que l'Os, l'Ir, le Ru et également le Rh entrent préférentiellement dans la chromite (Cr-spinelle), alors que le Pt et le Pd sont incompatibles et restent donc plutôt dans le magma (Richter et al., 2004 ; Brenan et al., 2012). Des travaux de Locmelis et al. (2011 et 2013), Pagé et al. (2012) et Pagé et Barnes (2016) ont montré, par des

analyses in situ d'ablation laser (Laser Ablation Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry : LA-ICP-MS), que les chromites des komatiites et aussi de certaines roches volcaniques peuvent présenter des concentrations au-dessus des limites de détection pour l'Os, l'Ir, Ru et Rh. Les coefficients de partage obtenus par Pagé et Barnes (2016) pour les chromites des komatiites non minéralisée en sulfures sont :  $D_{Ru}^{chr/kom} \approx 56.2$  ;  $D_{Ir}^{chr/kom} \approx 11,8$  ;  $D_{Os}^{chr/kom} \approx 9,6$  ;  $D_{Rh}^{chr/kom} \approx 18,1$ . De plus, dans les komatiites, la chromite semble contrôler plus de 75% du budget en Ru de la roche (voir Fig. 1.3).

Les EGPI et le Rh dans les chromites de roches plutoniques sont connus pour être sous la forme de minéraux du groupe du platine (MGP) ou bien d'alliage en inclusions. Dans les chromites de roches volcaniques, des études ont montré que les EGP peuvent être sous formes d'inclusions, mais que ces inclusions restent relativement rares voire exceptionnelles dans certaines roches et donc les EGPI et aussi le Rh sont sous forme de solution solide à l'intérieur des chromites, c'est-à-dire qu'ils entrent dans le réseau cristallin des chromites (Locmelis et al., 2011 ; Pagé et al., 2012 ; Kamenetsky et al., 2015 ; Pagé et Barnes, 2016). Des études de chromites de komatiites par analyse au LA-ICP-MS ont montré que les IEGP et le Rh semblent plutôt entrer dans le réseau cristallin des chromites. En effet, d'après les spectres obtenus par l'analyse de chromites de komatiites par LA-ICP-MS, aucune inclusion de Ru n'est observée et les spectres apparaissent comme homogènes, suggérant que le Ru est bel et bien en solution solide dans la structure de ces chromites (Fig. 1.8). Les travaux de Brenan et al. (2012) montrent que le Ru va entrer dans la structure de la chromite sous la forme de  $Ru^{3+}$  dont le rayon ionique lui permet de se substituer au  $Cr^{3+}$  ou au  $Fe^{3+}$ . Le coefficient de partage du Ru dans la chromite est influencé par sa teneur en  $Fe^{3+}$ , ce qui implique que le  $Ru^{3+}$  semble se substituer plus aisément au  $Fe^{3+}$  qu'au  $Cr^{3+}$ .



**Figure 1.8 :** Spectres d’analyses de chromites par LA-ICP-MS présentés en coups par seconde en fonction du temps (millisecondes). Avec en A), l’analyse d’une chromite de komatiite du secteur de la mine Alexo (Ontario). Noter que le signal du Ru est constant et bien marqué, alors que pour l’Os et l’Ir on se rapproche des limites de détection (Pagé et al., 2012). En B), l’analyse d’une chromite de chromitite du manteau. Le pic associé à la présence de l’inclusion est visible pour Ir, Os et Ru suggérant la présence d’un alliage ou bien d’un MGP comme une laurite  $\text{Ru}(\text{Os}, \text{Ir})\text{S}_2$  (Pagé et al., 2012).

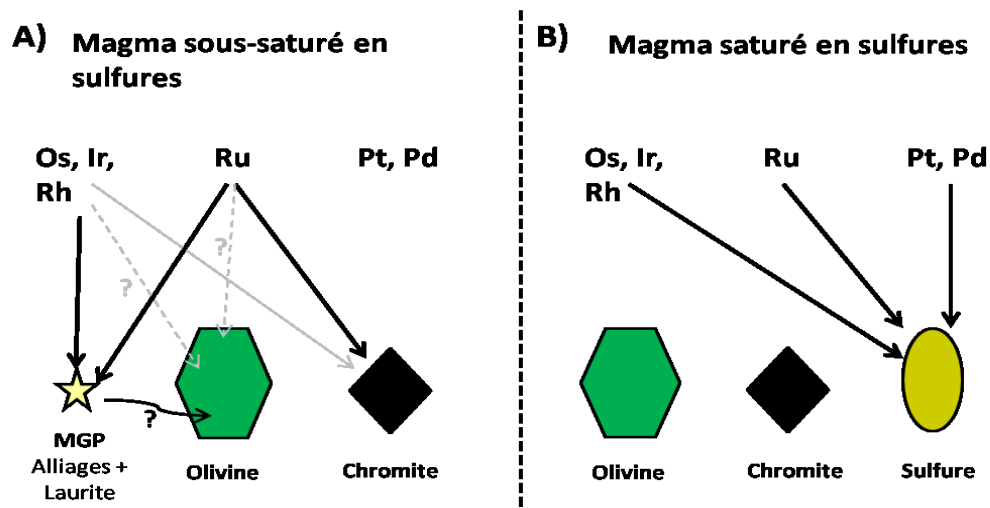
Ces observations nouvelles du Ru qui semble entrer dans le réseau de la chromite sont importantes pour deux raisons principales : 1) Cela permet de mieux comprendre le comportement des EGP lors de la cristallisation fractionnée d’un magma komatiitique. 2) Cela permet de proposer que les concentrations en Ru des chromites de komatiites pourraient être utilisées pour déterminer si une coulée komatiitique a expérimenté un épisode de ségrégation en sulfures ayant conduit à la formation d’un gisement de sulfures de Ni-Cu et EGP.

### 1.3 Objectifs de l’étude et organisation du manuscrit

#### 1.3.1 Objectifs de l’étude

Les objectifs de cette étude sont :

1- Prouver notre hypothèse de travail : les chromites de komatiites non minéralisées en sulfures présentent des concentrations élevées en Ru et en éléments chalcophiles en général. Tandis que les chromites de komatiites minéralisées en sulfures présenteront de faibles concentrations en Ru et autres éléments chalcophiles (Fig. 1.9). Pour tester cette hypothèse, des chromites des komatiites d'Alexo et de Hart (Ontario, Abitibi) ont été analysées.



**Figure 1.9 :** Schéma du comportement du Ru dans un magma komatiitique sous-saturé en sulfures (à gauche) et saturé en sulfure (à droite).

2- Développer l'utilisation de la chromite comme minéral indicateur pour l'exploration minière des gisements de Ni-Cu et EGP associés aux komatiites. En plus du Ru, d'autres éléments chalcophiles comme le Ni, Co, Zn, Cu mais aussi Os, Ir et Rh pourront permettre de prévoir la présence de minéralisation en sulfures.

3- Définir la signature en éléments mineurs et traces des chromites komatiitiques qui pourra être utilisée dans les études sur la provenance de chromites détritiques.

4- Préciser le comportement de Os, l'Ir, Ru et Rh dans les premiers stades de l'évolution des magmas mafiques à ultramafiques, en lien avec la présence de chromite et/ou de sulfure.

### **1.3.2 Organisation du manuscrit**

Le présent manuscrit est divisé en 5 chapitres :

Le chapitre 1 est une introduction et une présentation du projet de maîtrise, il présente la problématique du projet ainsi que des généralités sur les komatiites, les chromites et les EGP et il présente les objectifs visés du projet.

Le chapitre 2 présente le contexte géologique des sites où les échantillons ont été prélevés.

Le chapitre 3 traite de la pétrographie des échantillons et plus particulièrement de la chromite. Il présente également les différentes méthodologies d'analyses géochimiques utilisées, avec comme méthode principale les analyses par LA-ICP-MS (Laser Ablation-Inductive Coupled Plasma-Mass Spectrometry).

Le chapitre 4 présente les résultats obtenus des analyses sur roche totale et des analyses minérales des chromites (éléments majeurs et éléments en traces). Il présente aussi spécifiquement les résultats obtenus pour les éléments du groupe du platine, pour les analyses sur roche totale et les analyses de chromites (Os, Ir, Ru et Rh).

Le chapitre 5 est un chapitre de discussion. Les résultats présentés dans le chapitre 4 sont comparés à d'autres études scientifiques afin de mieux comprendre le comportement des EGP dans un magma komatiitique et dans la chromite.

Le chapitre 6 est la conclusion, il fait une synthèse rapide des résultats et interprétations.

## CHAPITRE 2

### GÉOLOGIE ET ÉCHANTILLONNAGE

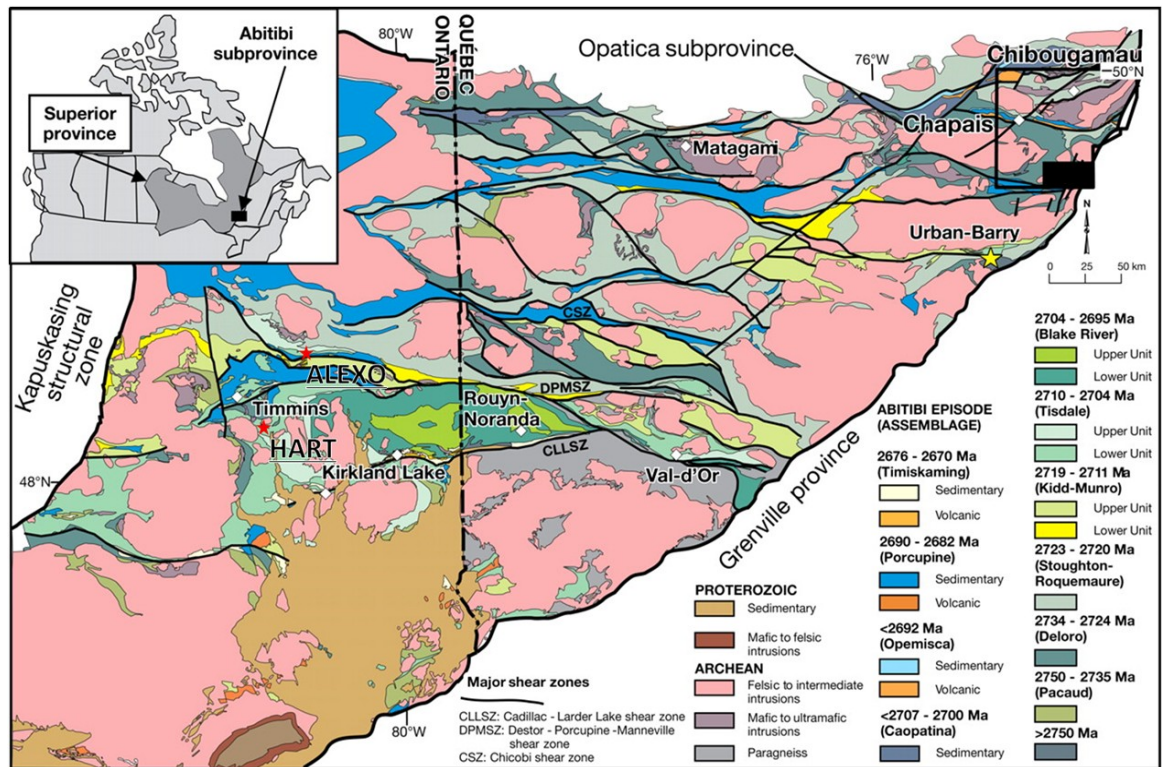
#### 2.1 Les komatiïtes dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi

L'Abitibi est une sous-province située dans la province géologique du Supérieur à l'intérieur du bouclier Canadien (Fig. 2.1). Elle abrite une des plus large ceinture de roches vertes archéennes au monde. Cette ceinture est aussi l'une des mieux exposée et l'une des plus riche en minéralisation économique, elle contient notamment des gisements d'Or orogénique de classe mondiale (ex : Timmins, Kirkland Lake, Val d'Or), des gisements de sulfures massifs volcanogènes Cu-Zn de classe mondiale (ex : Kidd Creek, La Ronde-Bousquet), et des minéralisations significatives de Ni-Cu-(EGP) (ex : Dumont, Shebandowan). C'est aussi là qu'ont été découverts et décrits les premiers gisements de Ni-Cu-(EGP) associés à des komatiïtes (Alexo et Shebandowan ; Naldrett, 1973 ; Coad, 1979 ; Barnes, 1986 ; Houlié et al., 2011). Sur les différents épisodes volcaniques décrits en Abitibi, seulement quatre contiennent un volume de komatiïtes significatifs : 2760 à 2735 Ma (l'assemblage Pacaud) ; 2723 à 2720 Ma (l'assemblage Stoughton-Roquemaure) ; 2720 à 2710 Ma (l'assemblage Kidd-Munro) ; 2710 à 2704 Ma (l'assemblage Tisdale). La proportion de komatiïtes dans les roches volcaniques de ces épisodes varie de 3 à 11% et les deux plus jeunes assemblages (Kidd-Munro et Tisdale) abritent la quasi-totalité des gisements en Ni-Cu et EGP associés à des komatiïtes (Houlié et al., 2011). C'est pourquoi pour cette étude, nous nous sommes intéressés à des sites provenant des assemblages de



Kidd-Munro et Tisdale. Les échantillons analysés proviennent de deux sites différents situés en Ontario près de la ville de Timmins. La majorité des 54 échantillons viennent du secteur de la mine Alexo ( $n = 48$ ), dont les komatiites font partie de l'assemblage Kidd-Munro, et quelques échantillons proviennent du secteur de la mine Hart ( $n = 6$ ) dont les komatiites font partie de l'assemblage Tisdale (Fig. 2.1). Pour simplification, tout au long du mémoire nous parlerons de la zone Alexo et de la zone Hart pour se référer aux deux secteurs d'étude. Initialement la zone Hart devait être la cible principale. Cependant, après l'observation pétrographique de certains échantillons, il s'est avéré que les échantillons ne contenaient que peu de chromites de dimensions suffisantes pour être analysées, et aussi que la plupart des grains de chromites de la zone Hart étaient altérés en magnétite avec seulement un cœur de chromite préservé, mais trop petit pour une analyse par LA-ICP-MS. De plus, les échantillons de la zone Hart sont affectés par du métamorphisme au grade amphibolite et par de la carbonatation. Le métamorphisme et l'altération peuvent affecter la composition chimique des minéraux primaires, par contre leur influence sur la composition en éléments traces et ultra traces dans la chromite reste peu connue et peu documentée. Le choix s'est donc reporté sur la zone Alexo, pour plusieurs raisons : i) les komatiites présentes sont certainement parmi les mieux préservées sur la planète, le métamorphisme est au grade prehnite-pumpellyite à schiste vert inférieur (Barnes et al., 1983 ; Arndt, 1986), ii) les textures et structures magmatiques sont très bien préservées, des reliques d'olivine fraîches sont encore observées, iii) une grande quantité d'échantillons provenant des thèses de doctorat de Sarah-Jane Barnes (1983) et de Michel Houlié (2008) étaient disponibles et le secteur de la mine Alexo est un environnement bien documenté, et enfin iv) la majorité des chromites font entre 50 et 500  $\mu\text{m}$  de diamètre et sont donc de dimensions suffisantes pour être analysées par ablation laser. De plus, à de

très rares exceptions les chromites de la zone Alexo ne montrent pas de traces d'altération en magnétite et les compositions qui seront obtenues vont être représentatives des compositions primaires.



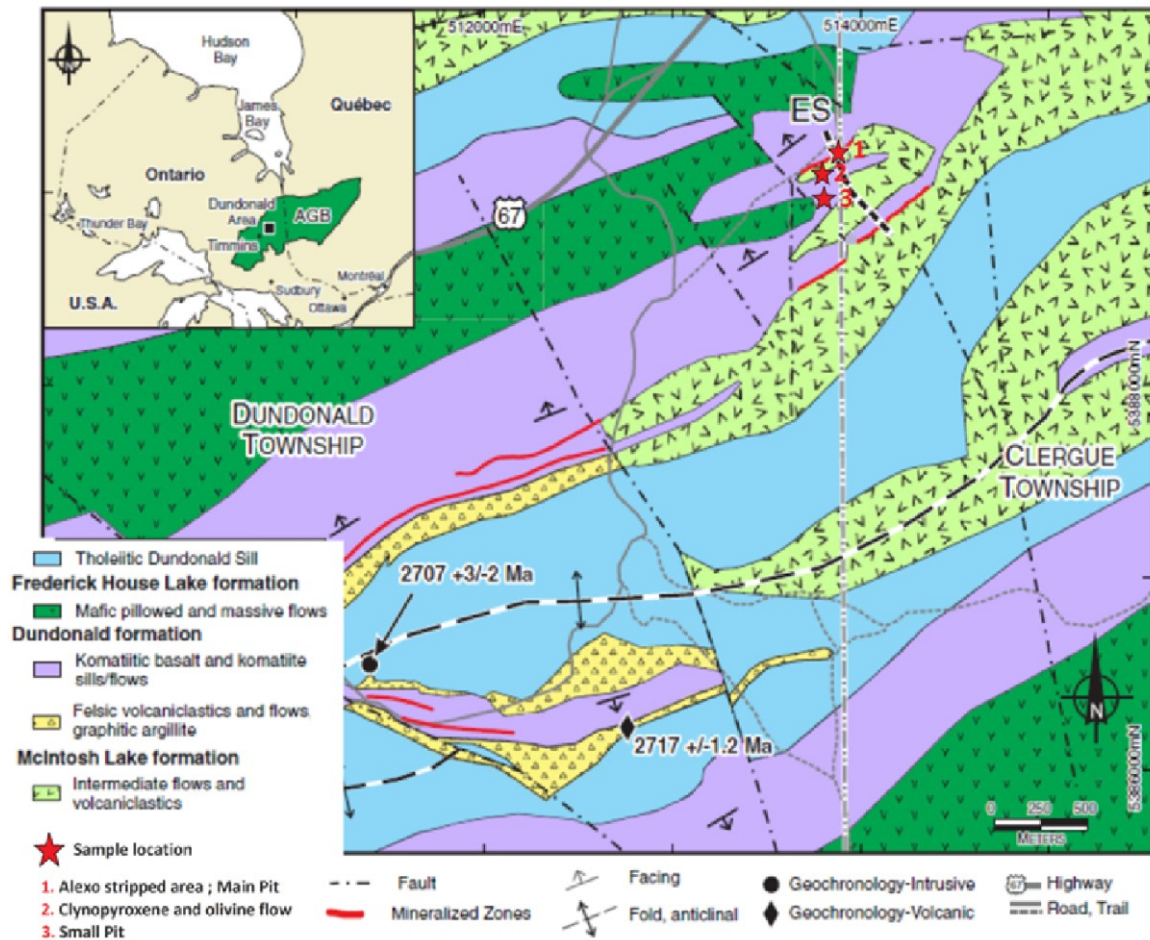
**Figure 2.1 :** Carte géologique de la sous-province de l'Abitibi et localisation des zones d'échantillonnage (étoiles rouges) (modifiée d'après Thurston et al., 2008).

## 2.2 La zone Alexo : géologie et échantillonnage

### 2.2.1 Géologie générale

Les komatiites de la zone Alexo sont bien préservées car le degré de métamorphisme est resté faible. Elles constituent un exemple typique de komatiites minéralisées, car elles abritent un gisement de Ni-Cu et EGP. La zone Alexo est située dans la partie NORD-EST du district de Dundonald, à environ 45 km au NORD-EST de la ville

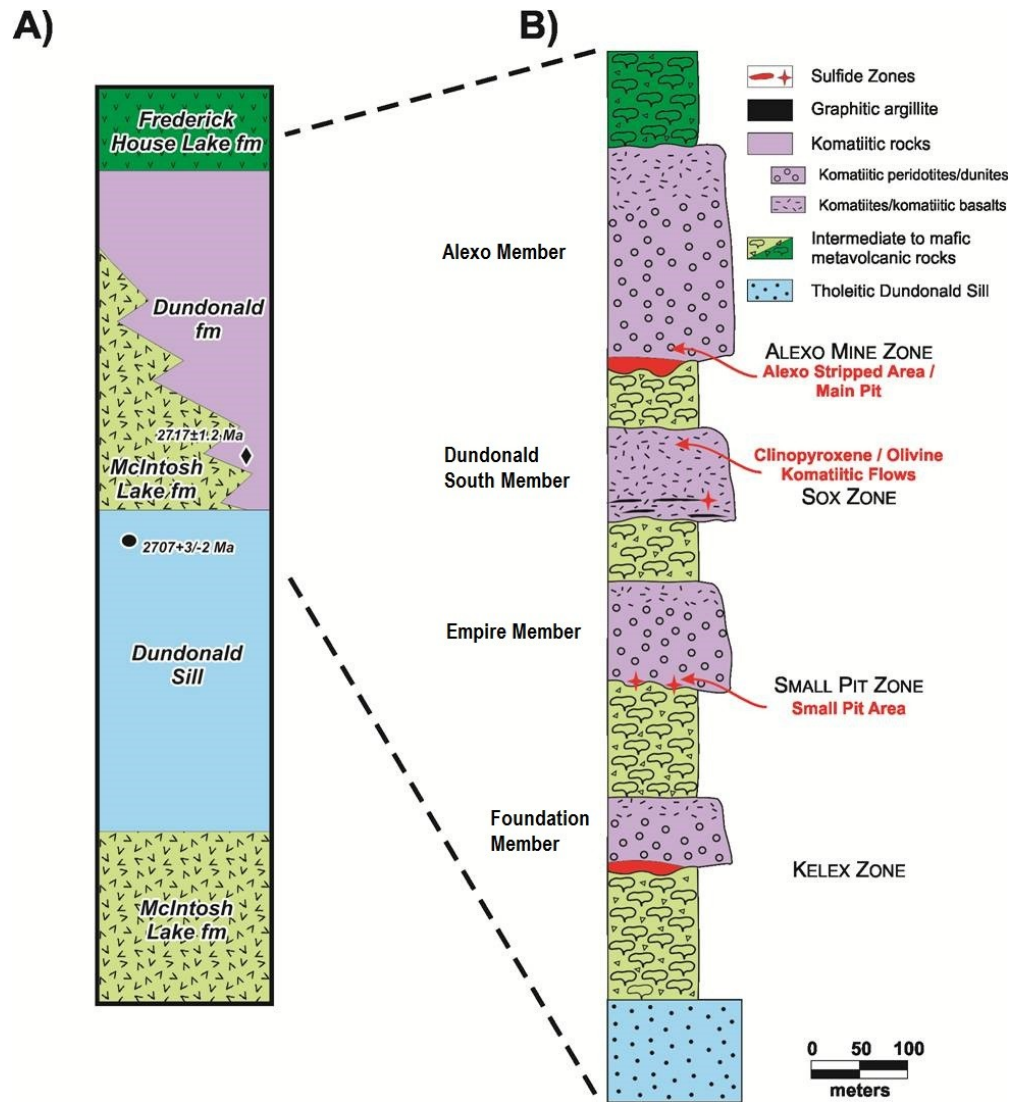
de Timmins (en Ontario). Géologiquement, la zone Alexo fait partie d'une suite volcano-sédimentaire appartenant à l'épisode volcanique de 2720-2710 Ma (assemblage Kidd-Munro). Cet épisode a été divisé par Houlié et al. (2008) en 3 Formations, elles sont présentées de la plus ancienne à la plus récente : 1) la Formation McIntosh Lake, 2) la Formation Dundonald et 3) la Formation Frederick House Lake (Figs. 2.2 et 2.3). Les échantillons de la zone Alexo proviennent d'unités komatiitiques de la Formation de Dundonald. Celle-ci est composée de roches volcaniques felsiques, d'argilites à graphite et sulfures, de coulées et de filons-couches komatiitiques. Les unités komatiitiques de la Formation de Dundonald sont subdivisées en 4 sous-unités lithostratigraphiques allant de la plus ancienne à la plus récente : 1) l'unité Alexo, 2) l'unité Dundonald sud, 3) l'unité Empire et 4) l'unité Foundation (Houlié et al., 2008 ; voir Fig. 2.3). Une minéralisation en sulfure de fer-nickel-cuivre est présente à la base de chacune de ces unités, cependant seulement les unités Alexo (la mine Alexo) et Foundation (gisement Kelex) ont été exploitées.



**Figure 2.2 :** Carte géologique simplifiée du district de Dundonald dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi. La carte présente les principales unités géologiques ainsi que la localisation des sites d'étude, (étoiles rouges) (modifiée d'après Houlé et al., 2012) . Section ES (Section Est : Mine Alexo) correspond à la localisation de la colonne stratigraphique présentée à la figure 2.3.

De manière plus précise, les échantillons de la zone Alexo de ce projet d'étude proviennent i) de l'unité Empire qui correspond à un filon-couche massif de péridotites komatiitiques d'environ 100 m d'épaisseur ; ii) de la partie supérieure de l'unité Dundonald sud, qui est représentée par de fines coulées komatiitiques bien différenciées (c'est-à-dire avec des zones à texture de cumulat et à texture spinifex), avec en sommet de coulées des brèches de hyaloclastites (Barnes et al., 1983 ; Barnes, 1985 ; Arndt, 1986) ;

iii) et de l'unité Alexo, qui correspond à d'épaisses coulées komatiitiques peu différenciées d'orthocumulat à mésocumulat d'olivine (Houlé et al., 2008 ; Houlé et al., 2012).



**Figure 2.3 :** A ) Colonne stratigraphique schématique du district de Dundonald (d'après Houlé et al., 2008). B) Stratigraphie simplifiée de la Formation de Dundonald au niveau de la mine Alexo. Elle présente les localisations des gisements et indices de minéralisations en Ni-Cu et EGP associés à des komatiites, ainsi que la localisation des sites d'études (flèches rouges) (modifiée d'après Houlé et al., 2008).

## 2.2.2 Position des échantillons

Les échantillons de la zone Alexo sont répartis dans cinq coulées komatiitiques différentes. Elles sont nommées Main Pit, Small Pit, Olivine Flow, Pyroxene Flow et

Alexo Stripped area. Ces coulées proviennent des trois unités komatiitiques décrites précédemment, l'unité Empire, la partie supérieure de l'unité Dundonald sud et l'unité Alexo.

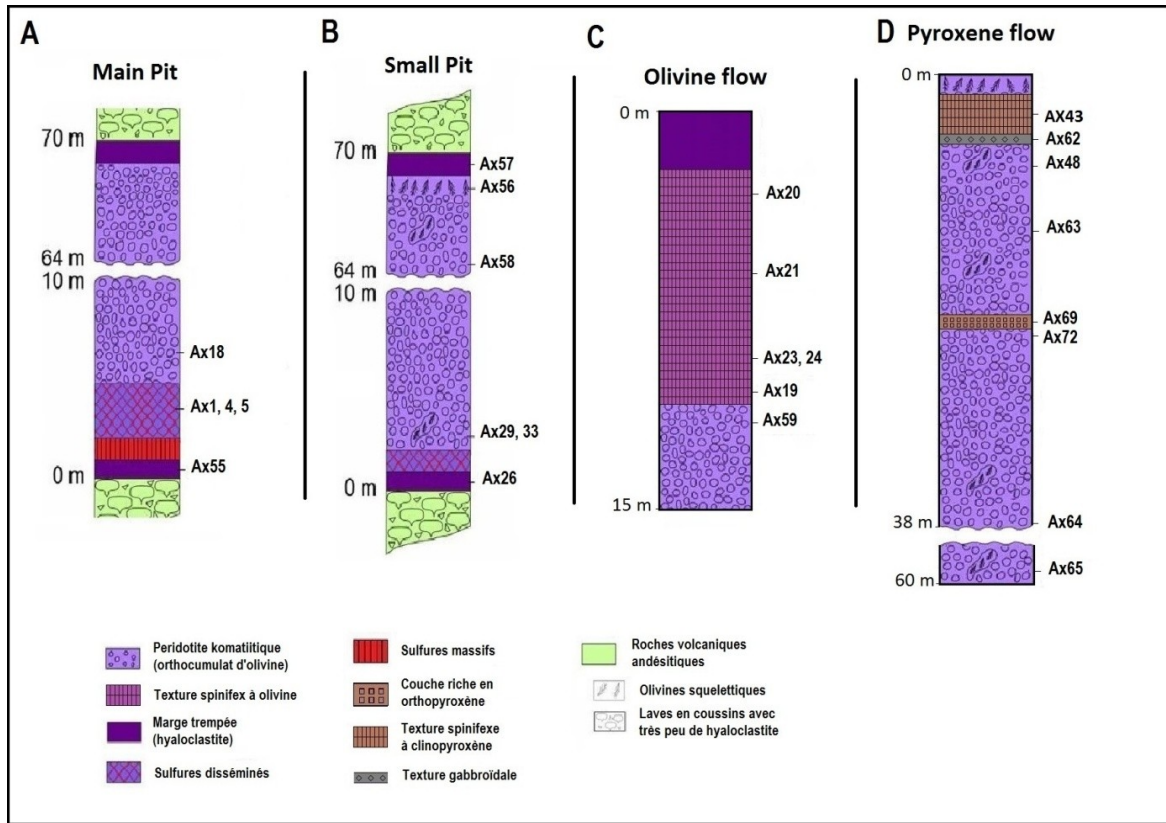
La figure 2.4 présente les colonnes stratigraphiques simplifiées pour les coulées komatiitiques *Main Pit*, *Small Pit*, *Olivine Flow* et *Pyroxene Flow*. Le *Main Pit* fait partie de l'unité Alexo. Il a été exploité une première fois de 1914 à 1919 puis il y a eu une seconde phase d'extraction minière sur une zone élargie du *Main Pit* de 2004 à 2005 (*Alexo Stripped area*). Le *Main Pit* correspond à une komatiite périodotitique massive qui présente une texture à orthocumulat d'olivine avec à son sommet une marge trempée, et à sa base, une zone de sulfures massifs surmontée par des sulfures disséminés. Les sulfures disséminés forment une matrice interstitielle dans les orthocumulats d'olivine. Le hiatus observé sur la colonne stratigraphique est dû à une absence d'affleurements sur le terrain (Fig. 2.4A).

Le *Small Pit* fait partie de l'unité Empire. Contrairement au *Main Pit* il n'a jamais été exploité. Il correspond aussi à une komatiite périodotitique massive présentant une texture à orthocumulat d'olivine, cependant on ne retrouve pas de sulfures massifs à sa base mais seulement quelques sulfures disséminés interstitiels dans les orthocumulats d'olivine. Il présente vers le sommet des olivines squelettiques, ce qui s'approche de la texture spinifex typique des komatiites, cette zone à olivines squelettiques est surmontée par une marge trempée. Le hiatus observé sur la colonne stratigraphique est dû à une absence d'affleurements sur le terrain (Fig. 2.4B).

*Olivine Flow* et *Pyroxene Flow* correspondent à des coulées komatiitiques qui font partie de la partie supérieure de l'unité de Dundonald sud. Elles ont été décrites et cartographiées en détails par Barnes (1983). Les figures 2.4C et 2.4D, respectivement *Olivine Flow* et *Pyroxene Flow*, représentent les colonnes stratigraphiques simplifiées de ces coulées komatiitiques. *Olivine flow* est une komatiite périidotitique qui montre une texture différenciée typique pour des komatites décrites par Pyke et al. (1973), avec une partie à cumulat d'olivine et une partie à spinifex d'olivine. *Pyroxene Flow* présente également une texture différenciée, cependant la partie à cumulat et la partie à texture spinifex contiennent une quantité plus importante de clinopyroxènes, on parle de texture spinifex à pyroxène et olivine. La présence de plus de pyroxènes montre que le magma ayant formé ces coulées était plus évolué que celui ayant formé les coulées plus riches en olivine.

Il faut remarquer que contrairement au *Main Pit* et au *Small Pit*, les deux coulées komatiitiques, *Olivine Flow* et *Pyroxene Flow* ne contiennent pas de minéralisations en sulfures. En revanche, il est à noter que l'unité Dundonald sud à laquelle elles appartiennent est connue pour être minéralisée dans sa partie inférieure, cette partie correspond au gisement de Sox zone (voir Fig. 2.3).



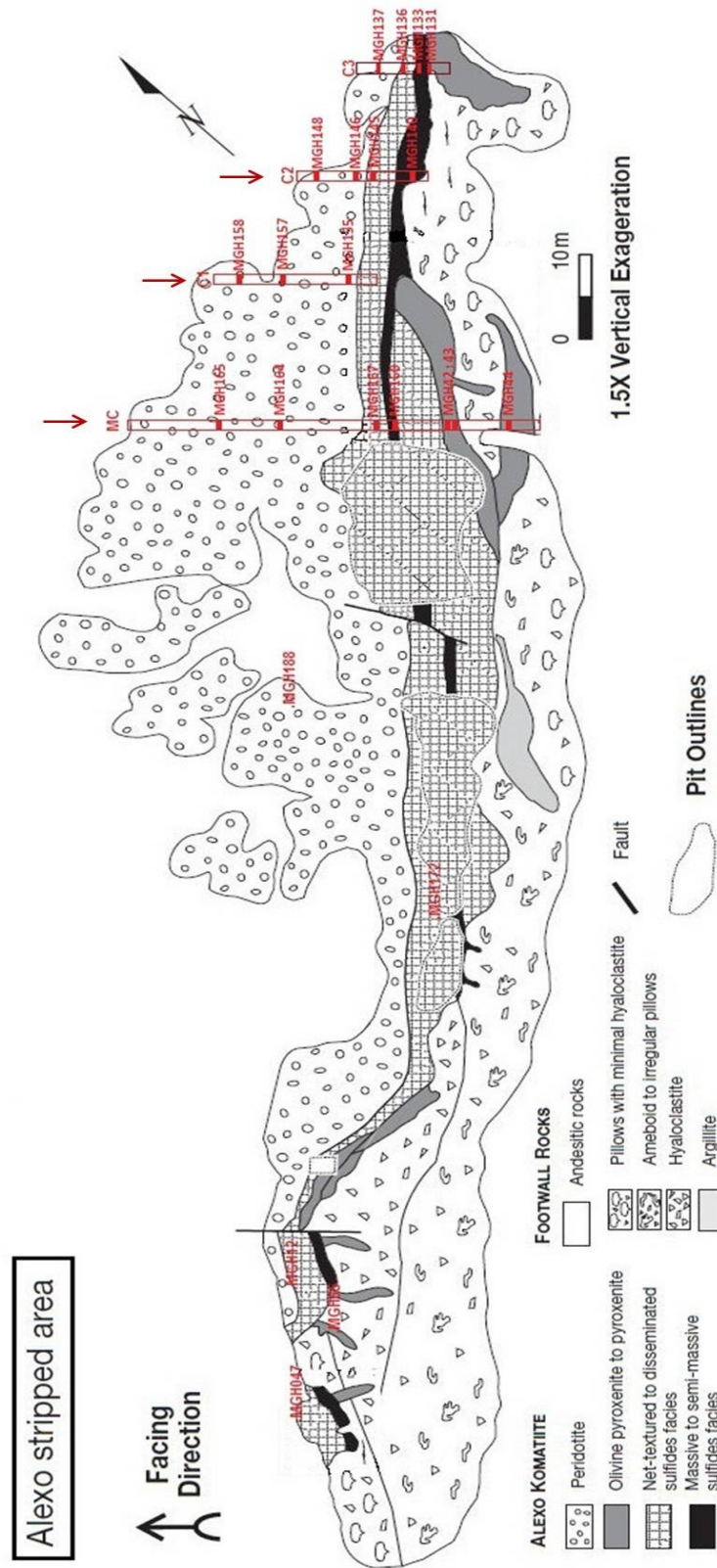


**Figure 2.4 :** A) Coupe transversale du Main Pit (unité Alexo) au niveau de la mine Alexo montrant la position des échantillons, B) Coupe transversale du Small Pit (unité Empire), C) et D) Coupes transversales simplifiées pour respectivement Olivine Flow et Pyroxene Flow (unité Dundonald sud) (modifié d'après Barnes, 1983) .

*Alexo Stripped area* est situé au même endroit que le *Main Pit* de la mine Alexo, cette zone a été agrandie pour être de nouveau exploitée de 2004 à 2005. La figure 2.5 présente la carte géologique de cette zone agrandie qui a été décapée (*Stripped area*) pour mettre en évidence le gisement. Les komatiites massives présentes juste au-dessus du gisement sont presque entièrement composées d'orthocumulats et de mésocumulats d'olivine. La partie la plus basale de l'unité présente une zone de 2 ou 3 m d'épaisseur de péridotite à pyroxène allant jusqu'à une péridotite à olivine (Houlé et al., 2012). La minéralisation en Ni-Cu et EGP correspond à une minéralisation de type I, c'est-à-dire des sulfures massifs à disséminés situés en base de coulée. Cette minéralisation est incluse



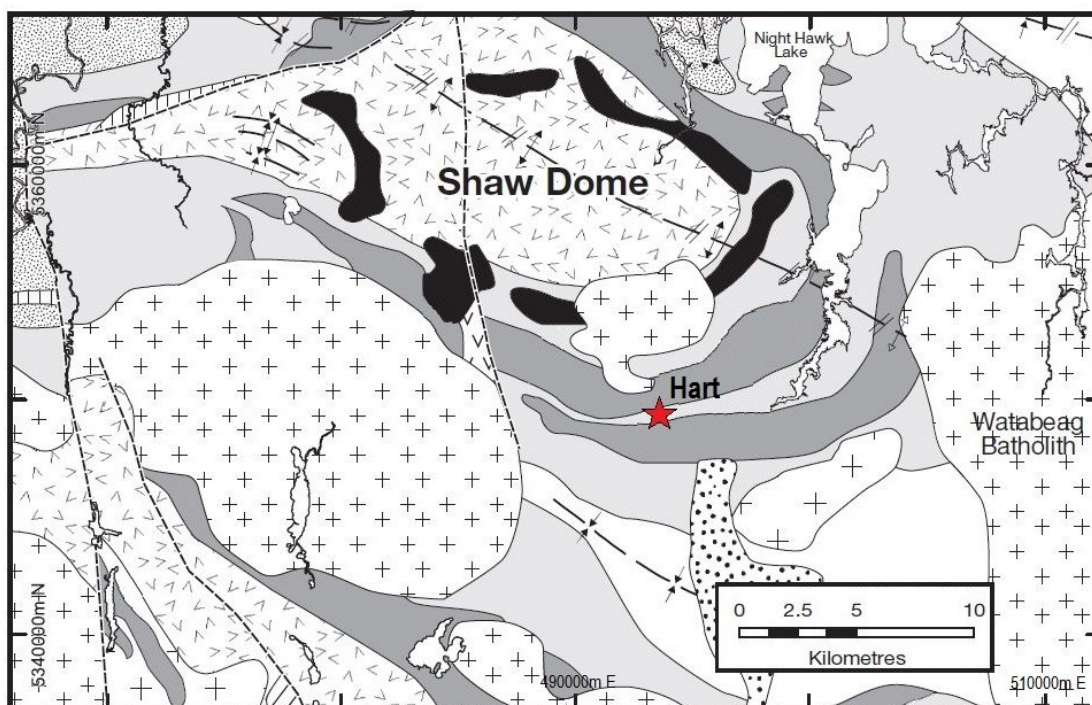
dans les komatiites à orthocumulats et mésocumulats d'olivine. La minéralisation va de quelques centimètres jusqu'à 8m d'épaisseur, elle est caractérisée par des lentilles de sulfures massifs à semi-massifs surmontées par des sulfures disséminés (Houlé et al., 2012). Le gisement et les cumulats d'olivine montrent un contact franc avec l'encaissant. Cet encaissant est composé de roches volcaniques intermédiaires de la Formation de McIntosh, qui présentent des faciès allant de laves en coussin avec peu de hyaloclastite à des faciès de laves en coussins irréguliers avec beaucoup de hyaloclastite. Le contact avec l'encaissant a été étudié et cartographié en détail par Houlé et al. (2012), qui a ainsi mis en évidence une érosion thermomécanique suite à la mise en place des komatiites. Il semble que cette érosion joue un rôle important dans la mise en place, la géométrie et la position du gisement. Cependant aucun échantillon de bordure avec l'encaissant n'a été utilisé dans notre étude.



### **2.3 La zone Hart : géologie et échantillonnage**

La zone Hart est située à environ 30 km au SUD-EST de la ville de Timmins (Ontario), dans la région du Shaw Dome (Houlé et al., 2011 ; Fig. 2.6). Le gisement de la zone Hart a été découvert en 1964 et décrit par Coad (1979), il s'inscrit dans la partie inférieure de l'assemblage géologique Tisdale (épisode volcanique 2710-2706 Ma). La minéralisation de la zone Hart correspond à un gisement Ni-Cu et EGP de type I. Ce gisement est encaissé dans une épaisse coulée de komatiite, constituée d'orthocumulats à mésocumulats d'olivine. La minéralisation en sulfures se trouve à la base de la coulée komatiitique à l'intérieur de dépressions au niveau de la roche encaissante. Ces dépressions ont été formées par érosion thermomécanique (Houlé et al., 2012). Les roches encaissantes sont dominées par des roches volcaniques felsiques et des formations de fer litées.

Le degré de métamorphisme subi par les komatiites de la zone Hart est important, il est généralement au faciès amphibolite à schiste vert supérieur. De plus, une intense carbonatation est aussi observée. L'effet du métamorphisme sur la composition des chromites reste peu connu surtout dans le cadre des éléments traces et ultra traces comme les éléments du groupe du platine. C'est pourquoi seuls quelques échantillons ( $n = 5$ ) en provenance de Hart ont été retenus pour analyse afin d'observer et contrôler si le métamorphisme pouvait avoir un impact sur la composition en EGP des chromites.



**Figure 2.6 :** Carte géologique simplifiée du Shaw Dome, situé au sud de la ville de Timmins (Ontario). L'étoile rouge montre la position de la mine Hart (modifiée d'après Houlié et al., 2011).

## **CHAPITRE 3**

### **PÉTROGRAPHIE ET MÉTHODOLOGIE**

Dans ce chapitre, la première partie traite de la pétrographie, nous ferons une brève description générale de la pétrographie observée dans la zone Alexo et la zone Hart. Plus de détails sur la pétrographie peuvent être trouvés dans les thèses de doctorat de Sarah-Jane Barnes (1983) et Michel Houlé (2008) et aussi dans Barnes et al. (1983) et Barnes (1985). L'accent sera mis sur la description pétrographique des chromites (morphologie, position, altération, etc.). La deuxième partie présente la méthodologie ainsi que les techniques d'analyses géochimiques utilisées.

#### **3.1 Pétrographie**

##### **3.1.1 La zone Alexo**

À Alexo, le métamorphisme a transformé en grande partie la minéralogie primaire, cependant les textures magmatiques demeurent pratiquement intactes et parfois quelques reliques d'olivines fraîches sont encore présentes. Le métamorphisme est au faciès prehnite-pumpellyite à schiste vert inférieur. De façon générale, 4 lithologies principales ont été identifiées :

- Les komatiites péridotitiques à texture de cumulat
- Les komatiites péridotitiques à texture spinifex

- Les komatiites pyroxénitiques à texture de cumulat
- Les komatiites pyroxénitiques à texture spinifex

Pour les échantillons de la zone Alexo, des minéralisations en sulfures sont présentes à la base des coulées komatiites, on les retrouve sous forme de lentilles de sulfures massifs ou bien sous forme disséminés, ou en texture de filet dans les komatiites péridotitiques à texture de cumulat et les komatiites pyroxénitiques à texture de cumulat. Il n'y a pas de minéralisation en sulfures observées dans les lithologies à texture spinifex. Les sulfures massifs sont décrits comme une lithologie secondaire.

### **3.1.1.1 Les komatiites péridotitiques**

#### *À texture de cumulat*

Les komatiites péridotitiques à texture de cumulat correspondent à des orthocumulats à méso-cumulats d'olivine. La proportion d'olivine et de liquide interstitielle varie de façon graduelle et répétée à travers les coulées komatiitiques, et l'abondance d'olivine semble diminuée près du contact basal (Naldrett, 1966). L'observation des lames minces montrent que les olivines constituent la phase principale toujours au-dessus de 50% en proportion modale jusqu'à environ 80% dans certains échantillons. Les olivines des komatiites péridotitiques à texture de cumulat se retrouvent sous la forme de grains automorphes de 0,5 à 2 mm de diamètre. Les grains d'olivine sont presque en totalité transformés en serpentine, avec parfois quelques portions d'olivine préservées. La matrice est composée de pyroxènes interstitiels et de verre recristallisé en partie transformé en chlorite.

Certains échantillons des komatiites péridotitiques à texture de cumulat présentent des sulfures, la quantité de sulfures augmente plus l'on se rapproche des lentilles de sulfures massifs. Dans les cumulats d'olivine, les sulfures se retrouvent dans la matrice sous formes disséminés ou bien en texture de filet. La pyrrhotite est la phase sulfurée la plus importante avec environ 70-80 % des sulfures observés, suivis de la pentlandite avec environ 20-30 % des sulfures observés, la chalcopryrite et la pyrite constituent des phases sulfurées accessoires.

#### *À texture de spinifex*

Les komatiites péridotitiques à texture de spinifex présentent environ 70-90% d'olivines de forme squelettiques, de lames ou bien d'aiguilles de tailles allant d'environ 1 mm jusqu'à pluricentimétriques et qui sont maintenant presque entièrement transformées en serpentine. Quelques pyroxènes (augite) en lames ou dendritiques sont également observés. La matrice constitue 10-30% et elle est principalement composée de verre recristallisé, presque entièrement transformé en chlorite. L'observation des lames minces n'a pas mis en évidence la présence de sulfures dans les échantillons des komatiites péridotitiques à texture spinifex.

### **3.1.1.2 Les komatiites pyroxénitiques**

#### *À texture de cumulat*

Les komatiites pyroxénitiques correspondent à des ortocumulats à méso-cumulats d'olivine et de clinopyroxène. Les olivines restent la phase principale avec environ 30-40 % en proportion modale, et sont sous forme de grains automorphes de 0,5 à 2 mm de diamètre. Les olivines sont presque entièrement transformées en serpentine. Les clinopyroxènes (augites), constituent environ 20-30% et sont sous forme de grains automorphes ou bien de

lames de 1 à 2 mm et ils sont presque entièrement transformés en chlorite. La matrice est principalement composée de verre recristallisé et transformé en chlorite, avec quelques pyroxènes éparses et parfois des plagioclases.

Certains échantillons des komatiites pyroxénitiques à texture de cumulat présentent des sulfures, la quantité de sulfures augmente plus l'on se rapproche des lentilles de sulfures massifs. Dans les lames minces, les observations sur les sulfures sont les mêmes que pour les échantillons des komatiites péridotitique à texture de cumulat. C'est-à-dire que les sulfures se retrouvent dans la matrice sous forme disséminés ou bien en texture de filet. La pyrrhotite est la phase sulfurée la plus importante avec environ 70-80 % des sulfures observés, suivis de la pentlandite avec environ 20-30 % des sulfures observés, la chalcopryrite constitue une phase sulfurées accessoire.

#### *À texture de spinifex*

Les komatiites pyroxénitiques à texture spinifex sont composées de grains d'olivine et de clinopyroxènes de 1 mm jusqu'à plusieurs cm, sous forme squelettique ou bien de lames ou d'aiguilles. Les olivines sont transformées en serpentine et les clinopyroxènes en chlorite. Certains échantillons ne sont composés que de lames de clinopyroxènes (*Pyroxene Flow*). La matrice est principalement composée de verre recristallisé transformé en chlorite. L'observation des lames minces n'a pas mis en évidence la présence de sulfures dans les échantillons des komatiites pyroxénitiques à texture spinifex.



### **3.1.1.3 Les sulfures massifs**

Les sulfures massifs à Alexo se retrouvent à la base d'une coulée komatiitique, sous forme de lentilles allongées, ils sont composés de plus de 85% de sulfures, avec quelques inclusions de komatiites. Les phases sulfurées des sulfures massifs sont les mêmes que pour les sulfures disséminés, la pyrrhotite est la phase sulfurée la plus importante avec environ 70-80% des sulfures observés, suivis de la pentlandite avec environ 20-30 % des sulfures observés, la chalcopryrite et la pyrite constituent des phases sulfurées accessoires. La pentlandite est le principal minéral porteur de nickel. La chromite, mais aussi de la magnétite sont présentes comme phases accessoires.

### **3.1.2 La zone Hart**

Pour la zone Hart, le métamorphisme est au faciès schiste vert supérieur à amphibolite. La minéralogie magmatique a été transformée, pour certains échantillons les textures magmatiques ont été préservées, mais pour d'autres la texture magmatique a été complètement oblitérée par le métamorphisme. Globalement les komatiites de la zone Hart présentent les mêmes assemblages minéralogiques primaires que la zone Alexo, les échantillons sélectionnés de la zone Hart correspondent aux lithologies des komatiites peridotitiques à texture de cumulat. Cependant la matrice est parfois remplacée par de la chlorite, du talc, de la tremolite et des carbonates qui viennent complètement détruire les textures magmatiques dans certains échantillons. Un seul échantillon à Hart contient des sulfures, avec la pyrrhotite et pentlandite comme phase principale et la chalcopryrite et pyrite comme phases accessoires.

### 3.1.3 Les chromites

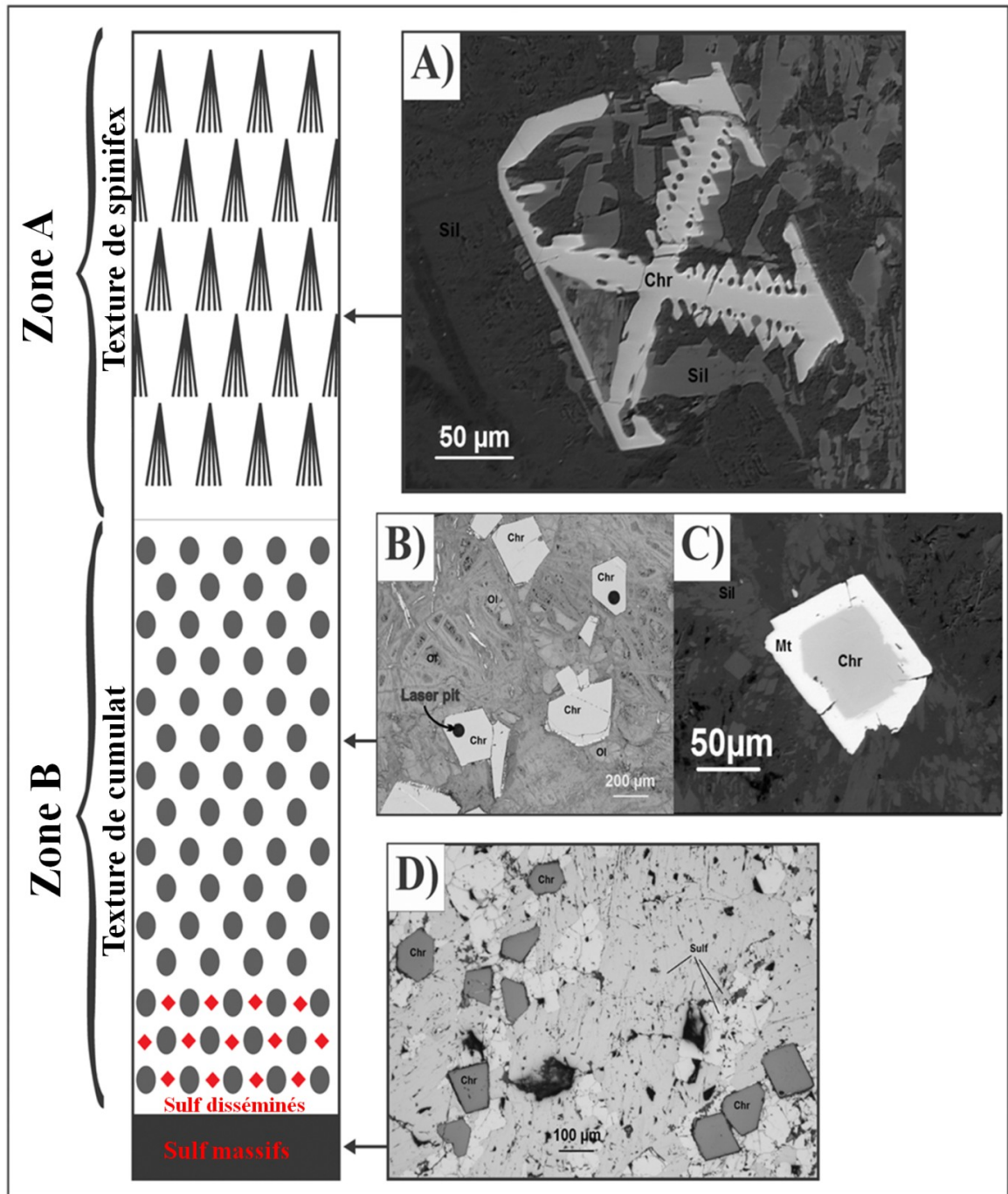
Les chromites sont présentes dans toutes les lithologies présentées précédemment, comme une phase accessoire en faible proportion, environ 1% ou moins en proportion modale dans nos échantillons. Il ne semble pas y avoir de différence visuellement dans la quantité de chromite présentes dans les komatiites péridotiques à texture de cumulat, les komatiites péridotiques à texture spinifex et les komatiites pyroxénitiques à texture de cumulat. En revanche, les komatiites pyroxénitiques à texture spinifex semblent visuellement contenir moins de chromites que les autres lithologies. Les morphologies des chromites sont très similaires à celles observées dans les différentes unités komatiitiques partout dans le monde (Barnes, 1998). Le type de morphologie dépend principalement de la texture de la roche (spinifex et cumulat), la taille des grains varie d'une dizaine de  $\mu\text{m}$  à environ  $200\mu\text{m}$ . Typiquement, les chromites des zones à texture spinifex présentent des grains automorphes à sub-automorphes et des grains squelettiques (Fig. 3.1A). Les chromites des zones à cumulats présentent des grains automorphes à sub-automorphes et peuvent être distribués en amas de plusieurs grains jusqu'à quelques dizaines (Fig. 3.1B). Des grains de chromites apparaissent aussi en inclusion dans certaines olivines.

Certains grains de chromite présentent des évidences d'altération dues au métamorphisme. Cette altération s'exprime par une bordure de ferritchromite ou de magnétite entourant un cœur de chromite préservé. La zone Alexo ne présente que des grains préservés et qui ne montrent pas de traces d'altération, seulement un échantillon présente des chromites légèrement altérées en magnétite (Ax33), avec environ 20% des chromites transformées en magnétites. Pour la zone Hart en revanche, presque la totalité des grains de chromite sont affectés. Le degré d'altération varie d'une simple frange ( $\approx 1\%$

du grain transformé), jusqu'à la totalité du grain transformé en magnétite (Fig. 3.1C). La partie préservée des chromites est considérée comme assez représentative de la chimie primaire des chromites avant l'effet du métamorphisme, c'est pourquoi, seuls les cœurs préservés ont été analysés (en évitant toute fracture et/ou inclusion).

Les lithologies à sulfures massifs contiennent aussi des chromites comme phase accessoire (environ 1%). Les grains de chromites sont automorphes et équigranulaires (Fig. 3.1D), ces grains ont vraisemblablement cristallisé à partir du liquide sulfuré. Houlé et al. (2012) ont également rapporté des grains de chromites squelettiques le long de la bordure basale entre les sulfures massifs et la roche encaissante (footwall).

Toutes ces observations suggèrent que la morphologie des chromites est clairement dépendante des conditions de refroidissement à l'intérieur de chaque unité komatiitique (Barnes, 1998).



**Figure 3.1** : À gauche, colonne stratigraphique schématisée simplifiée d'une unité komatiitique (échelle non respectée). À droite photos de chromites de différentes morphologies en fonction de leur position stratigraphique pour les zones Alexo et Hart. A) Chromite squelettique dans les lithologies à texture spinifex (zone Alexo) ; B) Chromites automorphes dans les lithologies à cumulat d'olivine (zone Alexo) ; C) Chromite automorphe altérée, caractérisée par un cœur de chromite préservé et entouré par une bordure de magnétite dans un cumulat d'olivine (zone Hart) ; D) Chromites automorphes dans un horizon de sulfures massifs à la base d'une coulée komatiitique (zone Alexo). Abréviations: Chr = chromite; Sil = silicate; Ol = olivine; Mt = magnétite; sulf = sulfure.

## **3.2 Méthodologie**

### **3.2.1 Introduction et historique**

La méthodologie mise en place pour ce projet a consisté à effectuer une série d'analyses géochimiques afin de comprendre le comportement des éléments traces et des EGP dans la chromite et aussi dans un magma komatiitique. Il a été réalisé et sélectionné 54 lames minces polies, dont 48 provenant de la zone Alexo et 6 provenant de la zone Hart. Les échantillons de Hart ont été retenus afin de contrôler l'effet d'un métamorphisme plus important sur la composition géochimique des chromites. Ensuite, après les observations pétrographiques, entre 4 et 6 grains de chromites par lames minces ont été sélectionnés pour effectuer des analyses in situ. Les grains ont été sélectionnés de façon à être d'une taille suffisante ( $\geq 40\mu\text{m}$ ) pour une analyse par ablation laser. Des analyses sur roche totale ont également été effectuées afin de réaliser des bilans de masse. Les tableaux 1, 2 et 3 présentent la liste des échantillons ainsi que les analyses effectuées par échantillon.

**Tableau 1 :** Liste des échantillons de la thèse de doctorat de Barnes (1983) et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible.

Échantillons thèse Barnes (1983)				
échantillon	LM	Microsonde	Laser	Analyses RT
Ax1	X	X	X	+
Ax4	X	X	X	+
Ax5	X	X	X	+
Ax18	+	+	+	+
Ax19	+	+	+	+
Ax20	+	+	+	+
Ax21	+	+	+	+
Ax23	+	+	+	+
Ax24	+	+	X	+
Ax26	+	+	+	X
Ax29	+	+	+	+
Ax33	+	+	+	X
Ax43	+	+	+	+
Ax48	+	+	+	+
Ax55bis	+	+	+	X
Ax56	+	+	+	+
Ax57	+	+	+	+
Ax58	+	+	+	+
Ax59	+	+	+	+
Ax62	+	+	X	+
Ax63	+	+	+	+
Ax64	+	+	+	+
Ax65	+	+	+	+
sa5015(Ax69)	+	+	+	X
sa5014(Ax72)	+	+	+	X

**Tableau 2 :** Liste des échantillons de la thèse de doctorat de Houlié (2008) et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible.

Échantillons thèse Houlié (2008)				
échantillon	LM	Microsonde	Laser	Analyses RT
01-MGH-012	+	+	+	X
02-MGH-040	+	+	+	+
02-MGH-042	+	+	+	+
02-MGH-043	+	+	+	+
02-MGH-044	+	+	X	+
02-MGH-047	+	+	+	+
02-MGH-055	+	+	X	+
02-MGH-131	+	+	+	X
02-MGH-133	+	X	+	+
02-MGH-136	+	+	+	+
02-MGH-137	+	+	+	+
02-MGH-140	+	+	+	+
02-MGH-145	+	+	+	+
02-MGH-146	+	+	+	+
02-MGH-148	+	+	+	+
02-MGH-155	+	+	+	+
02-MGH-157	+	+	+	+
02-MGH-158	+	+	+	+
02-MGH-159	+	+	+	+
02-MGH-164	+	+	+	+
02-MGH-165	+	+	+	+
02-MGH-167	+	+	+	+
02-MGH-172	+	+	+	X
02-MGH-188	+	+	+	X

**Tableau 3 :** Liste des échantillons de la zone Hart et des analyses effectuées. LM = Lames Minces, RT = Roche Totale. X = non disponible, + = disponible.

Hart				
échantillon	LM	Microsonde	Laser	Analyses RT
AV2T (JMA)	+	+	+	+
AV3T (JMB)	+	+	+	+
AV7T (JMC)	+	+	+	+
AV8T (JMD)	+	+	+	+
AV12T (JME)	+	+	+	+
AV17T (JMF)	+	+	+	+

### 3.2.2 Analyses sur roche totale

Des analyses sur roche totale ont été effectuées sur la majorité des échantillons. Cependant, pour certaines lame minces sélectionnées, il n’y avait pas ou plus assez d’échantillon disponible pour réaliser des analyses sur roche totale (voir tableaux 1 à 3). Les éléments majeurs ont été analysés par XRF à « Activation Laboratories LTD » pour une partie des échantillons et à « Geoscience Laboratories (Ontario) » pour l’autre partie. Les éléments traces ont été analysés à « Geoscience Laboratories » en effectuant des digestions multi-acides et des analyses des solutions par ICP-MS. Les éléments du groupe du platine (EGP) et l’Au ont été analysés par la méthode de « Nickel Sulfur Fire-Assay », à « Geoscience Laboratories » pour une partie des échantillons et au LabMaTer à l’Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) pour l’autre partie. Enfin le S a été analysé par combustion avec la fournaise EMIA au LabMaTer et à « Geoscience Laboratories ».

### 3.2.3 Analyses minérales

Après l’observation pétrographique des lames minces et la sélection des grains de chromites, des analyses minérales ont d’abord été effectuées par microsonde électronique (EMP) de type CAMECA SX100 à l’université Laval (Québec). Les conditions analytiques

de la microsonde étaient de 15kv et 20 nA, avec un faisceau de 2  $\mu\text{m}$  de diamètre. Ces analyses ont été réalisées dans le but de déterminer les concentrations en éléments majeurs de la chromite, notamment le Fe qui sert d'élément de calibration pour les analyses au LA-ICP-MS.

Ensuite, pour déterminer les concentrations des éléments traces et EGP, des analyses par ablation laser ont été réalisées à UQAC au laboratoire LabMaTer avec un système d'ablation laser RESolution M-50 (Excimer 193nm) couplé à un ICP-MS Agilent 7700x. Un trou est percé à travers la chromite d'un diamètre de 33 à 100 $\mu\text{m}$  selon la taille du grain. La fréquence du laser est de 15 Hz pour une puissance de 5 mJ par impulsion. L'ablation est réalisée en utilisant de l'hélium de haute pureté qui est introduit dans la cellule d'ablation au rythme de 650ml / min. Un débit d'azote de 1ml / min est ajouté sur la ligne, ensuite de l'argon sert de gaz porteur (0.7 à 0.9ml / min). Des matériaux de référence riches en fer sont utilisés pour calibrer l'ICP-MS, le fer étant l'élément de calibration. Pour la majorité des éléments traces dans les oxydes, le laboratoire LabMaTer de l'UQAC utilise pour la calibration un verre synthétique GSE-1g développé par la commission géologique des États-Unis. Pour les concentrations en EGP et S c'est un sulfure synthétique, Laflamme (Po727) qui est utilisé pour la calibration. D'autres matériaux de référence sont aussi utilisés comme moniteurs afin de contrôler la qualité des analyses, un verre komatiitique naturel GOR-128G et également une chromite naturelle du manteau, M1A dont de nombreuses analyses ont été réalisées en interne à l'UQAC.



Une série de 34 éléments ont été sélectionnés pour être analysés au LA-ICP-MS. La liste suivante présente les isotopes utilisés pour déterminer ces éléments :

$^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{47, 49}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{69,71}\text{Ga}$ ,  $^{73,74}\text{Ge}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{101,102}\text{Ru}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{105}\text{Pd}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{190,192}\text{Os}$ ,  $^{191,193}\text{Ir}$ , et  $^{195}\text{Pt}$ .

Afin de contrôler la présence possible d'inclusions (comme des silicates ou bien des sulfures) les éléments suivants ont aussi été analysés :  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{42}\text{Ca}$ ,  $^{75}\text{As}$  et  $^{88}\text{Sr}$ . Certains éléments de la liste présentent plusieurs isotopes qui ont aussi été analysés pour contrôler la possibilité d'interférences et permettre de sélectionner l'isotope montrant les résultats les plus fiables. Par exemple, les résultats du  $^{93}\text{Nb}$  sont inutilisables, dû à une interférence massique entre le  $^{53}\text{Cr}$  qui est le constituant majeur de la chromite et le gaz porteur  $^{40}\text{Ar}$ , cette interférence vient donc biaiser le signal de façon importante. Les éléments majeurs de la chromite comme le Cr, l'Al et le Mg sont aussi mesurés afin de s'assurer que le signal provient bien de la chromite. Cependant les concentrations retenues pour ces éléments majeurs sont celles mesurées à la microsonde électronique.

Les limites de détection sont calculées par le logiciel de traitement Iolite et vont varier en fonction de plusieurs paramètres, principalement selon la taille du faisceau mais aussi selon la fréquence et la puissance utilisées pour le laser. Ces paramètres vont influencer sur la quantité de matériel envoyé dans l'ICP-MS pour l'analyse. La calibration de l'ICP-MS peut aussi avoir un effet sur les limites de détection, c'est-à-dire que les limites peuvent légèrement varier d'une journée d'analyse à l'autre. Le tableau 4 présente les limites de détection moyennes, minimales et maximales obtenues pour chacun des éléments traces

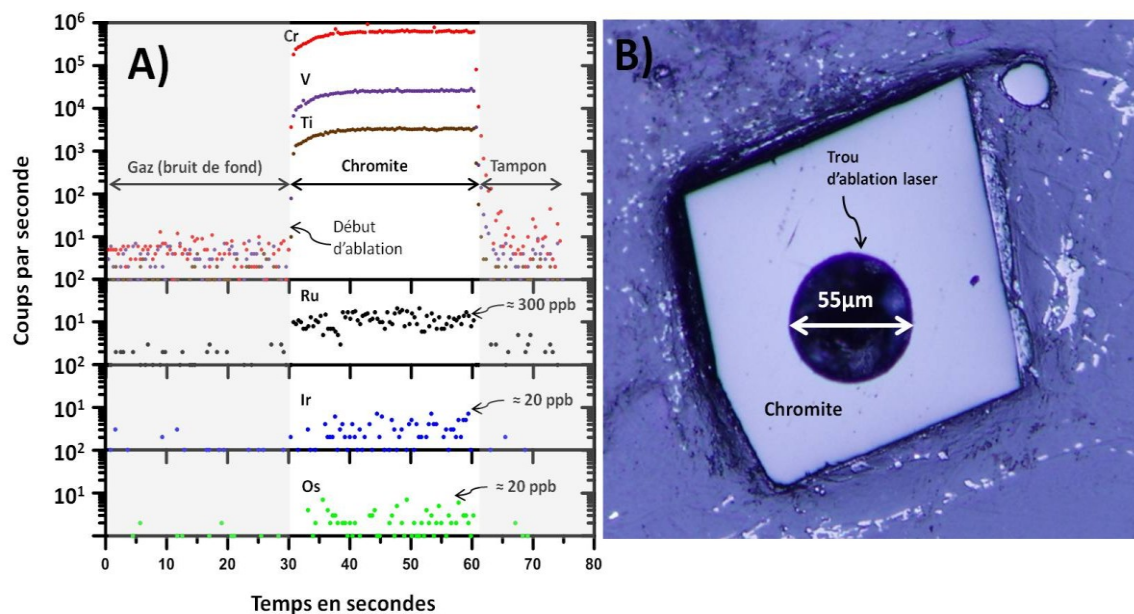
analysés au laser. Il est à noter que parmi la liste des éléments, As, Y, Pd, Sb, Ta et Pt montrent des concentrations dans les chromites presque systématiquement en dessous des limites de détection. Pour Zr, Mo, Rh, In, Sn, Sb, Hf, Os et Ir, les concentrations sont globalement au-dessus des limites de détection, mais une partie des données sont en dessous des limites de détection. Le reste des éléments montrent des concentrations largement au-dessus des limites de détection.

**Tableau 4 :** Limites de détection des éléments traces analysés au LA-ICP-MS. Le tableau présente les valeurs minimales et maximales obtenues et en caractères gras les valeurs moyennes. LD = Limite de détection.

éléments		LD min	LD max	LD moy (n≈220)
S34	ppm	69	614	<b>244</b>
Ca42	ppm	68	632	<b>318</b>
Sc45	ppb	31	938	<b>243</b>
Ti47	ppb	80	3557	<b>944</b>
Ti49	ppb	247	2823	<b>933</b>
V51	ppb	30	495	<b>141</b>
Mn55	ppb	294	2625	<b>1232</b>
Co59	ppb	3	292	<b>74</b>
Ni60	ppb	53	1755	<b>498</b>
Cu63	ppb	11	372	<b>126</b>
Zn66	ppb	127	1592	<b>485</b>
Ga69	ppb	40	495	<b>154</b>
Ga71	ppb	4	546	<b>144</b>
Ge73	ppb	23	2742	<b>755</b>
Ge74	ppb	39	326	<b>125</b>
As75	ppb	47	1010	<b>261</b>
Sr88	ppb	1	57	<b>19</b>
Y89	ppb	1	37	<b>13</b>
Zr91	ppb	8	1643	<b>489</b>
Nb93	ppb	0,7	101	<b>31</b>
Mo95	ppb	6	436	<b>144</b>
Ru101	ppb	2	187	<b>70</b>
Ru102	ppb	2	57	<b>21</b>
Rh103	ppb	0,7	34	<b>12</b>
Pd105	ppb	3	282	<b>79</b>
In115	ppb	1	27	<b>10</b>
Sn118	ppb	14	156	<b>55</b>
Sb121	ppb	11	126	<b>44</b>
Hf178	ppb	1	27	<b>8</b>
Ta181	ppb	0,4	13	<b>4</b>
Os190	ppb	3	43	<b>15</b>
Ir191	ppb	2	53	<b>15</b>
Os192	ppb	3	37	<b>12</b>
Ir193	ppb	1	29	<b>9</b>
Pt195	ppb	7	60	<b>31</b>

### 3.2.4 Génération des résultats des analyses au LA-ICP-MS

Une analyse est d'une durée d'environ 75 s. Les 30 premières secondes servent à mesurer le bruit de fond lié aux gaz. Puis l'ablation laser du grain de chromite commence pour une durée maximale de 30 s ou bien jusqu'à ce que la chromite soit percée et que l'on obtienne un pic en Si ou en S dépendamment des minéraux qui entourent le grain (silicates, sulfures ou bien verre de lame mince). Les 15 dernières secondes servent de tampon pour laisser le signal retourner à son niveau initial (Fig. 3.2). Ensuite, afin de générer les données des concentrations, le signal obtenu est traité avec le logiciel Iolite. Les données brutes pour chaque élément sont en coups par seconde en fonction du temps. Le logiciel va permettre d'intégrer le signal sur la durée d'analyse choisie et de générer une concentration moyenne par élément. La durée d'analyse choisie pour intégration est manuellement sélectionnée afin d'éviter la présence d'inclusions et de s'assurer que le signal n'est que celui de la chromite. La figure 3.2 présente les signaux obtenus après l'ablation d'une chromite pour différents éléments comme le Cr, le V, le Ti et aussi pour certains EGP. Le signal pour le Ru apparaît de façon claire et continue, tandis que pour l'Os et l'Ir, le signal est plus faible, mais toujours présent de façon continue.



**Figure 3.2 :** A) Traitement des analyses par ablation laser présentées en coups par seconde en fonction du temps. Les signaux présentés sont le Cr, le V et le Ti, et également le Ru, l'Ir et l'Os. B) Photo d'une chromite de komatiite après une analyse par ablation laser.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS

#### 4.1. Introduction et présentation des résultats

Pour la présentation des résultats, les chromites ont été regroupées suivant leur faciès lithologique, c'est-à-dire en fonction de la texture magmatique, de la minéralogie mais aussi du niveau d'altération. Tout d'abord, un regroupement est fait pour les chromites des échantillons à texture de cumulat et à texture spinifex. Ensuite dans ces regroupements, une distinction a été faite lorsqu'une proportion significative de pyroxène a été observée, car cela correspond généralement à un magma plus évolué et un impact est possible sur la géochimie des chromites. Puis, les échantillons ont été regroupés en fonction de la présence ou l'absence de sulfures dans les lames minces afin d'observer s'il y a un effet sur la géochimie des chromites. Enfin, les chromites de la zone Hart constituent le groupe altéré, et les échantillons sont aussi distingués par la présence de sulfures ou non.

Ainsi on retrouve les catégories d'échantillons suivants (n correspond au nombre de chromites analysées pour une catégorie) :

Les échantillons non minéralisés (sans sulfures) :

- Les cumulats d'olivine n = 46
- Les cumulats d'olivine et pyroxène n = 17

- Les spinifex d'olivine (n = 31)
- Les spinifex à pyroxène (n = 7)

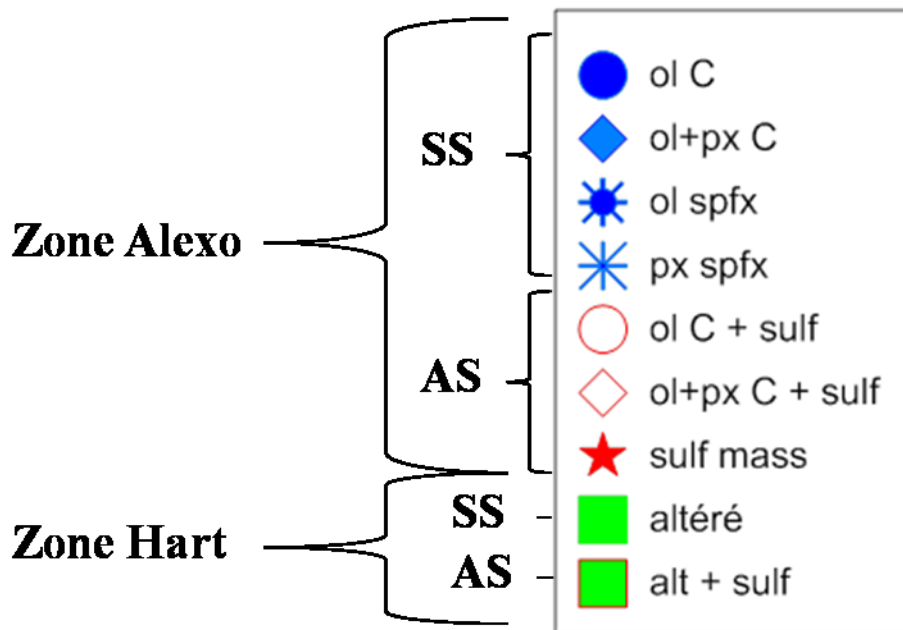
Les échantillons minéralisés (avec sulfures) :

- Les cumulats d'olivine avec sulfures disséminés (n = 29)
- Les cumulats d'olivine et pyroxène avec sulfures disséminés (n = 9)
- Les sulfures massifs (n = 10)

Les échantillons de la zone Hart (pôle altéré) :

- Les chromites de Hart (n = 20)
- Les chromites de Hart avec sulfures disséminés (n = 5)

Ces différents regroupements seront utilisés tout au long des Chapitres 4 et 5 et apparaissent la sous forme de symboles qui sont présentés dans la légende suivante :



**Figure 4.1 :** Légende utilisée pour distinguer les différentes catégories d'échantillons contenant les chromites. SS = sans sulfure, AS = avec sulfure, Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spfx = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt=altéré.

## 4.2. Analyses sur roche totale

Les résultats des analyses sur roche totale sont présentés en deux parties sous la forme de diagrammes binaires : les éléments majeurs, mineurs et traces en fonction de MgO, et les EGP en fonction de MgO et du Cr. Le MgO est utilisé car il est un des oxydes les plus abondant dans les komatiites, jusqu'à 45 % poids dans certains échantillons des cumulats à olivine. Les EGP sont également présentés en fonction du Cr, afin de vérifier un lien potentiel avec les chromites. Les échantillons représentant les sulfures massifs ne sont pas représentés dans les diagrammes en fonction du MgO dû à un manque de données.

Les résultats sont discutés de façon qualitative et comparative en fonction de la minéralisation et des différents faciès lithologiques. Plus particulièrement, les observations sont regroupées selon les échantillons non minéralisés, minéralisés ou bien altérés et une description des différences et similitudes entre les faciès lithologiques est faite. Les résultats sont aussi discutés selon l'observation ou non de corrélations dans les diagrammes et les implications sur l'histoire de cristallisation. Pour les valeurs quantitatives le lecteur est renvoyé au tableau 5, qui présente les variations de concentration des différents éléments analysés pour chaque faciès lithologique.

### 4.2.1 Éléments majeurs et mineurs

#### *Les échantillons non minéralisés*

Pour les échantillons non minéralisés, le CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ga, Sc et V présentent de fortes corrélations linéaires négatives avec MgO, pour un coefficient de corrélation R<sup>2</sup> compris entre 0,88 et 0,96 (Fig. 4.2 A à F). Le SiO<sub>2</sub> et le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, présentent de faibles

corrélations linéaires négatives avec MgO pour un coefficient de corrélation  $R^2$  respectivement 0,24 et 0,31 (Fig. 4.3 A et C). Le Zn et le Cu ne présentent pas de corrélations claires mais semblent suivre une tendance négative avec MgO mais pour un  $R^2$  très faible, respectivement de 0,06 et de 0,15 (Fig. 4.3 B et D). Le Ni et le Co montrent des corrélations linéaires positives avec MgO avec un  $R^2$  de 0,85 et 0,21 respectivement (Fig. 4.3 E et F). Le MnO, le Cr et le S ne montrent pas de corrélation ni de tendance particulière avec MgO (Fig. 4.4 A à C).

Ces corrélations sont l'illustration de l'évolution du liquide magmatique lors de la cristallisation fractionnée qui est dominée par la cristallisation et l'accumulation d'olivine représentant la phase la plus importante. Pour les fortes corrélations négatives, ces éléments étant peu compatibles dans l'olivine, leur concentration dans le liquide augmente à mesure que l'olivine cristallise et que le contenu en MgO diminue. Pour les corrélations positives, le Ni étant compatible dans l'olivine et le Co légèrement compatible (respectivement  $D_{Ni} \approx 2$  et  $D_{Co} \approx 1,1$  ; Sproule et al., 2005) leur concentration dans le liquide va donc diminuer avec la diminution de MgO. Cette évolution du liquide est aussi illustrée par l'évolution des facies lithologiques, avec dans l'ordre, les cumulats d'olivine qui constituent le pôle le moins évolué avec les plus fortes concentrations en MgO (30-45 % poids MgO), suivis des spinifex d'olivine (24-35 % poids MgO), puis des cumulats à olivine et spinifex (19-21 % poids MgO), et enfin des spinifex à pyroxène ( $\approx 12$  % poids MgO) qui constituent le pôle le plus évolué avec les plus faibles concentrations en MgO et les plus élevées en CaO,  $Al_2O_3$ , Sc,  $TiO_2$  et V.

Pour les corrélations légèrement négatives ou bien l'absence de corrélation, le coefficient de partage global doit être proche de 1, et dans ce cas, l'olivine n'est pas la



phase principale qui contrôle l'évolution de ces éléments. Ceci est particulièrement vrai pour Zn, Cu et S qui sont des éléments bien plus compatibles dans les sulfures que dans l'olivine avec des coefficients de partage dans les sulfures de plusieurs ordres de grandeur supérieurs. La grande variabilité des concentrations en MnO mais aussi dans une certaine mesure, en Cu, Zn, Co, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et CaO suggère aussi une plus grande mobilité de ces éléments durant l'altération et le métamorphisme, même avec une faible intensité.

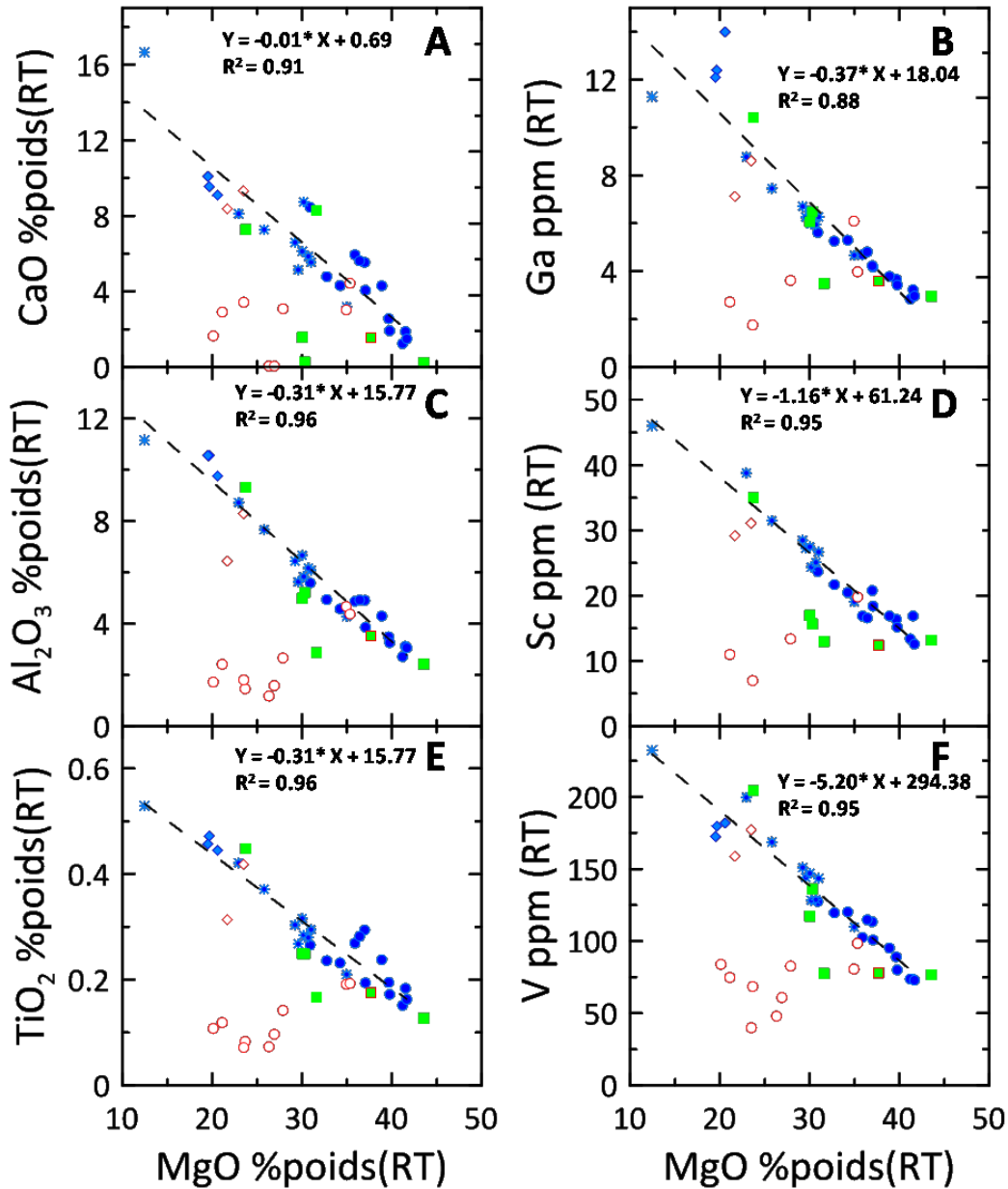
#### *Les échantillons minéralisés*

Pour les échantillons minéralisés, seul SiO<sub>2</sub> montre une corrélation positive avec MgO (Fig. 4.3 A) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> une corrélation négative avec MgO (Fig. 4.3 C). Ces corrélations ne sont observées que pour les échantillons des cumulats à olivine avec sulfures disséminés, elles illustrent directement les proportions de silicates et de sulfures présents. Le SiO<sub>2</sub> exprime directement la présence de silicate et sa concentration diminue avec celle de MgO à mesure que la proportion de sulfures augmente. Le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plus présent dans les sulfures suit l'évolution inverse. Les échantillons des cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés montrent des concentrations plus fortes en CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ga, Sc, V et SiO<sub>2</sub> et plus faibles en Ni et S par rapport aux échantillons des cumulats à olivine avec sulfures disséminés (Figs. 4.2 à 4.4).

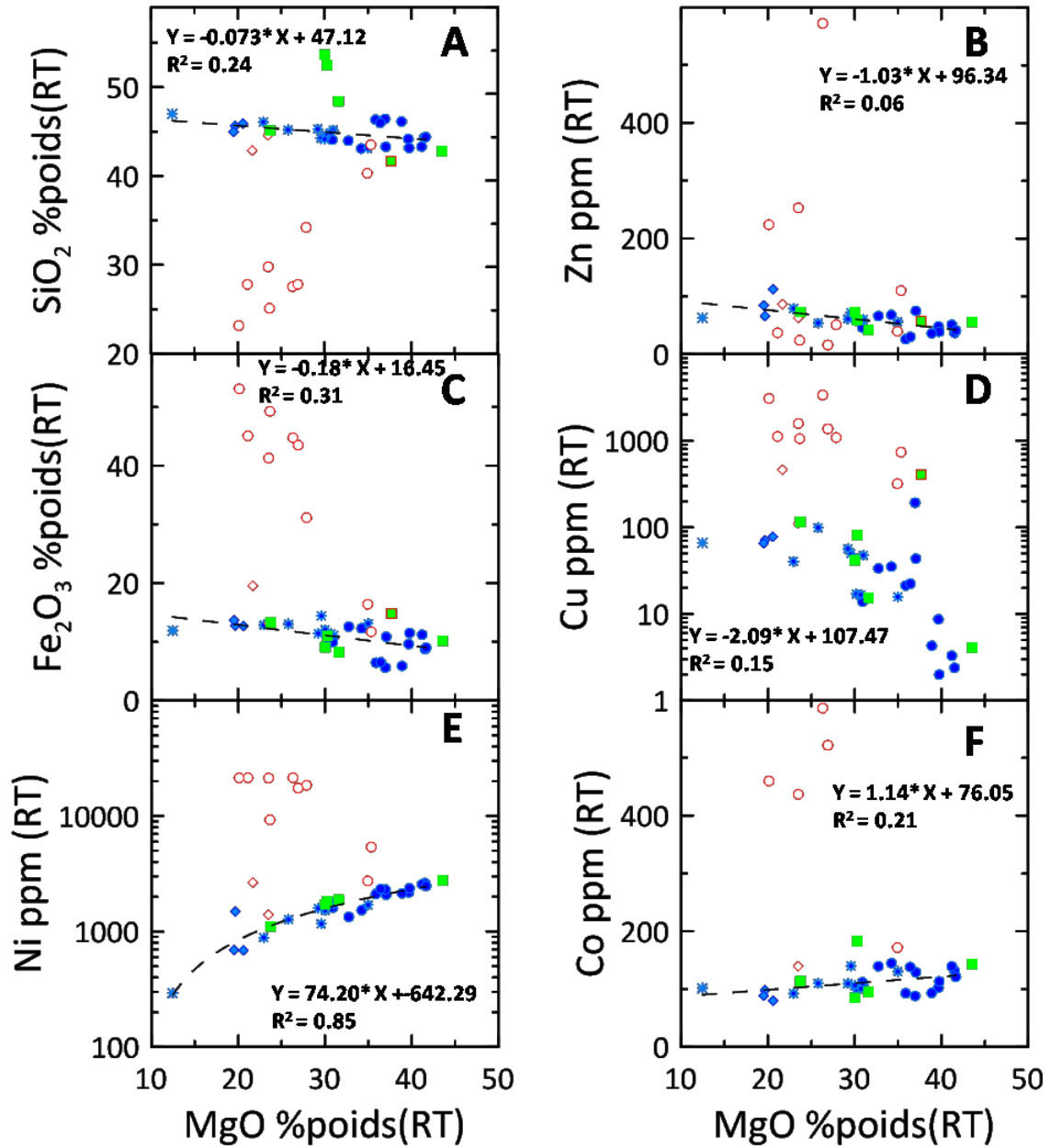
#### *Les échantillons de la zone Hart*

Les échantillons de la zone Hart, plus altérés, suivent les mêmes corrélations et tendances observées que pour les échantillons non minéralisés de la zone Alexo. Cependant certains échantillons présentent une plus grande variation de concentration et

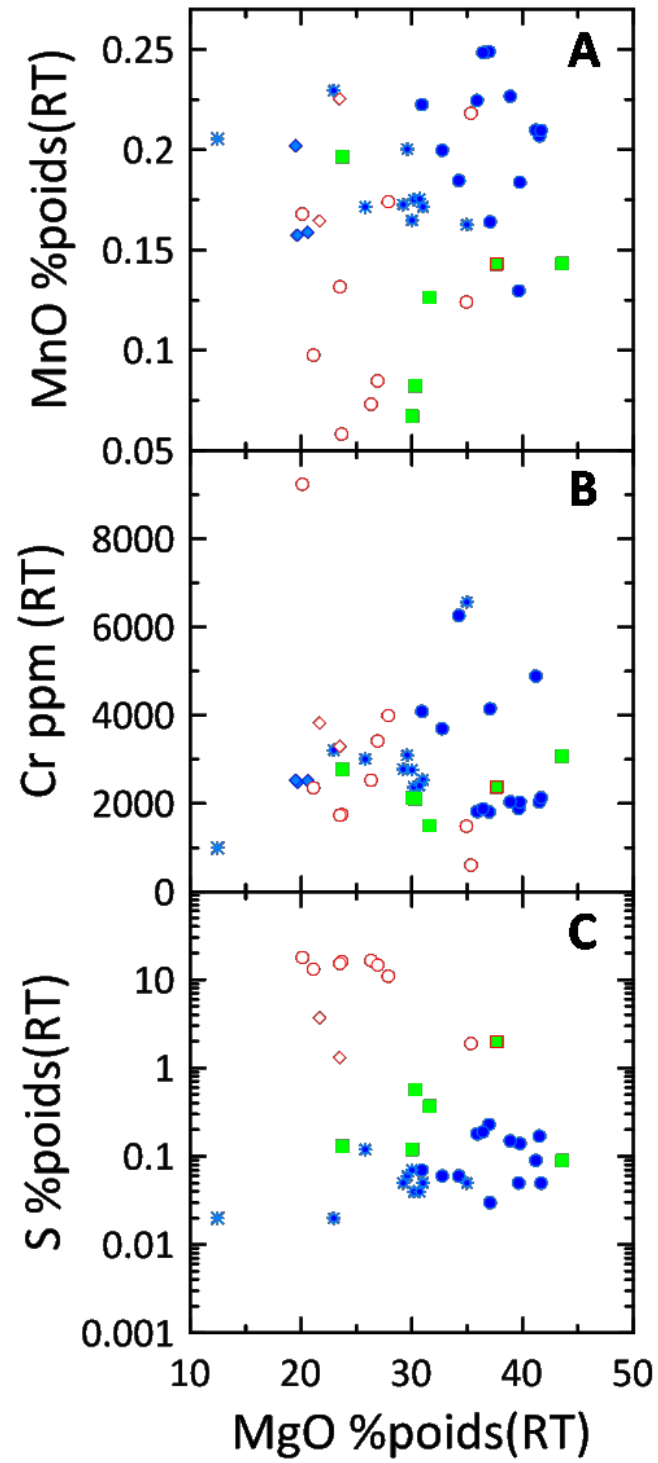
sortent légèrement de la tendance, surtout pour le CaO. Ceci illustre certainement la mobilité de certains éléments lors du métamorphisme (Figs. 4.2 à 4.4).



**Figure 4.2 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) CaO vs MgO (% poids), (B) Ga (ppm) vs MgO (% poids), (C)  $Al_2O_3$  vs MgO (% poids), (D) Sc (ppm) vs MgO (% poids), (E)  $TiO_2$  vs MgO (% poids), (F) V (ppm) vs MgO (% poids). La ligne en tiretées correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.



**Figure 4.3 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) SiO<sub>2</sub> vs MgO (% poids), (B) Zn (ppm) vs MgO (% poids), (C) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs MgO (% poids), (D) Cu (ppm) vs MgO (% poids), (E) Ni (ppm) vs MgO (% poids), (F) Co (ppm) vs MgO (% poids). La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo. R<sup>2</sup> = coefficient de corrélation.



**Figure 4.4 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des éléments majeurs et mineurs en fonction de MgO. (A) MnO vs MgO (% poids), (B) Cr (ppm) vs MgO (% poids), (C) S vs MgO (% poids).

**Tableau 5 :** Variations des concentrations roche totale en éléments majeurs, mineurs, traces et EGP pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

	ol C (n=11)		ol+px C (n=5)		ol spfx (n=8)		px spfx (n=1)	ol C + sulf (n=9)		ol+px C + sulf (n=2)		sulf mass (n=2)		Hart (n=5)		Hart + sulf (n=1)
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	-	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	-
SiO <sub>2</sub> (%poids)	43,10	46,36	44,99	46,44	43,14	46,09	47,00	23,18	43,52	42,90	44,60	0,46	8,82	42,83	53,67	41,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72	5,59	4,30	10,56	4,28	8,72	11,16	1,18	4,67	6,44	8,29	0,02	0,58	2,43	9,32	3,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	6,47	12,60	5,64	13,66	9,80	14,43	11,91	11,73	53,10	13,18	19,59	67	71,18	8,26	13,31	14,84
MnO	0,13	0,25	0,16	0,25	0,16	0,23	0,21	0,06	0,22	0,16	0,23	0,01	0,02	0,07	0,20	0,14
MgO	30,90	41,67	19,51	38,88	22,95	34,97	12,45	20,12	35,34	21,68	23,48	0,21	0,55	23,74	43,57	37,67
CaO	1,25	8,46	4,31	10,09	3,19	8,74	16,66	0,06	4,44	8,38	9,33	0,14	0,187	0,23	8,29	1,56
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,28	0,24	0,47	0,21	0,42	0,53	0,07	0,19	0,31	0,42	0,03	0,03	0,13	0,45	0,18
S	0,03	0,19	0,15	0,23	0,02	0,12	0,02	1,90	17,90	1,32	3,71	35,4	35,7	0,09	0,57	1,99
Cr (ppm)	1819	6263	1814	2531	2375	6570	999	605	9239	3299	3826	552	552	1502	3076	2377
Co	93	145	80	98	93	140	102	172	586	140	140	0,00	0,00	85	183	0,00
Cu	2	44	4	193	16	100	67	320	3379	111	463	1635	1988	4	116	407
Ga	2,84	5,62	3,79	14	4,67	8,78	11,29	1,76	6,10	7,13	8,61	0,74	2,91	2,96	10,42	3,59
Ni	1342	2633	690	2313	886	1840	294	2743	21500	1398	2667	0,00	0,00	1108	2776	0,00
Sc	12,60	23,70	16,90	20,80	19,10	38,80	46,00	7,00	19,80	29,20	31,10	0,00	0,00	13,00	35,00	12,40
V	73	128	95	182	110	200	232	40,00	98,60	159	177	34	51	77	205	78
Zn	26	75	36	112	54	79	63	16,00	572,00	63	87	48	56	42	73	57
Ru (ppb)	3,81	9,51	2,49	4,46	3,91	9,50	1,98	10,10	159,74	8,60	19,19	369	882	2,98	9,05	44,86
Rh	0,67	2,91	0,82	4,55	1,15	4,60	1,47	4,93	86,35	3,79	11,12	177,07	314,97	0,52	3,53	17,42
Pd	2,70	13,30	4,18	120	6,69	42,20	12,69	46	1328	35,60	121,09	0,00	0,00	2,81	52,22	150,89
Os	0,82	3,93	0,00	0,00	1,14	5,09	0,00	2,61	2,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	4,04	12,51
Ir	0,50	4,33	0,43	0,93	1,42	3,80	0,69	1,99	21,64	1,16	2,84	44,02	94,47	1,04	3,66	10,54
Pt	3,67	9,89	4,78	58,3	7,27	24,74	14,42	22,60	611,60	21,10	56,53	0,00	0,00	2,59	15,82	78,44

#### 4.2.2 Éléments du groupe du platine

Pour les EGP, 48 échantillons sont présentés, excepté pour l'élément Os dont seulement 16 échantillons ont été analysés en raison de contraintes de laboratoire.

*Diagrammes binaires : EGP en fonction de MgO*

Pour les échantillons non minéralisés, Os, Ir et Ru présentent des corrélations très légèrement positives avec MgO, avec un R<sup>2</sup> de 0,51, 0,15 et 0,20 respectivement (Fig. 4.5 A à C). Tandis que Rh, Pt et Pd présentent des corrélations très légèrement négatives, avec un R<sup>2</sup> de 0,11, 0,29 et 0,17 respectivement (Fig. 4.5 D à F). Ces corrélations font ressortir deux groupes parmi les EGP, ayant des comportements différents: les EGPI, éléments ayant le même comportement que l'Ir (Os, Ir et Ru) et les EGPP, éléments ayant le même

comportement que le Pd (Rh, Pt, Pd). Les EGPI sont légèrement compatibles dans le liquide lors de la cristallisation fractionnée, avec un coefficient de partage global supérieur et proche de 1 (Puchtel et al., 2004), leur concentration dans le liquide va donc diminuer en même temps que la concentration en MgO diminue et que les premières phases (olivine  $\pm$  chromite) cristallisent. Les EGPP sont incompatibles et leur concentration va donc augmenter dans le liquide résiduel à mesure que la cristallisation progresse et que la concentration en MgO diminue. Ces tendances observées entre les EGP et le MgO attestent du rôle de la cristallisation fractionnée dans l'évolution des concentrations de ces éléments dans le liquide magmatique. Cependant, les corrélations avec MgO restent légères avec des coefficients de corrélation assez faibles ce qui tend à dire que l'olivine joue seulement un rôle mineur et n'est clairement pas la seule phase ayant un contrôle sur le comportement des EGP en l'absence de sulfures.

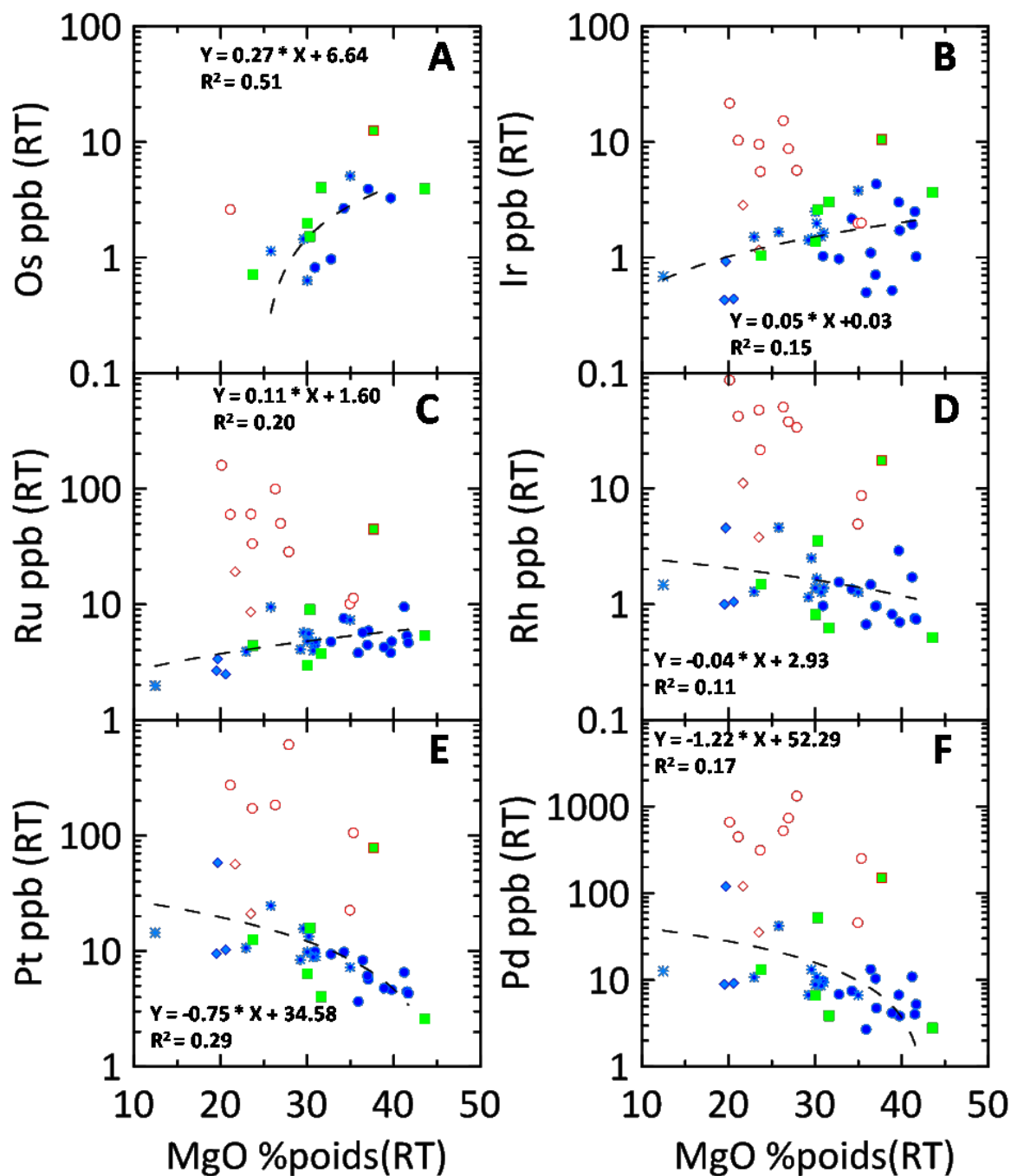
Pour les échantillons minéralisés, excepté Os qui ne présente pas assez d'analyses pour être discuté, les EGP montrent tous des concentrations de un à deux ordres de grandeur supérieurs aux échantillons non minéralisés. Aucune corrélation claire ne ressort, cependant les concentrations en EGP tendent généralement à diminuer avec l'augmentation de MgO, ce qui illustre l'augmentation de la proportion de silicate et une diminution du contenu en sulfure. Les EGP étant bien plus solubles dans les sulfures que dans les silicates, leur concentration dans la roche est bien plus élevée à mesure que la proportion de sulfures augmente et que le MgO diminue (Fig. 4.5 A à F).

Les échantillons de la zone Hart, suivent le même comportement que les échantillons de la zone Alexo, suggérant que l'altération et le métamorphisme plus intenses

à Hart ne semblent pas avoir un effet notable sur les concentrations en EGP de la roche (Fig. 4.5 A à F).

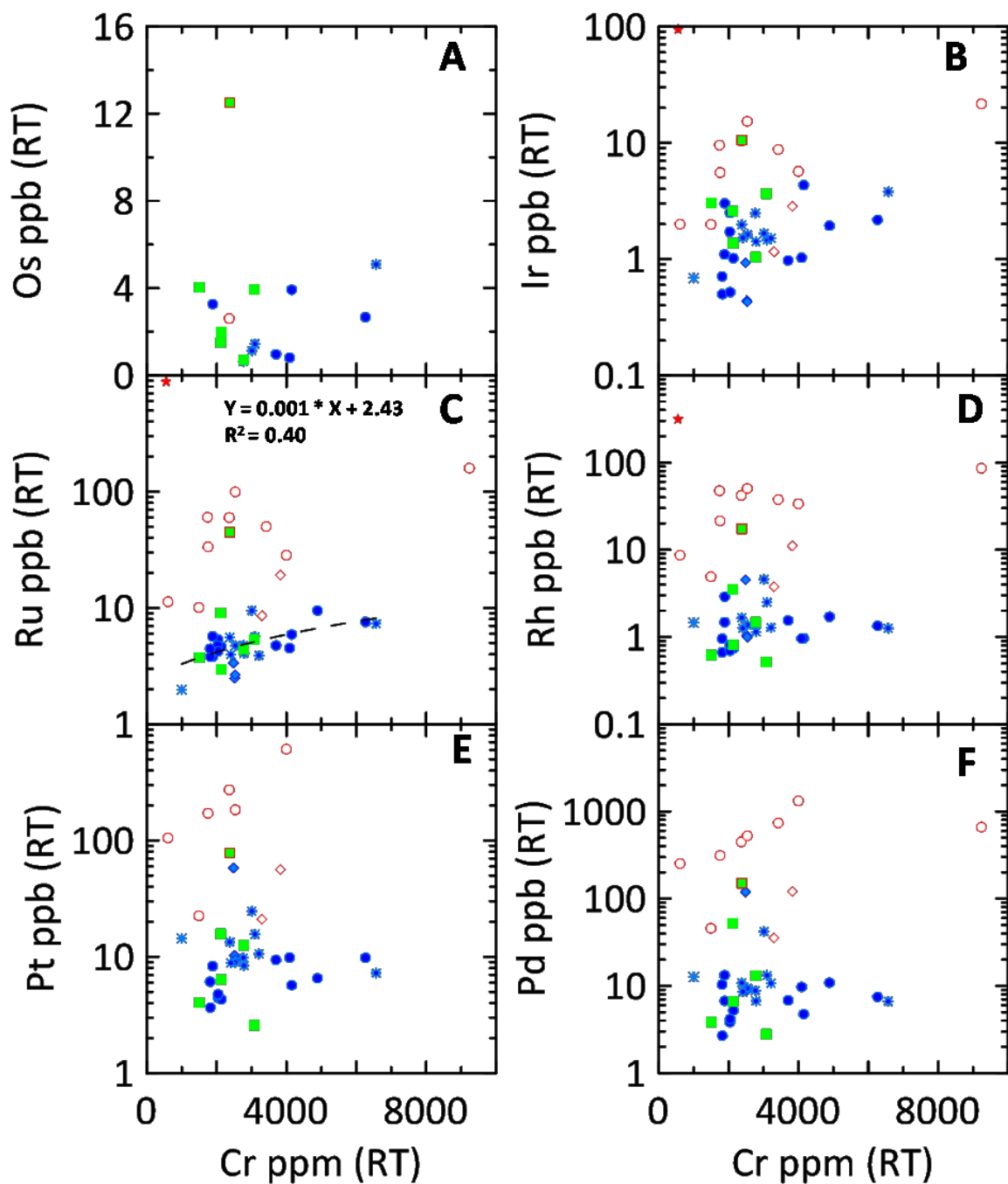
*Diagrammes binaires : EGP en fonction de Cr*

Parmi les EGP, seul le Ru présente une corrélation positive en fonction du Cr pour les échantillons non minéralisés, avec  $R^2 = 0,40$  (Fig. 4.6 C). Cette corrélation indique un lien probable avec les chromites qui constituent la phase principale qui contrôle le Cr. Pour les autres éléments, quelque soit le faciès lithologique, aucune tendance ou corrélation n'est observée. Les données sont éparpillées aléatoirement, indiquant que la chromite ne joue pas un rôle majeur dans le contrôle de ces éléments et que d'autres phases sont nécessairement impliquées (Fig. 4.6).



**Figure 4.5 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des EGP en fonction de MgO. (A) Os (ppb) vs MgO (% poids), (B) Ir (ppb) vs MgO (% poids), (C) Ru (ppb) vs MgO (% poids), (D) Rh (ppb) vs MgO (% poids), (E) Pt (ppb) vs MgO (% poids), (F) Pd (ppb) vs MgO (% poids). La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.





**Figure 4.6 :** Diagrammes binaires présentant les analyses sur roche totale des EGP en fonction du Cr. (A) Os (ppb) vs Cr (ppm), (B) Ir (ppb) vs Cr (ppm), (C) Ru (ppb) vs Cr (ppm), (D) Rh (ppb) vs Cr (ppm), (E) Pt (ppb) vs Cr (ppm), (F) Pd (ppb) vs Cr (ppm). La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.

### 4.3. Analyses des chromites

#### 4.3.1 Les éléments majeurs

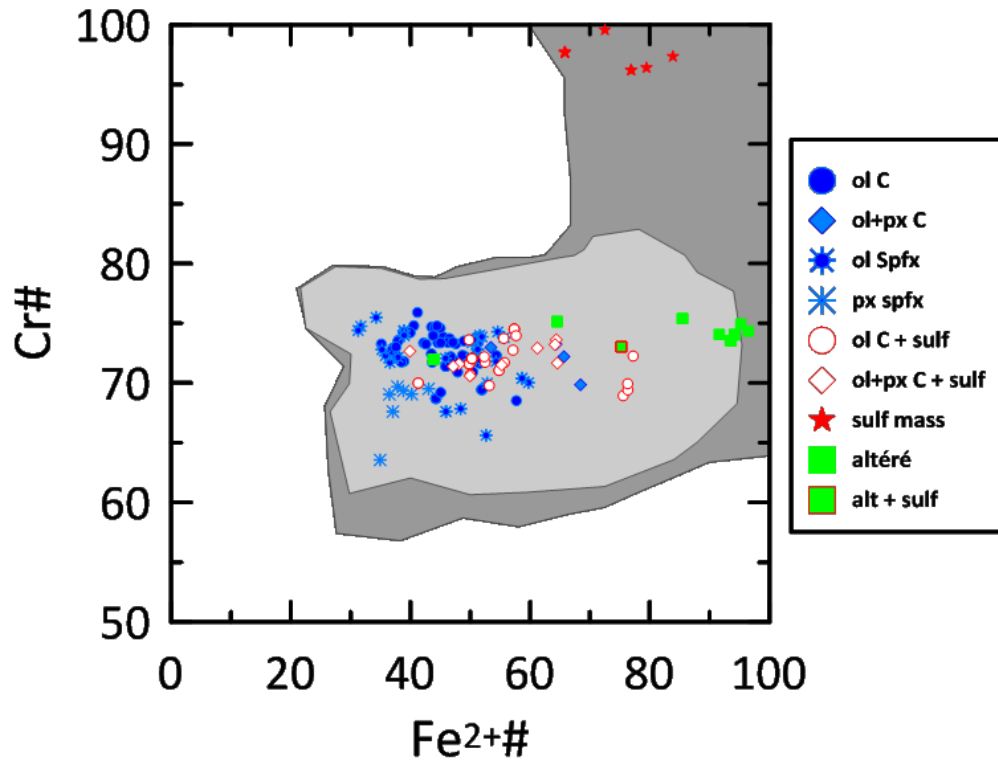
Les Oxydes majeurs dans la chromite :  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constituent pratiquement la totalité (> 98 % poids) de la composition chimique de la chromite. Dans la littérature, les spinelles, et donc les chromites, sont généralement présentés et classés dans des champs de compositions définis par les éléments majeurs. Pour la chromite, les éléments Cr, Al, et  $\text{Fe}^{3+}$  de valence 3+ et les éléments Mg et  $\text{Fe}^{2+}$  de valence 2+ sont généralement présentés et comparés. C'est pourquoi il est commun de présenter des analyses géochimiques de chromites dans des diagrammes binaires présentant le  $\text{Cr\#} = (100 \cdot \text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al}))$  en fonction du  $\text{Fe}^{2+\#} = (100 \cdot \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}))$  (Barnes et Roeder, 2001) (Fig. 4.7). Un tableau récapitulatif présente les variations des concentrations des différents éléments analysés pour chaque faciès lithologique (Tableau 6).

À l'exception des sulfures massifs ( $\text{Cr\#} > 95$ ), les analyses des chromites de la zone Alexo et de la zone Hart montrent peu de variation du  $\text{Cr\#}$ . Les chromites des échantillons non minéralisés ont un  $\text{Cr\#}$  qui varie de 68 à 76 pour les cumulats à olivine ( $n = 44$ ), de 70 à 73 pour les cumulats à olivine et pyroxène ( $n = 17$ ), de 65 à 76 pour les spinifex à olivine ( $n = 33$ ) et de 63 à 70 pour les spinifex à pyroxène ( $n = 7$ ). Les chromites des échantillons minéralisés ont un  $\text{Cr\#}$  qui varie de 69 à 75 pour les cumulats à olivines avec sulfures disséminées ( $n = 29$ ) et de 71 à 74 pour les cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminées ( $n = 9$ ). Les chromites des échantillons de la zone Hart ont un  $\text{Cr\#}$  qui varie de 72 à 75 pour les échantillons altérés non minéralisés ( $n = 20$ ) et un  $\text{Cr\#}$  de 73 pour l'échantillon altéré minéralisé ( $n = 5$ ).

Le  $\text{Fe}^{2+}\#$  présente des variations plus importantes. Les chromites des échantillons non minéralisés ont un  $\text{Fe}^{2+}\#$  qui varie de 35 à 58 pour les cumulats à olivine, de 53 à 68 pour les cumulats à olivine et pyroxène, de 31 à 60 pour les spinifex à olivine et de 35 à 43 pour les spinifex à pyroxène. Les chromites des échantillons minéralisés ont un  $\text{Fe}^{2+}\#$  globalement plus élevé que les chromites des échantillons non minéralisés avec un  $\text{Fe}^{2+}\#$  qui varie de 41 à 77 pour les cumulats à olivines avec sulfures disséminés, de 40 à 66 pour les cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés, et de 65 à 84 pour les sulfures massifs. Les chromites des échantillons de la zone Hart ont un  $\text{Fe}^{2+}\#$  qui varie de 44 à 96 pour les échantillons altérés non minéralisés et un  $\text{Fe}^{2+}\#$  de 75 pour l'échantillon altéré minéralisé.

Ces résultats montrent, à l'exception des sulfures massifs, que les chromites de notre étude (zones Alexo et Hart) ont une composition assez similaire en éléments majeurs que les chromites d'autres komatiites dans le monde (Fig. 4.7 champs gris clairs). Les chromites des différents faciès lithologiques des zones Alexo et Hart, ont des concentrations similaires entre elles avec des  $\text{Cr}\#$  montrant les mêmes variations (Tableau 6). Pour les chromites de la zone Alexo, les échantillons minéralisés présentent un  $\text{Fe}^{2+}\#$  globalement un peu plus élevé que les échantillons non minéralisés. Les chromites de la zone Hart montrent le  $\text{Fe}^{2+}\#$  le plus élevé. D'après Barnes (2000) le métamorphisme semble influencer en priorité sur les compositions en éléments de valence 2+, qui entrent dans le site tétraédrique de la chromite. Ainsi, la forte variabilité du  $\text{Fe}^{2+}\#$  des chromites de la zone Hart reflèterait le degré d'altération subi par les chromites, avec un degré d'altération moins élevé pour celles avec un  $\text{Fe}^{2+}\#$  plus bas et un degré d'altération plus élevé pour celles avec un  $\text{Fe}^{2+}\#$  plus haut. Ceci se confirme lors de l'observation pétrographique des lames minces.

La composition très différente des chromites dans les sulfures massifs peut s'expliquer par le fait que ces chromites ont cristallisé directement à partir d'un liquide sulfuré, d'une composition bien différente d'un liquide silicaté et qui contient déjà très peu de Al et de Mg (Ewers et al., 1976), ce qui se reflète par des valeurs de Cr# et de  $Fe^{2+}\#$  élevées pour ces chromites.



**Figure 4.7 :**  $Cr \# = (100 * Cr / (Cr + Al))$  versus  $Fe^{2+}\# = (100 * Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Mg))$  des chromites des komatiites de la zone Alexo et de la zone Hart comparées aux champs de compositions des chromites de komatiites dans le monde (tirés de la base de données de Barnes et Roeder, 2001). Champ gris foncé = toutes les données de chromites de komatiites du faciès schiste vert à amphibolite ( $n = 4095$ ) ; Champ gris pâle = chromites de komatiites au faciès schiste vert ou inférieur ( $n = 1036$ ). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

**Tableau 6 :** Variation de Cr#, Fe<sup>2+</sup># et les variations des concentrations en éléments majeurs, mineurs et traces pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

	ol C (n=46)		ol+px C (n=17)		ol spfx (n=31)		px spfx (n=7)		ol C + sulf (n=29)		ol+px C + sulf (n=9)		sulf mass (n=10)		Hart (n=20)		Hart + sulf (n=5)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Cr#</b>	68,5	75,9	69,9	74,0	65,6	75,5	63,6	69,7	68,9	74,5	70,6	73,6	96,2	99,6	72,0	75,4	73,0	73,0
<b>Fe<sup>2+</sup>#</b>	31,3	57,7	35,1	68,4	34,3	59,7	34,9	43,0	41,3	77,2	39,9	64,6	65,8	83,9	43,8	96,5	75,3	75,3
<b>SiO<sub>2</sub> (% poids)</b>	0,058	0,456	0,107	0,173	0,056	0,156	0,066	0,107	0,056	0,274	0,086	0,548	0,006	0,096	0,109	0,147	0,114	0,114
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,1	15,5	12,9	14,5	12,3	16,5	15,0	18,2	12,1	15,7	12,7	14,8	0,2	1,6	11,6	14,0	12,8	12,8
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	48,5	57,5	50,1	56,5	47,0	58,0	47,3	53,1	51,9	55,1	51,4	56,0	49,2	59,2	50,0	55,0	51,5	51,5
<b>MgO</b>	8,77	14,53	6,33	13,66	8,13	13,97	12,43	14,12	7,11	12,48	7,18	12,83	3,01	6,67	0,64	11,76	4,88	4,88
<b>Sc (ppm)</b>	3,1	9,9	4,0	8,4	3,7	9,4	6,7	8,6	1,4	14,1	3,1	9,2	3,4	15,9	3,7	8,5	6,7	8,9
<b>Ti</b>	1336	9170	1404	1883	1449	5400	1942	2260	1429	6840	1510	4060	4440	11970	1163	2146	1437	1829
<b>V</b>	707	1835	699,2	935	718	1675	1076	1238	715	2351	727	3010	1987	3648	593	1033	705	949
<b>Mn</b>	1264	1925	1392	2009	1257	2080	1279	1347	1652	5913	1604	1896	2860	6270	1624	16340	1565	2472
<b>Co</b>	184	304	209	262	188	293	211	230	131	403	100	275	161	282	200	1436	250	285
<b>Ni</b>	642	1468	689	1355	640	1519	948	1066	82	1000	57	1069	316	593	504	1620	462	594
<b>Cu</b>	2,17	73,30	1,45	4,39	3,24	126,00	3,19	5,75	0,26	34,00	0,27	5,36	0,78	43,40	0,32	8,76	0,51	0,65
<b>Zn</b>	576	1784	577	1770	475	1468	690	822	685	26000	940	2198	903	2240	695	18000	1810	4290
<b>Ga</b>	21	46	20	30	21	36	29	34	4	49	20	33	25	46	13	31	20	27

#### 4.3.2 Les éléments mineurs et traces dans les chromites

Les résultats sont présentés sous la forme de diagrammes binaires entre le contenu en différents éléments dans les chromites et le Cr# ainsi que le Fe<sup>2+</sup># (Figs 4.8 à 4.13). Ils sont discutés de façon qualitative et comparative. Plus particulièrement, les observations sont regroupées selon les chromites provenant des échantillons non minéralisés, minéralisés ou bien altérés (les chromites de la zone Hart et Ax33) et en fonction des différences et similitudes entre les faciès lithologiques. Les résultats sont aussi discutés selon l'observation ou non de corrélations et les implications sur l'histoire de cristallisation. Pour les valeurs quantitatives le lecteur est renvoyé au tableau 6, qui présente les variations de concentrations des différents éléments analysés pour chaque faciès lithologique.

#### 4.3.2.1 Résultats

##### *Échantillons non minéralisés*

Pour tous les éléments mineurs et traces, les chromites des cumulats à olivine et les chromites des spinifex à olivine montrent les plus grandes variations de concentrations pour tous les éléments. (Figs 4.8 à 4.13 et Tableau 6). Les cumulats à olivine et pyroxène et les spinifex à pyroxène présentent des variations de concentrations plus petites, probablement dues au plus faible nombre d'échantillons. Leurs limites (max – min ; Tableau 6) sont presque toujours comprises à l'intérieur des limites des cumulats à olivine et des spinifex à olivine, à l'exception du Mg montrant des concentrations plus faibles pour les chromites des cumulats à olivine et pyroxène. Il est à noter que pour le Ti, deux points d'analyses présentent une concentration anormalement élevée (5500 et 9000ppm, Figs 4.10 A1 et A2). Cette anomalie reste inexplicée, aucune trace d'inclusions ou bien d'autres anomalies de concentration avec d'autres éléments n'a été mis en évidence pour permettre d'exclure ces points d'analyses. Le Cu présente aussi des concentrations élevées pour deux échantillons (6 points d'analyses > 50 ppm, Fig 4.9 B1 et B2). Ces deux échantillons ont été analysés au laser la même journée sur la même cellule d'analyse laissant ainsi planer le doute d'un problème technique. Cependant aucune autre observation d'anomalie de concentration avec d'autres éléments n'a été constatée, ne permettant pas d'exclure ces points d'analyses.

De façon générale pour les chromites des échantillons non minéralisés, les éléments ayant un état de valence 3+ ou plus, montrent des corrélations linéaires avec le Cr# et les éléments ayant un état de valence 2+ montrent des corrélations linéaires avec le Fe<sup>2+</sup>#. Ainsi, aucune corrélation avec Cr# n'est observée pour Mg, Mn, Co, Zn, Cu et Ni (Figs 4.8

et 4.9). Le Ti, Sc et V présentent une corrélation linéaire négative avec Cr# avec un  $R^2$  de 0,24, 0,20 et 0,56 respectivement (Fig. 4.10 A, C et D). Le Ga qui est aussi à l'état de valence 3+ ne présente pas de corrélation avec Cr#, mais tout de même une tendance négative pour les chromites des spinifex à olivine (Fig. 4.10 B). Le Mn, Co et Zn présentent une corrélation linéaire positive avec le  $Fe^{2+}\#$ , avec un  $R^2$  de 0,70, 0,28 et 0,32 respectivement (Fig. 4.11 A à C). Le Ni présente une corrélation linéaire négative avec le  $Fe^{2+}\#$ , avec un  $R^2$  de 0,46 (Fig. 4.11 E). Le Cu, bien que de valence 2+, ne présente pas de corrélation avec le  $Fe^{2+}\#$ , même en excluant les échantillons de concentrations anormalement élevées (Fig. 4.11 D). Le Ti, Ga, Sc, V et Al ne montrent pas de corrélation avec  $Fe^{2+}\#$  (Figs 4.12 et 4.13). Le Cr, bien que de valence 3+, présente une corrélation négative avec le  $Fe^{2+}\#$ , avec un  $R^2$  de 0,36, cette corrélation excluant les chromites des spinifex à pyroxène (Fig. 4.13 C).

### *Échantillons minéralisés*

Les chromites des échantillons minéralisés sont décrites en regroupant les échantillons des cumulats à olivine avec sulfures disséminés et les échantillons des cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés, parce que les chromites des échantillons de ces faciès lithologiques montrent des variations de concentration très similaires pour tous les éléments. Les résultats pour les chromites des sulfures massifs sont décrits séparément parce que ces chromites montrent des concentrations différentes des autres faciès lithologiques. L'échantillon Ax33 (des cumulats à olivine avec sulfures disséminés), mis en évidence dans les graphiques, est aussi décrit séparément des autres échantillons minéralisés, car il présente des concentrations différentes en de nombreux éléments, et il est de plus le seul échantillon de la zone Alexo présentant des chromites

altérées en magnétites jusqu'à un niveau semblable à celui enregistré par les chromites de la zone Hart (Figs 4.8 à 4.13).

Ainsi les chromites des cumulats à olivine avec sulfures disséminés et les cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés, montrent des variations de concentrations similaires. Aucune corrélation n'est observée avec  $Cr\#$  et  $Fe^{2+\#}$ . Toutefois le Ti et le V semblent montrer une tendance négative et leur concentration diminue avec l'augmentation de  $Cr\#$ , comme pour les échantillons non minéralisés, mais une partie des analyses sortent de la tendance (Fig. 4.10 A2 et C2). Pour la majorité des éléments, les fourchettes de concentrations des échantillons minéralisés (cumulats à olivine avec sulfures disséminés et les cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés) chevauchent les fourchettes de concentrations des échantillons non minéralisés. Cependant des différences significatives sont observées. Pour un tiers à la moitié des analyses, le Mn et le Zn montrent des concentrations plus élevées dans les chromites des échantillons minéralisés que dans celles des échantillons non minéralisés. Un tiers à la moitié des analyses montrent des concentrations en Co plus faibles pour les échantillons minéralisés. Le Ni et le Cu présentent les différences les plus importantes, où environ deux tiers des analyses des échantillons minéralisés montrent des concentrations plus faibles que les échantillons non minéralisés (Figs 4.8 à 4.13 et Tableau 6).

Les analyses des chromites des sulfures massifs présentent des concentrations très différentes pour les éléments majeurs, avec de plus faibles concentrations en Mg et beaucoup plus faibles en Al (Fig. 4.13 B et C). Les faibles concentrations en Al des chromites expliquent les grandes valeurs du  $Cr\#$  ( $=100 \cdot Cr / (Cr + Al)$ ). Les chromites des sulfures massifs montrent aussi des concentrations plus élevées en Ti, V et Mn par rapport aux chromites des autres échantillons (hormis les chromites de la zone Hart et Ax33). Les



concentrations en Ni des chromites des sulfures massifs sont plus faibles que les chromites des échantillons non minéralisés, mais restent dans les mêmes fourchettes de variations que les chromites des autres échantillons minéralisés (Figs 4.9 C1 et 4.11 E1).

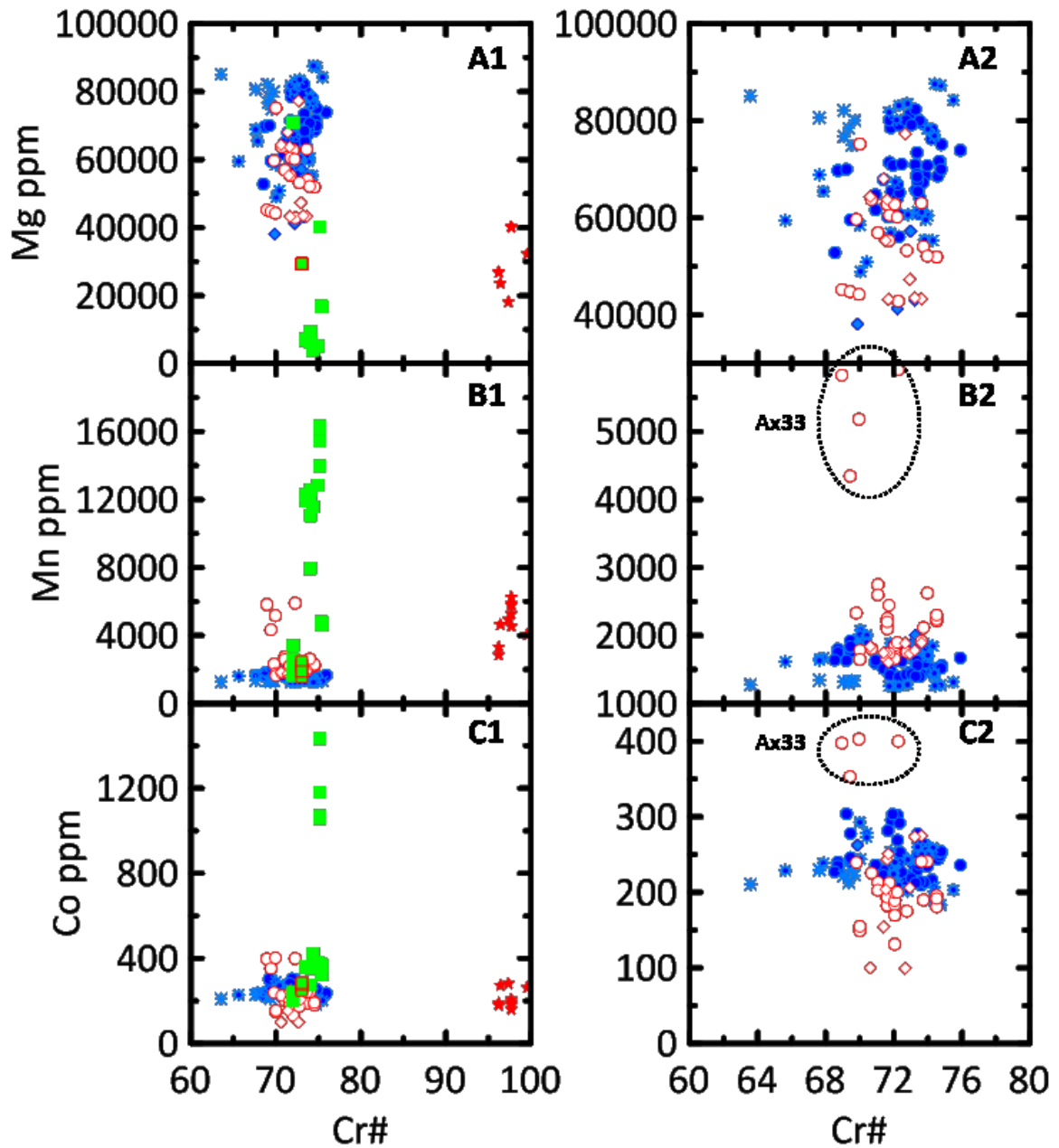
Les chromites de l'échantillon Ax33 présentent des concentrations différentes par rapport aux chromites des autres échantillons minéralisés, avec un fort enrichissement en Mn, Zn et Co et des concentrations plus faibles en Ga. Ces variations suivent en grande partie les observations faites pour les chromites de la zone Hart qui sont plus altérées et décrites ci- dessous. Ax33 correspond au seul échantillon de la zone Alexo qui présente des chromites altérées en magnétite avec un cœur de chromite préservé comme pour les chromites de la zone Hart.

#### *Échantillons altérés (zone Hart et Ax33)*

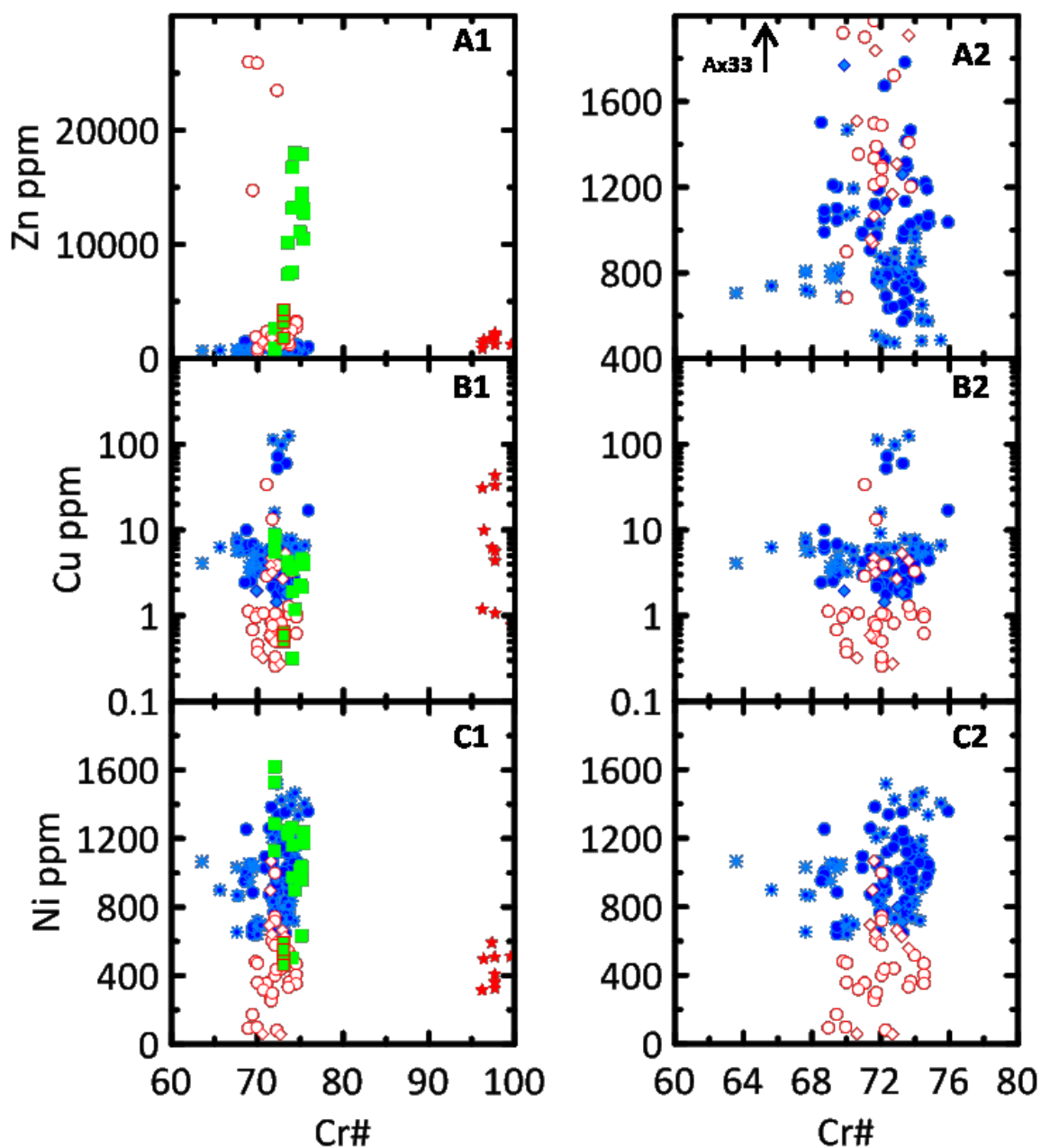
Les échantillons de la zone Hart représentent le pôle altéré, c'est-à-dire ayant subi le métamorphisme le plus important et contenant les chromites les plus altérées. Les analyses montrent que les chromites des échantillons de la zone Hart sont fortement appauvries en Mg, fortement enrichies en Zn et Mn, légèrement appauvries en Ga et légèrement enrichies en Co par rapport aux chromites des autres faciès lithologiques (Figs 4.8 à 4.13). Ces éléments présentent des variations de concentrations très grandes, qui illustrent certainement le degré de métamorphisme et d'altération subi par les chromites. Les autres éléments montrent les mêmes fourchettes de variations que les chromites des échantillons non minéralisés. Il en ressort de façon générale que les éléments à l'état de valence 2+, apparaissent plus sensibles à l'altération que les éléments de valence 3+ ou plus élevé, à l'exception du Ga. Le Ni et le Cu montrent des concentrations plus élevées dans les chromites des échantillons non minéralisés de la zone Hart que dans les chromites de l'échantillon minéralisé de la zone Hart (Figs 4.9 B1 et C1 et 4.13 D1 et E1). Comme

décrit précédemment, les chromites de l'échantillon Ax33 présentent les mêmes variations de concentrations que les chromites des échantillons de la zone Hart, à l'exception du Mg, qui ne semble pas autant affecté.

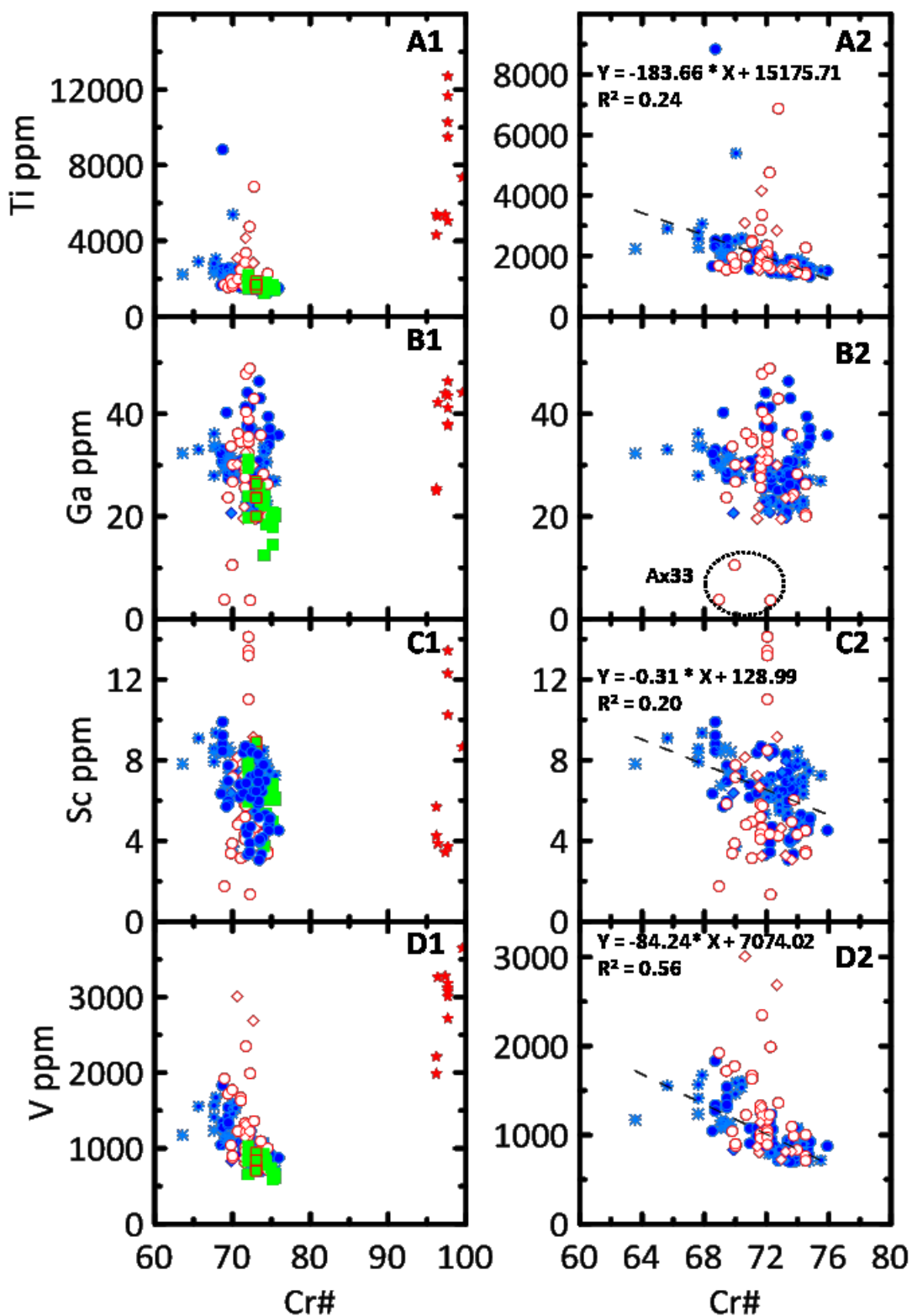
Une corrélation linéaire positive est observée entre le Zn, Mn et Co en fonction de Cr#, pour les échantillons de la zone Hart, avec un  $R^2$  de 0,73, 0,39 et 0,33 respectivement. Aucune corrélation n'est observée avec  $Fe^{2+}$ # (Figs 4.8 B1 et C1 et 4.8 A1).



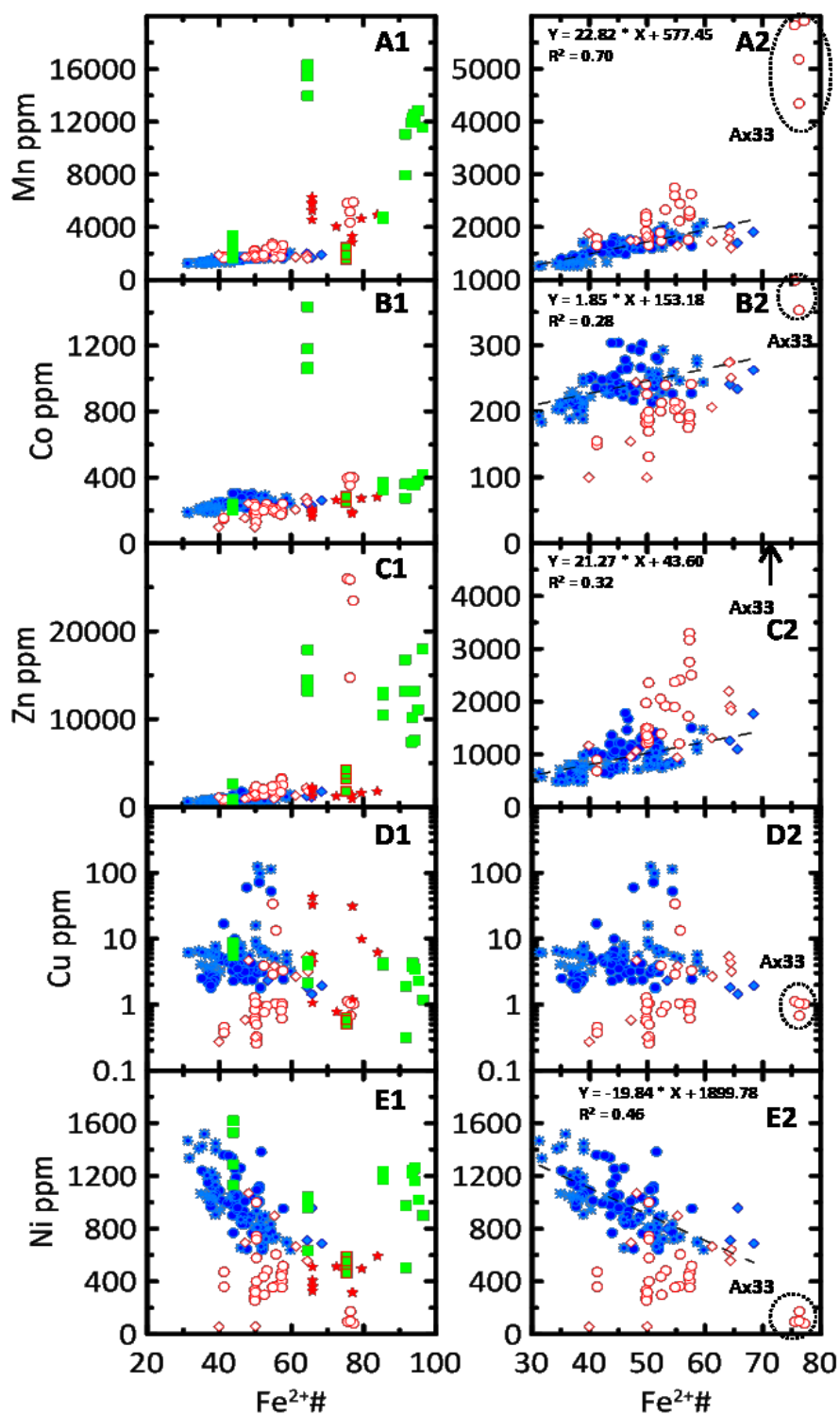
**Figure 4.8 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Mg (ppm) vs Cr#, (B) Mn (ppm) vs Cr#, (C) Co (ppm) vs Cr#.



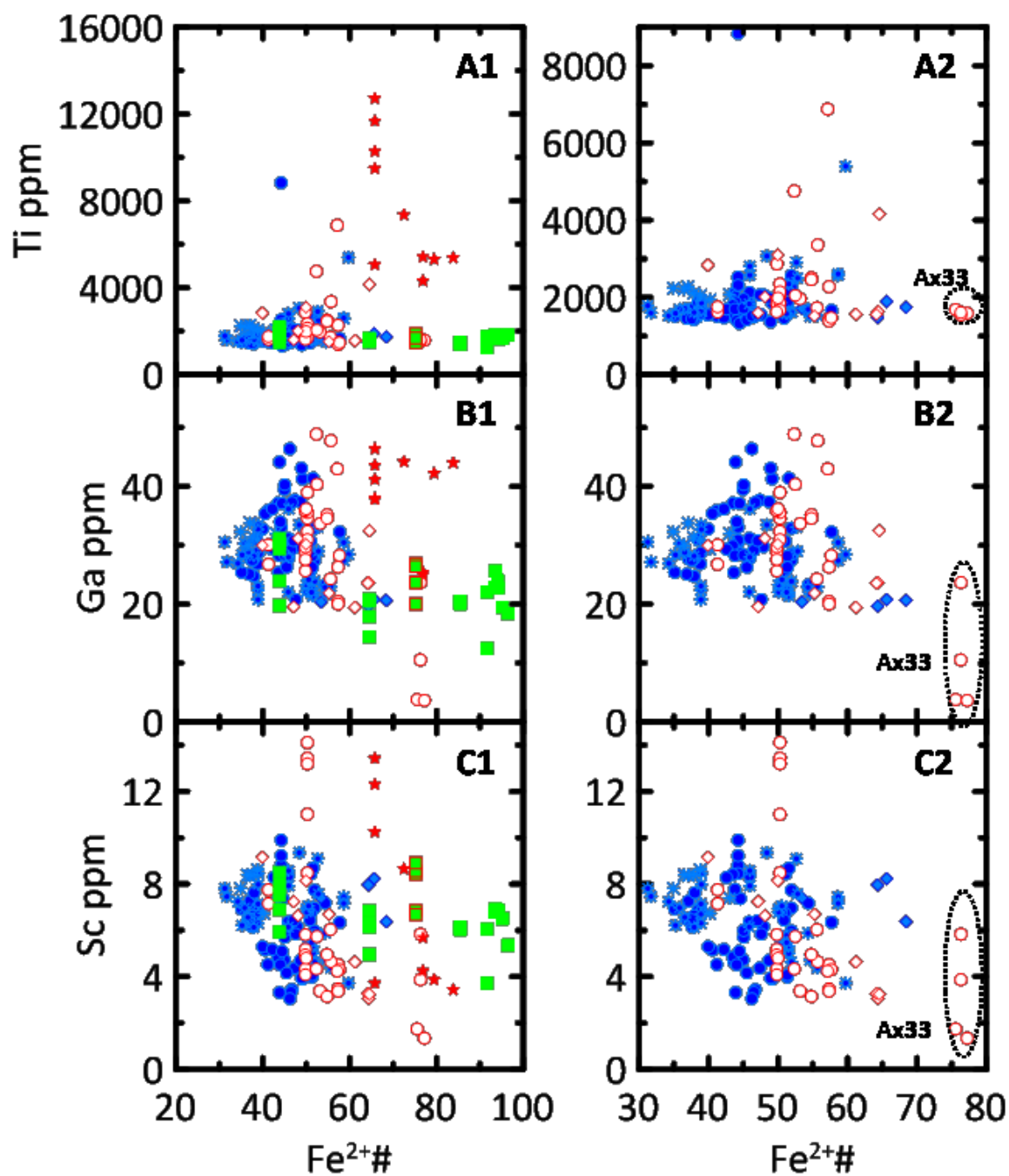
**Figure 4.9 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Zn (ppm) vs Cr#, (B) Cu (ppm) vs Cr#, (C) Ni (ppm) vs Cr#.



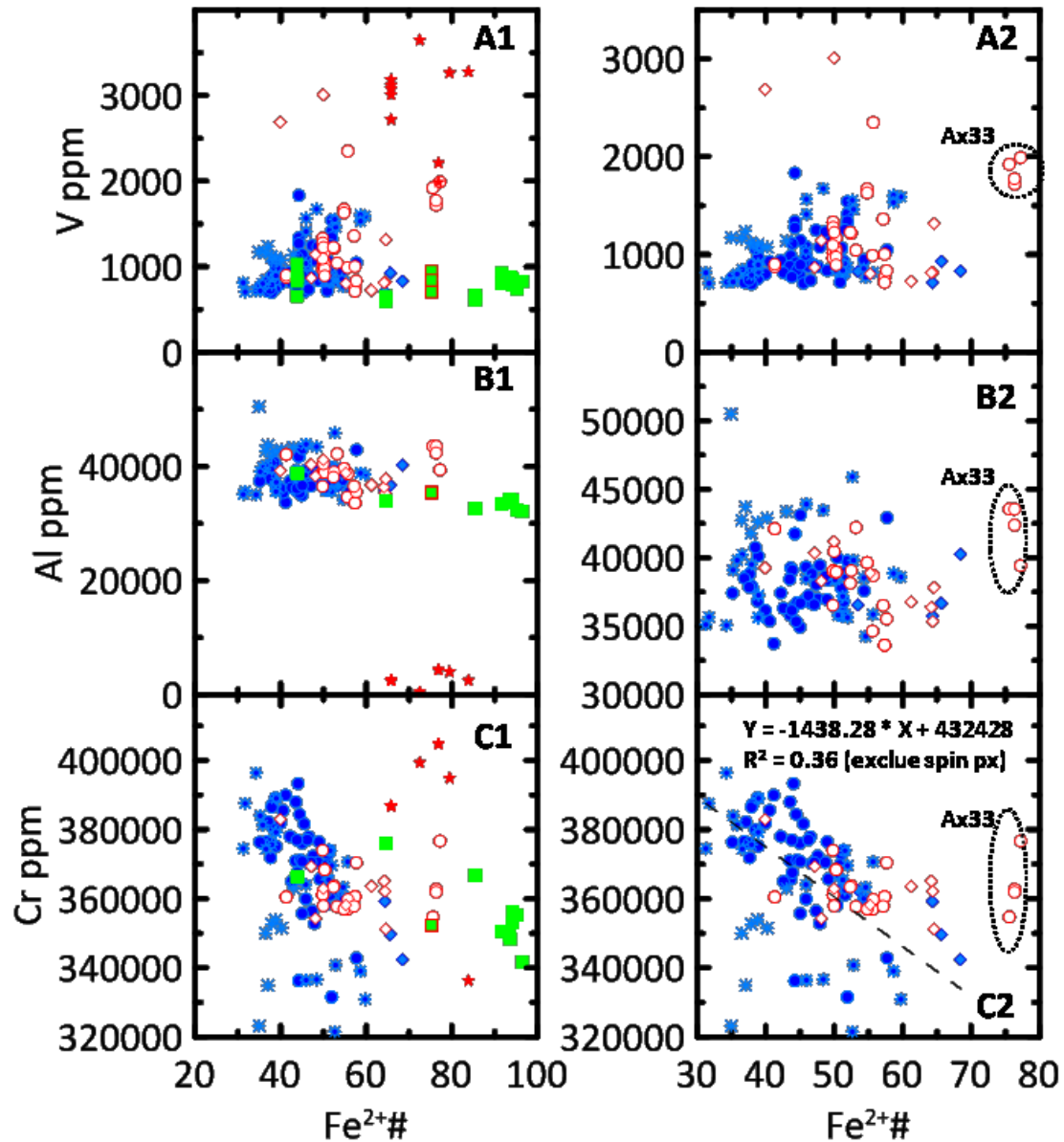
**Figure 4.10 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du Cr#. La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Ti (ppm) vs Cr#, (B) Ga (ppm) vs Cr#, (C) Sc (ppm) vs Cr#, (D) V (ppm) vs Cr#. La ligne en tiretés correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.



**Figure 4.11 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du  $Fe^{2+}\#$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Mn (ppm) vs  $Fe^{2+}\#$ , (B) Co (ppm) vs  $Fe^{2+}\#$ , (C) Zn (ppm) vs  $Fe^{2+}\#$ , (D) Cu (ppm) vs  $Fe^{2+}\#$ , (E) Ni (ppm) vs  $Fe^{2+}\#$ . La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.



**Figure 4.12 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du  $\text{Fe}^{2+}\#$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) Ti (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ , (B) Ga (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ , (C) Sc (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ .



**Figure 4.13 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en fonction du  $\text{Fe}^{2+}\#$ . La partie de gauche présente toutes les données (X1). La partie de droite (X2) correspond à un agrandissement de X1, où sont exclues les chromites des sulfures massifs et de la zone Hart. (A) V (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ , (B) Al (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ , (C) Cr (ppm) vs  $\text{Fe}^{2+}\#$ . La ligne en tirets correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des lithologies non minéralisées de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.

#### 4.3.2.2 Résumé et discussions

##### *Aspect exploration*



Les résultats montrent que les différents faciès lithologiques n'influencent pas de façon significative les concentrations en éléments mineurs et traces. En revanche la présence ou non de sulfures a un impact observable sur ces concentrations. Ainsi, les chromites des cumulats à olivine, des cumulats à olivine et pyroxène, des spinifex à olivine, et des spinifex d'olivine et pyroxène suivent les mêmes variations de concentrations entre elles. De même, les chromites des cumulats d'olivine avec sulfures disséminés, et des cumulats d'olivine et pyroxène avec sulfures disséminés suivent les mêmes variations de concentrations entre elles.

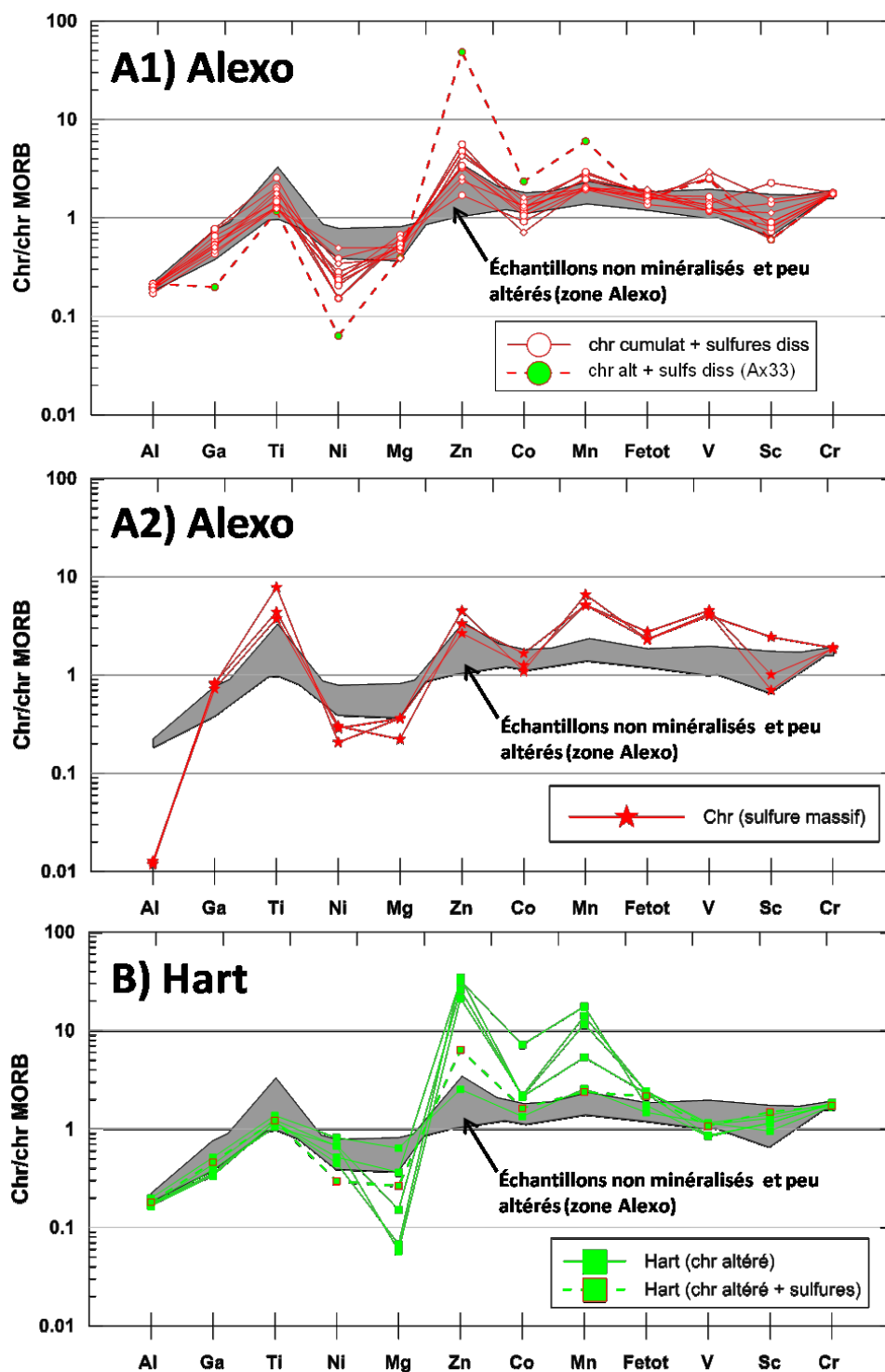
Les chromites des échantillons minéralisés avec sulfures disséminés présentent des concentrations légèrement plus élevées en Mn et Zn, des concentrations légèrement plus faibles en Co et significativement plus faibles en Ni et en Cu par rapport aux chromites des échantillons non minéralisés (Fig. 4.14 A1). Le Zn, Co, Ni et Cu sont tous des éléments dits chalcophiles, qui ont une forte affinité avec le soufre et un coefficient de partage plus élevé pour les sulfures que pour les autres minéraux. La présence de sulfures devrait donc avoir pour effet une diminution des concentrations de ces éléments dans le liquide magmatique à partir duquel cristallisent les chromites et dans les chromites elles-mêmes qui sont en compétition avec les sulfures. Ceci est bien observé pour le Ni et Cu, et légèrement pour le Co, mais non pour le Zn. Le Zn et aussi le Mn sont certainement influencés par d'autres processus, tel que l'altération ou bien des rééquilibrations subsolidus avec les autres phases environnantes. Ces processus sont discutés et approfondis dans l'aspect pétrologique et le chapitre 5.

Les chromites des sulfures massifs marquent de grandes différences avec les chromites des échantillons non minéralisés. Elles sont plus riches en Ti, Mn, Fe et V et légèrement plus riches en Zn, et elles sont plus pauvres en Al, Ni, et Mg (Fig. 4.14 A2).

Les chromites des échantillons de la zone Hart constituent le pôle altéré. Il apparaît clairement que certains éléments ont été mobiles durant l'altération, avec un enrichissement en Zn, Co et Mn et un appauvrissement en Mg et un léger appauvrissement en Ga (Fig. 4.14 B). Il semble que l'altération a une influence plus importante sur les éléments de valence 2+ et n'affecte que très peu les éléments ayant une valence plus élevée ( $\geq 3+$ ), seul le Ga montre une diminution de concentration. Le Ni est de valence 2+ mais ne semble pas être affecté par l'altération.

Ces résultats montrent qu'il y a pour plusieurs éléments (particulièrement pour Mg, Zn, Mn et Fe), une possibilité de surimposition de l'effet de l'altération et de la présence de sulfures, comme c'est le cas pour l'échantillon Ax33. Ainsi, pour l'exploration il serait utile de considérer cet effet de l'altération afin de discriminer les chromites associées aux faciès minéralisés des chromites associées aux faciès altérés.

La figure 4.14 constitue un résumé des observations précédentes. Elle présente, sous la forme de diagrammes multi-élémentaires, les compositions des chromites normalisées à la composition des chromites de MORB. Une comparaison est faite entre les chromites des échantillons non minéralisés et les chromites des échantillons minéralisés de la zone Alexo (Fig. 4.7 A1 et A2) et entre les chromites des échantillons non minéralisés de la zone Alexo et les chromites altérées de la zone Hart (Fig. 4.14 B). Les champs en gris regroupent les données pour tous les faciès lithologiques des échantillons non minéralisés (les cumulats à olivine, les cumulats à olivine et pyroxène, les spinifex à olivine et les spinifex à pyroxène). Pour des raisons visuelles, le Cu n'est pas représenté, car certains échantillons des faciès lithologiques non minéralisés sont très riches en Cu et viennent fausser la comparaison.



**Figure 4.14 :** Diagrammes multi-élémentaires présentant les compositions de chromites normalisées à la composition des chromites de MORB (Pagé et Barnes, 2009). Le champ gris regroupe les données des chromites des échantillons des lithofaciès non minéralisés en sulfures et peu altérés (zone Alexo). Ces données sont comparées en A avec les chromites des échantillons minéralisés en sulfures (zone Alexo) : A1 pour les échantillons des sulfures disséminés et A2 pour les échantillons des sulfures massifs. Les données sont comparées en B avec des chromites altérées (zone Hart). Chr = chromite, alt = altéré, sulfs = sulfures, diss = disséminés.

### *Aspect pétrologique*

Les résultats des analyses de chromites ont montré que les chromites des échantillons non minéralisés présentent un certains nombre de corrélations chimiques. Ainsi le Ti, Sc et V montrent une corrélation linéaire négative avec le Cr#. Le Mn, Co, Zn montrent des corrélations linéaires positives avec le  $\text{Fe}^{2+}\#$  et le Ni une corrélation linéaire négative. Il en ressort des comportements différents suivant l'état de valence des éléments. En effet, les éléments de valence 2+ montrent une corrélation avec  $\text{Fe}^{2+}\#$  à l'exception du Cu, alors que les éléments de valence 3+ montrent une corrélation avec Cr# à l'exception du Ga. Les corrélations avec Cr# sont majoritairement dues au processus de cristallisation fractionnée, Ti, Sc et V sont plutôt incompatibles avec des coefficients de partage globaux inférieurs à 1, leur concentration va donc augmenter dans le liquide résiduel au fur et à mesure de la cristallisation et le Cr# va diminuer. Le Ga ne semble pas affecté par ce processus. Les corrélations avec  $\text{Fe}^{2+}\#$ , sont le résultat de processus de rééquilibration subsolidus entre l'olivine et la chromite mais aussi avec le liquide piégé, ce processus de rééquilibration va appauvrir les chromites en Mg et les enrichir en  $\text{Fe}^{2+}$ , Mn, Co et aussi Zn (Barnes, 1998 et 2000 ; Pagé et Barnes, 2009). Ces processus semblent n'avoir un impact que sur les éléments de valence 2+, à l'exception du Cu qui ne semble pas affecté. Le comportement différent du Ni est peut-être dû au fait que celui-ci est compatible à la fois dans l'olivine et la chromite, entraînant une compétition entre les deux. Cependant une étude de Paktunc et Cabri (1995), suggère que le Ni bien qu'étant de valence 2+, ne se retrouve pas dans le site tétraédrique de la chromite, mais préfère le site octaédrique, de ce fait il ne se comporte pas comme les autres éléments 2+.

Comme décrit dans la partie « *aspect exploration* » les chromites des échantillons minéralisés en sulfures montrent de façon générale des concentrations en Ni, Cu et aussi Co plus faibles que les chromites des échantillons non minéralisés. Ces éléments sont dits chalcophiles et ont tous des coefficients de partage plus élevés dans les sulfures que dans les autres minéraux. La cristallisation de sulfures va donc diminuer rapidement les concentrations de ces éléments dans le liquide, et des chromites plus appauvries vont cristalliser, ou bien si les chromites cristallisent avant les sulfures, il existe peut-être des processus de rééquilibration au cours desquelles les éléments chalcophiles diffusent hors des chromites vers les sulfures. Le Zn et Mn présentent des concentrations légèrement plus élevées dans les chromites des échantillons minéralisés que celles des chromites des échantillons non minéralisés. Ceci est probablement dû aux rééquilibrations sub-solidus entre les chromites et les olivines qui ont une influence plus importante que la cristallisation des sulfures.

Les chromites des échantillons minéralisés ne montrent aucunes corrélations chimiques entre les différents éléments et Cr# et Fe<sup>2+</sup>#. L'absence de corrélation semble indiquer que d'autres processus que la compétition entre sulfures et chromites sont en jeu. La large gamme de variation de concentration des chromites des échantillons minéralisés qui vient chevaucher les fourchettes de variation des échantillons non minéralisés (ex : Ni, Cu) tend à montrer qu'il peut exister différentes populations de chromites au sein des échantillons minéralisés ; celles qui auraient cristallisé avant la ségrégation en sulfures et qui montrent des compositions similaires aux chromites des échantillons non minéralisés, et celles qui auraient cristallisé pendant et après la ségrégation en sulfures et qui montrent des compositions en Ni, Cu et aussi Co plus faibles. Cette réflexion est approfondie et discutée dans le chapitre 5.

La composition très différente des chromites dans les sulfures massifs s'explique comme pour les éléments majeurs, par le fait que ces chromites ont cristallisé directement à partir d'un liquide sulfuré, d'une composition chimique bien différente d'un liquide silicaté (Ewers et al., 1976).

#### **4.3.3 Les EGPI et le Rh dans les chromites**

Comme pour les éléments mineurs et traces, les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh dans les chromites sont présentées sous la forme de diagrammes binaires en fonction du Cr# et du Fe<sup>2+</sup># (Fig. 4.15). Ces diagrammes sont discutés de façon qualitative et comparative. Plus particulièrement, les observations sont regroupées par échantillons non minéralisés, minéralisés ou bien altérés (les chromites de la zone Hart et Ax33) et sont décrites en fonction des différences et similitudes entre les faciès lithologiques. Les diagrammes sont aussi discutés selon l'observation ou non de corrélation, et les implications sur l'histoire de cristallisation. Pour les valeurs quantitatives le lecteur est renvoyé au tableau 7, qui présente les fourchettes de variations des concentrations dans les chromites par élément pour chaque faciès lithologique.

##### **4.3.3.1 Résultats**

De façon générale, les concentrations en Os, Ir et Rh dans les chromites varient de en dessous des limites de détection à environ un maximum de 80 ppb, tandis que le Ru montre des concentrations maximums plus élevées atteignant un maximum de 450 ppb (Fig. 4.15 et tableau 7).

### *Échantillons non minéralisés*

Pour les échantillons non minéralisés, les chromites des faciès de cumulats à olivine et des spinifex à olivine montrent des variations de concentrations similaires pour Os, Ir, Ru et Rh. Les chromites des faciès des cumulats à olivine et pyroxène et des spinifex à pyroxène présentent des concentrations légèrement plus élevées pour Os, Ir et Rh. Les données apparaissent dispersées et aucune corrélation ou bien tendance ne ressort avec Cr# ou bien  $\text{Fe}^{2+}\#$ .

### *Échantillons minéralisés*

Les chromites des cumulats à olivine avec sulfures disséminés, et les chromites des cumulats à olivine et pyroxène avec sulfures disséminés montrent les mêmes fourchettes de variations de concentrations en Os, Ir, Ru et Rh que les chromites des échantillons non minéralisés. Les chromites des sulfures massifs en revanche montrent toutes des concentrations en Os, Ir, Ru et Rh en dessous des limites de détection. Comme pour les échantillons non minéralisés, aucune corrélation ou bien tendance n'est observée avec Cr# et  $\text{Fe}^{2+}\#$ .

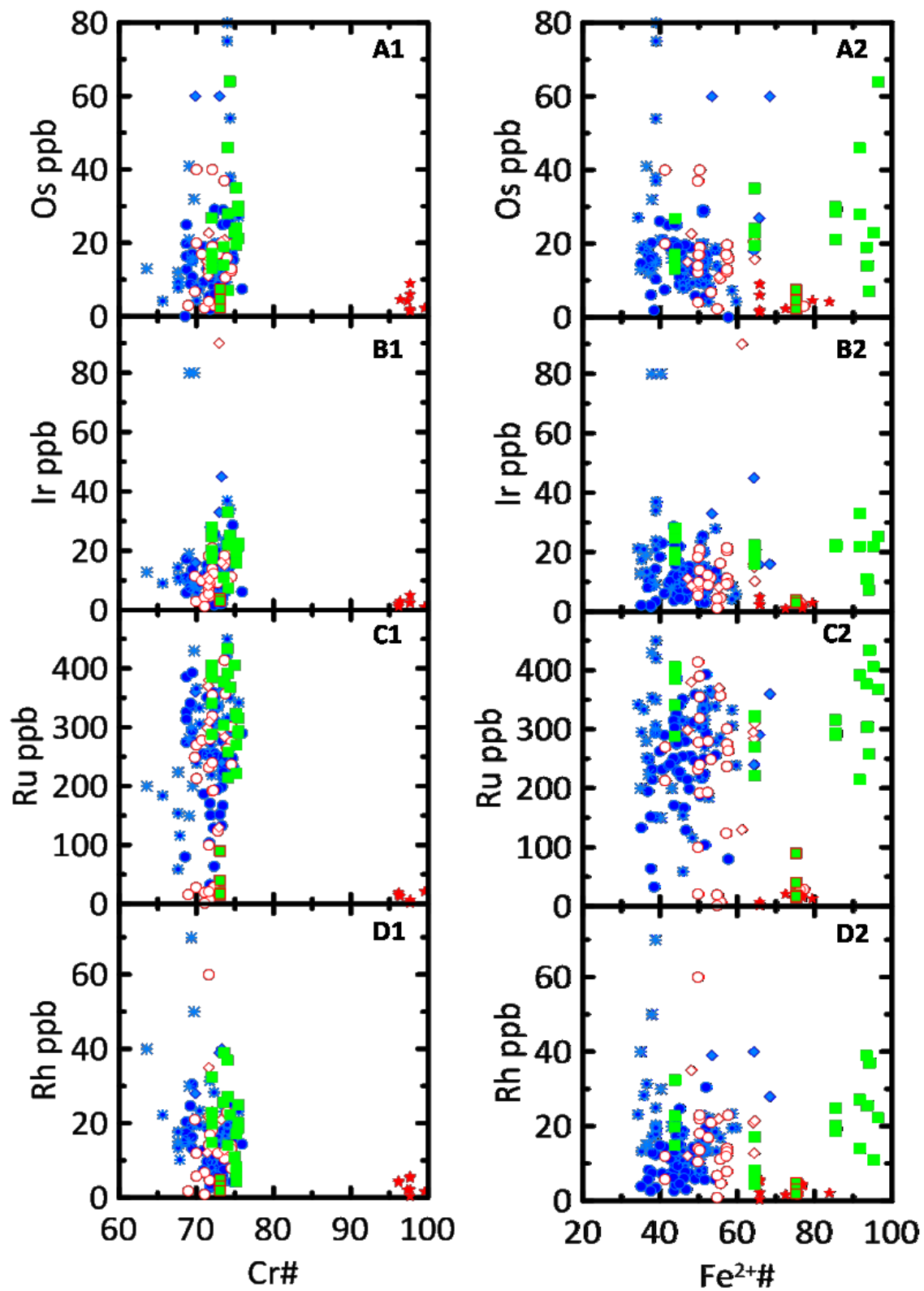
### *Échantillons altérés (zone Hart et Ax33)*

Les chromites de la zone Hart, montrent une concentration plus faible en Os, Ir, Ru et Rh pour les échantillons associés à des sulfures disséminés que pour ceux sans sulfures. Malgré cela, elles s'inscrivent dans les mêmes fourchettes de variations de concentrations que les échantillons minéralisés et non minéralisés de la zone Alexo, c'est-à-dire que l'altération ne semble pas avoir d'effet sur les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh des chromites. Aucune corrélation ou bien tendance n'est observée avec Cr# et  $\text{Fe}^{2+}\#$ .

**Tableau 7 :** Variations des concentrations en EGPI et Rh pour chaque faciès lithologique. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

	ol C (n=46)		ol+px C (n=17)		ol spfx (n=31)		px spfx (n=7)		ol C + sulf (n=29)		ol+px C + sulf (n=9)		sulf mass (n=10)		Hart (n=20)		Hart + sulf (n=5)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Os (ppb)</b>	< 3	58	6,1	60	4,2	80	12	41	< 3	40	11	22,7	< 3	9	7,1	64	< 3	7,5
<b>Ir</b>	3,1	28,7	1,7	45	4,2	37	7,9	80	1,3	21,5	8,2	90	1,1	5	7,4	100	3,1	4
<b>Ru</b>	33	440	64	360	59	450	150	430	< 6	414	130	380	< 6	21	215	434	15	90
<b>Rh</b>	< 3	30,5	< 3	80	8,1	31,4	15	70	< 3	80	12,1	35	< 3	5,7	4,4	39	< 3	4,9





**Figure 4.15 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites. La partie de gauche (X1) présente dans l'ordre Os, Ir, Ru et Rh en fonction du Cr#. La partie de droite (X2) présente dans l'ordre Os, Ir, Ru et Rh en fonction du Fe<sup>2+</sup>#.

#### 4.3.3.2 Résumé et discussions

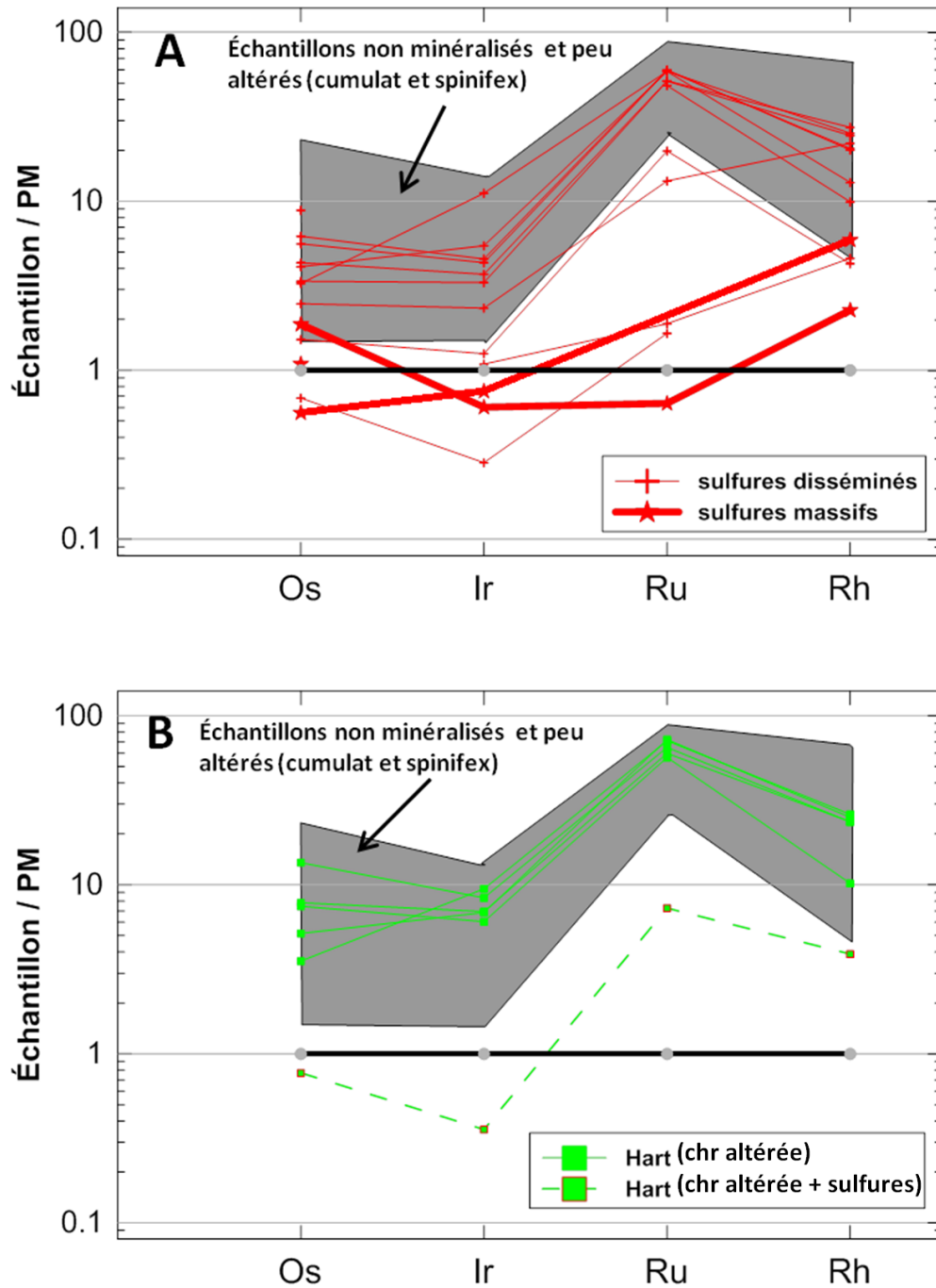
Ainsi les résultats montrent que les faciès lithologiques des échantillons non minéralisés ne présentent pas de différences de concentrations significatives entre eux en EGPI et Rh. Pour la zone Alexo, contrairement à l'hypothèse de départ, et malgré des coefficients de partage bien plus élevés pour les sulfures, les chromites analysées dans les roches contenant des sulfures disséminés ne sont pas clairement appauvries en EGPI et Rh. Ces chromites montrent les mêmes variations de concentrations que les chromites des échantillons non minéralisées. Cette observation va à l'encontre des conclusions établies par Locmelis et al. (2013), qui montrent dans leur étude, que le Ru indique un système minéralisé pour des chromites appauvries, et un système non minéralisé pour des chromites enrichies. Cependant les chromites de l'échantillon minéralisé de la zone Hart montrent pour chaque élément une concentration plus faible que les chromites des échantillons de Hart non minéralisés. Cette observation va dans le sens de l'étude de Locmelis et al. (2013), laissant penser que la zone Alexo serait un système où l'histoire de cristallisation des chromites et des sulfures joue un rôle important.

En revanche, les chromites dans les échantillons de sulfures massifs montrent toutes des concentrations en dessous des limites de détection pour les EGPI et le Rh. Ces chromites ont cristallisées à partir d'un liquide sulfuré et sont donc en compétition directe avec les sulfures. Elles sont de ce fait, très appauvries en EGPI et Rh.

La figure 4.16 constitue un résumé des observations précédentes. Elle présente des comparaisons sous la forme de diagrammes multi-élémentaires. Les chromites des échantillons non minéralisés sont comparées d'abord aux chromites des échantillons minéralisés puis aux chromites altérées de la zone Hart. La composition des chromites est

normalisée à la composition du manteau primitif. Les champs en gris (Fig. 4.16) regroupent les données pour toutes les chromites des faciès lithologiques des échantillons non minéralisés (les cumulats à olivine, les cumulats à olivine et pyroxène, les spinifex à olivine et les spinifex à pyroxène). Ces chromites sont enrichies en EGPI et Rh avec une forte anomalie positive en Ru par rapport au manteau primitif, de 2x à 20x pour Os, de 2x à 15x pour Ir, de 25x à 90x pour Ru et de 5x à 70x pour Rh. Les chromites des échantillons à sulfures disséminés (cumulat à olivine à sulfures disséminés et cumulat à olivine et pyroxène à sulfures disséminés) montrent pour la majorité des échantillons, des variations de concentrations similaires aux chromites des échantillons non minéralisées, et sont aussi enrichies en EGPI et Rh par rapport au manteau primitif (Fig. 4.16 A). Toutefois, pour ces quatre éléments, les maximums de concentration atteints par les chromites des échantillons minéralisés sont toujours inférieurs aux maximums atteints par les chromites des échantillons non minéralisés, avec 9x pour Os, 10x pour Ir, 60x pour Ru et 30x pour Rh. Le Ru montre une répartition différente avec un regroupement autour de 55x ( $\approx 275$  ppb), et seulement quelques échantillons avec des concentrations plus faibles que les chromites des lithologies non minéralisées. Les chromites des sulfures massifs présentent un appauvrissement en EGPI et Rh par rapport aux échantillons non minéralisés, avec Os, Ir et une part du Rh en dessous des limites de détection (Fig. 4.16 A et tableau 7). Les chromites de la zone Hart sont enrichies en EGPI et Rh par rapport au manteau primitif, et montrent également une anomalie positive en Ru. Les chromites des échantillons non minéralisés de la zone Hart se situent dans les mêmes gammes de variations de concentrations que les chromites des échantillons non minéralisés de la zone Alexo, avec 3x à 15x pour Os, 5x à 10x pour Ir, 50x à 70x pour Ru et 10x à 25x pour Rh (Fig. 4.16 B). Cette observation suggère que l'altération n'a que très peu d'effet sur les concentrations en EGPI et Rh. Ces

éléments ont un comportement immobile dans la chromite, jusqu'à un faciès schiste vert supérieur à amphibolite inférieur. Un échantillon de la zone Hart présente des sulfures et contient des chromites avec des concentrations plus faibles en EGPI et Rh que les chromites des échantillons de la zone Hart sans sulfures. Les chromites de cet échantillon ont donc cristallisé à partir d'un magma appauvri en EGPI et Rh après la cristallisation de sulfures.



**Figure 4.16 :** Diagrammes multi-élémentaires présentant les compositions de chromites normalisées au manteau primitif (valeurs de McDonough et Sun, 1995). Le champ gris regroupe les données de chromites des faciès lithologiques non minéralisés en sulfures et peu altérés (zone Alexo, cumulat et spinifex). Ces données sont comparées en A avec les chromites des faciès lithologiques minéralisés en sulfures (sulfures massifs et disséminés de la zone Alexo). Les données sont comparées en B avec des chromites des échantillons altérés de la zone Hart. Chr = chromite, PM = manteau primitif.

#### **4.4 Analyses des chromites comparées aux analyses sur roche totale et discussions**

Afin de mettre en relief les données géochimiques, les analyses sur roche totale ont été comparées aux analyses des chromites sous la forme de diagrammes binaires. Le but est d'illustrer de nouveaux phénomènes et d'observer les liens qui existent entre la chimie de la roche et la chimie des chromites. Dans cette partie, l'accent est mis sur les EGPI et le Rh dans la chromite, et sur leurs interactions avec la chimie roche totale, et plus particulièrement sur le comportement du Ru.

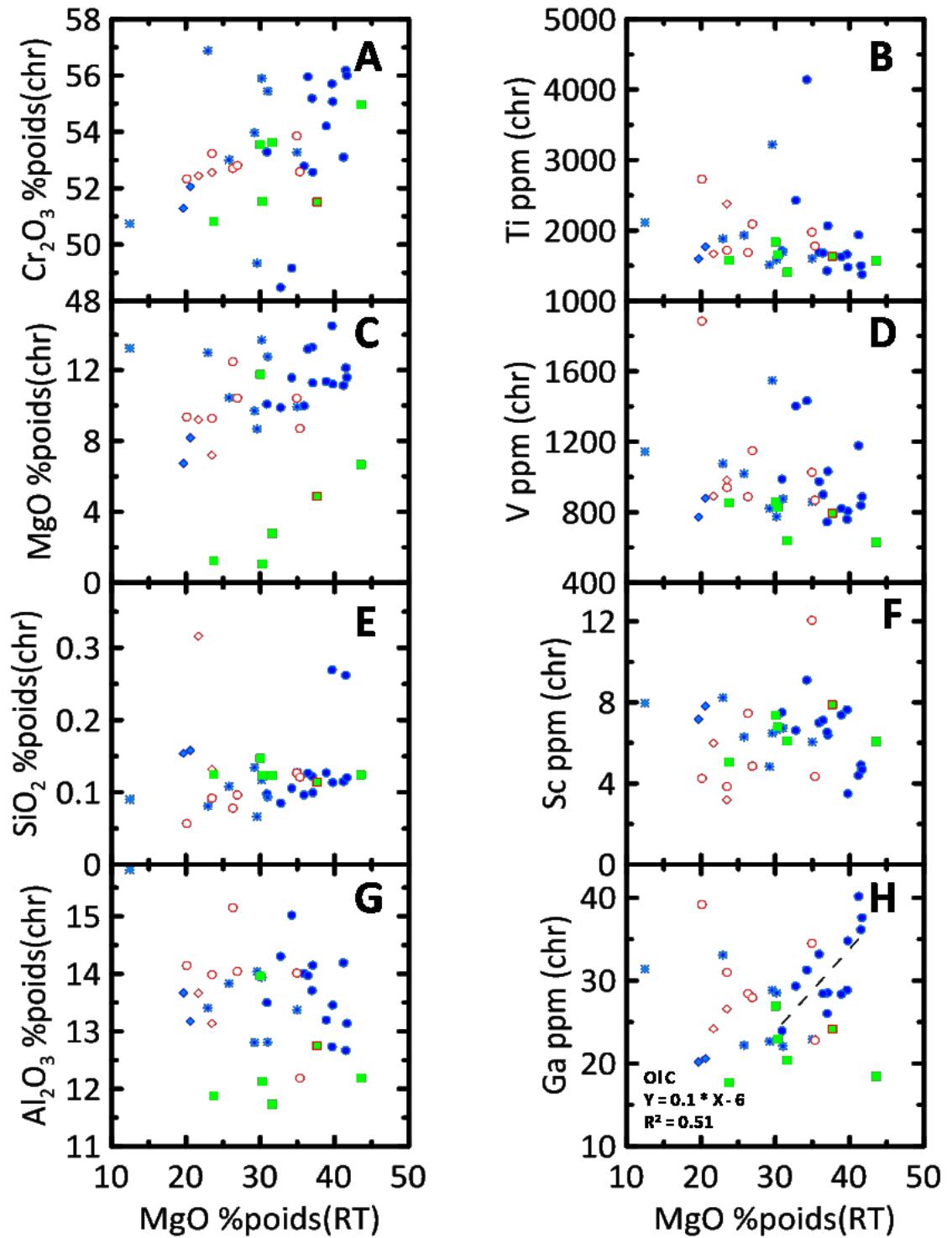
##### **4.4.1 Éléments majeurs et mineurs dans la chromite versus MgO roche totale**

Dans un premier temps, les données de concentrations des chromites en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ , S, Sc, Ti, V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn et Ga ont été comparées aux concentrations en  $\text{MgO}$  de la roche (Figs 4.17 et 4.18). Pour la majorité des éléments, les données apparaissent dispersées et aucune tendance franche ne ressort quelque soit le faciès lithologique, à l'exception du Ga qui présente une corrélation linéaire positive pour les cumulats à olivine avec un  $R^2$  de 0,51 (Fig. 4.17 H). Une légère tendance positive semble ressortir visuellement pour  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$  mais avec des  $R^2 < 0,1$  (Fig. 4.17 A, C et E).

Aucune différence particulière n'est observée entre les échantillons minéralisés et non minéralisés. Pour l'altération, le  $\text{MgO}$  dans les chromites montre une différence importante pour les échantillons altérés de la zone Hart avec des concentrations plus faibles dans la roche et dans les chromites (Fig. 4.17 C), le Mn, Zn et Co montrent des concentrations plus élevées dans les chromites pour certains échantillons de la zone Hart (Fig. 4.18 B, D et F).

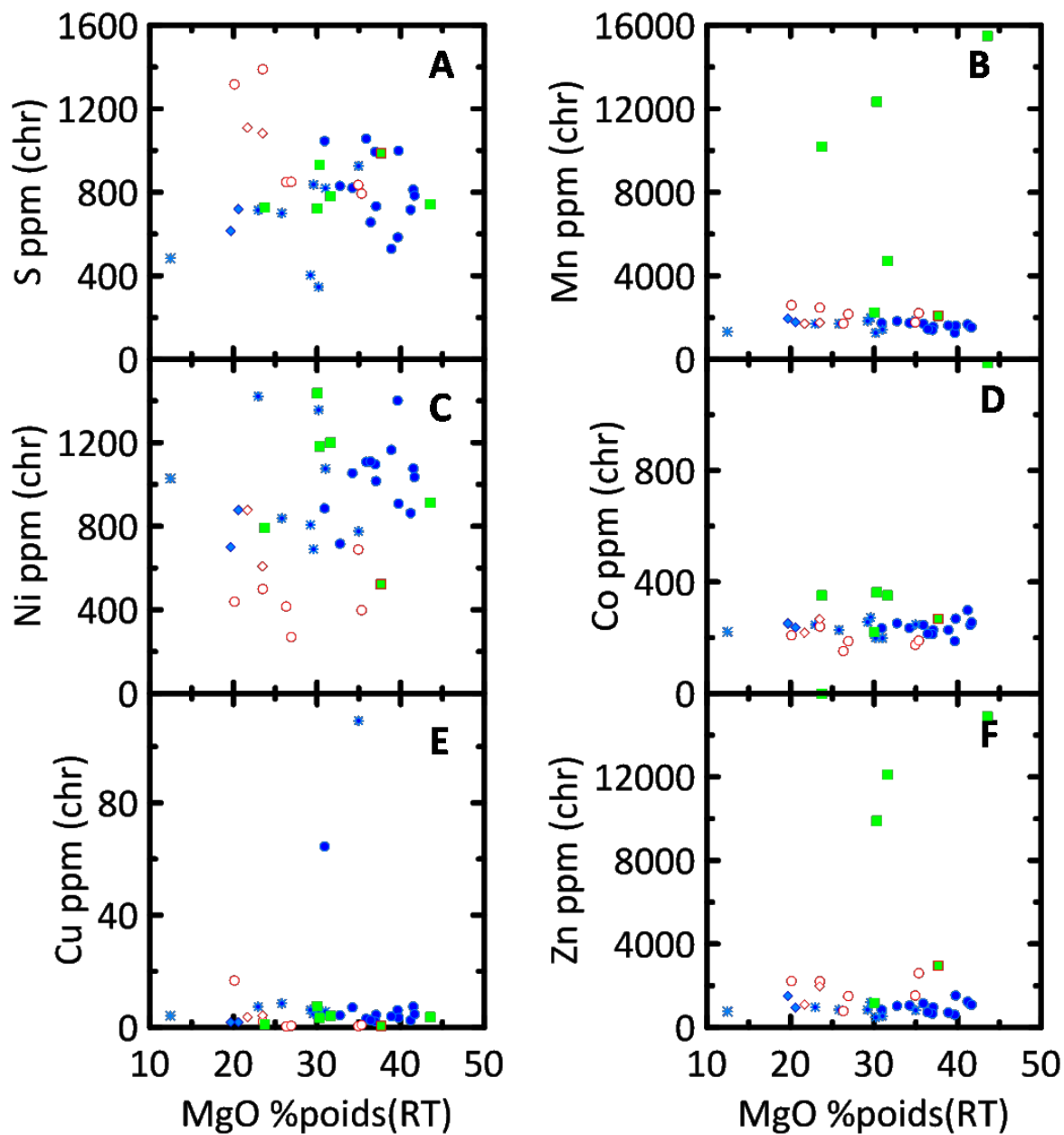
Ces résultats montrent que le contenu en olivine de la roche, bien que ce soit la phase la plus importante, n'influence que légèrement la géochimie des chromites. D'autres processus doivent donc entrer en jeu. Il se peut également que différentes populations de chromites ayant cristallisées à différents stade de fractionnement du magma soit présentes et mélangées au sein des échantillons.

Les mêmes comparaisons ont été effectuées avec le contenu en  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de la roche, mais les diagrammes ne sont pas présentés. Le constat est le même que pour  $\text{MgO}$ , il n'y a pas de tendances ou de corrélations significatives observées. Cela tend à montrer que la chromite n'est pas le minéral qui contrôle le comportement de ces éléments. Cela s'explique par le fait que la chromite n'est qu'une phase mineure représentant seulement 1% ou moins de la proportion modale des minéraux dans les roches analysées.



**Figure 4.17 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{V}$  et  $\text{Ga}$  en fonction du  $\text{MgO}$  roche totale. (A)  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (% poids chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (B)  $\text{Ti}$  (ppm chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (C)  $\text{MgO}$  (% poids chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (D)  $\text{V}$  (ppm chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (E)  $\text{SiO}_2$  (% poids chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (F)  $\text{Sc}$  (ppm chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (G)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (% poids chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT), (H)  $\text{Ga}$  (ppm chr) vs  $\text{MgO}$  (% poids RT). La ligne en tiretées correspond à la droite de régression linéaire pour les échantillons des cumulats à olivine de la zone Alexo.  $R^2$  = coefficient de corrélation.



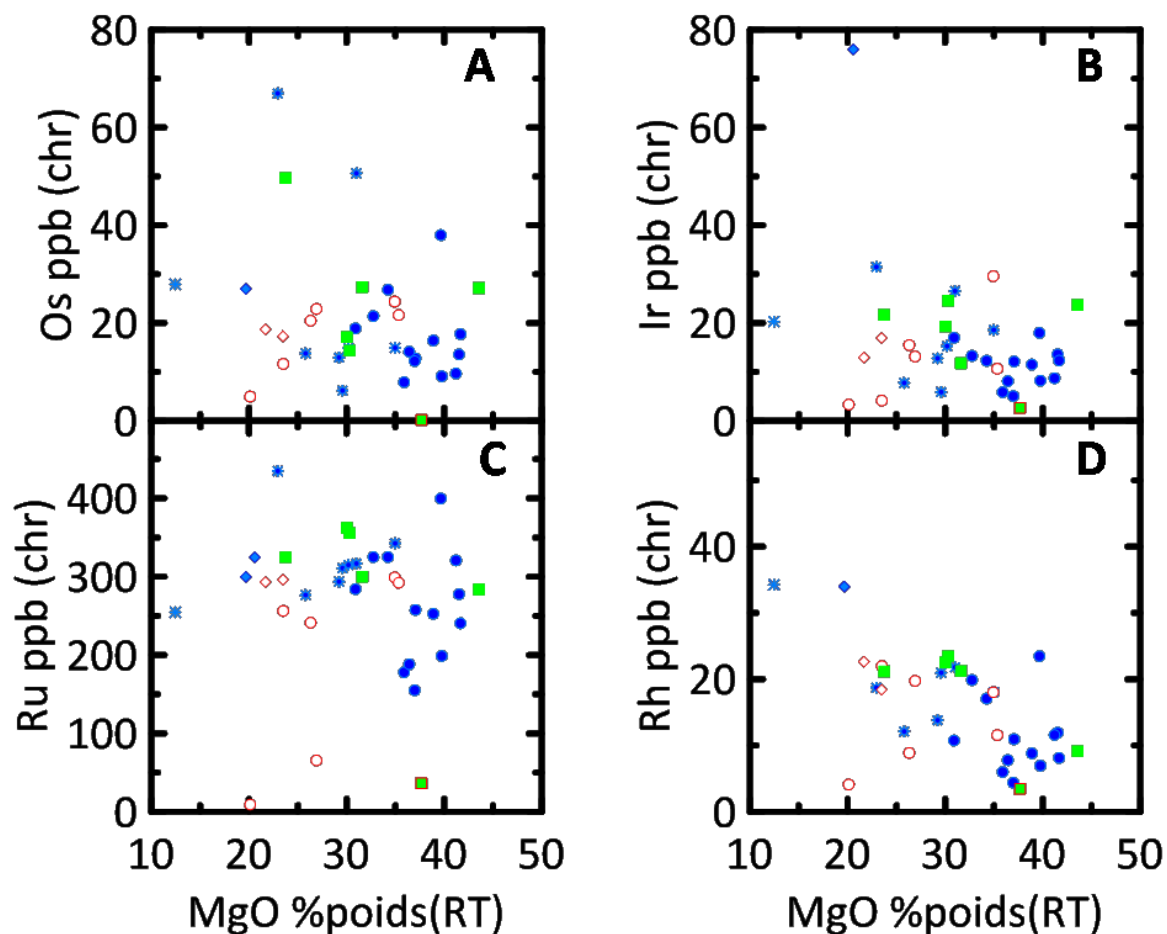


**Figure 4.18 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en S, Mn, Co, Ni, Cu et Zn en fonction du MgO roche totale. (A) S (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (B) Mn (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (C) Ni (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (D) Co (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (E) Cu (ppm chr) vs MgO (% poids RT), (F) Zn (ppm chr) vs MgO (% poids RT).

#### **4.4.2 EGPI et Rh dans la chromite versus MgO, Cr et S roche totale**

##### *EGPI et Rh versus MgO*

Les valeurs des concentrations des chromites en Os, Ir, Ru et Rh ont été comparées aux valeurs des concentrations en MgO de la roche (Fig. 4.19). Les diagrammes présentent des données dispersées pour chacun des éléments. Aucune corrélation ou bien tendance n'est observée, quelque soit le faciès lithologique. De même, il n'y a pas de différences significatives entre les échantillons avec sulfures disséminés et ceux sans sulfures et entre les échantillons altérés et moins altérés. Ces résultats montrent que le contenu en olivine de la roche ne semble pas influencer la concentration en EGPI et Rh dans les chromites.



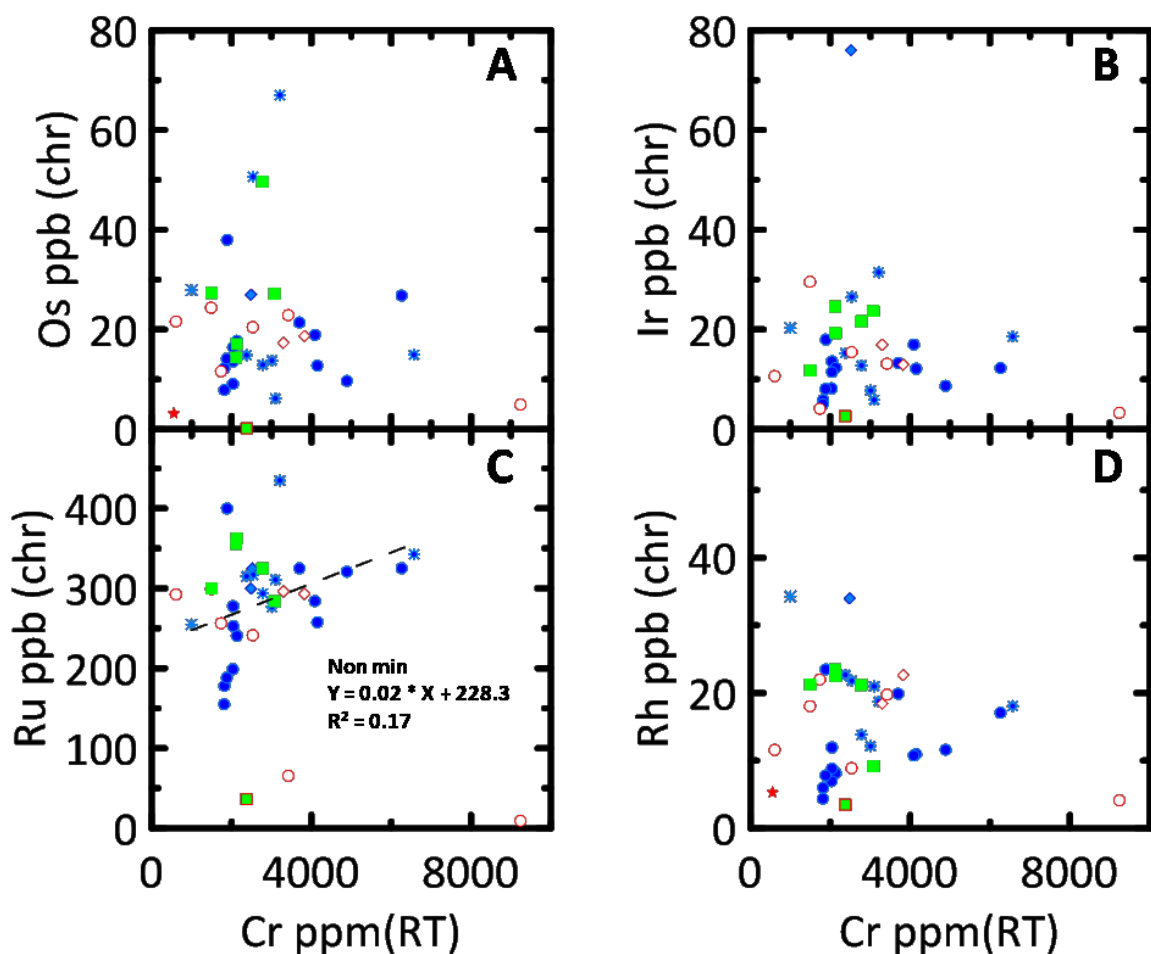
**Figure 4.19 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du MgO roche totale. (A) Os (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (B) Ir (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs MgO (% poids RT), (D) Rh (ppb chr) vs MgO (% poids RT).

#### *EGPI et Rh versus Cr*

Les concentrations en Os, Ir et Rh dans les chromites comparées à la concentration en Cr de la roche, ne présentent pas de corrélation ou bien tendance particulière (Fig. 4.20). Les données apparaissent dispersées et aucune différence ne ressort entre les échantillons minéralisés et non minéralisés ou ceux altérés et moins altérés (Fig. 4.20 A, B et D). En revanche le Ru montre une très légère corrélation positive pour les échantillons non minéralisés avec un  $R^2$  de 0,17, qui monte à 0,24 lorsque seuls les échantillons des

cumulats à olivine sont pris en compte (Fig. 4.20 C). Cette corrélation montre que le Cr de la roche augmente d'abord assez linéairement avec le Ru dans les chromites, puis il y a une cassure à Cr (roche totale)  $\approx 3500$  ppm et Ru (chromite)  $\approx 300$  ppb, et la tendance devient plutôt plane et les données plus dispersées. La concentration en Cr de 3500 ppm correspond environ au niveau de saturation en chromite pour un magma komatiitique.

Ces observations montrent que la chromite dans les komatiites ne joue à priori pas de rôle majeur sur le contrôle en Os, Ir et Rh dans la roche. En revanche, elle a une influence importante sur le contenu en Ru, mais d'autres phases ou processus doivent aussi entrer en jeu.



**Figure 4.20 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du Cr roche totale. (A) Os (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (B) Ir (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (C) Ru (ppb chr) vs Cr (ppm RT), (D) Rh (ppb chr) vs Cr (ppm RT). Non min = non minéralisé.

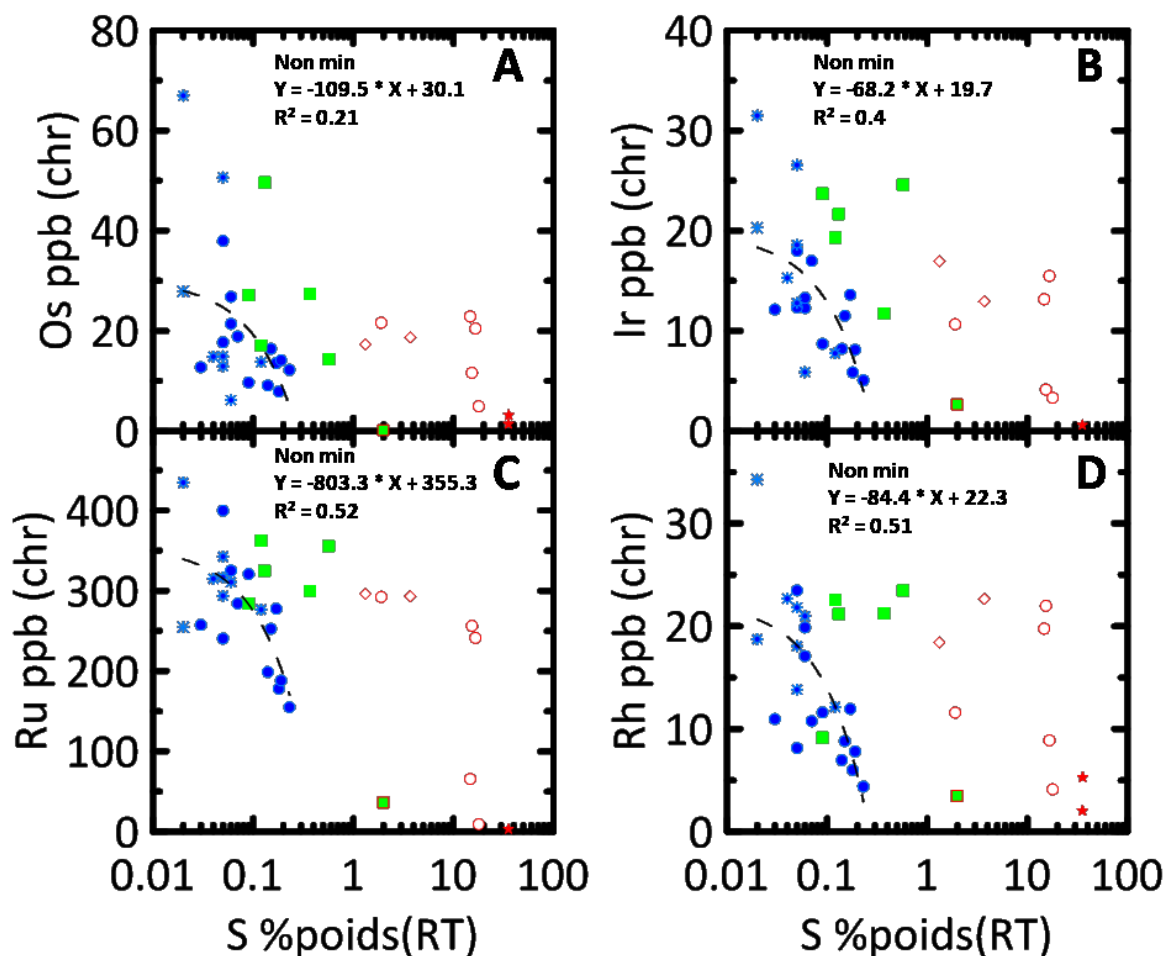
#### *EGPI et Rh versus S*

Pour les échantillons non minéralisés, les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh dans les chromites montrent toutes de faibles corrélations linéaires négatives avec la concentration en S de la roche, avec un  $R^2$  compris entre 0,21 et 0,52 (Fig. 4.21). Ces corrélations sont observées alors que ces échantillons non minéralisés ont un contenu roche totale en S inférieur à 0,5 % poids. Cela démontre la très forte influence de la présence de sulfures sur le contenu en EGPI et Rh des chromites. C'est-à-dire que pour les échantillons

minéralisés, une très faible teneur en soufre dans la roche diminue rapidement les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh des chromites. Pour les quatre éléments, les corrélations négatives apparaissent plus claires entre 0,5 et 0,1 % poids en S, et elles sont un peu plus dispersées en dessous de 0,1 % poids en S (Fig. 4.21).

Pour les échantillons minéralisés, les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh dans les chromites présentent visuellement une faible tendance négative avec la concentration en S de la roche, mais avec un  $R^2 < 0,1$ . Cependant, la présence de chromites avec des concentrations élevées en Os, Ir, Ru et Rh dans les échantillons minéralisés est anormale. Cela implique que les chromites ont cristallisé bien avant la présence de liquide sulfuré, ou bien qu'il existe différentes populations de chromites.

Pour les échantillons plus altérés et non minéralisés de la zone Hart, les concentrations en Os, Ir, Ru et Rh dans les chromites semblent aussi suivre visuellement une faible tendance négative avec la concentration en S de la roche. Les teneurs en S sont légèrement plus élevées que pour la zone Alexo, variant de 0,1 à 1 % poids.



**Figure 4.21 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Os, Ir, Ru et Rh en fonction du S roche totale. (A) Os (ppb chr) vs S (% poids RT), (B) Ir (ppb chr) vs S (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs S (% poids RT), (D) Rh (ppb chr) vs S (% poids RT). Non min = non minéralisé.

#### 4.4.3 Le Ru dans la chromite versus données roche totale

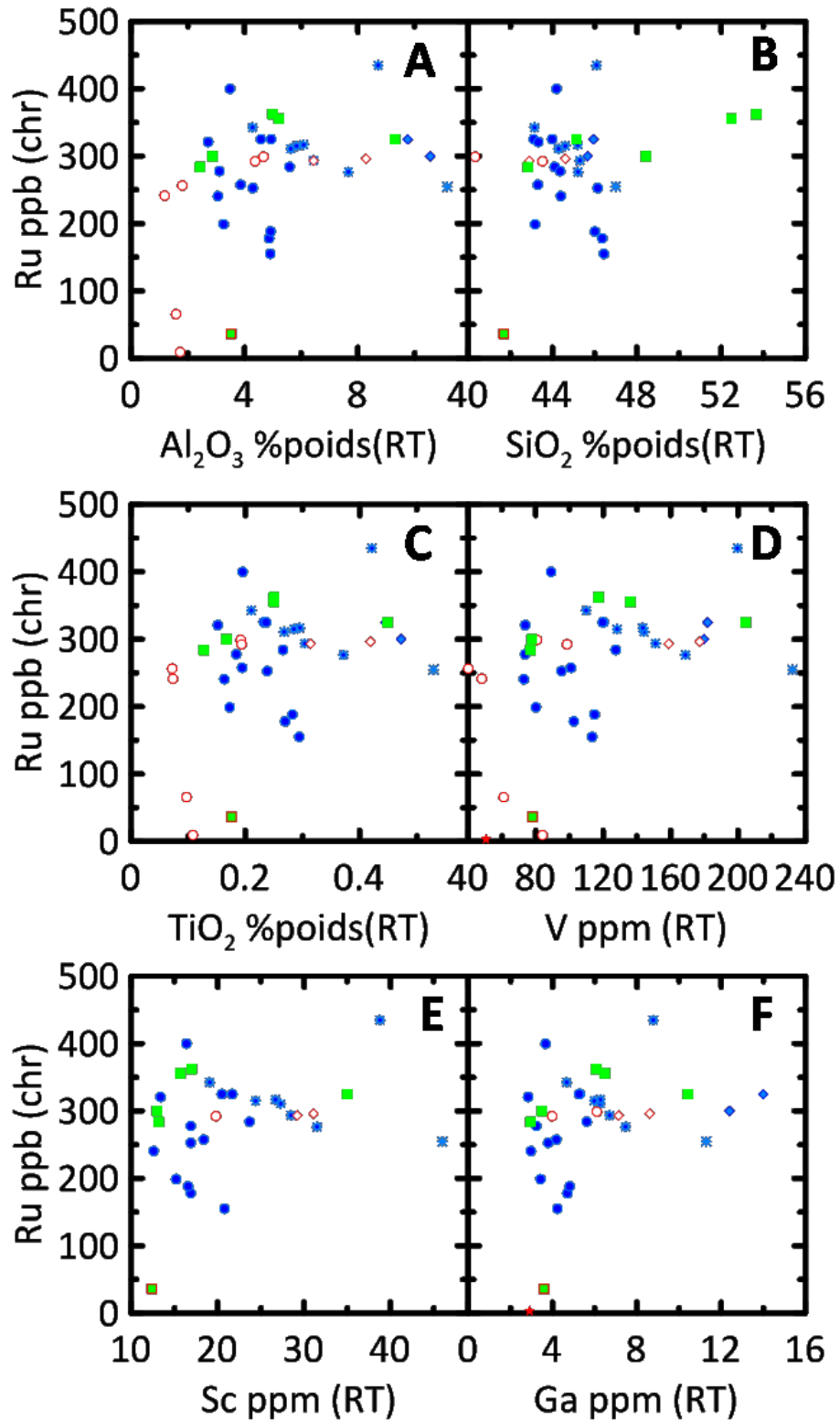
Le Ru est l'élément du groupe du platine le plus abondant dans les chromites de komatiïtes. Il est en moyenne 100x plus abondant que Os, Ir et Rh. Dans le but de mieux comprendre le comportement géochimique de cet élément nous avons réalisé des comparaisons sous la forme de diagrammes binaires entre les concentrations en Ru dans les chromites et les concentrations en différents éléments dans la roche (Figs 4.22 et 4.23). Ces diagrammes sont présentés en deux parties, avec en premier les diagrammes présentant le Ru dans les chromites en fonction de  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ , Sc, V et Ga dans la roche. Ces

éléments présentent tous un état de valence 3+ ou plus. En deuxième, sont présentés les diagrammes montrant le Ru dans les chromites en fonction de MnO, S, FeO, Zn, Co, Ni et Cu dans la roche. Ces éléments sont tous à un état de valence 2+. Une troisième partie insiste sur le comportement du Ru pour les échantillons des faciès à texture spinifex (spinifex à olivine et spinifex à pyroxène) (Fig. 4.24).

#### *Éléments de valence 3+ et au-delà*

Les diagrammes de la figure 4.22, présentent le contenu en Ru dans les chromites en fonction du contenu en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , Sc, V et Ga. De façon générale, aucune corrélation ou bien tendance particulière n'est observée. Seuls les échantillons des textures à spinifex présentent des corrélations. Ces corrélations sont discutées plus en détail par la suite lors de la description de la figure 4.24.



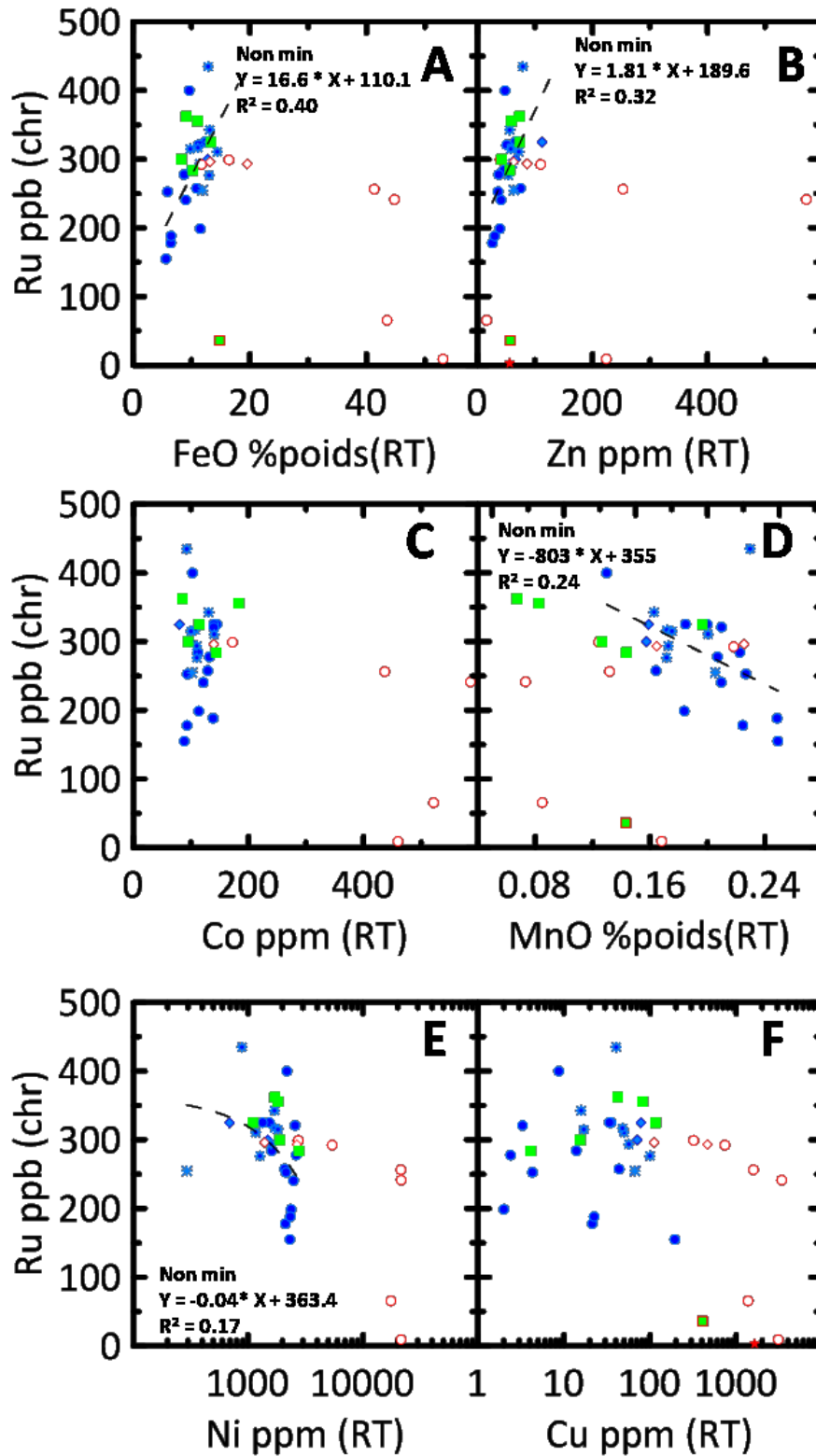


**Figure 4.22 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , Sc, V et Ga roche totale. (A) Ru (ppb chr) vs  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs  $\text{SiO}_2$  (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs  $\text{TiO}_2$  (% poids RT), (D) Ru (ppb chr) vs V (ppm RT), (E) Ru (ppb chr) vs Sc (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Ga (ppm RT).

### *Élément de valence 2+*

Les diagrammes de la figure 4.23, présentent le contenu en Ru dans les chromites en fonction du contenu de la roche en MnO, FeO, Zn, Co, Ni et Cu. Pour les échantillons non minéralisés, une corrélation positive est observée pour FeO et Zn, avec un  $R^2$  de 0,40 et 0,32 respectivement (Fig. 4.23 A et B). Le Co semble suivre visuellement une tendance positive mais avec un  $R^2 < 0,1$  (Fig. 4.23 C). Il y a une faible corrélation négative pour MnO et Ni avec un  $R^2$  de 0,24 et 0,17 respectivement (Fig. 4.23 D et E). Le Cu ne présente pas de corrélation particulière (Fig. 4.23 F). Pour les échantillons minéralisés, aucune corrélation significative n'est observée, en revanche, FeO, Ni et Cu, montrent une tendance négative, c'est-à-dire que leur concentration dans la roche semble diminuer avec la diminution des concentrations en Ru dans les chromites (Fig. 4.23 B, E et F).

Ces corrélations, pour les échantillons non minéralisés, entre le Ru dans les chromites et les éléments de valence 2+ dans la roche constituent une observation nouvelle. Comme pour les résultats présentés dans la partie 4.3, elles illustrent peut-être un phénomène de rééquilibration sub-solidus entre le Ru des chromites et une autre phase dans la roche. Cependant le Ru est normalement à l'état de valence 3+ (Brenan et al., 2012), et de ce fait, il est théoriquement moins mobile que les éléments de valence 2+.

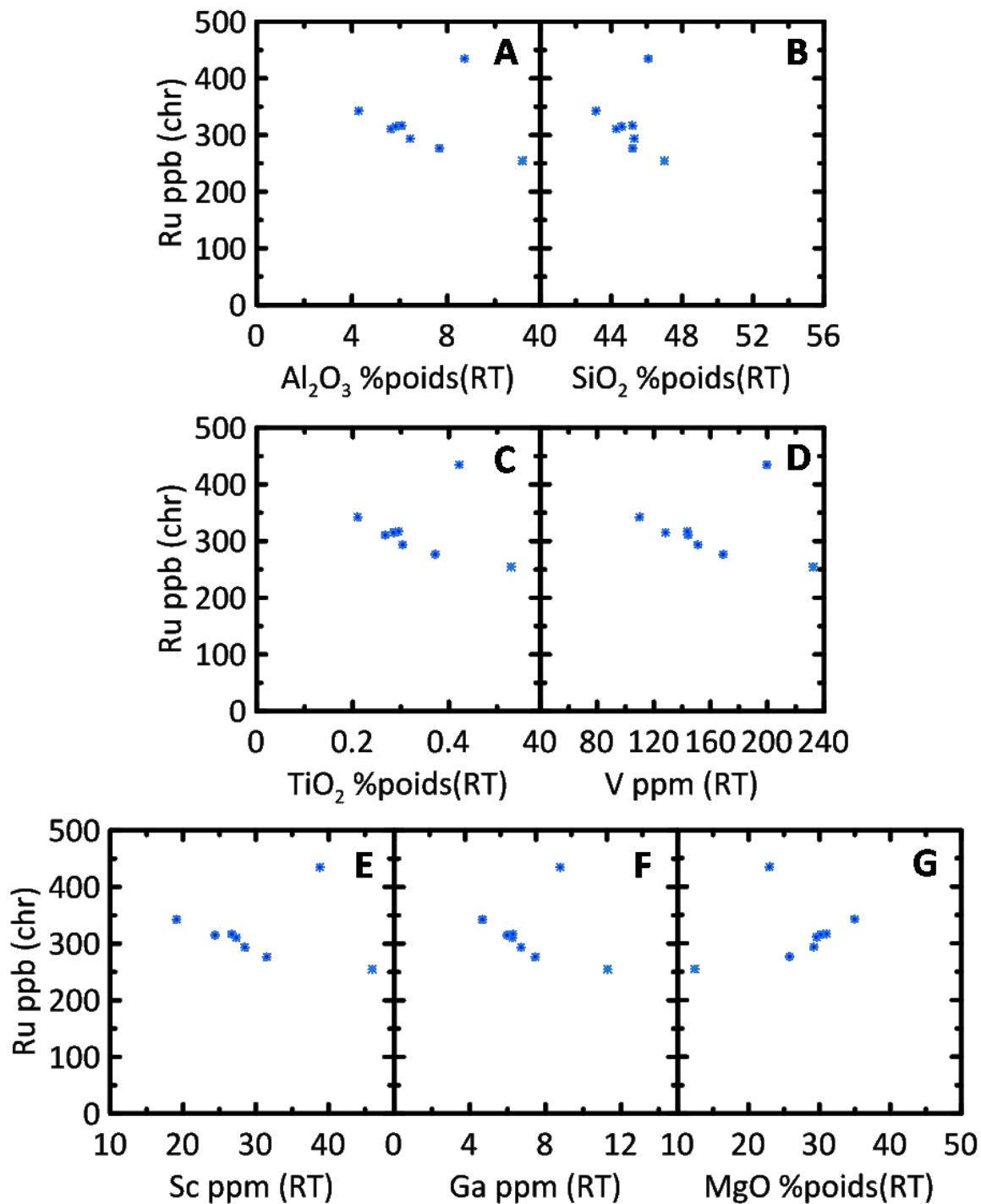


**Figure 4.23 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de FeO, Zn, Co, MnO, Ni et Cu roche totale. (A) Ru (ppb chr) vs FeO (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs Zn (ppm RT), (C) Ru (ppb chr) vs Co (ppm RT), (D) Ru (ppb chr) vs MnO (% poids RT), (E) Ru (ppb chr) vs Ni (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Cu (ppm RT). Non min = non minéralisé.

### *Le cas des échantillons à texture spinifex*

Comme pour la figure 4.14, la figure 4.24 présente également sous la forme de diagrammes binaires le contenu en Ru dans les chromites en fonction du contenu en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , Sc, V, Ga et MgO de la roche. Cependant, cette fois seuls les échantillons des faciès lithologiques des spinifex à olivine et des spinifex à pyroxène sont représentés. Une tendance négative est observée pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , Sc, V et Ga (Fig. 4.24 A à F) et une tendance positive pour MgO (Fig. 4.24 G). Un seul échantillon (Ax19) vient briser cette tendance. Le spectre au laser pour cet échantillon ne montre pas de trace franche d'inclusion pour expliquer la teneur élevée en Ru. Cependant, dû aux petites tailles de chromite dans Ax19, une taille de faisceau laser de  $33\mu\text{m}$  a été utilisée, ce qui peut diminuer la qualité du signal et une inclusion pourrait ne pas apparaître clairement sur le spectre en coups par seconde (voir chapitre 3 méthodologie). De plus les chromites de Ax19 montrent aussi des teneurs un peu plus élevées en Os que les autres échantillons à texture spinifex, ce qui va dans le sens d'inclusions d'un minéral du groupe du platine ou d'un alliage Os-Ru.

La texture spinifex représente du liquide komatiitique figé rapidement, ces tendances enregistrent donc l'effet de la cristallisation fractionnée sur ce liquide pour la partie à spinifex seulement. Le MgO a un comportement compatible et va diminuer dans le liquide en même temps que le Ru dans les chromites. Les autres éléments ont un comportement incompatible et leur concentration va augmenter dans le liquide pendant que le Ru dans les chromites diminue.



**Figure 4.24 :** Diagrammes binaires présentant les analyses des chromites en Ru en fonction de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Sc, V et Ga roche totale. Seulement les échantillons des faciès à texture spinifex sont représentés. (A) Ru (ppb chr) vs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% poids RT), (B) Ru (ppb chr) vs SiO<sub>2</sub> (% poids RT), (C) Ru (ppb chr) vs TiO<sub>2</sub> (% poids RT), (D) Ru (ppb chr) vs V (ppm RT), (E) Ru (ppb chr) vs Sc (ppm RT), (F) Ru (ppb chr) vs Ga (ppm RT), (G) Ru (ppb chr) vs MgO (% poids RT).

## **CHAPITRE 5**

### **DISCUSSIONS**

Le chapitre 5 est découpé en trois parties distinctes. La première partie discute des aspects pétrologiques du projet, il y est discuté du comportement des EGP dans les komatiites et du rôle de la chromite. Des comparaisons avec les données d'autres études sont présentées afin d'appuyer la discussion. La deuxième partie discute des aspects exploration du projet, c'est-à-dire des différentes implications de la chimie des chromites pouvant être utilisées comme indicateur de la présence ou bien l'absence de sulfures. Et enfin, la troisième partie discute de l'impact du métamorphisme sur la chimie des chromites à l'aide de cartographies géochimiques de chromites à différent stade d'altération.

#### **5.1 Aspect pétrologique : le comportement des EGP dans un magma komatiitique et le rôle de la chromite**

##### **5.1.1 Contrôle de la chromite sur les budgets en EGPI et Rh dans les komatiites de la zone Alexo**

Les spectres chimiques obtenus par ablation au laser ne démontrent pas la présence d'inclusions de minéraux du groupe du platine. Au contraire ils montrent un signal continu qui démontre une homogénéité des concentrations en EGPI et Rh à l'intérieur des grains de

chromites, c'est-à-dire que les EGPI et le Rh entrent dans le réseau cristallin de la chromite. Cependant le contrôle exact que joue la chromite sur ces éléments dans les komatiites reste peu documenté.

Afin de savoir réellement dans quelle proportion la chromite contrôle les budgets sur roche totale en EGPI et aussi Rh, des bilans de masse ont été réalisés. Pour calculer ces bilans, dans un premier temps, la proportion de chromite par échantillon est calculée. Pour ce calcul, la part de Cr contrôlée par les phases silicatées n'est pas négligeable, car les phases silicatées principalement représentées par l'olivine et le verre magmatique, peuvent contenir une part importante de Cr (environ 1200 ppm pour l'olivine selon Puchtel et al., 2004). D'après Arguin et al. (2016) et Pagé et Barnes (2016), dans les roches volcaniques 75% du Cr provient des chromites et 25% pourrait être attribué à la partie silicatée. C'est pourquoi la vraie proportion de chromite est estimée d'après l'équation suivante (Équation 1, modifiée d'après Pagé et al., 2012 et Pagé et Barnes, 2016) :

$$(1) F_{chr} = 0,75 * [Cr_2O_3]_{RT} / [Cr_2O_3]_{chr}$$

Avec  $F_{chr}$  pour proportion de chromite ;  $[Cr_2O_3]_{RT}$  pour concentration en  $Cr_2O_3$  dans la roche ;  $[Cr_2O_3]_{chr}$  pour concentration en  $Cr_2O_3$  dans la chromite.

Ensuite il est possible de calculer la proportion d'un élément contrôlée par la chromite avec l'équation suivante (Équation 2, d'après Pagé et Barnes, 2016) :

$$(2) F_{EGP/chr} = 100 * ([C]_{EGP/chr} * F_{chr}) / [C]_{EGP/RT}$$

Avec  $F_{\text{EGP/chr}}$  pour proportion d'un élément contrôlée par la chromite ;  $[C]_{\text{EGP/chr}}$  pour concentration de cet élément dans la chromite ;  $[C]_{\text{EGP/RT}}$  pour concentration de cet élément dans la roche.

Le calcul a été effectué sur tous les échantillons de la zone Alexo, et un regroupement a été fait pour les échantillons des lithologies non minéralisées et les échantillons des lithologies minéralisées à sulfures disséminés. Les faciès lithologiques à sulfures massifs ne figurent pas dans ces résultats, car dans ce cas-là les budgets en éléments du groupe du platine sont uniquement contrôlés par les sulfures.

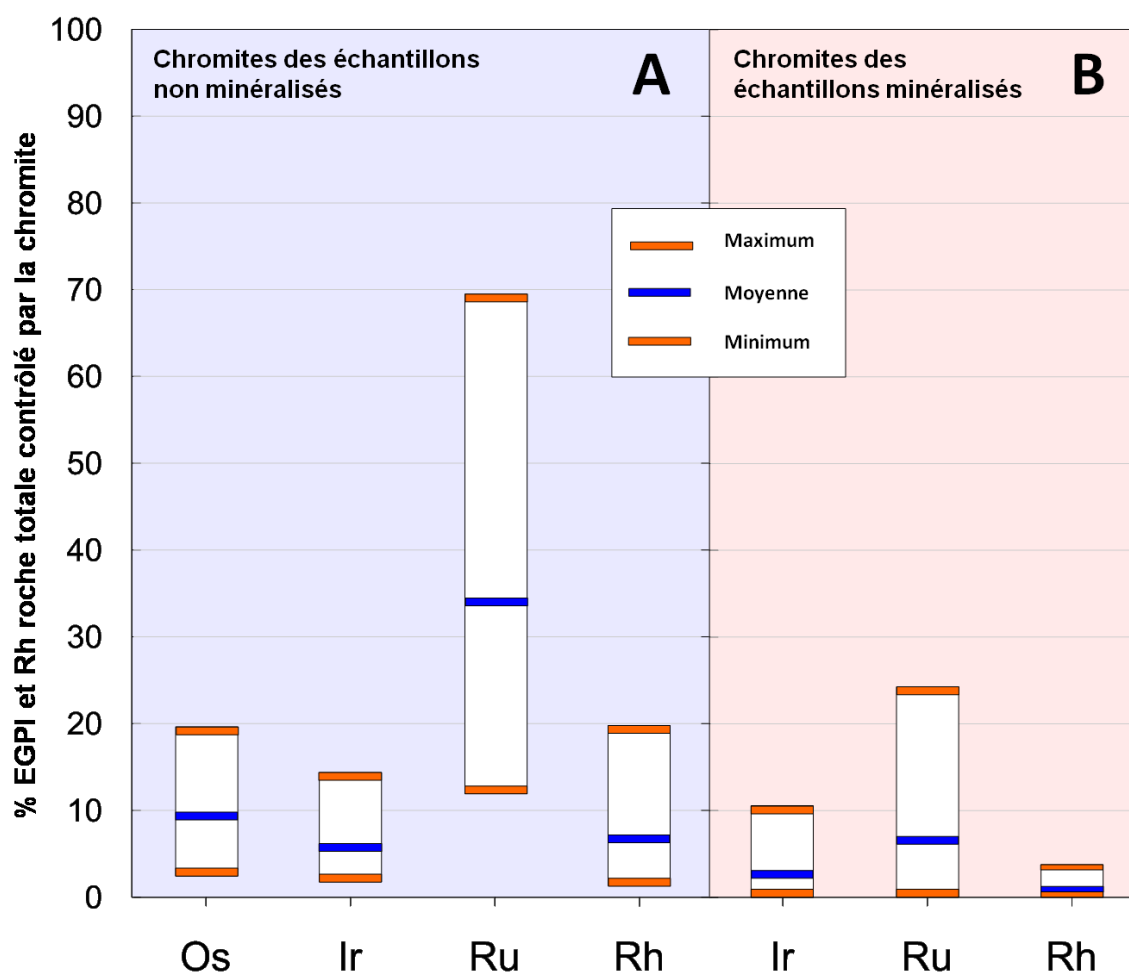
D'après les calculs, les échantillons non minéralisés montrent une proportion de chromite dans la roche variant de 0,2 % à 1,4 %, pour une moyenne d'environ 0,7 %. Les échantillons minéralisés quand à eux montrent une proportion de chromite allant de 0,1 % à 1,9 %, pour une moyenne de 0,6 %. Ces résultats reflètent assez bien les proportions de chromites généralement observées dans les komatiites qui, selon la littérature, sont de l'ordre de 1%. Lorsque l'on regarde en détail, il n'y a pas plus de chromites dans les échantillons à texture de cumulat que les échantillons à texture spinifex. En revanche, il y a en règle générale un peu moins de chromites dans les échantillons contenant des pyroxènes.

La figure 5.1 montre la proportion en % du budget roche totale en Os, Ir, Ru et Rh pouvant être expliquée par les chromites. Les résultats sont présentés sous forme de gammes de valeurs, avec en extrémité basse la valeur minimale, en extrémité haute la valeur maximale et le trait bleu correspondant à la moyenne. Pour les échantillons sans sulfures, les résultats montrent que les chromites contrôlent en moyenne environ 34% du budget sur roche totale en Ru ;  $\text{Os} \approx 9\%$  ;  $\text{Ir} \approx 6\%$  ;  $\text{Rh} \approx 7\%$ . Pour un minimum de Ru  $\approx$



12% ; Os  $\approx$  3% ; Ir  $\approx$  2% ; Rh  $\approx$  2%, et pour un maximum de Ru  $\approx$  69% ; Os  $\approx$  19% ; Ir  $\approx$  14% ; Rh  $\approx$  19%. Pour les échantillons minéralisés à sulfures disséminés, Os ne figure pas sur la figure, car très peu d'analyses de données sur roche totale étaient disponibles pour cet élément, et les données d'analyses de chromites étaient souvent très proches voir même sous les limites de détection, ne permettant pas d'effectuer un calcul précis et significatif. Pour les échantillons avec sulfures disséminés, les chromites contrôlent en moyenne environ 7% du budget roche totale en Ru ; Ir  $\approx$  3% ; Rh  $\approx$  1%. Pour un minimum de Ru  $\approx$  0,2% ; Ir  $\approx$  0,2% ; Rh  $\approx$  0,1%, et pour un maximum de Ru  $\approx$  24% ; Os  $\approx$  10% ; Ir  $\approx$  14% ; Rh  $\approx$  3% (Fig.5.1).

Ces résultats montrent qu'en l'absence de sulfures, les chromites ont une influence importante sur le budget en Ru de la roche, et une influence partielle sur le budget en Os, Ir et Rh. Pour les échantillons minéralisés avec sulfures, le contrôle de la chromite sur le budget roche totale est négligeable, et ce sont les sulfures qui constituent la phase qui contrôle le budget en EGPI et Rh de la roche. Toutes ces observations impliquent aussi que pour les échantillons non minéralisés, une autre phase que la chromite entre en jeu pour expliquer les contenus en EGPI et Rh de la roche. Barnes et Naldrett (1987) ont proposé que l'olivine, ainsi que des minéraux du groupe du platine, contrôlent aussi ces éléments. Ensuite Puchtel et al. (2004), et aussi Pagé et al. (2016) ont confirmé que l'olivine seule n'expliquait pas les teneurs en EGPI et Rh et qu'une phase riche en Os-Ir était nécessaire. Cette phase doit se trouver sous forme de micro-grains de minéraux du groupe du platine et reste non visible au microscope.



**Figure 5.1 :** Bilans de masse présentant les proportions en % des budgets en EGPI et en Rh de la roche expliquées par la chromite pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. Les traits orange correspondent aux valeurs maximales et minimales, et le trait bleu correspond à la moyenne. A) Les résultats pour les échantillons non minéralisés. B) Les résultats pour les échantillons minéralisés avec sulfures disséminés.

### 5.1.2 Comportement des EGP dans un magma komatiitique en l'absence de sulfures : comparaison avec d'autres études

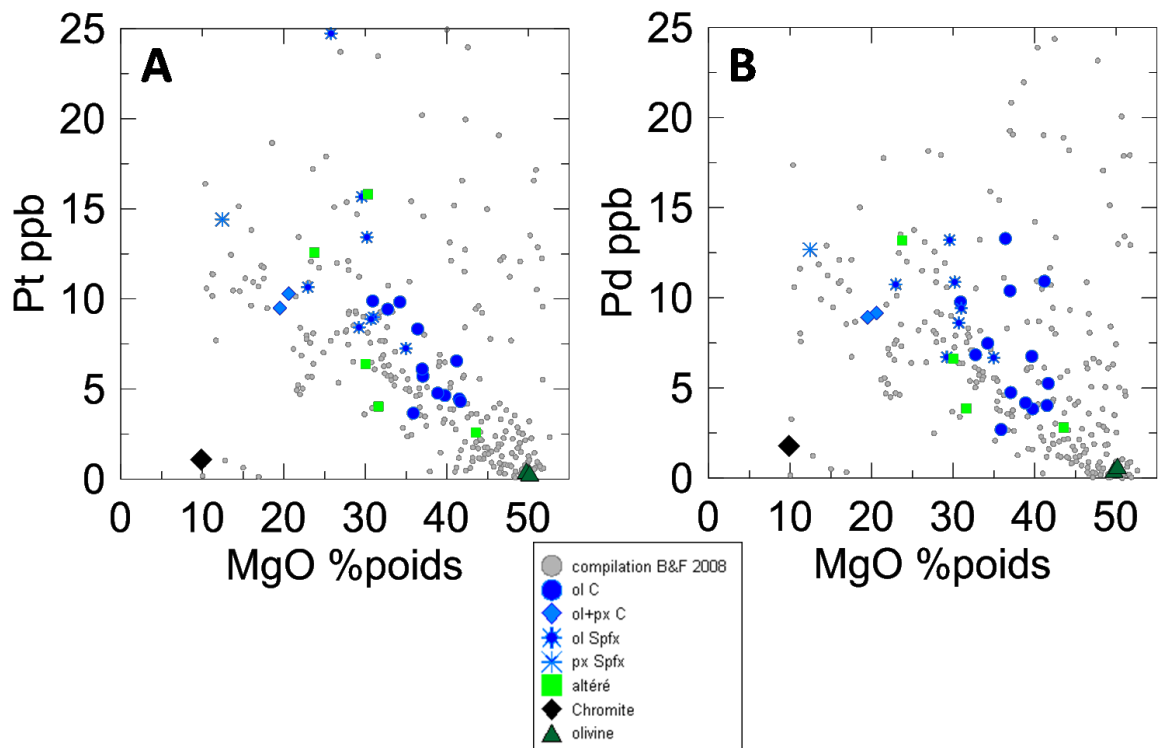
Afin d'investiguer et de comprendre le comportement des EGP dans les komatiites, les données sur roche totale de notre étude ont été comparées et discutées avec les données d'un grand nombre d'échantillons en provenance de komatiites du monde entier (travaux de Barnes et Fiorentini, 2008). Les échantillons présentés ne contiennent pas de sulfures. En effet, dans le cas de saturation du magma en sulfures, la quasi totalité des EGP est

accaparée par les sulfures compte tenu de leurs coefficients de partage très élevés pour un liquide sulfuré, comparé à un liquide silicaté. En revanche, en l'absence de sulfures, c'est-à-dire en présence d'un liquide silicaté, les EGP réagissent différemment les uns par rapport aux autres. De nombreuses études ont montré que les EGP se fractionnent entre les EGPP (Pt, Pd et Rh) et les EGPI (Os, Ir et Ru) pendant les processus magmatiques. En l'absence de sulfures, les EGPP montrent un comportement incompatible et restent dans le magma, tandis que les EGPI montrent un comportement plutôt compatible et se concentrent dans une ou des phases solides telles que les chromites et possiblement des micro-grains de MGP (Keays et al., 1981 ; Barnes et al., 1985 ; Barnes et Naldrett, 1987). Les comparaisons avec l'étude de Barnes et Fiorentini (2008) se focalise sur le comportement des EGPI et du Rh.

#### *Comportement du Pt et du Pd*

La figures 5.2 présentent les données sur roche totale de notre étude comparées avec les données compilées de Barnes et Fiorentini (2008). Cette figure présente des diagrammes binaires montrant le Pt et le Pd versus le MgO. Ces diagrammes montrent que nos données suivent les mêmes variations de concentrations que celles de Barnes et Fiorentini (2008). Les variations des concentrations en Pt et Pd en fonction de la concentration en MgO montrent une corrélation négative avec MgO. Cette corrélation indique clairement un comportement incompatible durant la différenciation magmatique. Dans ce cas-ci, la tendance est contrôlée par la cristallisation de l'olivine, le Pt et le Pd étant incompatibles dans celle-ci, leurs concentrations augmentent dans le liquide résiduel à mesure que l'olivine cristallise et le contenu en MgO diminue. Sur les deux diagrammes

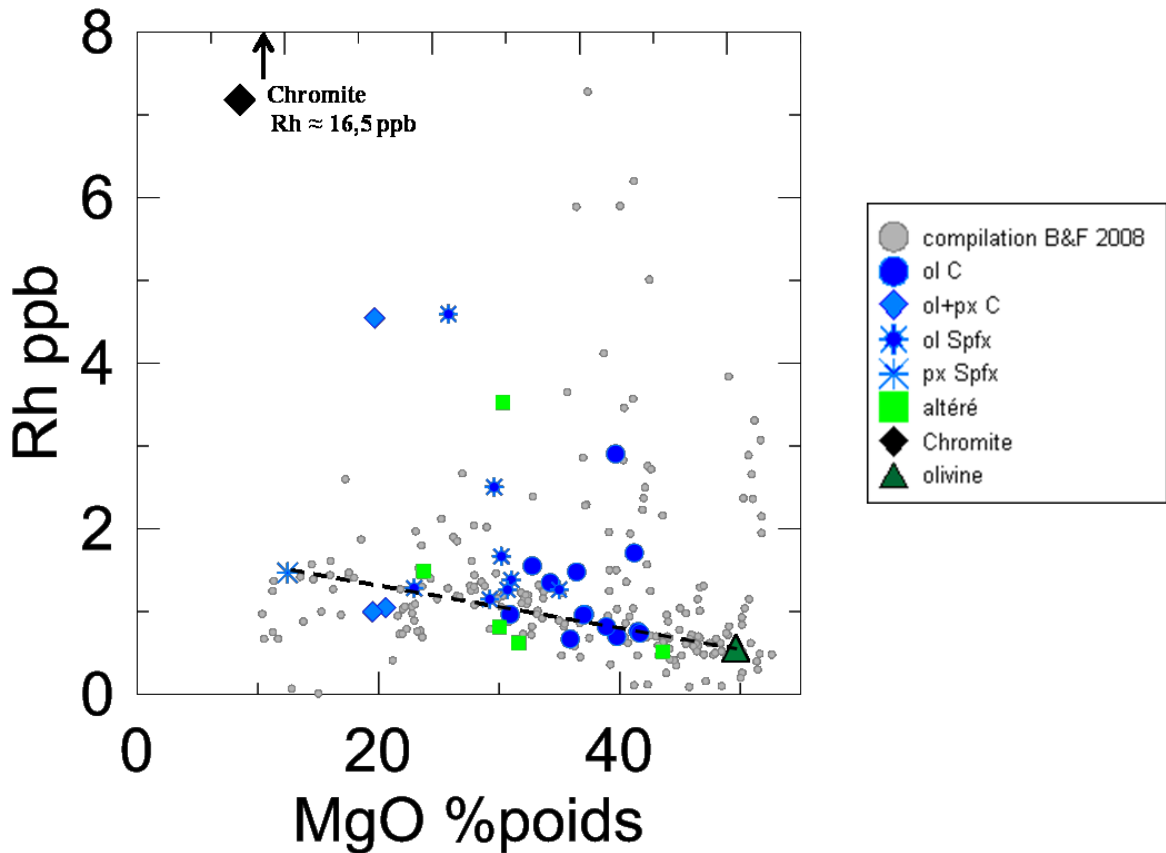
sont aussi présentées les concentrations moyennes en Pt et en Pd pour des chromites et des olivines de la zone Alexo provenant de concentrés de minéraux analysés par Puchtel et al. (2004). Ces données sont présentées afin d'observer une influence de ces minéraux sur la distribution des EGP dans la roche. L'olivine pure apparaît à la base des corrélations entre Pt, Pd et MgO, ce qui confirme que c'est le processus de cristallisation fractionné qui est le facteur principal expliquant le comportement du Pt et du Pd dans les komatiites sans sulfures. Les chromites quant à elles ne montrent pas d'influence sur le comportement du Pt et du Pd.



**Figure 5.2 :** Diagrammes binaires présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008). Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004) ; A) Le Pt versus MgO ; B) Le Pd versus MgO. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex.

### *Comportement du Rh*

Le Rh présente également une corrélation négative avec MgO, mais moins claire que pour Pt et Pd, avec des données plus éparpillées (Fig. 5.3). D'après Barnes et Fiorentini (2008), certaines données plus riches en Rh qui sortent de la tendance, semblent indiquer qu'une autre phase que l'olivine influence également le comportement du Rh. Les données de chromites et d'olivines ne sont pas présentées, car le Rh n'a pas été analysé dans l'étude de Puchtel et al. (2004). Toutefois, il est possible de proposer une valeur moyenne de 16,5 ppb en Rh pour les chromites analysées de notre étude. Pour l'olivine il est possible de proposer une valeur approximative en Rh par interprétation graphique. En effet, compte tenu de la corrélation entre le Rh et le MgO, si l'on prend l'échantillon considéré comme le plus évolué issu des spinifex à pyroxène et que l'on fait une extrapolation graphique à travers la tendance et jusqu'à la concentration en MgO des olivines (50 % poids selon Puchtel et al., 2004), on obtient une valeur possible en Rh d'environ 0,4 ppb pour les olivines (Fig. 5.3). Les chromites ne montrent pas d'effets significatifs sur la distribution en Rh ce qui est cohérent avec les faibles valeurs obtenues sur la part du budget en Rh contrôlée par la chromite (en moyenne environ 7%, voir partie 5.1.1).



**Figure 5.3 :** Diagramme binaire présentant les données d’analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008), pour le Rh versus le MgO. Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). La droite en tirets noirs correspond à une extrapolation graphique pour déterminer la concentration en Rh dans l’olivine. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex.

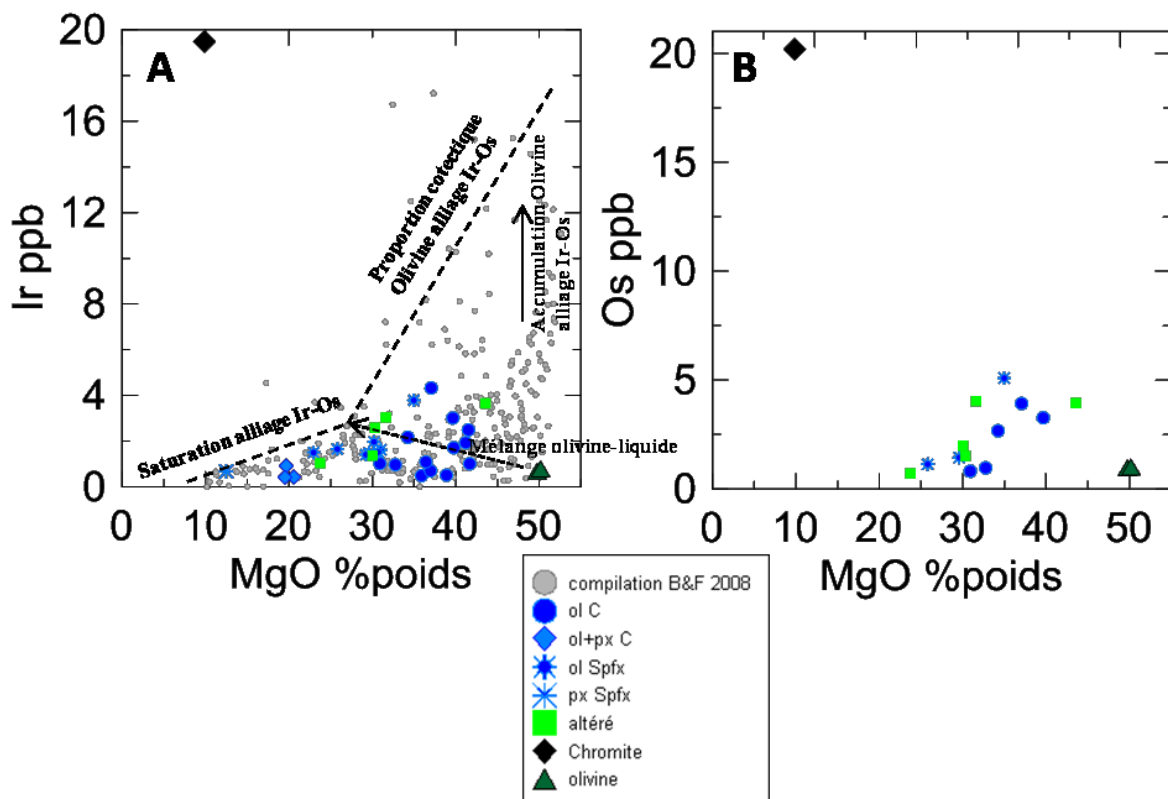
#### *Comportement de l’Ir et Os*

La figure 5.4 présente les données sur roche totale de notre étude comparées à celles de Barnes et Fiorentini (2008) pour Ir et Os versus MgO. Pour Ir, nos données présentent les mêmes variations de concentrations que les données de Barnes et Fiorentini (2008). Il n’y a pas de tendances claires mais plutôt une distribution de forme triangulaire, avec les concentrations en Ir qui montrent une augmentation en même temps que MgO, avec une variation en Ir plus importante à mesure que MgO augmente. D’après Barnes et

Fiorentini (2008), la distribution en Ir semble très similaire à la distribution en Cr versus MgO habituellement observée dans les komatiites. Il est donc possible de faire une analogie avec la distribution en Ir et l'existence d'une phase ou d'un alliage qui cristalliserait avec Ir et probablement Os sous forme d'éléments majeurs. Sur la figure 5.4 A, deux tendances linéaires ressortent : une corrélation négative pour  $\text{MgO} > 27 \text{ \% poids}$ , qui correspond à une ligne de mélange entre l'olivine et un liquide sous-saturé en alliage Ir-Os, et une corrélation positive pour  $\text{MgO} < 27 \text{ \% poids}$ , qui correspond à la droite de saturation du magma en alliage Ir-Os pour une température donnée (Barnes et Fiorentini, 2008). Lorsque  $\text{MgO} > 27 \text{ \% poids}$ , cette droite correspond aussi à la portion durant laquelle l'olivine et la chromite cristallisent de façon cotectique. La partie présentant des échantillons riches en Cr, au-dessus de la droite de mélange olivine-liquide, mais avec comme limite supérieure la droite de cristallisation cotectique de l'olivine et de l'alliage Ir-Os, correspond à une zone d'accumulation d'olivine et d'alliage Ir-Os.

Les données en Os ne sont pas disponibles pour l'étude de Barnes et Fiorentini (2008) car cet élément n'a pas été analysé dans leur étude. En revanche ils proposent que l'Os suit le même comportement que Ir, compte tenu de plusieurs autres études qui montrent des corrélations linéaires très proches entre l'Os et l'Ir (Puchtel et al., 2004 et 2007). Nos données semblent attester de cette similarité, en effet, malgré le faible nombre de données, l'Os montre une distribution proche de celle de l'Ir de type triangulaire (Fig. 5.4). L'analogie appliquée à l'Ir peut donc s'appliquer pour Os et une autre phase que l'olivine, riche en Ir-Os contrôle donc leur distribution. Cette autre phase doit cristalliser dans la matrice des komatiites sous forme de micro minéraux, qui restent très difficiles à identifier compte tenu de leur taille.

Il est à noter que sur les diagrammes, la chromite ne semble pas avoir d'influence sur la distribution en Ir et Os. Ceci est cohérent avec les faibles valeurs obtenues sur la part des budgets en Ir et Os contrôlée par la chromite (respectivement 6 et 9 % en moyenne, voir partie 5.1.1).



**Figure 5.4 :** Diagrammes binaires présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini, 2008 ; A) Ir versus MgO ; B) Os versus MgO. La figure présente les droites empiriques de la composition du liquide et les droites de mélange entre liquide et olivine pour  $Dir_{olivine/liquide} = 0,5$  (Modifiées et tirées de Barnes et Fiorentini, 2008). Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex.



### *Comportement du Ru*

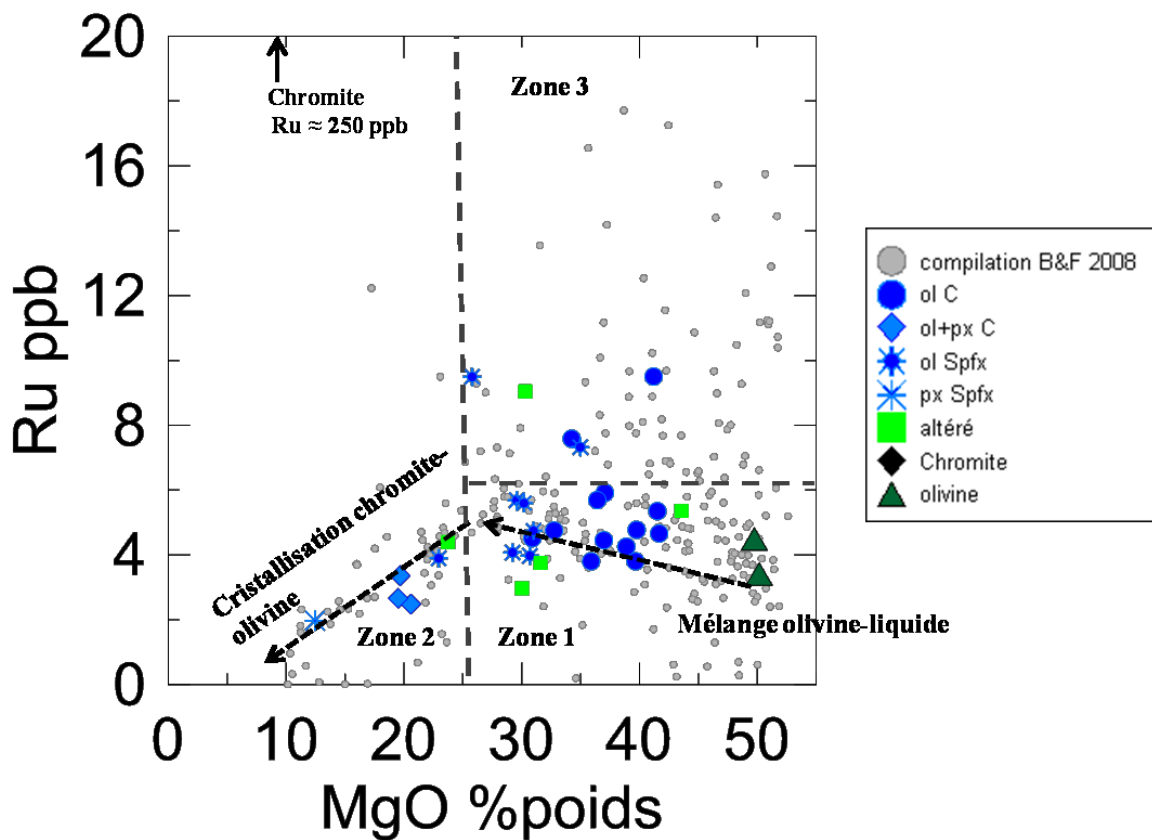
La figure 5.5 présente les données sur roche totale de notre étude comparées à celles de Barnes et Fiorentini (2008) pour le Ru versus MgO. Le Ru montre une distribution plus complexe que les autres EGP, et nos données présentent les mêmes variations de concentrations que les données de Barnes et Fiorentini (2008). D'après nos données et celles de Barnes et Fiorentini (2008), trois zones se distinguent sur la figure :

- 1) Une zone présentant une faible corrélation négative entre Ru et MgO au-dessus de 25-27 % poids MgO. Cette tendance semble correspondre à une droite de mélange olivine-liquide avec un coefficient de partage du Ru dans l'olivine légèrement inférieur à un. Il y a donc une augmentation de la concentration en Ru dans le liquide à mesure que l'olivine cristallise.
- 2) Une corrélation positive en-dessous de 25-27 % poids MgO. Cette valeur en MgO correspond au niveau auquel le liquide atteint la saturation en chromite pour les komatiites, il y a alors co-cristallisation d'olivine et de chromite.
- 3) Une zone riche en Ru avec une distribution dispersée, au-dessus de 25 % poids MgO et 6 ppb Ru. Cette partie correspond à la zone à cumulat d'olivine et de chromite.

D'après Barnes et Fiorentini (2008), la chromite ne montre qu'un rôle mineur dans le contrôle du Ru, et une autre phase, différente de celle riche en Os-Ir, est impliquée dans le contrôle de la distribution en Ru. Cependant d'après nos données, les bilans de masse démontrent un contrôle plus important de la chromite sur le Ru, en moyenne environ 35 % et jusqu'à 70 % du budget sur roche totale pour la zone Alexo. Ceci peut expliquer la

corrélation observée pour la zone 2, la cristallisation de chromite va abaisser le contenu en Ru du liquide.

Ainsi, la distribution du Ru est donc contrôlée par plusieurs phases, dont la chromite et une autre phase riche en Ru.



**Figure 5.5 :** Diagramme binaire présentant les données d'analyses sur roche totale de notre étude (échantillons non minéralisés de la zone Alexo et de la zone Hart), comparées aux données compilées de Barnes et Fiorentini (2008), pour le Ru versus le MgO. Les compositions du pôle chromite et olivine sont issues des travaux de Puchtel et al. (2004). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, Spfx = spinifex.

### 5.1.3 La zone Alexo, un cas particulier de magma déjà fractionné en EGP

Contrairement à notre hypothèse de départ, une grande partie des chromites de la zone Alexo présente des concentrations élevées en Ru et dans une moindre mesure en Os,

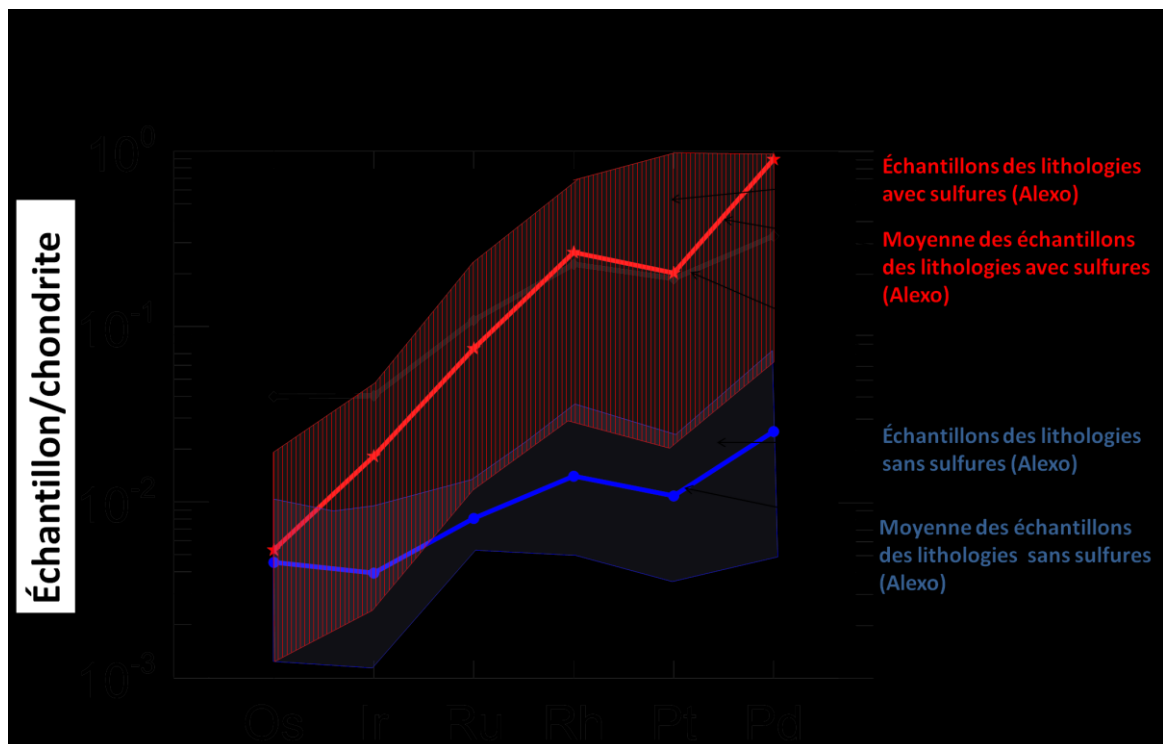
Ir et Rh, alors qu'elles sont associées à des faciès lithologiques minéralisés en sulfures. Pour apporter des éléments de réponse à cette anomalie, il faut regarder en détail le cas de la zone Alexo. En effet, il a été mis en évidence que le gisement de la mine Alexo s'est formé à partir d'un magma déjà fractionné en EGP, c'est à dire qu'il existe un découplage entre les EGPI (Os, Ir et Ru) et les EGPP (Rh, Pt et Pd) (Barnes et Naldrett, 1987 ; voir Fig. 5.6).

Ce fractionnement précoce est illustré sur la figure 5.6 qui présente les résultats des analyses sur roche totale en EGP des échantillons de la zone Alexo. Ces résultats sont montrés sous la forme d'un diagramme multi-élémentaire avec les concentrations en EGP normalisées aux chondrites (McDonough et Sun, 1995). Ce diagramme permet de comparer les fractionnements en EGP des échantillons de la zone Alexo sans sulfures avec ceux des échantillons associés avec des sulfures et aussi avec des échantillons de komatiites de Dundonald. Les komatiites de Dundonald sont considérées comme un type commun et classique de komatiites associées à un gisement de Ni-Cu et EGP (Barnes et Naldrett, 1987 ; Arndt, 2008). Les échantillons sans sulfures de la zone Alexo montrent peu de fractionnement entre les EGPI et les EGPP avec une différence d'un ordre de grandeur, pour un rapport  $(Pd/Ir)_N$  compris entre 5 et 10 pour la majorité des échantillons. Comme ils proviennent de komatiites minéralisées, les échantillons de Dundonald montrent des valeurs en EGP normalisées plus élevées que les échantillons sans sulfures de la zone Alexo. Les échantillons de Dundonald montrent également peu de fractionnement entre les EGPI et les EGPP avec un rapport  $(Pd/Ir)_N$  compris entre 3 et 10, ce qui d'après Barnes et Naldrett (1987), constitue des valeurs communes observées dans les komatiites dans le monde. Les échantillons associés à des sulfures de la zone Alexo présentent un

fractionnement plus important entre les EGPI et les EGPP, avec une différence de deux ordres de grandeur et un rapport  $(\text{Pd/Ir})_N$  compris entre 30 et 170. Le rapport  $(\text{Pd/Ir})_N$  reste généralement constant au cours des processus magmatiques et un tel enrichissement des EGPP par rapport aux EGPI implique que le magma était déjà fractionné avant la saturation et la cristallisation des sulfures. Barnes et Naldrett (1987), expliquent ce fractionnement par l'effet d'une cristallisation précoce d'alliages de Os-Ir et de Laurite ( $\text{RuS}_2$ ) qui auraient collecté les EGPI. Ces phases auraient servi de point de départ à la nucléation d'olivine et devraient donc être sous forme de micro inclusions dans l'olivine. Ensuite les sulfures auraient cristallisé à partir d'un magma déjà appauvri en EGPI. Cependant, des travaux de Puchtel et al. (2004) sur la zone Alexo ont montrés que l'olivine seule n'explique pas les concentrations en EGPI. D'après Barnes et Fiorentini (2008), des alliages Os-Ir seraient plutôt présents dans la matrice sous la forme de micro-grains. De plus, d'après notre étude les chromites contrôlent une part importante des budgets en Ru (35% en moyenne) et une part minime des budgets en Os et Ir. Il est donc possible de proposer que ce fractionnement est dû à une cristallisation précoce d'alliages Os-Ir ou bien de micro-minéraux du groupe du platine, il pourrait aussi être dû en partie à la cristallisation de chromites avant la ségrégations des sulfures.

Ainsi, le fait qu'une part importante des chromites des échantillons avec sulfures présente des concentrations élevées en Ru montre que ces chromites ont cristallisé certainement avant la saturation en sulfure du magma, abaissant par la même occasion son contenu en EGPI, surtout le Ru, et contribuant à fractionner les EGP. Ensuite, puisque les komatiites sont des systèmes très dynamiques, les populations de chromites ont pu être mélangées entre elles ou bien transportées avant la cristallisation des sulfures disséminés. Le fait qu'à Alexo, Houlié et al. (2012) ont mis en évidence une érosion thermomécanique

témoigne que les komatiites peuvent être des coulées très fluides et dynamiques et va dans le sens de cette hypothèse. Puis, les chromites ont continué à cristalliser pendant la saturation en sulfure du magma donnant des chromites pauvres en Ru. Il est aussi à noter que la zone Alexo a connu plusieurs émissions de magma (Puchtel et al., 2004), donc plusieurs populations de chromites peuvent être présentes et avoir été mélangées entre elles, ce qui peut complexifier la lecture des données.



**Figure 5.6 :** Diagramme multi-élémentaire, présentant les concentrations sur roche totale en EGP normalisées aux chondrites (données chondrites issues de McDonough et Sun, 1995) pour les échantillons de la zone Alexo et de Dundonald.

#### 5.1.4 Discussion sur la solubilité des EGPI et du Rh dans la chromite

Les EGPI et Rh sont des éléments à priori compatibles dans la chromite (Brenan et al., 2012). Pour la plupart des roches dans lesquelles les chromites présentent des concentrations en EGPI et Rh détectables, ces éléments sont présents sous forme

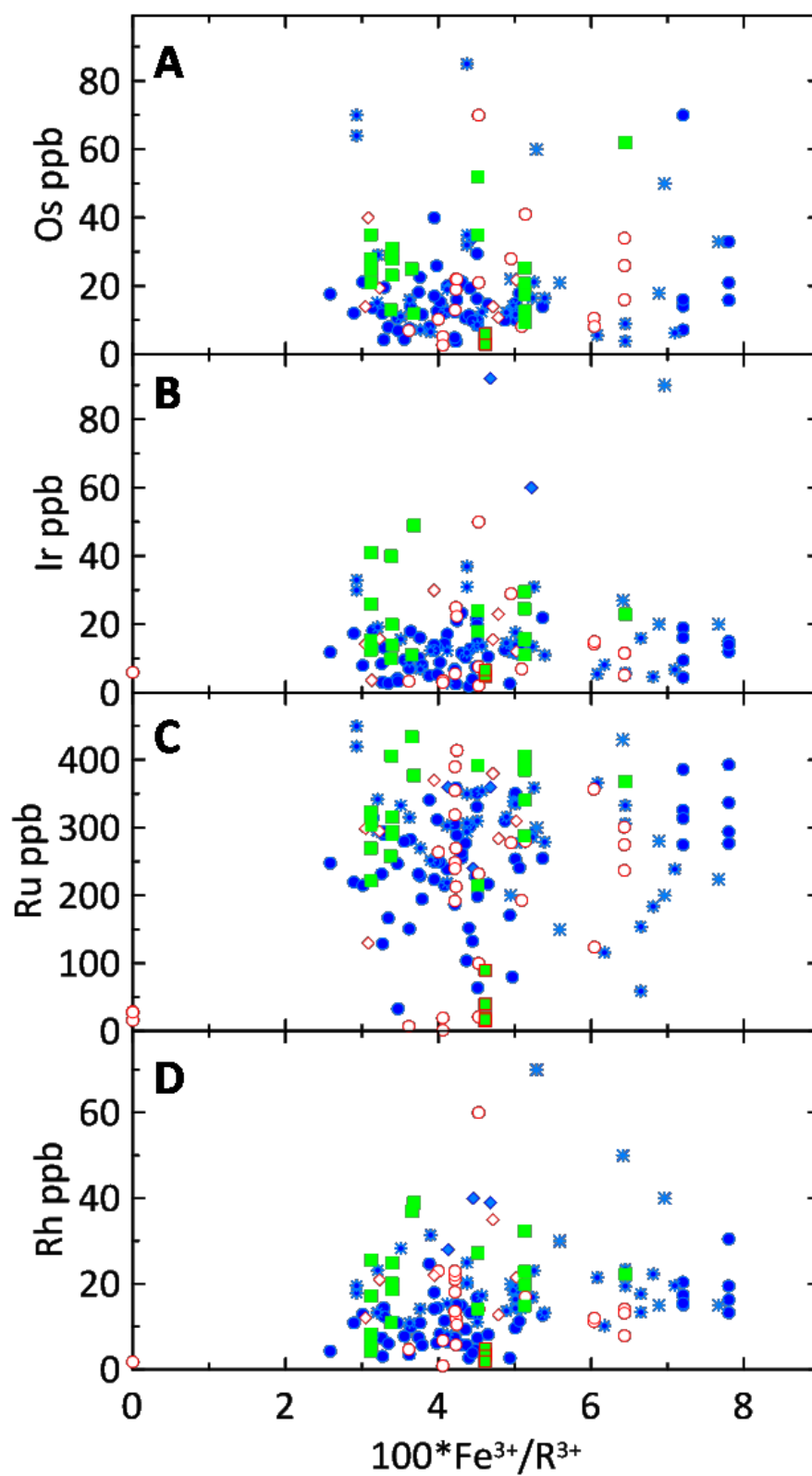
d'inclusions de minéraux du groupe du platine (MGP) à l'intérieur des grains de chromites. Cela a été rapporté dans de nombreuses études d'analyses par LA-ICP-MS pour des chromites d'intrusions litées, de basaltes tholéitiques, de basaltes ferropicritiques, ou encore des basaltes komatiitiques (Pagé et al., 2009, 2012, 2016 ; Locmelis et al., 2011, 2013). En dehors des inclusions de MGP les concentrations des EGPI et Rh dans le réseau cristallin de ces chromites sont très faibles voir non détectables (Ballhaus et Sylvester, 2000 ; Fiorentini et al., 2004). Cependant notre étude, ainsi que celles de Pagé et al. (2012) et Locmelis et al. (2011) ont montré que les chromites des komatiites ne présentent que rarement des inclusions de MGP, et que les EGPI et Rh sont présents dans le réseau cristallin de la chromite. Les raisons de cette affinité des EGPI et du Rh pour la chromite restent peu connues. Dans cette partie, il est discuté des effets des principaux facteurs qui peuvent influencer la solubilité des EGPI et du Rh dans la chromite. C'est-à-dire, la fugacité d'oxygène ( $fO_2$ ), la composition du magma et la température. Nous avons aussi comparé les données de chromites de notre étude avec les données de chromites d'une autre étude, provenant d'un système à  $fO_2$  élevée dans des laves oxydées (Park et al., 2012).

#### **5.1.4.1 Causes de la solubilité des EGPI et du Rh dans les chromites de komatiites**

##### *La fugacité d'oxygène*

Les komatiites se mettent généralement en place à des  $fO_2$  de l'ordre du tampon Quartz Fayalite Magnétite (QFM). Ceci constitue des conditions plutôt réductrices. La  $fO_2$  est un facteur dominant pour la solubilité des EGPI et du Rh dans le magma et les

chromites. En effet, l'augmentation de la  $fO_2$  va influencer l'état d'oxydation du Ru. L'augmentation de la  $fO_2$  va aussi augmenter la présence d'ions  $Fe^{3+}$  dans le réseau cristallin de la chromite et permettre ainsi une substitution plus facile par le Ru qui est à l'état de d'oxydation 3+. Ainsi il existe une corrélation importante des EGPI et du Rh avec le  $Fe^{3+}$  dans les chromites des systèmes oxydés (Brenan et al., 2012 ; Park et al., 2012). Afin de vérifier s'il existe une influence de  $fO_2$  sur les concentrations en EGPI et Rh des chromites de notre étude, nous avons réalisé des diagrammes binaires qui présentent les concentrations en EGPI et Rh des chromites de notre étude versus  $Fe^{3+}/R^{3+}$  ( $R^{3+} = Fe^{3+} + Cr + Al$ ). Ces diagrammes sont présentés sur la figure 5.7. Aucune corrélation avec le rapport  $Fe^{3+}/R^{3+}$  n'est observée pour aucun des quatre éléments (Os, Ir, Ru et Rh) et ce quel que soit le faciès lithologique considéré. Cela implique que les conditions de  $fO_2$ , ne constituent pas le facteur dominant contrôlant la solubilité des EGPI et du Rh dans la chromite.



**Figure 5.7 :** Diagrammes binaires présentant les EGPI et le Rh versus  $100 \cdot \text{Fe}^{3+} / \text{R}^{3+}$ , avec en A) Os, B) Ir, C) Ru, D) Rh.



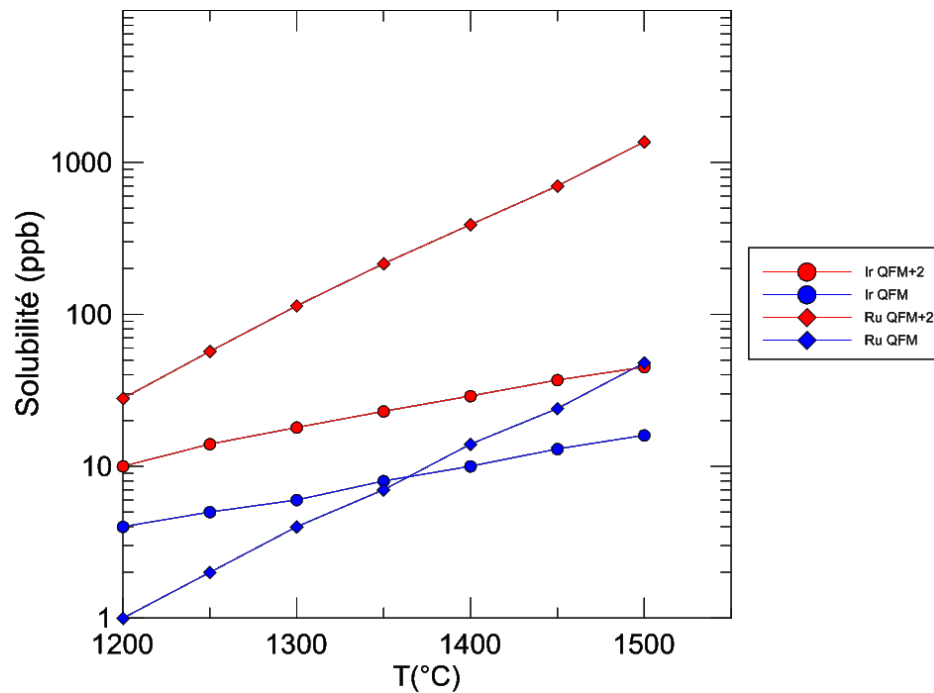
### *La composition du magma*

Les magmas komatiitiques non saturés en sulfures présentent généralement un contenu en Ru mais aussi en Os, Ir et Rh, plus élevé que pour d'autres roches. Cependant cela n'explique pas entièrement les concentrations de ces éléments dans les chromites de komatiites, notamment les teneurs plus élevées en Ru. De même, d'après Brenan et al. (2012) et Park et al. (2012), une augmentation de  $\text{Fe}^{3+}$  dans le liquide semble favoriser la substitution du Ru qui va entrer sous forme de  $\text{Ru}^{3+}$  dans le site octaédrique de la chromite. Cependant comme expliqué précédemment, pour nos échantillons de chromites, aucune corrélation n'est observée avec  $\text{Fe}^{3+}/\text{R}^{3+}$ . D'autres facteurs doivent donc contrôler la solubilité des EGPI et du Rh dans les chromites de komatiites.

### *La température*

La température joue probablement un rôle sur la solubilité des EGPI et du Rh dans le magma et les chromites, et plus particulièrement sur le Ru qui apparaît à des concentrations plus élevées dans les chromites de komatiites que dans les chromites de la plupart des autres roches. Cette hypothèse est mise en avant par plusieurs études (Pagé et al., 2012, 2016 ; Arguin et al., 2016). De plus, d'après une étude de Borisov et Palme (2000) la solubilité du Ru et de l'Ir dans un magma silicaté, augmente avec la  $f\text{O}_2$ , mais aussi avec la température. La solubilité du Ru augmente plus rapidement que celle de l'Ir avec l'augmentation de la température (Fig. 5.8). Compte tenu des températures de mise en place très élevées des komatiites ( $\approx 1600$  °C d'après Arndt, 2008), le Ru reste donc plus

soluble que les autres EGP dans le magma komatiitique et de ce fait est plus disponible pour entrer dans le réseau cristallin de la chromite.



**Figure 5.8 :** Diagramme présentant la solubilité de l'Ir et du Ru en fonction de la température dans un magma silicaté à différentes fugacités d'oxygène (données de Borisov et Palme, 2000).

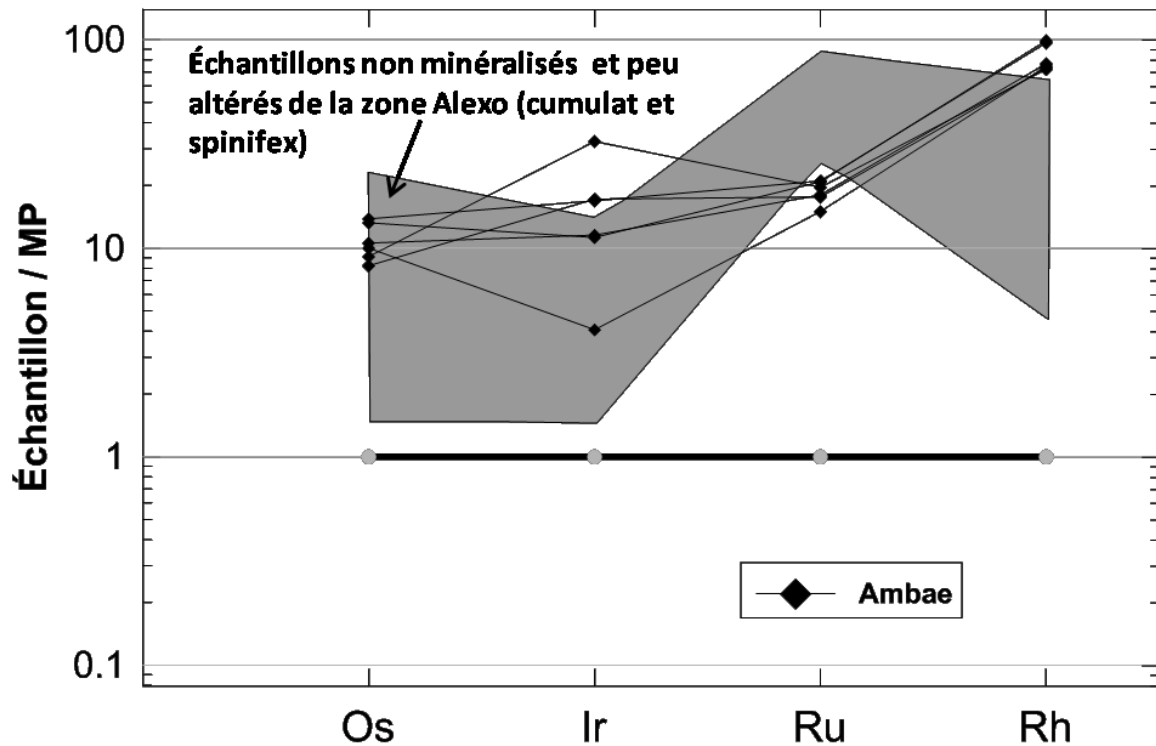
#### 5.1.4.2 Comparaison avec un système à fugacité d'oxygène élevée

D'après une étude de Park et al. (2012), une fugacité d'oxygène élevée serait le facteur principal de l'incorporation des EGPI et du Rh dans la chromite. Nous avons donc aussi comparé nos données avec les données de chromites de laves oxydées provenant du volcan d'Ambae. Les laves d'Ambae sont issues d'un volcan de l'archipel de Vanuatu. La composition de ces laves va d'un basalte riche en aluminium ( $\approx 4,5$  % poids MgO) à un basalte picritique ( $\approx 23$  % poids MgO). La  $fO_2$  calculée est au tampon QFM + 2,5 (Eggins, 1993). Park et al. (2012) ont effectué des analyses in situ par LA-ICP-MS de chromites

provenant de ces laves oxydées. Ils ont réalisé que les chromites d'Ambae contiennent des EGPI et du Rh à des niveaux mesurables, et sous forme de solution solide. C'est-à-dire, que comme pour les chromites de komatiites, les EGPI et le Rh de ces laves oxydées entrent dans le réseau cristallin de la chromite.

La figure 5.9 présente les concentrations en EGPI et Rh dans les chromites des échantillons non minéralisés de la zone Alexo, comparées aux compositions des chromites des laves d'Ambae. Les données sont présentées sous forme de diagramme multi-élémentaire, et sont normalisées au manteau primitif à des fins de comparaison. Les chromites de la zone Alexo sont représentées par le champs gris qui regroupe les chromites de tous les faciès lithologiques non minéralisés. Sur le diagramme, les chromites de la zone Alexo présentent des valeurs normalisées en  $Ru_N$  plus élevées que les chromites des laves d'Ambae. Les chromites des laves d'Ambae montrent une variation en  $Ir_N$  plus importante que les autres EGPI et Rh et un  $Rh_N$  plus élevé que les chromites de la zone Alexo. Les concentrations en Rh dans les chromites des laves d'Ambae sont très proches des concentrations en Ru ( $Rh_{moy} \approx 74$  ppb et  $Ru_{moy} \approx 93$  ppb pour Ambae), alors que pour les chromites de la zone Alexo, les concentrations en Rh sont toujours de l'ordre de celles de l'Os et de l'Ir et inférieures d'un ordre de grandeur à celles du Ru. Park et al. (2012) démontre que la  $fO_2$  élevée des laves d'Ambae est le facteur principal des concentrations riches en EGPI et Rh dans les chromites. En effet, la  $fO_2$  influence la solubilité de ces éléments dans la chromite. C'est-à-dire que si la  $fO_2$  augmente, les coefficients de partage des EGPI et du Rh dans la chromite vont aussi augmenter de façon importante (Brenan et al., 2012). Cependant pour nos résultats, les komatiites sont normalement des systèmes proches de la surface, très proches des pressions atmosphériques, et les  $fO_2$  ne sont pas élevées, généralement de l'ordre du tampon QFM (Arndt, 2008). La température apparaît

donc comme un facteur dominant pour la solubilité des EGPI et du Rh, et plus particulièrement du Ru dans les chromites des komatiites.



**Figure 5.9 :** Diagramme multi-élémentaire présentant les compositions de chromites normalisées au manteau primitif (valeurs de McDonough et Sun, 1995). Le champ gris regroupe les données de chromites des échantillons non minéralisés en sulfures et peu altérés de la zone Alexo (cumulat et spinifex). Ces données sont comparées aux données de chromites des laves d'Ambae (Park et al., 2012).

## 5.2 Aspect exploration : la chromite un indicateur potentiel de la présence de sulfures

### 5.2.1 Diagrammes binaires pour l'exploration

D'après les variations de la composition en éléments traces des chromites observées sur les diagrammes multi-élémentaires (voir résultat chapitre 4 et Fig. 4.7), des rapports d'éléments ont été identifiés pour réaliser des diagrammes binaires. Le but est de mettre en évidence certaines caractéristiques des échantillons étudiés, à savoir, la présence de

minéralisation en sulfures, l'effet de l'évolution magmatique par cristallisation fractionnée et l'importance du métamorphisme (Fig. 5.10).

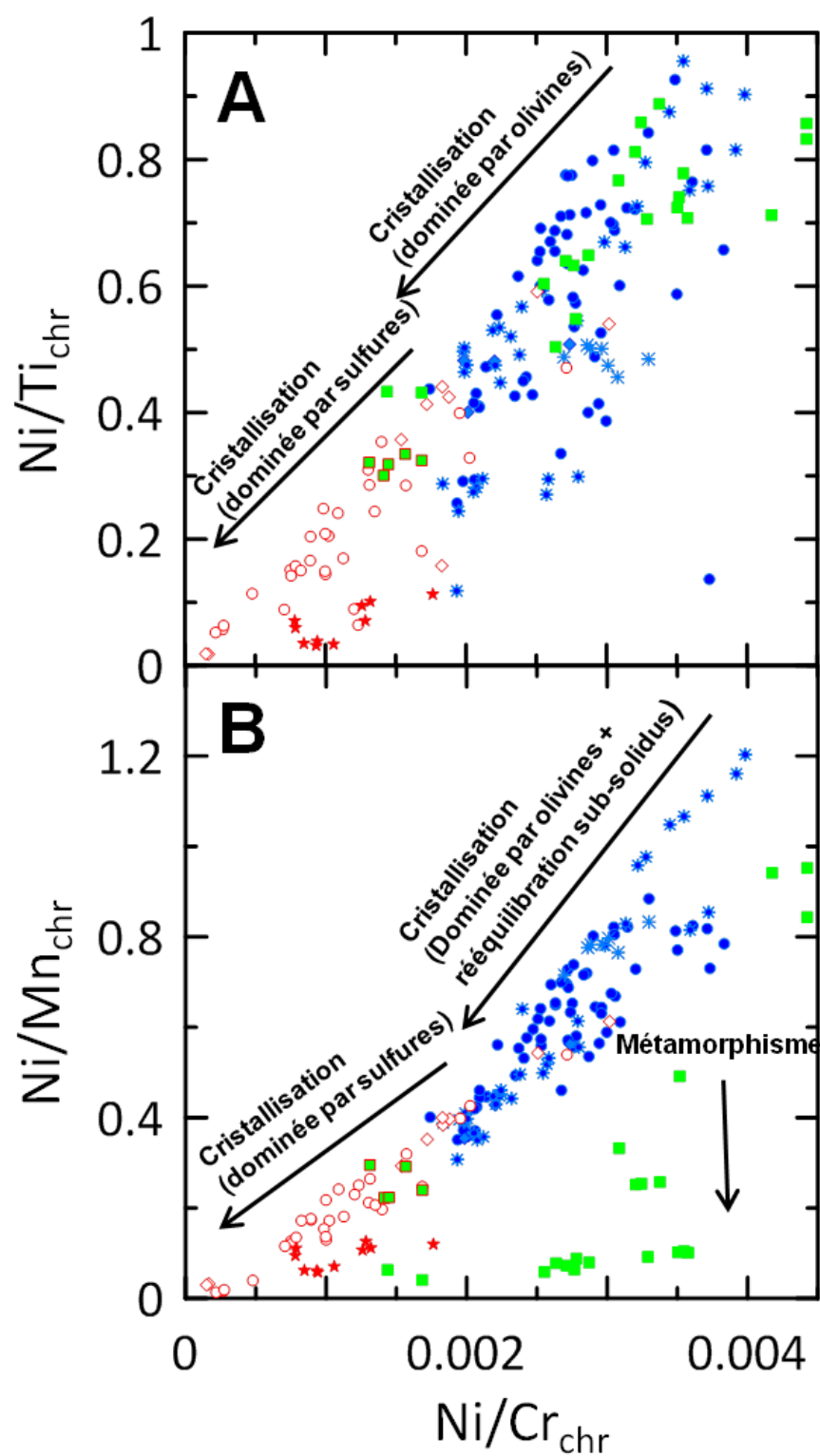
La figure 5.10 présente deux diagrammes binaires qui montrent plusieurs rapports d'éléments. Le premier diagramme présente Ni/Ti versus Ni/Cr et il montre clairement une tendance positive où le rapport Ni/Ti dans les chromites diminue en même temps que le rapport Ni/Cr (Fig. 5.10A). Ces trois éléments Ni, Ti et Cr ont été retenus pour plusieurs raisons. D'après nos résultats les concentrations des chromites en Ti et Cr ne montrent pas de signe de modification dû au métamorphisme. De plus ces éléments ne semblent pas être affectés par les processus de rééquilibration sub-solidus avec l'olivine, leur concentration dans la chromite va donc refléter l'évolution du liquide magmatique à partir duquel elles cristallisent. Il est aussi à noter que les concentrations en Ti des chromites associées aux sulfures massifs, sont toujours plus élevées que pour les chromites provenant des autres faciès lithologiques. Le Ni a été sélectionné parce que lui non plus n'est pas affecté par le métamorphisme ou par les processus de rééquilibration sub-solidus avec l'olivine, et également parce que les chromites des échantillons avec des sulfures montrent presque systématiquement des concentrations plus faibles en Ni que les chromites des échantillons sans sulfures. En l'absence de sulfures c'est la cristallisation de l'olivine qui contrôle le comportement du Ni dans le liquide. La chromite va donc enregistrer l'évolution de ce liquide et les concentrations en Ni dans le liquide et dans la chromite vont diminuer au fur et à mesure que les olivines cristallisent. En présence de sulfures, le Ni va être largement contrôlé par la cristallisation des sulfures compte tenu des coefficients de partage plus élevés pour les sulfures que pour l'olivine. De ce fait la cristallisation de sulfures va provoquer une diminution plus rapide des concentrations en Ni du liquide et donc des

chromites. Ainsi, les rapports Ni/Ti et Ni/Cr dans les chromites enregistrent l'évolution du liquide par cristallisation fractionnée et permettent également une discrimination assez claire entre les chromites des échantillons avec sulfures, situées en-dessous de  $\text{Ni/Ti} \approx 0,4$  et  $\text{Ni/Cr} \approx 0,02$  et les chromites des échantillons sans sulfures située au-dessus (Fig. 5.10A). Cependant, ces rapports ne permettent pas de visualiser l'effet du métamorphisme. Le deuxième diagramme présente les rapports Ni/Mn versus Ni/Cr, Mn est utilisé car il est sensible aux effets du métamorphisme. Le Mn est aussi sensible aux processus de rééquilibration sub-solidus avec l'olivine, ce qui explique que la tendance observée entre Ni/Mn et Ni/Cr des chromites des échantillons sans sulfures soit différente de la tendance observée entre Ni/Mn et Ni/Cr des chromites des échantillons avec sulfures. Cette différence est marquée par une rupture de pente à  $\text{Ni/Mn} < 0,4$  (Fig. 5.10B). Le rapport Ni/Mn va aussi permettre d'enregistrer l'altération par une forte diminution des concentrations en Mn des chromites des échantillons altérés.

Ainsi, ces rapports d'éléments permettent d'identifier plusieurs processus différents :

- L'évolution du liquide par cristallisation fractionnée
- La ségrégation de sulfures qui abaissent le contenu en Ni disponible
- L'effet du métamorphisme, qui provoque une augmentation des concentrations en Mn des chromites

Ces rapports permettent également de discriminer les échantillons non minéralisés des échantillons à sulfures disséminés et constituent donc des outils potentiels pour l'exploration de minéralisation en sulfures.



**Figure 5.10 :** Diagrammes binaires présentant des rapports élémentaires pour toutes les chromites de la zone Alexo et de la zone Hart avec en A)  $Ni/Ti$  versus  $Ni/Cr$  et en B)  $Ni/Mn$  versus  $Ni/Cr$ . Chr = chromite.

## 5.2.2 Le Ru dans la chromite comme indicateur de la présence de sulfures

### 5.2.2.1 Comparaison avec les chromites de Locmelis et al. (2013)

Le Ru est un élément qui est compatible dans la chromite. De plus, dans les chromites de roches volcaniques, le Ru semble entrer dans le réseau cristallin de la chromite, sous la forme de solution solide et non pas sous la forme d'inclusions de minéraux du groupe du platine ou bien d'alliages (Locmelis et al., 2011 ; Pagé et Barnes, 2016). Le Ru est aussi un élément très compatible dans les sulfures, avec des coefficients de partage bien plus élevés que pour la chromite ( $D_{\text{Ru/sulf}} \approx 30\,000$  et  $D_{\text{Ru/chr komatiite}} \approx 60\text{--}285$  ; Pagé et Barnes, 2016).

D'après des travaux de recherche réalisés par Locmelis et al. (2013), la concentration en Ru des chromites peut être utilisée comme un indicateur de la présence de sulfures. Ils ont montré que les chromites situées dans des komatiites minéralisées en sulfures présentent majoritairement des concentrations faibles en Ru, sous les limites de détection, alors que les chromites situées dans des komatiites non minéralisées présentent majoritairement des concentrations plus élevées en Ru, au-dessus des limites de détection (Fig. 5.11A). Dans leurs résultats cependant, certaines chromites situées dans des komatiites minéralisées, présentent tout de même des concentrations en Ru élevées, similaires aux concentrations observées dans les chromites des komatiites non minéralisées, c'est le cas pour les systèmes de Mt Clifford, The Horn et Wiluna (Fig. 5.11A). Les explications avancées pour ces anomalies, sont que pour le cas de Mt Clifford, il y a des évidences de plusieurs émissions de magma, il y aurait donc différentes

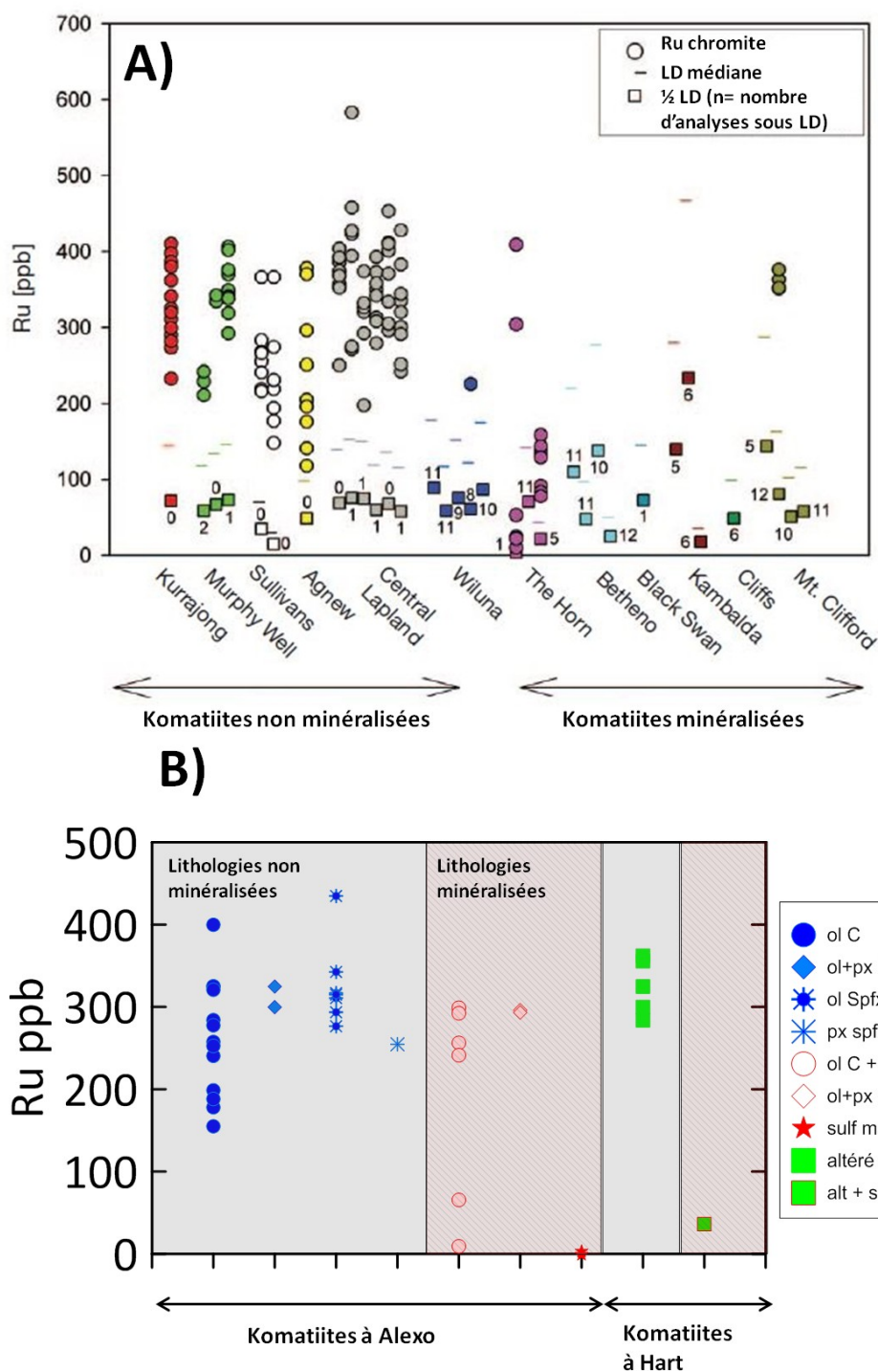


populations de chromites. Une partie des chromites, pauvre en Ru, a cristallisé dans un magma saturé en sulfure, les EGPI et le Rh ont alors été captés par les sulfures au détriment des chromites. Et une autre partie, riche en Ru, a cristallisé dans un magma sous-saturé en sulfure, les chromites ont donc cristallisé avant les sulfures plus tardifs. Pour The Horn et Wiluna, la chronologie de cristallisation aurait été le facteur principal déterminant la présence de Ru. En effet, les chromites riches en Ru auraient cristallisé avant que le magma n'ait atteint la saturation en sulfure, puis la majorité des chromites pauvres en Ru auraient cristallisé en équilibre avec les sulfures.

Pour notre étude, le système de la zone Alexo a été observé en détail, et dans une moindre mesure, celui de la zone Hart. La zone Alexo et la zone Hart correspondent à des systèmes komatiitiques minéralisés, puisqu'une mine est présente sur les deux sites. Pour la zone Alexo, les résultats ont montré que la plupart des chromites présentent des concentrations en Ru élevées, et ce même en présence de sulfures. Seules les chromites associées aux sulfures massifs ont toujours des concentrations en Ru en dessous des limites de détections (Fig. 5.11B). Quelques chromites associées aux sulfures disséminés ont également des concentrations en dessous des limites de détection. Pour la zone Hart, les teneurs en Ru des chromites sont élevées en l'absence de sulfures et elles sont en dessous des limites de détection en présence de sulfures. La concentration en Ru des chromites semble cette fois être un bon indicateur de la présence de sulfures, bien que les komatiites de la zone Hart constituent un système minéralisé (Fig. 5.11B). Ces observations tendent à montrer que la zone Alexo, et dans une certaine mesure, la zone Hart correspondent à des cas particuliers, plus complexes, comme The Horn et Wiluna. Cependant, dans notre étude

une part importante des chromites présente des concentrations en Ru élevées, alors qu'elles sont issues de komatiites minéralisées en sulfures.

Contrairement à l'étude de Locmelis et al. (2013), les résultats obtenus dans notre étude ne montrent pas vraiment que le Ru constitue un indicateur franc pour un système minéralisé ou non. Cependant, il est à noter que pour l'étude de Locmelis et al. (2013), seulement quelques échantillons par système ont été sélectionnés, alors que pour notre étude, un seul système a été étudié en détail. La zone Alexo est potentiellement un cas particulier, où l'histoire de cristallisation du magma constitue un facteur clé pour la compréhension des teneurs en EGPI et Rh des chromites. Toutefois, il est à noter que de façon générale, dans la zone Alexo, les chromites des échantillons sans sulfures atteignent des valeurs de concentrations plus élevées que celles des chromites associées aux échantillons avec sulfures. Cette observation, montre que les concentrations en Ru dans les chromites restent sensibles à la présence directe de sulfures, et ce même dans un système minéralisé où les chromites présentent des taux élevés en Ru.



**Figure 5.11 :** Concentrations en Ru des grains de chromite de komatiites, avec en A), les résultats pour l'étude de Locmelis et al. (2013) présentant à gauche les systèmes non minéralisés et à droite les systèmes minéralisés. Les cercles représentent les analyses ponctuelles, les traits représentent la médiane pour les limites de détection et les nombres associés aux carrés représentent le nombre de points en dessous de la médiane des limites de détection (Modifiée d'après Locmelis et al., 2013) ; En B), les résultats pour la zone Alexo et la zone Hart, chaque point correspond à une moyenne des grains de chromites par échantillon (n variant de 3 à 5 grains). Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spfx = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

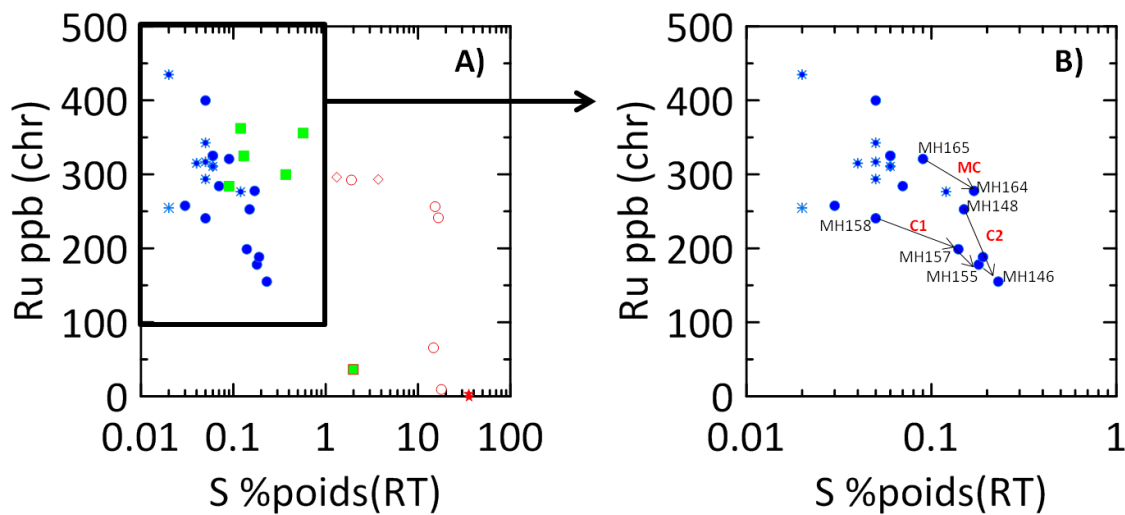
### 5.2.2.2 Le Ru et le Cu sensibles à la distance par rapport à la minéralisation

Lors de l'analyse des comparaisons entre la chimie des chromites et la chimie roche totale, une partie des échantillons de chromites ont montré une corrélation négative pour les concentrations en Ru et en Cu des chromites avec les concentrations en S de la roche hôte. En d'autres termes, les concentrations en Ru et Cu des chromites pour une partie des échantillons diminuent lorsque que la concentration en S de la roche augmente (voir chapitre 4.4). Lorsque l'on observe en détail les échantillons issues de la zone Alexo *Stripped Area*, les concentrations en Ru et aussi en Cu des chromites montrent un lien avec la distance par rapport à la minéralisation.

#### *Cas du Ruthénium*

La corrélation entre les concentrations en Ru des chromites et les concentrations en S de la roche est visible sur la figure 5.12A. Les échantillons des faciès lithologiques non minéralisés montrent que le Ru des chromites diminue lorsque le S de la roche augmente. Les concentrations en Ru des échantillons des faciès lithologiques minéralisés n'ont pas une tendance aussi claire mais semblent globalement diminuer lorsque le S de la roche augmente. Plus précisément, les échantillons des faciès lithologiques à cumulat d'olivine semblent montrer la meilleure corrélation. En investiguant plus loin, les échantillons des cumulats d'olivine de la *Stripped Area* (Alexo member) montrent un lien entre les concentrations en Ru des chromites et la distance par rapport à la minéralisation (Fig. 5.12B). La figure 5.13 est une carte géologique de la *Stripped Area* (Alexo member), elle

présente la position des échantillons. Les coupes MC, C1 et C2 contiennent plusieurs échantillons dans les cumulats d'olivine (identifiés comme péridotite sur la figure 5.13), ces échantillons sont répertoriés sur la figure 5.12B. Pour les 3 coupes, plus l'échantillon est proche de la minéralisation, plus le contenu en Ru des chromites diminue et le S de la roche augmente (Figs. 5. 12A et B et 5.13).



**Figure 5.12 :** Diagrammes binaires présentant les concentrations en Ru dans les chromites en ppb versus les concentrations en S de la roche en % poids pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. A) Toutes les données sont présentées incluant les échantillons associés aux sulfures. B) Agrandissement de A) représentant uniquement les échantillons sans sulfures de la zone Alexo. Les flèches représentent les coupes (MC, C1 et C2) présentées sur la figure 5.13, et indiquent la direction vers la minéralisation. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré, chr = chromite, RT = roche totale.

### *Cas du Cuivre*

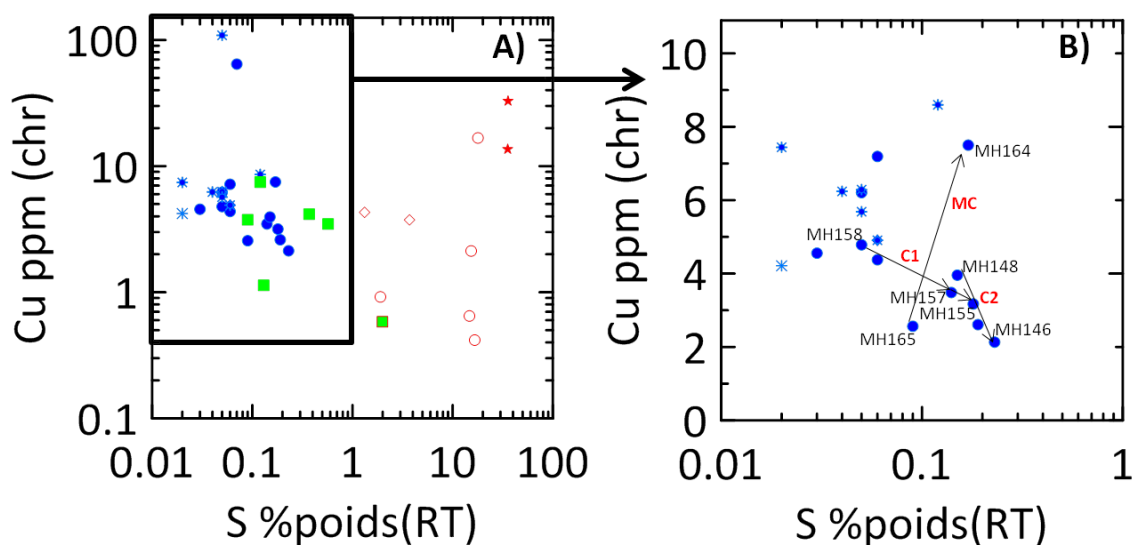
Comme pour le Ru, les concentrations en Cu des chromites diminuent avec l'augmentation en S de la roche. La figure 5.14A montre les résultats pour le Cu. À part quelques échantillons avec des concentrations très élevées (> 50 ppm), une corrélation

négative apparaît pour les échantillons des faciès lithologiques non minéralisés. Cette corrélation est aussi visible pour les échantillons des faciès lithologiques minéralisés et pour les échantillons de la zone Hart. En l'absence de sulfures, le Cu montre donc un comportement similaire à celui du Ru, et sa concentration dans les chromites diminue lorsque le S de la roche augmente. La meilleure corrélation est obtenue avec les échantillons des cumulats d'olivine de la *Stripped Area*, comme pour le Ru, il existe un lien entre la concentration en Cu des chromites et la distance par rapport à la minéralisation. La figure 5.14B présente les coupes MC, C1 et C2. À part la coupe MC, les coupes C1 et C2 montrent que plus l'échantillon est proche de la minéralisation, plus le contenu en Cu des chromites diminue et le S de la roche augmente.

Le Cu est un élément nouveau détecté dans la chromite, et son comportement reste encore peu documenté, notamment sous l'effet du métamorphisme. Cette distribution est toutefois prévisible, puisque le Cu est un élément chalcophile au même titre que le Ru, cependant le coefficient de partage du Cu dans les sulfures ( $D \approx 1200$ ) reste bien moins élevé que le Ru ( $D \approx 30000$ ) (base de donnée GEOREM). Le Cu reste compatible dans la chromite mais à moindre niveau que dans les sulfures, et il est incompatible dans les silicates. Il est aussi à noter que certains échantillons présentent des concentrations très élevées, entre 50 et 100 ppm au lieu d'être  $\leq 10$  ppm comme pour la majorité des échantillons. Ces anomalies restent pour l'instant inexplicables. Cependant le Cu dans les chromites semble être lui aussi un indicateur potentiel de minéralisation en sulfures.



138



**Figure 5.14 :** Diagrammes binaires présentant les concentrations en Cu dans les chromites en ppm versus les concentrations en S de la roche en % poids pour les échantillons de la zone Alexo et de la zone Hart. A) Toutes les données sont présentées incluant les échantillons associés aux sulfures. B) Agrandissement de A) représentant uniquement les échantillons sans sulfures de la zone Alexo. Les flèches représentent les coupes (MC, C1 et C2) présentées sur la figure 5.13, et indiquent la direction vers la minéralisation. Ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spf = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré, chr = chromite, RT = roche totale.

En résumé, en l'absence de sulfures (échantillons non minéralisées), les concentrations en Ru et aussi en Cu des chromites semblent plus faibles lorsque le S de la roche est élevé. Ces résultats sont intéressants et semblent attester que le Ru et le Cu pourraient définir des vecteurs indicateurs de la minéralisation, avec des concentrations de plus en plus faibles lorsqu'on se rapproche de la minéralisation. De façon générale, dans la zone Alexo, les chromites des échantillons sans sulfures atteignent des valeurs de concentrations plus élevées que celles des chromites associées aux échantillons avec sulfures. Cette observation, ainsi que les résultats obtenus avec la variation du Ru et du Cu en fonction de la distance par rapport à la minéralisation permettent de dire que les teneurs en Ru et en Cu dans les chromites restent sensibles à la présence directe de sulfures, et ce même dans un système komatiitique minéralisé où les chromites présentent des concentrations élevées en Ru.



Toutefois, le faible nombre d'échantillons et le manque de contraintes pour l'échantillonnage d'une partie des échantillons de la zone Alexo ne permet pas une conclusion ferme et mérite d'être investigué davantage. Il faudrait élaborer un projet spécifique pour confirmer cette observation et comprendre les processus en action.

### **5.3 Discussion de l'impact de l'altération sur la géochimie des chromites durant le métamorphisme à partir de cartographies géochimiques de chromites**

#### **5.3.1 Introduction et présentation**

La chromite est un minéral accessoire commun dans les roches ultramafiques qui est à la fois dur, résistant à l'érosion et à priori résistant à l'altération et au métamorphisme. Toutefois, des travaux de Barnes (2000) ont montré que la chromite peut tout de même s'altérer en magnétite durant le métamorphisme, ce qui peut entraîner la migration de certains éléments chimiques. Dans ce projet, les analyses des éléments mineurs et traces dans la chromite ont montré que l'altération influence la concentration en certains éléments (voir partie 4.3.2 et Fig. 4.7). Ainsi, afin d'investiguer plus en détail l'effet de l'altération durant le métamorphisme, des cartes chimiques de chromites de komatiites à différents stades d'altération en magnétite ont été réalisées par LA-ICP-MS au LabMaTer de l'UQAC (Figs. 5.15 et 5.16). Plusieurs grains de chromites montrant différents stades d'altération ont été sélectionnés puis cartographiés au LA-ICP-MS. Le protocole d'analyse utilisé est le même que celui des analyses ponctuelles, excepté que les données obtenues

sont semi-quantitatives, et que le faisceau laser utilisé est d'un rayon plus petit, entre 5 et 12  $\mu\text{m}$ .

### **5.3.2 Observation et description de cartographies géochimiques de chromites**

La figure 5.15 constitue une représentation schématique abrégée des différentes observations faites. Elle présente les cartes géochimiques de trois grains de chromites à différents stades d'altération. Le premier grain représente une chromite non altérée en magnétite. Une frange de surcroissance de magnétite est toutefois présente autour du grain. Cette surcroissance de magnétite est attribuée à la serpentinisation de l'olivine, mais la forme primaire des chromites n'est pas affectée (Barnes, 2000). Le deuxième grain représente une chromite moyennement altérée, avec environ 30 % du grain de chromite transformé en magnétite formant une couronne qui entoure un cœur de chromite préservé. Le troisième grain représente une chromite fortement altérée, avec plus de la moitié du grain transformé en magnétite qui entoure un petit cœur de chromite préservé.

Les parties transformées en magnétite montrent une perte de concentration en Al, Co, Cr, Cu, Ga, Mg, Mn, Sc, Ti, Zn et Ru et un gain en Fe et V par rapport aux cœurs de chromites préservés (Figs. 5.15 et 5.16).

Pour la chromite non altérée, une zonation est observée pour Fe, Zn, Mn et Co qui ont une concentration plus importante en bordure des grains de chromite et qui diminue progressivement vers le centre du grain. Le Mg montre également une telle zonation mais avec les concentrations inversées, c'est-à-dire plus concentrées au centre et diminuant vers les bordures du grain. Ces zonations sont interprétées par Barnes (2000) par des échanges

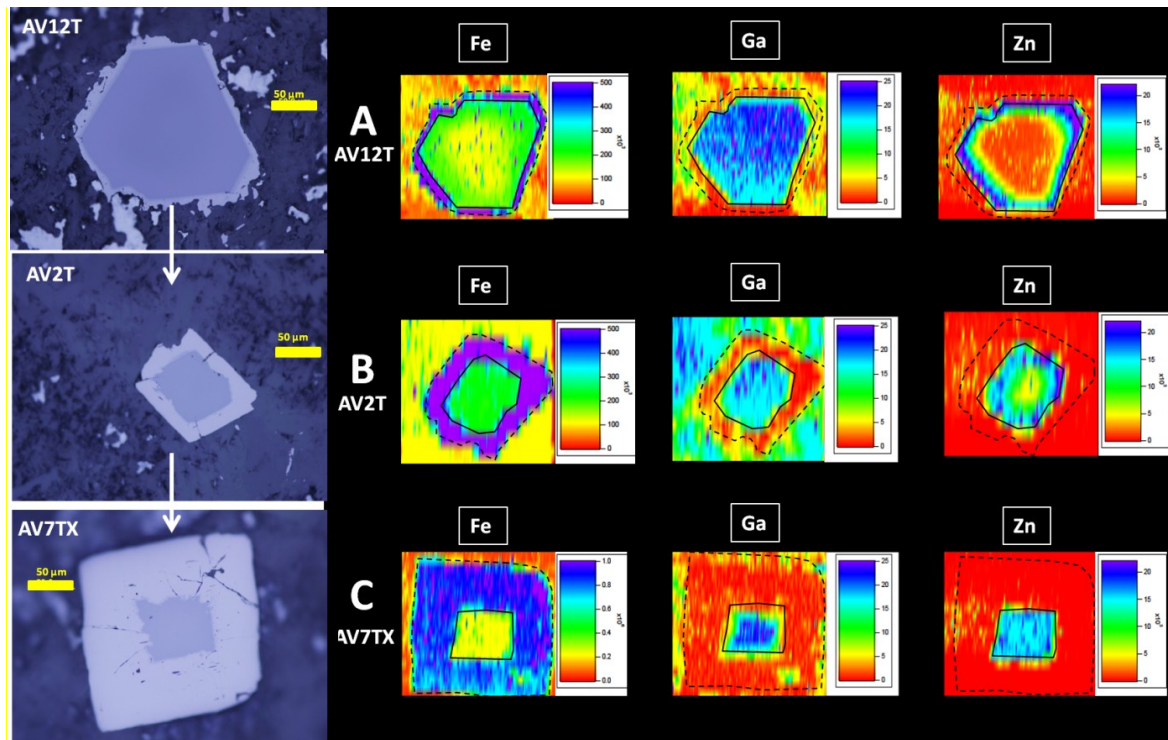
sub-solidus avec l'olivine ou avec le liquide résiduel piégé entre les cristaux, ces échanges ont lieu pendant la cristallisation du magma komatiitique.

Les cœurs de chromites préservés montrent une augmentation de concentration en Fe, Zn, Mn, Co et une diminution en Mg à mesure que l'altération du grain en magnétite progresse. Ces observations viennent confirmer les résultats obtenus dans les diagrammes binaires, par rapport aux différences de concentrations entre les chromites des échantillons altérés de la zone Hart et les chromites des échantillons peu altérés de la zone Alexo (voir partie 4.3 et Figs. 4.5.1 à 4.6.3). À l'exception du Ga qui montre une diminution de concentration dans les chromites des échantillons altérés dans les diagrammes binaires, mais cette diminution n'est pas traduite dans les cartographies géochimiques des grains de chromites altérés.

De façon générale ces cartes tendent à confirmer que les éléments ayant une valence plus élevée ( $\geq +3$ ) subissent moins de modifications de concentration à l'intérieur des cœurs de chromites préservés lors de l'altération.

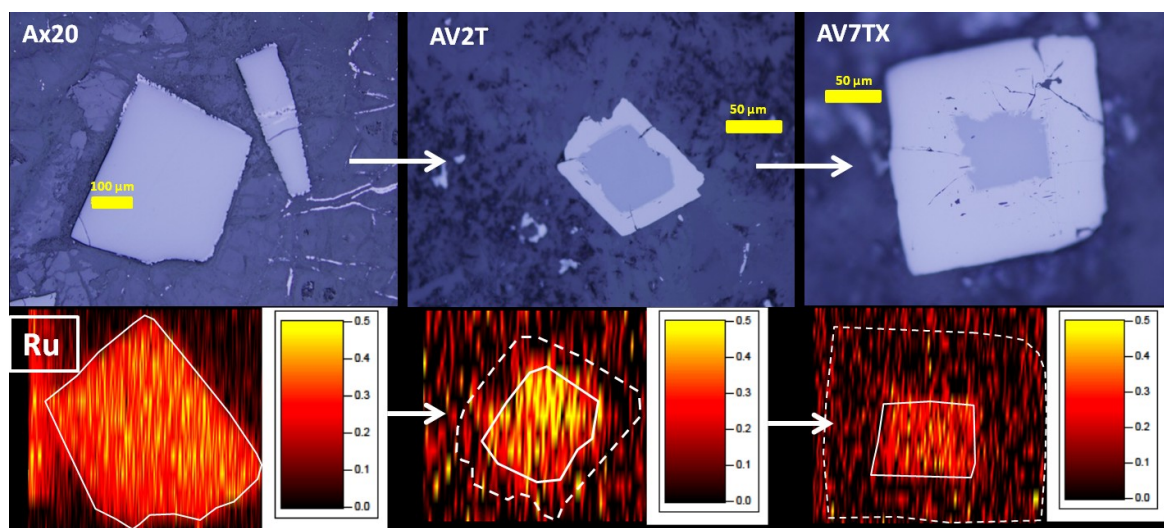
Le Mn, le Zn, et aussi le Co montrent des zonations plus complexes à l'intérieur des cœurs de chromites préservés, ces éléments sont plus concentrés en bordure de ces cœurs et moins concentrés vers le centre (Fig. 5.15B et C). Ces observations semblent indiquer que les grains de chromites ne sont pas en équilibre avec les silicates environnants (hypothèse également avancée par Baird, 1999 et Barnes, 2000). Cependant, il est à noter que l'enrichissement des cœurs de chromites en Mn, Zn et Co provient à la fois des échanges avec les silicates environnants notamment pendant le processus de serpentinisation de l'olivine, mais aussi de la transformation progressive des bordures de

chromite en magnétite, comme cette étude est seulement semi-quantitative il n'est pas vraiment possible de déterminer exactement la source principale des éléments en question.



**Figure 5.15 :** Photos de chromites de komatiites et cartographies chimiques au laser correspondantes pour Fe, Ga et Zn. A) chromite non altérée, B) chromite moyennement altérée, C) chromite fortement altérée. L'échelle est représentée par les couleurs de l'arc-en-ciel, avec les concentrations les plus faibles en rouge et les plus élevées en violet. Les valeurs présentées sont en ppm et sont semi-quantitatives. Les traits noirs pleins délimitent la portion préservée de chromite. Pour A), l'espace entre le trait plein et les tirets correspond à la portion de surcroissance de magnétite. Pour B) et C), l'espace entre le trait plein et les tirets correspond à la portion de chromite altérée en magnétite.

En ce qui concerne le Ru, il représente l'élément détecté avec les concentrations les plus faibles. Les cartes de chromites montrent une répartition plutôt homogène du Ru dans les grains de chromites non altérés et dans les cœurs de chromites préservés, mais il est absent de la portion altérée en magnétite (Fig. 5.16). Cette répartition homogène semble attester que le Ru est présent dans le réseau cristallin de la chromite et non en micro-inclusions de minéraux du groupe du platine.



**Figure 5.16 :** Photos de chromites de komatiites et cartographies chimiques au laser correspondantes pour le Ru. Ax20 chromite non altérée, AV2T chromite moyennement altérée, AV7TX chromite fortement altérée. L'échelle est représentée par les couleurs noir, rouge et jaune, avec les concentrations les plus faibles en noir et les plus élevées en jaune. Les valeurs présentées sont en ppm et sont semi-quantitatives. Les traits blancs pleins délimitent la portion préservée de chromite. L'espace entre les traits blancs plein et les tirets blancs correspond à la portion de chromite altérée en magnétite.

### 5.3.3 Discussion et synthèse

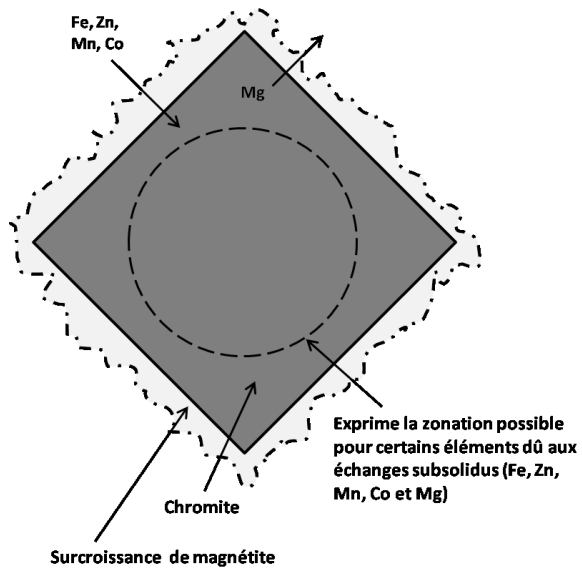
Pour apporter un début d'explication à ces migrations d'éléments, on peut revenir à la formule théorique générale de la chromite qui est  $(A^{2+} B^{3+}_2 O_4)$ , la vraie formule de la chromite étant  $FeCr_2O_4$ . Les oxydes de Mg, Cr, Fe et Al représentent 98 % du poids d'une chromite naturelle et les 2 % restants sont composés des oxydes mineurs et des éléments en traces (Irvine, 1965). Si une chromite respecte la stœchiométrie, les cations divalents occupent le site tétraédrique ( $A^{2+}$ ) et les éléments trivalents occupent le site octaédrique ( $B^{3+}$ ). Ainsi les ions  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ , et  $Zn^{2+}$  peuvent se substituer au  $Fe^{2+}$  dans le site  $A^{2+}$ , tandis que les ions  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Ga^{3+}$  et  $V^{3+}$  peuvent se substituer au  $Cr^{3+}$  dans le site  $B^{3+}$  (Baird, 1999). Cependant, l'état stœchiométrique n'est pas forcément atteint et certains éléments comme Mg, Fe et Al peuvent occuper les deux sites (Marshall and Dollase, 1984 ; Murck and Campbell, 1986). De plus, les autres phases minérales présentes

et leurs relations avec la chromite jouent aussi un rôle important. D'après Paktunc et Cabri (1995), le Ni, bien que de valence 2+, occupe le site octaédrique. Cependant d'après nos résultats présentés dans le chapitre 4, aucune corrélation n'est observée avec des éléments de valence 3+, mais une corrélation est observée avec les éléments de valence 2+, suggérant que le Ni peut aussi occuper le site tétraédrique.

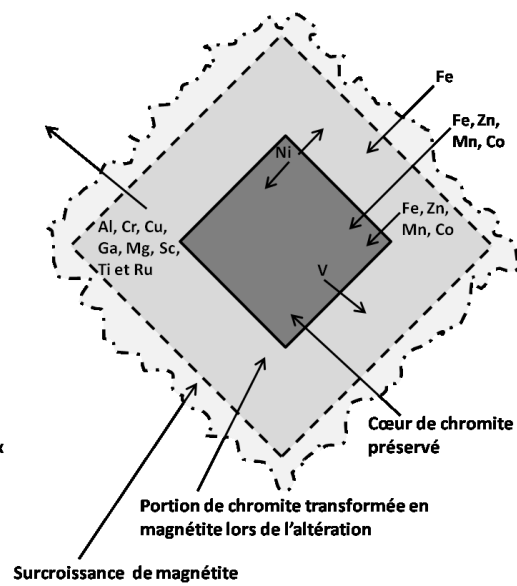
Le Ru est à l'état de valence 3+ et entrerait donc dans le site trivalent de la chromite (Borisov, 2005). L'absence de Ru dans la magnétite montre qu'il se diffuse hors de la portion altérée. Puisque la concentration en Ru des cœurs de chromites préservés ne semble pas augmenter, il est possible de conclure que le Ru se diffuse vers l'extérieur du grain lors de l'altération en magnétite. Cependant on ne sait pas dans quelle phase il va se concentrer ou bien s'il formera de nouvelles phases.

Pour résumer, l'altération de la chromite en magnétite, entraîne des pertes ou des gains en certains éléments et les cœurs de chromites préservés subissent des modifications de composition. Ces processus de redistribution sont résumés sur la figure 5.17. Enfin, le Ru, bien qu'il soit absent de la magnétite, reste toujours détectable dans les cœurs de chromite même lorsque la chromite montre une très forte altération (Fig. 5.16). Cette observation est importante car une grande part des komatiites dans le monde a subi un degré élevé de métamorphisme et les chromites qu'elles renferment sont souvent fortement altérées. Le Ru peut donc encore être utilisé comme un indicateur potentiel de minéralisation tant qu'il reste des cœurs préservés de chromites.

### Chromite non altérée en magnétite



### Chromite altérée en magnétite avec un cœur préservé



**Figure 5.17 :** Schéma simplifié du comportement de différents éléments chimiques dans la chromite pendant l'altération progressive en magnétite lors du métamorphisme.

## **CHAPITRE 6**

### **CONCLUSION**

#### **6.1 Introduction**

Pour ce projet de maitrise, une méthode originale d'analyse in situ par LA-ICP-MS a été appliquée à des chromites de komatiites afin de déterminer si leur géochimie en éléments majeurs, mineurs et traces, et plus particulièrement leur concentration en EGPI et Rh, peut être un indicateur de minéralisation en sulfures. Ce chapitre synthétise les interprétations et les conclusions générales qui ressortent de l'observation et de l'interprétation des résultats.

#### **6.2 Géochimie des chromites dans les komatiites**

##### **6.2.1 Éléments majeurs mineurs et traces**

La géochimie des chromites est contrôlée par différents facteurs et processus qui sont : la composition du magma, l'évolution du liquide par cristallisation fractionnée, des rééquilibrations sub-solidus avec l'olivine et les autres phases silicatées environnantes (dont le liquide résiduel piégé) et enfin le métamorphisme. Ce projet de maitrise a permis de caractériser la géochimie en éléments mineurs et traces des chromites de komatiites de la zone Alexo et de la zone Hart. Il apparaît que la géochimie des chromites reflète



partiellement l'évolution du liquide par cristallisation fractionnée avec une légère évolution de composition entre les faciès à olivine et les faciès avec pyroxène. Il apparaît que les compositions des chromites des faciès à texture spinifex reflètent mieux cette évolution que les compositions des chromites des faciès à texture de cumulat.

La présence de sulfures et/ou un métamorphisme qui augmente vont avoir un impact important et observable sur la géochimie des chromites. Ainsi, les chromites dans des échantillons avec sulfures disséminés présentent des concentrations légèrement plus élevées en Mn et Zn, des concentrations légèrement plus faibles en Co et significativement plus faibles en Ni et en Cu par rapport aux chromites des échantillons sans sulfures. Les chromites des sulfures massifs marquent de grandes différences avec les chromites des échantillons sans sulfures, elles sont plus riches en Ti, Mn, Fe et V et légèrement plus riches en Zn, et elles sont plus pauvres en Al, Ni, et Mg. L'augmentation du métamorphisme entraîne un enrichissement des concentrations en Zn, Co et Mn et un appauvrissement en Mg et un léger appauvrissement en Ga dans les parties préservées de chromites. Il semble que l'altération a une influence plus importante sur les éléments de valence 2+ et n'affecte que très peu les éléments ayant une valence plus élevée ( $\geq 3+$ ).

### **6.1.2 Éléments du groupe du platine**

Contrairement à notre hypothèse de départ, les chromites de la zone Alexo et de la zone Hart présentent des contenus en EGPI et Rh élevés alors que ce sont des systèmes komatiitiques considérés comme minéralisés. De plus, une grande partie des chromites des échantillons contenant des sulfures disséminés présentent des concentrations élevées en EGPI et Rh, seules les chromites des échantillons à sulfures massifs sont systématiquement en dessous des limites de détections. Ces observations, ainsi que le fait que les échantillons

avec sulfures disséminés soient déjà très fractionnés entre EGPI et EGPP à Alexo, témoignent de l'importance du moment de la ségrégation des sulfures dans le magma. En effet, il apparaît que si les chromites cristallisent avant la ségrégation en sulfures du magma, elles ne sont pas en compétition avec les sulfures et vont avoir un contenu élevé en EGPI et Rh et vont de ce fait participer en partie au fractionnement du magma.

Le calcul de bilans de masses montre que les chromites des échantillons sans sulfures de la zone Alexo contrôlent en moyenne environ 34% du budget roche totale en Ru, jusqu'à un maximum de 70%. Pour Os, Ir et Rh, les chromites en l'absence de sulfures contrôlent moins de 20% du budget roche totale. Les chromites des échantillons avec sulfures disséminés de la zone Alexo contrôlent en moyenne environ 7% du budget roche totale en Ru, jusqu'à un maximum de 24%. Pour Os, Ir et Rh, les chromites en présence de sulfures contrôlent moins de 15% du budget roche totale. Ces résultats montrent que les chromites contrôlent en partie les budgets en Ru mais elles ne contrôlent pas les budgets des autres EGPI et du Rh, d'autres phases sont donc nécessaires. Dans le cas de la présence de sulfures et compte tenu de la grande affinité des EGP pour ceux-ci, ce sont les sulfures qui contrôlent les budgets roche totale en EGPI et Rh. En revanche, d'après une comparaison de nos résultats avec ceux de Barnes et Fiorentini (2008), en l'absence de sulfures, une autre phase sous la forme d'alliage ou bien de MGP riches en Os-Ir doit cristalliser et contrôler le budget de la roche pour ces éléments. Cette ou ces phases ainsi que celles contrôlant le budget en Rh restent pour l'instant non identifiées.

L'absence de corrélation entre les concentrations en EGPI et Rh avec les rapports  $\text{Fe}^{3+}/\text{R}^{3+}$  pour les chromites de notre étude suggère que la  $f\text{O}_2$  ne joue pas le rôle principal sur l'enrichissement important en Os, Ir, Rh et plus particulièrement en Ru des chromites

de komatiites. Les températures très élevées des magmas komatiitiques ainsi que la composition de ces magmas apparaissent comme les facteurs déterminant pour expliquer l'enrichissement des chromites en EGPI et Rh dans les komatiites.

### **6.3 Aspect exploration**

#### **6.3.1 Éléments majeurs mineur et traces**

Les rapports d'éléments dans les chromites, Ni/Ti, Ni/Mn et Ni/Cr permettent de discriminer les chromites des lithologies minéralisées des chromites des lithologies non minéralisées et également des chromites altérées. Ces rapports d'éléments permettent d'identifier plusieurs processus qui sont, l'évolution du liquide par cristallisation fractionnée, la ségrégation de sulfures et l'effet du métamorphisme. Ces rapports comparés sous la forme de diagrammes binaires semblent être de bons outils pour l'indication de la présence de sulfures, et pourraient potentiellement être utilisés pour les bases de données de minéraux lourds dans les tills en vue de créer des vecteurs géochimiques pour l'exploration de gisements de sulfures de Ni-Cu et EGP.

#### **6.3.2 Le Ruthénium**

Bien que la zone Alexo soit un système komatiitique minéralisé, les chromites des échantillons avec ou sans sulfures présentent des concentrations élevées en Ru et dans une moindre mesure en Os, Ir et Rh. Cependant, d'après nos résultats et aussi des calculs de bilan de masse, les chromites des échantillons sans sulfures atteignent des valeurs de concentrations en Ru plus élevées que celles des chromites associées aux échantillons avec sulfures et exercent un contrôle plus important sur le budget roche totale. Cette observation, ainsi que les résultats obtenus avec la variation du Ru et aussi du Cu en fonction de la distance par rapport à la minéralisation, permettent de dire que les teneurs en

Ru dans les chromites restent sensibles à la présence directe de sulfures. Le Ru dans les chromites peut donc encore être un indicateur potentiel de la présence de sulfures et ce même dans un système komatiitique minéralisé où les chromites présentent des taux élevés en Ru.

Enfin durant le métamorphisme, le Ru sort de la chromite lorsqu'elle est transformée en magnétite. Cependant, il reste toujours détectable dans les cœurs de chromite préservés, même lorsque la chromite montre une très forte altération. Le Ru peut donc encore être utilisé comme un indicateur potentiel de minéralisation tant qu'il reste des cœurs préservés de chromites.

## RÉFÉRENCES

- Arguin J.-P., Pagé P., Barnes, S.-J., Yu S.-Y. and Song X.-Y., 2015. The effect of chromite crystallization on the distribution of osmium, iridium, ruthenium and rhodium in picritic magmas: an example from the Emeishan Large Igneous Province, southwestern China. *Journal of Petrology* 57, 1019-1048.
- Arndt N. T., 1986. Differentiation of komatiite flows. *Journal of Petrology* 27, 279-301.
- Arndt N. T., 2008. Komatiite. *Cambridge, UK, Cambridge University Press*.
- Augé T., 1985. Platinum-group-mineral inclusions in ophiolitic chromitite from the Vourinos Complex, Greece. *The Canadian Mineralogist* 23, 163-171.
- Baird A. M., 1999. Geochemistry and petrogenesis of chromite in intrusive and extrusive komatiites in the shaw dome area (Abitibi greenstone belt, Ontario). *Masters thesis* University of Alabama.
- Ballhaus C. and Sylvester P., 2000. Noble metal enrichment processes in the Merensky Reef, Bushveld Complex. *Journal of Petrology* 41, 545–561.
- Barnes S.-J., 1983. The origin of the fractionation of platinum group elements in Archean komatiites of the Abitibi greenstone belt, northern Ontario, Canada. *Unpublished PhD thesis* University of Toronto, Toronto, Ontario.
- Barnes S.-J., Gorton M. P. and Naldrett A. J., 1983. A comparative study of olivine and clinopyroxene spinifex flow from Alexo Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 83, 293-308.
- Barnes, S.-J., 1985, The petrology and geochemistry of komatiite flows from the Abitibi greenstone belt, Canada, and a model for their formation. *Lithos* 18, 241-270.
- Barnes S.-J. and Naldrett A. J., 1987. Fractionation of the Platinum-Group Elements and Gold in Some Komatiites of the Abitibi Greenstone Belt, Northern Ontario. *Economic Geology* 82, 165-183.
- Barnes S.-J. and Lightfoot P. C., 2005. Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. *Society of Economic Geologist 100<sup>th</sup> anniversary volume* 179-213.
- Barnes S. J., 1998. Chromite in komatiites, I. Magmatic controls on crystallization and composition. *Journal of Petrology* 39, 1689-1720.

- Barnes S. J., 2000. Chromite in komatiites, II. Modification during greenschist to mid-amphibolite facies metamorphism. *Journal of Petrology* 41, 387-409.
- Barnes, S. J. and Roeder, P.L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2279-2302.
- Barnes S. J., 2007. Cotectic precipitation of olivine and sulfide liquid from komatiite magma, and the origin of komatiite-hosted disseminated nickel sulfide mineralization at Mt Keith and Yakabindie, Western Australia. *Economic Geology* 102, 299-304.
- Barnes S. J. and Fiorentini, M. L., 2008. Iridium, ruthenium and rhodium in komatiites: evidence for iridium alloy saturation. *Chemical Geology* 257, 44-58
- Borisov A. A. and Palme H., 2000. Solubilities of Noble Metals in Iron-Containing Silicate Melts as Derived from Experiments in Iron-Free Systems. *American Mineralogist* 85, 1665-1673.
- Borisov A. A., 2005. Crystallization and Stability of Noble Metal Alloys in the Magmatic Process. *Geology of Ore Deposits* 47, 469-475.
- Brenan J. M., Finnigan C. S., McDonough W. F. and Homolova V., 2012. Experimental constraints on the partitioning of Ru, Rh, Ir, Pt and Pd between chromite and silicate melt: The importance of ferric iron. *Chemical Geology* 302-303, 16-32.
- Brüggemann G. E., Arndt N. T., Hofmann A. W., and Tobschall H. J., 1987. Noble Metal Abundances in Komatiite Suites from Alexo, Ontario, and Gorgona Island, Columbia. *Geochimica Cosmochimica Acta* 51, 2159-2169.
- Coad P. R., 1979. Nickel sulphide deposits associated with ultramafic rocks of the Abitibi belt and economic potential of mafic-ultramafic intrusions. *Toronto, Ontario Geological Survey Study* 20, 84.
- Crocket J. H., 2002. Platinum-group elements in basalts from Maui, Hawaii: low abundances in Alkali basalts. *The Canadian Mineralogist* 40, 595-609.
- El Ghorfi M., Melcher F., Oberthur T., Boukhari A. E., Maacha L., Maddi A. and Mhaili M., 2008. Platinum group minerals in podiform chromitites of the Bou Azzer ophiolite, Anti Atlas, Central Morocco. *Mineralogy and Petrology* 92, 59-80.
- Ewers W. E., Graham J., Hudson D. R. and Rolls J. M., 1976. Crystallization of chromite from nickel-iron sulphide melts. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 54, 61-64.
- Fiorentini M. L., Stone W. E., Beresford S. W. and Barley M. E., 2004. Platinum-group element alloy inclusions in chromites from Archaean mafic-ultramafic units: evidence from the Abitibi and the Agnew-Wiluna Greenstone Belts. *Mineralogy and Petrology* 82, 341-355.

- Fiorentini, M. L., Beresford S. W., and Barley M. E., 2008. Ruthenium chromium variation: A new lithogeochemical tool in the exploration for komatiite-hosted Ni-Cu-(PGE) deposits. *Economic Geology* 103, 431-437.
- Garuti G., Zaccarini F. and Economou-Eliopoulos M., 1999. Paragenesis and composition of laurite from chromitites of Othrys (Greece): implications for Os–Ru fractionation in ophiolitic upper mantle of the Balkan peninsula. *Mineralium Deposita* 34, 312-319.
- Gonzalez-Jimenez J. M., Gervilla F., Proenza J., Augé T. and Kerestedjian T., 2009. Distribution of platinum-group minerals in ophiolitic chromitites. *Applied Earth Science* 118, 101-110.
- Houlé M. G., 2008. Physical volcanology and metallogenesis of komatiitic rocks in the Abitibi greenstone belt, Superior Province, Ontario, Canada. *Unpublished PhD thesis* University of Ottawa, Ottawa, Ontario.
- Houlé M. G., Gibson H. L., Leshner C. M., Davis P. C., Cas R. A. F., Beresford S. W. and Arndt N. T., 2008a. Komatiitic sills and multigenerational peperite at Dundonald Beach, Abitibi greenstone belt, Ontario: volcanic architecture and nickel sulfide distribution. *Economic Geology* 103, 1269-1284.
- Houlé M. G. and Leshner C. M., 2011. Komatiite-associated Ni–Cu–(PGE) deposits in the Abitibi greenstone belt, Superior Province, Canada. *Reviews in Economic Geology* 17, 89-121.
- Houlé M. G., Leshner C. M. and Davis P. C., 2012. Thermomechanical erosion at the Alexo Mine, Abitibi greenstone belt: implications for the genesis of komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) mineralization. *Mineralium Deposita* 47, 105-128.
- Irvine, T.N., 1965, Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Part 1. Theory. *Canadian Journal of Earth Sciences* 2, 648-672.
- Kamenetsky V. S., Park J.-W., Mungall J. E., Pushkarev E. V., Ivanov A. V., Kamenetsky M. B., and Yaxley G. M., 2015. Crystallization of platinum-group minerals from silicate melts: evidence from Cr-spinel-hosted inclusions in volcanic rocks. *Geology* 43, 903-906.
- Keays, R.R., Ross, J.R. and Woolrich, P., 1981. Precious metals in volcanic peridotite associated nickel sulphide deposits in Western Australia, II. Distribution within the ores and host rocks at Kambalda. *Economic Geology* 76, 1645-1674
- Leshner C. M. and Stone W. E., 1996. Exploration geochemistry of komatiites. In: D.A Wyman (ed.) *Igneous Trace Element Geochemistry Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada* 153-204.
- Locmelis M., Pearson N. J., Barnes S. J. and Fiorentini M. L., 2011. Ruthenium in komatiitic chromite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 3645-3661.

- Locmelis M., Fiorentini M. L., Barnes S. J. and Pearson N. J., 2013. Ruthenium variation in chromite from komatiites and komatiitic basalts — a potential mineralogical indicator for nickel sulfide mineralization. *Economic Geology* 108, 355-364.
- Maier W. D. and Barnes S.-J., 1999. Platinum-group elements in silicate rocks of the lower, critical and main zones at union section, western Bushveld complex. *Journal of Petrology* 40, 1647-1671.
- Marshall, C. P. and Dollase, W. A., 1984. Cation arrangement in iron-zinc-chromium spinel oxides. *American Mineralogist* 69, 928-936.
- Marchesi C., Gonzalez-Jimenez J., Gervilla F., Garrido C., Griffin W., O'Reilly S., Proenza J. and Pearson N., 2010. In situ Re–Os isotopic analysis of platinum-group minerals from the Mayari Cristal ophiolitic massif (Mayari-Baracoa Ophiolitic Belt, Eastern Cuba): implications for the origin of Os-isotope heterogeneities in podiform chromitites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 1, 14.
- McDonough W. S. and Sun S. S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120, 223-253.
- Merkle R. K. W., 1992. Platinum group minerals in the middle group of chromitite layers at Marikana, western Bushveld complex: indications for collection mechanisms and postmagmatic modification. *Canadian Journal of Earth Sciences* 29, 209-221.
- Mungall, J. and Brenan, J., 2014. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle–crust fractionation of the chalcophile elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 125, 265-289.
- Murck B. W. and Campbell I. H., 1986. The effects of temperature, oxygen fugacity and melt composition on the behaviour of chromium in basic and ultrabasic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 1871-1887.
- Naldrett A. J., 1966. The role of sulphurization in the genesis of iron-nickel sulphide deposits of the Porcupine District, Ontario. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Transaction* 69, 147-155.
- Naldrett A. J., Gasparini E. L., 1971. Archaean nickel sulphide deposits in Canada, their classification, geological setting and genesis with some suggestions as to exploration. In: Glover JE (ed) The Archaean Rocks. Proceedings of the First Symposium on Archaean Rocks. *Geological Society of Australia, Sydney special publication* 3, 201-225.
- Naldrett A. J., 1973. Nickel sulfide deposits, their classification and genesis with special emphasis on deposits of volcanic association. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy* 66, 45-63.
- Naldrett A. J. 2004. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration. *Springer, Berlin* p.727.



- Pagé P. and Barnes S.-J., 2009. Trace elements signature of chromites from podiform chromitites of the Thetford Mines Ophiolite, Québec, Canada: products of boninitic melt migration. *Economic Geology* 104, 997-1018.
- Pagé P., Barnes S.-J., Bédard J. H. and Zientek M. L., 2012. In situ determination of Os, Ir, and Ru in chromites formed from komatiite, tholeiite and boninite magmas: Implications for chromite control of Os, Ir and Ru during partial melting and crystal fractionation. *Chemical Geology* 302-303, 3-15.
- Pagé P. and Barnes S.-J., 2016. The influence of chromite on osmium, iridium, ruthenium and rhodium distribution during early magmatic processes. *Chemical Geology* 420, 51-68.
- Paktunc, A. D. and Cabri L. J., 1995. A proton-and electron-microprobe study of gallium, nickel and zinc distribution in chromian spinel. *Lithos* 35, 261-282.
- Park J.-W., Campbell I. H. and Eggins S. M., 2012. Enrichment of Rh, Ru, Ir and Os in Cr spinels from oxidized magmas: evidence from the Ambae volcano, Vanuatu. *Geochimica Cosmochimica Acta* 78, 28-50.
- Puchtel I. S., Humayun M., Campbell A. J., Sproule R. A. and Leshner C. M., 2004. Platinum group element geochemistry of komatiites from the Alexo and Pyke Hill areas, Ontario, Canada. *Geochimica Cosmochimica Acta* 68, 1361-1383.
- Puchtel I. S., Humayun M. and Walker R. J., 2007. Os–Pb–Nd isotope and highly siderophile and lithophile trace element systematics of komatiitic rocks from the Volotsk suite, SE Baltic Shield. *Precambrian Research* 158, 119-137.
- Pyke D., Naldrett A. J. and Eckstrand O. R., 1973. Archean ultramafic flows in the Munro Township, Ontario. *Bulletin of Geological Society of America* 84, 955-978.
- Righter K., Campbell A. J., Humayun M. and Hervig R. L., 2004. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts. *Geochimica Cosmochimica Acta* 68, 867-880.
- Shima H., and Naldrett A. J., 1975. Solubility of sulfur in an ultramafic melt and the relevance of the system Fe-S-O. *Economic geology* 70, 960-967.
- Sproule R. A., Leshner C. M., Houle M., Keays R. R., Thurston P. C. and Ayer J. A., 2005. Chalcophile element geochemistry and metallogenesis of komatiitic rocks in the Abitibi Greenstone Belt, Canada. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 100, 1169-1190.
- Thurston P. C., Ayer J. A., Goutier, J. and Hamilton, M. A., 2008. Depositional gaps in Abitibi greenstone belt stratigraphy: A key to exploration for syngenetic mineralization. *Economic Geology* 103, 1097-1134.

Viljoen M. J. and Viljoen R. P., 1969. The geology of the lower ultramafic unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks. *Geological Society of South Africa, Special Publication 2*, 55-86.

## **ANNEXE 1 : Analyses minéralogiques (chromites)**

Les coordonnées sont en UTM83-zone 17N

Abréviations : ol = olivine, C = cumulat, px = pyroxène, spfx = spinifex, sulf = sulfure, mass = massif, alt = altéré.

Échantillons	AX59-D.D	AX59-C.D	AX48-A.D	AX48-B.D	AX48-C.D	AX48-D.D	AX63-A.D	AX63-B.D
UTM X	513735,4302	513735,4302	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869
UTM Y	5389269,761	5389269,761	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652
Coupes	Olivine flow	Olivine flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	74,760	74,410	71,740	70,921	71,396	71,396	68,710	68,710
Fe2+#	31,716	31,256	43,646	47,885	45,889	45,889	44,251	44,251
Fe3+/R3+	4,248	7,380	4,936	5,364	5,007	5,007	7,203	7,203
Ni/Ti	0,875	0,816	0,428	0,489	0,587	0,456	0,400	0,387
Ni/Cr	0,003	0,004	0,002	0,003	0,004	0,002	0,003	0,003
Ni/Mn	1,049	1,161	0,596	0,645	0,771	0,577	0,536	0,589
SiO2 (% poids)	0,11	0,43	0,12	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11
Al2O3	12,83	12,63	14,13	14,19	14,14	14,14	15,02	15,02
Cr2O3	56,66	54,76	53,45	51,59	52,62	52,62	49,17	49,17
MgO	14,48	14,53	11,85	10,75	11,27	11,27	11,57	11,57
Si (ppm)	518	1999	560	430	435	435	493	493
Al	35676	35120	39268	39448	39320	39320	41758	41758
Cr	387575	374538	365612	352876	359953	359953	336321	336321
S	420	750	658	810	723	745	790	880
Ca	<318	470	<318	500	<318	<318	<318	<318
Sc	7,47	7,82	4,65	6,17	8,38	6,37	8,81	9,23
Ti	1526	1800	2110	2106	2145	1915	2410	2605
V	707	815	987	1076	1082	989	1286	1340
Mn	1274	1264	1517	1595	1634	1515	1802	1711
Co	183,6	193,1	229,9	229	229,4	222,9	229,9	235,6
Ni	1336	1468	904	1029	1260	874	965	1008
Cu	6,13	6,29	3,28	4,23	5,93	4,8	6,03	6,06
Zn	576	652	975	979	908	1034	1056	1092
Ga	27,2	30,57	25,4	29,8	31,2	27,8	30,5	30,62
Ge	0,59	0,48	0,38	0,483	0,591	0,48	0,53	0,637
As	<0,261	0,6	0,87	10	4,8	1,7	1,3	2,3
Sr	0,043	0,171	0,147	0,141	0,082	0,086	0,159	0,069
Y	0,026	<0,013	0,027	0,039	0,018	0,032	<0,013	0,0169
Zr	<0,489	0,89	0,67	0,71	0,632	0,6	0,78	1,06
Mo	<0,144	0,6	0,163	<0,144	0,166	<0,144	<0,144	0,185
Ru (ppb)	<70	<70	171	255	351	254	326	386
Rh	29	18	2,7	12,7	18,8	9,7	20,4	17,4
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	10,7	18,6	21,7	22	41	19,6	14,8	19,8
Sn	148	154	271	255	333	247	119	217
Sb	<44	<44	<44	80	<44	111	<44	<44
Hf	13	8,2	32	15,4	31	18,9	17	<8
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	44	32	<15	<15	<15	<15	70	<15
Ir	16	20	<9	22	12,1	11,8	9,5	19
Pt	<31	<31	<31	80	<31	<31	<31	50

Échantillons	AX63-C.D	AX63-D.D	AX64-A.D	AX64-B.D	AX64-C.D	AX64-D.D	AX65-A1.D	AX65-A2.D
UTM X	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869
UTM Y	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652
Coupes	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	68,710	68,710	69,452	69,452	69,452	69,452	73,288	72,311
Fe2+#	44,251	44,251	51,922	51,922	51,922	51,922	47,587	54,367
Fe3+/R3+	7,203	7,203	7,800	7,800	7,800	7,800	4,511	4,307
Ni/Ti	0,137	0,414	0,292	0,257	0,335	0,294	0,438	0,472
Ni/Cr	0,004	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002
Ni/Mn	0,731	0,565	0,372	0,351	0,461	0,371	0,401	0,446
SiO2 (% poids)	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10
Al2O3	15,02	15,02	14,31	14,31	14,31	14,31	13,31	13,52
Cr2O3	49,17	49,17	48,48	48,48	48,48	48,48	54,44	52,64
MgO	11,57	11,57	9,89	9,89	9,89	9,89	10,90	9,31
Si (ppm)	493	493	398	398	398	398	472	481
Al	41758	41758	39768	39768	39768	39768	37005	37594
Cr	336321	336321	331618	331618	331618	331618	372376	360078
S	809	808	811	815	830	868	922	1038
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	9,9	8,46	5,98	5,8	7,74	6,97	5,85	7,18
Ti	9170	2390	2249	2498	2644	2324	1481	1632
V	1835	1274	1313	1417	1542	1342	878	949
Mn	1718	1753	1763	1827	1925	1840	1615	1727
Co	240,2	235,5	239,9	243,5	278,1	246	216,5	226,7
Ni	1255	990	656	642	887	683	648	771
Cu	10	6,69	3,58	3,12	6,84	3,98	60	52,7
Zn	991	1090	1201	1102	805	1047	965	856
Ga	33,1	30,9	27,48	28,5	32,9	28,5	20,81	23,27
Ge	0,62	0,554	0,516	0,502	0,58	0,552	0,4	0,512
As	4,5	1,61	1,21	1,125	1,14	1,15	1,23	2,2
Sr	0,196	0,073	0,062	0,08	0,052	0,083	0,09	0,077
Y	0,0179	0,0152	<0,013	<0,013	<0,013	0,017	<0,013	<0,013
Zr	0,98	0,73	0,569	0,79	0,81	0,554	0,67	0,685
Mo	0,19	<0,144	0,17	0,145	0,203	<0,144	0,216	0,189
Ru (ppb)	275	314	294	277	393	337	199	256
Rh	15,1	15,5	16,3	13,3	30,5	19,5	7,4	5,8
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	100	<79	<79
In	26	19,5	27,2	20,9	11,6	19,1	30	23,3
Sn	291	161	168	161	176	166	194	185
Sb	80	340	<44	57	90	<44	130	48
Hf	31	23	8,5	14	8,9	8,7	18,7	18,6
Ta	4,3	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	<15	16	21	15,8	33	15,9	<15	21,3
Ir	<9	16,2	12	12	15,1	14,1	14,8	11,6
Pt	<31	<31	<31	90	<31	<31	<31	<31

Échantillons	AX65-B1.D	AX65-B2.D	MH164-B.D	MH164-A.D	MH164-C.D	MH164-D.D	MH164-E.D	MH165-D.D
UTM X	513711,2869	513711,2869	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597
UTM Y	5389283,652	5389283,652	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253
Coupes	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	72,368	72,368	75,913	74,807	74,216	74,587	74,700	71,867
Fe2+#	51,059	51,059	41,171	40,556	39,952	44,971	43,539	47,363
Fe3+/R3+	4,506	4,506	3,285	3,258	4,304	4,241	3,141	4,873
Ni/Ti	0,536	0,601	0,926	0,655	0,716	0,641	0,655	0,426
Ni/Cr	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
Ni/Mn	0,556	0,612	0,813	0,650	0,720	0,619	0,641	0,494
SiO2 (% poids)	0,09	0,09	0,14	0,17	0,37	0,46	0,17	0,14
Al2O3	13,59	13,59	12,14	12,74	13,01	12,57	12,89	13,69
Cr2O3	53,04	53,04	57,02	56,37	55,83	54,98	56,72	52,12
MgO	10,06	10,06	12,27	12,47	12,66	11,38	11,89	10,87
Si (ppm)	438	438	658	808	1737	2130	789	640
Al	37766	37766	33738	35403	36171	34936	35829	38050
Cr	362776	362776	389983	385571	381857	376084	387992	356494
S	1134	1090	1170	720	789	610	780	800
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	700
Sc	8,58	8,44	4,53	5,16	5,3	4,73	4,85	4,38
Ti	1875	1867	1468	1549	1522	1472	1497	1963
V	1056	1071	877	931	802	798	787	1251
Mn	1806	1834	1672	1562	1514	1524	1528	1696
Co	242,2	253	236,2	253	249	244	248,8	295,2
Ni	1005	1122	1360	1015	1090	943	980	837
Cu	73,3	72	17	4,62	5,44	4,85	5,61	2,35
Zn	798	789	1038	1037	1048	1223	1193	1190
Ga	25,8	25,9	35,9	35,4	32,8	39,5	37,2	37,7
Ge	0,645	0,536	0,75	0,45	0,533	0,5	0,46	0,47
As	1,62	15	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	1
Sr	0,111	0,134	0,082	0,074	0,077	0,032	0,035	0,03
Y	0,0162	0,0175	0,032	<0,013	<0,013	<0,013	0,0133	<0,013
Zr	0,77	0,66	<0,489	0,75	0,5	<0,489	<0,489	1,06
Mo	0,224	0,21	0,151	<0,144	<0,144	0,176	<0,144	0,211
Ru (ppb)	331	351	290	232	263	289	315	310
Rh	16,8	13,1	14,4	7,4	14,9	15,1	8	3,2
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	100	<79	<79
In	24,7	17,5	18,9	12,9	20	20,4	17,6	<10
Sn	194	201	176	274	212	240	158	64
Sb	83	410	70	<44	<44	<44	<44	80
Hf	21,5	28	13,4	18	12,8	18,5	21,9	14,9
Ta	7,2	<4	<4	7	<4	9	<4	<4
Os	29,5	16,3	<15	<15	20,9	16	<15	<15
Ir	21,6	20	<9	<9	23,3	21,1	18,2	12,6
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH165-C.D	MH165-A.D	MH165-B1.D	MH165-B.D	MH158-D.D	MH158-C1.D	MH158-C2.D	MH158-B.D
UTM X	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597
UTM Y	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	69,220	72,216	72,331	71,935	74,656	73,363	73,525	74,779
Fe2+#	45,050	49,148	48,696	43,876	44,050	42,206	48,944	44,437
Fe3+/R3+	3,882	4,231	3,985	3,636	2,584	4,116	3,464	3,759
Ni/Ti	0,526	0,410	0,450	0,408	0,776	0,688	0,775	0,774
Ni/Cr	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
Ni/Mn	0,644	0,445	0,532	0,461	0,696	0,654	0,653	0,688
SiO2 (% poids)	0,15	0,07	0,11	0,11	0,12	0,12	0,10	0,15
Al2O3	15,51	13,80	13,90	14,07	13,10	13,46	13,30	12,72
Cr2O3	52,01	53,47	54,18	53,74	57,50	55,27	55,04	56,20
MgO	11,61	10,64	10,82	11,75	11,89	12,19	10,65	11,62
Si (ppm)	677	332	509	528	570	542	448	691
Al	43129	38364	38648	39101	36407	37424	36963	35350
Cr	355735	365721	370557	367582	393327	378033	376487	384422
S	707	559	780	738	770	900	620	849
Ca	<318	600	200	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	5,71	3,9	4,71	3,32	4,52	5,18	3,95	5,1
Ti	2001	1865	1981	1883	1374	1447	1336	1352
V	1145	1150	1234	1113	855	940	838	921
Mn	1635	1721	1677	1669	1531	1521	1586	1521
Co	304	302,2	292	303,6	253,4	247,9	266,2	254,3
Ni	1053	765	892	769	1066	995	1036	1047
Cu	2,55	2,39	3,25	2,3	5,42	5,02	4,22	4,49
Zn	1211	1330	1129	1364	1025	997	1296	1067
Ga	40,3	41,3	37,4	44,17	34	36,2	43,1	37,14
Ge	0,613	0,38	0,458	0,488	0,467	0,38	0,431	0,432
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261
Sr	0,086	0,079	0,07	0,058	0,078	0,09	0,118	0,071
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,02	0,0392	<0,013
Zr	0,64	0,88	0,88	0,85	0,5	0,71	0,64	<0,489
Mo	<0,144	0,215	0,194	0,195	0,179	0,145	0,21	0,157
Ru (ppb)	341	359	312	283	248	239	247	229
Rh	24,7	5,9	14,4	9,9	4,3	6,5	10,9	10,9
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	25,6	20,8	19,8	10,8	15,6	26,3	18,2	26,4
Sn	164	131	151	148	179	236	253	256
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	80	<44
Hf	10,2	13	8,8	13,5	18,2	18,1	8,5	11,3
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	<15	<15	<15	<15	17,7	20	<15	22,6
Ir	<9	<9	<9	<9	11,9	17,2	<9	16,1
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH157-E.D	MH157-B.D	MH157-A.D	MH157-D.D	MH155-B.D	MH155-C1.D	MH155-C2.D	MH155-D.D
UTM X	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597
UTM Y	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	73,857	72,216	73,723	73,405	68,530	73,725	73,410	70,932
Fe2+#	45,504	46,728	46,526	46,232	57,705	51,031	47,079	50,420
Fe3+/R3+	2,894	3,271	3,555	3,345	4,969	4,214	4,082	4,215
Ni/Ti	0,691	0,600	0,616	0,555	0,573	0,729	0,636	0,688
Ni/Cr	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
Ni/Mn	0,559	0,574	0,554	0,561	0,581	0,631	0,571	0,669
SiO2 (% poids)	0,12	0,10	0,11	0,12	0,06	0,12	0,12	0,09
Al2O3	13,25	13,97	13,21	13,40	15,44	13,03	13,16	14,39
Cr2O3	55,81	54,12	55,25	55,13	50,13	54,51	54,17	52,36
MgO	11,40	11,10	11,17	11,22	8,77	10,11	10,86	10,23
Si (ppm)	579	481	518	546	271	542	551	439
Al	36838	38834	36727	37249	42929	36232	36590	40015
Cr	381706	370208	377924	377070	342869	372869	370516	358142
S	970	1010	1200	820	980	916	770	1350
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	4,17	3,45	3,34	3,06	6,35	6,74	6,43	6,8
Ti	1397	1559	1455	1509	1662	1514	1585	1591
V	708	906	738	878	1048	774	887	907
Mn	1728	1631	1618	1491	1641	1748	1764	1637
Co	263,3	269,2	264,4	277,7	227,5	242,5	238,2	236,5
Ni	966	936	896	837	953	1103	1008	1095
Cu	4,15	3,42	3,4	2,98	2,45	3,5	3,17	3,01
Zn	1217	1675	1466	1784	1503	1028	1135	990
Ga	26,31	37,3	29,2	46,4	32,28	30,71	30,8	30,8
Ge	0,487	0,471	0,38	0,471	0,547	0,481	0,5	0,593
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261
Sr	0,068	0,053	0,061	0,07	0,058	0,065	0,059	0,075
Y	<0,013	<0,013	0,019	<0,013	<0,013	0,0164	<0,013	<0,013
Zr	0,56	0,63	0,53	0,51	0,63	0,54	0,54	0,54
Mo	0,173	<0,144	0,2	<0,144	0,157	0,182	0,151	0,172
Ru (ppb)	220	129	280	167	80	305	215	187
Rh	10,9	3,1	7,8	6,1	<12	13,6	11,4	7,4
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	16,6	14,3	14,5	10,5	17	18,8	19,9	19,4
Sn	176	176	159	157	181	252	193	200
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	17,3	10,4	13	10	<8	18,3	14,5	16,6
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Ir	17,4	<9	9,6	<9	<9	<9	14,4	<9
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH155-A.D	MH137-A.D	MH137-B.D	MH137-C.D	MH137-D.D	MH137-E.D	MH148-A.D	MH148-B.D
UTM X	513869,5597	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315
UTM Y	5389469,253	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C	ol C
Cr#	71,657	72,943	74,239	73,611	71,821	71,762	72,463	73,801
Fe2+#	51,572	37,104	38,814	38,022	38,898	38,481	43,493	50,865
Fe3+/R3+	4,370	4,022	3,290	3,010	3,620	3,472	3,978	4,650
Ni/Ti	0,657	0,724	0,682	0,697	0,625	0,582	0,765	0,713
Ni/Cr	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003
Ni/Mn	0,785	0,822	0,728	0,822	0,716	0,739	0,825	0,634
SiO2 (% poids)	0,10	0,12	0,15	0,17	0,10	0,10	0,11	0,13
Al2O3	14,01	13,91	13,25	13,62	14,44	14,66	13,83	12,88
Cr2O3	52,79	55,88	56,90	56,61	54,85	55,55	54,24	54,07
MgO	9,99	13,49	12,97	13,20	13,03	13,29	11,79	10,05
Si (ppm)	451	570	701	771	472	448	509	598
Al	38942	38659	36821	37850	40135	40766	38439	35795
Cr	361099	382247	389182	387233	375188	379976	370988	369825
S	1270	677	637	540	745	687	628	467
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	8,69	7,27	6,98	7,63	6,88	6,87	8,42	6,45
Ti	2105	1661	1552	1692	1700	1801	1751	1421
V	1255	829	752	897	968	1060	883	719
Mn	1763	1462	1454	1436	1484	1420	1623	1599
Co	282	221,9	216,7	209,8	212,4	211,4	226,6	213,4
Ni	1384	1202	1058	1180	1063	1049	1339	1013
Cu	3,75	3,01	2,74	2,7	2,44	2,17	4,27	3,47
Zn	1121	741	737	678	765	770	636	790
Ga	41,4	27,74	26,86	27,82	28,75	31,02	29,94	25,61
Ge	0,607	0,529	0,46	0,484	0,467	0,507	0,553	0,472
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261
Sr	0,078	0,06	0,056	0,101	0,044	0,067	0,079	0,051
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,0214	<0,013	<0,013
Zr	0,53	<0,489	<0,489	<0,489	<0,489	<0,489	0,51	0,62
Mo	0,221	<0,144	<0,144	0,238	<0,144	<0,144	<0,144	0,15
Ru (ppb)	104	249	294	215	151	33	251	217
Rh	5,7	8,3	12,4	12,9	3,5	2	6,2	8,2
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	15,5	12,4	10,8	14,7	15,6	16,6	20,5	18,4
Sn	225	235	154	204	304	231	188	182
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	9	18,6	16,2	17	11,5	11,2	18,8	16,8
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	<15	15,4	19,6	21,2	<15	<15	25,9	<15
Ir	<9	<9	13,2	<9	<9	<9	13,5	10,6
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31



Échantillons	MH148-C.D	MH148-D.D	MH148-E.D	MH148-F.D	MH146-A.D	MH146-B.D	MH146-C.D	MH146-D.D
UTM X	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315
UTM Y	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C	ol C	ol C	ol C	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol+px C
Cr#	73,263	73,367	73,974	73,372	73,518	72,306	72,731	73,035
Fe2+#	42,591	44,583	43,805	45,054	37,921	37,645	36,872	37,583
Fe3+/R3+	5,060	4,354	4,415	4,489	3,741	4,514	3,786	4,400
Ni/Ti	0,815	0,721	0,701	0,578	0,798	0,671	0,815	0,710
Ni/Cr	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Ni/Mn	0,818	0,729	0,675	0,614	0,802	0,695	0,805	0,700
SiO2 (% poids)	0,14	0,14	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
Al2O3	13,07	13,22	13,01	13,20	13,66	13,97	13,85	13,62
Cr2O3	53,37	54,27	55,12	54,21	56,51	54,37	55,06	54,99
MgO	11,77	11,45	11,74	11,36	13,27	13,13	13,28	13,13
Si (ppm)	649	630	579	593	542	570	528	500
Al	36321	36743	36165	36693	37961	38837	38500	37861
Cr	365017	371227	377007	370813	386515	371904	376617	376104
S	549	477	532	529	852	807	925	1214
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	8,29	7,38	7,78	5,99	6,64	6,16	6,48	6,47
Ti	1662	1648	1630	1660	1404	1442	1410	1416
V	816	844	772	897	699,2	801,9	715,7	741,5
Mn	1656	1631	1692	1563	1398	1392	1427	1437
Co	233,1	230,1	234,8	229,9	214,4	209	214	218,9
Ni	1355	1189	1142	960	1121	967	1149	1006
Cu	4,39	4	4,11	3,52	2,25	1,79	2,16	1,96
Zn	654	717	754	771	604	692	642	800
Ga	29,35	28,6	28,29	28,37	24,77	27,4	25,13	27,53
Ge	0,465	0,512	0,538	0,493	0,375	0,39	0,384	0,421
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261
Sr	0,066	0,066	0,068	0,055	0,073	0,063	0,079	0,054
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,0223	<0,013
Zr	0,72	<0,489	<0,489	<0,489	0,52	<0,489	0,51	<0,489
Mo	<0,144	<0,144	<0,144	<0,144	0,162	<0,144	0,165	<0,144
Ru (ppb)	241	277	303	228	232	64	195	152
Rh	11,3	9,4	13,3	4,6	7,5	2,2	5,7	2,7
Pd	<79	<79	<79	80	<79	<79	<79	<79
In	22,2	17,9	20,7	19,2	11,6	14,9	15,3	17,1
Sn	196	191	173	171	158	130	182	167
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	18	18,1	15	14,2	22,2	12	14,6	15,2
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Os	17,9	<15	19,4	<15	18,2	<15	<15	<15
Ir	14,2	10,4	12,8	<9	10,2	<9	<9	<9
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH146-E.D	MH12-1.D	MH12-2.D	MH42-B.D	MH42-D.D	MH43-C.D	MH43-A.D	AX20-B1.D
UTM X	513905,7315	513772,689	513772,689	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513735,4302
UTM Y	5389489,651	5389415,041	5389415,041	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389269,761
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Olivine flow
Lithologies	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol+px C	ol spfx
Cr#	73,274	73,477	73,477	72,212	72,993	69,864	73,263	73,397
Fe2+#	35,131	51,347	51,347	65,651	53,440	68,430	64,334	50,316
Fe3+/R3+	4,447	3,947	3,947	5,218	4,682	4,127	4,457	4,510
Ni/Ti	0,842	0,431	0,415	0,508	0,482	0,401	0,482	0,593
Ni/Cr	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003
Ni/Mn	0,885	0,424	0,420	0,563	0,429	0,360	0,355	0,499
SiO2 (% poids)	0,15	0,12	0,12	0,17	0,14	0,14	0,17	0,13
Al2O3	13,46	13,24	13,24	13,20	13,15	14,49	12,86	13,09
Cr2O3	55,03	54,68	54,68	51,12	53,00	50,06	52,52	53,84
MgO	13,66	10,09	10,09	6,86	9,50	6,33	7,15	10,18
Si (ppm)	719	575	575	808	668	640	799	588
Al	37430	36813	36813	36685	36568	40271	35748	36396
Cr	376378	374040	374040	349654	362499	342417	359264	368286
S	1170	545	588	640	800	630	600	447
Ca	<318	<318	<318	510	<318	<318	<318	<318
Sc	6,93	3,99	4,08	8,24	7,41	6,38	7,97	5,37
Ti	1473	1800	1851	1883	1659	1719	1478	1580
V	766,5	929	935	931	829	833	714	836
Mn	1403	1827	1832	1700	1864	1912	2009	1878
Co	212,5	247,8	237,3	234	239,9	262,4	240,9	260,1
Ni	1241	775	769	957	799	689	713	937
Cu	2,52	1,77	1,837	1,45	2,33	1,95	1,84	7,84
Zn	577	1315	1418	1100	820	1770	1260	801
Ga	25,43	28,2	26,3	20,8	20,4	20,68	19,7	22,67
Ge	0,379	0,54	0,513	0,3	0,32	0,44	0,24	0,428
As	<0,261	0,38	0,42	0,28	0,4	0,63	0,52	<0,261
Sr	0,056	0,031	0,048	0,026	0,113	<0,019	0,073	0,05
Y	<0,013	0,0156	<0,013	<0,013	0,037	0,024	<0,013	<0,013
Zr	0,6	<0,489	0,64	<0,489	0,53	<0,489	0,75	<0,489
Mo	0,149	0,16	0,205	<0,144	0,16	0,9	<0,144	0,159
Ru (ppb)	133	250	224	290	360	360	240	310
Rh	3,9	18	14,2	80	39	28	40	11,1
Pd	<79	<79	<79	<79	110	<79	<79	<79
In	15	20,1	20,2	21	80	60	<10	22,7
Sn	136	85	79	134	<55	147	66	191
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	80	<44	<44
Hf	15,3	21	12,7	24	45	30	13	16,4
Ta	<4	9	5	<4	14	12	5,3	<4
Os	<15	40	17,1	<15	<15	20	34	<15
Ir	<9	14	12,4	60	92	17	<9	13,6
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	30	<31	<31

Échantillons	AX20-A.D	AX20-C1.D	AX20-D1.D	AX20-B2.D	AX21-A1.D	AX21-A2.D	AX21-B2.D	AX23-A.D
UTM X	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302
UTM Y	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761
Coupes	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow
Lithologies	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx
Cr#	73,993	74,294	73,806	73,873	74,376	74,376	74,376	75,501
Fe2+#	51,574	54,594	55,667	51,938	38,904	38,904	38,904	34,275
Fe3+/R3+	4,892	5,392	5,231	5,082	4,374	4,374	4,374	3,207
Ni/Ti	0,535	0,497	0,503	0,530	0,662	0,567	0,670	0,956
Ni/Cr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004
Ni/Mn	0,448	0,390	0,410	0,448	0,830	0,641	0,781	1,067
SiO2 (% poids)	0,13	0,16	0,13	0,13	0,09	0,09	0,09	0,14
Al2O3	12,89	12,33	12,90	12,82	12,81	12,81	12,81	12,62
Cr2O3	54,67	53,12	54,20	54,04	55,45	55,45	55,45	57,96
MgO	10,03	9,19	9,20	9,90	12,76	12,76	12,76	13,97
Si (ppm)	588	729	607	628	436	436	436	658
Al	35834	34277	35870	35641	35625	35625	35625	35072
Cr	373929	363348	370701	369602	379257	379257	379257	396433
S	425	381	420	345	880	830	750	389
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	600	<318	<318
Sc	5,01	4,73	4,39	4,64	7,15	6,32	6,71	7,25
Ti	1564	1449	1466	1526	1795	1602	1690	1471
V	818,2	769	815	870,2	910	821	896	718
Mn	1867	1846	1797	1808	1432	1419	1449	1318
Co	259,7	259,2	246,4	256,8	207	188,2	201	203,4
Ni	836	720	737	809,4	1188	909	1132	1406
Cu	7,02	5,49	5,04	6,07	5,48	5,75	5,84	6,63
Zn	899	855	847	874	484	588	581	488
Ga	21,92	21,73	23,03	23,9	22,4	20,8	23,1	26,95
Ge	0,365	0,361	0,374	0,383	0,374	0,316	0,421	0,409
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	0,77	0,7	0,97	<0,261
Sr	0,056	0,041	0,072	0,037	0,076	0,051	0,22	0,055
Y	<0,013	0,0233	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013
Zr	0,512	<0,489	<0,489	0,495	0,56	<0,489	0,5	<0,489
Mo	0,15	<0,144	0,146	0,153	<0,144	<0,144	0,175	<0,144
Ru (ppb)	316	279	286	278	307	294	350	342
Rh	13,7	13,3	16,9	14,2	20,4	25	20,1	23,2
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	19	15,2	19,2	21,5	15,5	15,8	11,3	15,6
Sn	191	179	172	168	220	131	280	221
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	430	<44	<44
Hf	15,9	14,6	12,5	12,1	32	<8	12	17,5
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	<4	9	<4
Os	<15	16,5	16,5	<15	32	35	85	29,1
Ir	14,6	11	13,6	11,2	31	37	11,7	19,2
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	AX23-D1.D	AX23-D2.D	AX23-C.D	AX23-B.D	AX19-C.D	AX19-C2.D	AX57-A.D	AX57-B.D
UTM X	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513735,4302	513697,8975	513697,8975
UTM Y	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5389269,761	5388954,706	5388954,706
Coupes	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	Olivine flow	SP	SP
Lithologies	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx
Cr#	72,159	71,729	72,302	72,804	73,999	73,999	71,924	72,074
Fe2+#	37,929	36,575	35,824	35,234	38,957	38,957	51,546	45,863
Fe3+/R3+	4,570	3,899	3,508	3,200	2,931	2,931	3,764	3,624
Ni/Ti	0,796	0,726	0,903	0,912	0,758	0,751	0,288	0,492
Ni/Cr	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,002	0,002
Ni/Mn	0,977	0,959	1,204	1,112	0,855	0,816	0,388	0,496
SiO2 (% poids)	0,11	0,10	0,10	0,14	0,08	0,08	0,10	0,12
Al2O3	14,22	14,47	14,33	14,07	13,41	13,41	13,88	13,84
Cr2O3	54,92	54,74	55,75	56,14	56,88	56,88	53,00	53,23
MgO	13,30	13,57	13,80	13,86	12,99	12,99	10,00	11,19
Si (ppm)	518	458	448	649	378	378	448	570
Al	39520	40235	39832	39112	37271	37271	38586	38464
Cr	375673	374408	381357	384025	389059	389059	362541	364100
S	347	323	334	342	620	810	590	732
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	6,14	6,57	6,98	6,22	8,48	7,99	5,32	6,15
Ti	1547	1659	1682	1563	1910	1859	2310	1763
V	791	847	802	721	1070	1083	907	1038
Mn	1260	1257	1262	1282	1694	1713	1713	1747
Co	195,7	188,1	209,4	201,8	244	250	220,8	240
Ni	1231	1205	1519	1426	1448	1397	665	867
Cu	6,18	6,05	6,07	6,29	7,1	7,79	3,61	5,6
Zn	491	509	479	475	962	988	1031	749
Ga	28,2	28,8	30,3	28,4	33,5	32,7	21,4	22,1
Ge	0,431	0,405	0,442	0,467	0,61	0,7	0,391	0,434
As	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	0,731	0,84
Sr	0,042	0,037	0,058	0,037	0,047	0,096	0,38	0,07
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,67	<0,013
Zr	0,6	<0,489	0,76	0,6	0,78	0,93	2,06	0,75
Mo	<0,144	<0,144	<0,144	<0,144	0,19	0,15	0,148	0,162
Ru (ppb)	354	252	333	295	450	420	270	315
Rh	17,3	31,4	28,3	13,3	17,9	19,6	14,2	10,9
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	16,9	12,8	19,8	18,4	20,1	21,4	15,5	16,9
Sn	175	208	240	225	215	205	273	183
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	11,5	13	12,8	12,2	10,6	9	47	<8
Ta	<4	<4	<4	<4	6	6	14	<4
Os	<15	<15	<15	15,2	70	64	<15	16
Ir	13,7	12,3	15,7	15,6	30	33	<9	<9
Pt	<31	<31	<31	<31	90	100	<31	40

Échantillons	AX57-C.D	AX57-D.D	AX56-C.D	AX56-A.D	AX56-B.D	AX56-D.D	AX58-A1.D	AX58-A2.D
UTM X	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975
UTM Y	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706
Coupes	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
Lithologies	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx
Cr#	71,984	71,984	70,040	70,002	70,406	70,406	73,632	71,806
Fe2+#	50,098	50,098	59,737	52,820	58,652	58,652	50,555	54,313
Fe3+/R3+	4,115	4,115	7,095	6,079	6,446	6,446	5,252	4,981
Ni/Ti	0,545	0,448	0,119	0,296	0,282	0,275	0,475	0,521
Ni/Cr	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Ni/Mn	0,614	0,461	0,308	0,358	0,351	0,366	0,430	0,443
SiO2 (% poids)	0,11	0,11	0,06	0,08	0,07	0,07	0,15	0,12
Al2O3	13,81	13,81	13,89	14,32	13,98	13,98	12,88	13,87
Cr2O3	52,90	52,90	48,39	49,83	49,58	49,58	53,62	52,64
MgO	10,30	10,30	8,13	9,71	8,45	8,45	10,15	9,44
Si (ppm)	504	504	262	350	315	315	701	560
Al	38398	38398	38600	39821	38864	38864	35812	38545
Cr	361859	361859	330967	340810	339119	339119	366781	360044
S	699	780	719	927	905	801	1010	962
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	6,94	6,79	3,73	7,58	7,45	7,17	7,06	5,89
Ti	1852	1814	5400	2441	2500	2534	1705	1604
V	1079	1054	1591	1463	1608	1534	917	857
Mn	1645	1761	2080	2019	2006	1900	1884	1886
Co	226,7	224,5	244,2	293	278,8	273	250,4	254
Ni	1010	812	640	722	704	696	810	835
Cu	16	9,2	3,24	6,17	5,73	4,51	126	113,5
Zn	759	874	1468	1069	1086	1195	780	800
Ga	22,11	23,29	28,48	29,01	27,44	30,5	24,2	22,88
Ge	0,398	0,375	0,414	0,603	0,515	0,565	0,521	0,514
As	1,24	0,96	0,654	1,66	0,97	1,28	6,8	2,1
Sr	0,052	0,07	0,122	0,095	0,089	0,09	0,097	0,086
Y	0,0157	0,0132	<0,013	0,0198	0,0159	<0,013	0,02	<0,013
Zr	0,74	0,63	2,32	0,674	0,86	0,755	0,71	0,79
Mo	0,164	0,159	0,182	0,179	0,215	0,183	0,208	0,206
Ru (ppb)	219	303	239	366	306	333	359	339
Rh	8,1	15,4	19,6	21,5	19,5	23,4	23,1	18,5
Pd	<79	<79	<79	<79	90	<79	<79	<79
In	10	17,3	21,3	47	19,1	22,6	41	61
Sn	237	179	300	229	216	162	133	165
Sb	<44	600	<44	105	<44	140	230	60
Hf	16	11,8	81	8,3	15,8	15,8	21	14,4
Ta	<4	<4	6,3	<4	<4	<4	5,5	<4
Os	19	<15	<15	<15	<15	<15	21,2	<15
Ir	12,3	<9	<9	<9	<9	<9	31	11,7
Pt	<31	<31	<31	<31	50	<31	40	<31

Échantillons	AX58-C1.D	AX58-C2.D	AX72-A1.D	AX72-A2.D	AX72-B1.D	AX72-B2.D	Ax43(AX1-C).D	Ax43(AX1-D).D
UTM X	513697,8975	513697,8975	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869
UTM Y	5388954,706	5388954,706	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652
Coupes	SP	SP	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow
Lithologies	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	ol spfx	px spfx	px spfx
Cr#	72,823	72,823	65,629	67,860	67,623	67,623	69,081	69,530
Fe2+#	51,232	51,232	52,649	48,398	45,941	45,941	40,208	43,038
Fe3+/R3+	5,008	5,008	6,811	6,174	6,650	6,650	5,587	4,946
Ni/Ti	0,465	0,475	0,299	0,271	0,245	0,295	0,488	0,507
Ni/Cr	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003
Ni/Mn	0,394	0,398	0,556	0,519	0,396	0,532	0,715	0,777
SiO2 (% poids)	0,12	0,12	0,06	0,08	0,08	0,08	0,11	0,10
Al2O3	13,38	13,38	16,52	15,64	15,80	15,80	15,43	15,60
Cr2O3	53,43	53,43	47,01	49,22	49,19	49,19	51,40	53,08
MgO	10,07	10,07	9,88	10,86	11,43	11,43	12,73	12,43
Si (ppm)	563	563	299	360	351	351	500	458
Al	37188	37188	45917	43476	43925	43925	42904	43376
Cr	365487	365487	321562	336685	336483	336483	351576	363040
S	860	873	854	989	818	936	450	410
Ca	<318	<318	<318	<318	900	<318	400	<318
Sc	5,78	5,48	9,1	9,36	7,93	8,58	6,74	7,4
Ti	1565	1542	3010	3200	2678	2948	1942	2050
V	826	839	1556	1675	1413	1568	1076	1138
Mn	1846	1843	1618	1670	1656	1635	1325	1338
Co	244,1	243,5	229	238,8	230	230,2	222,2	229,2
Ni	727	733	900	866	655	870	948	1039
Cu	99,2	98,4	6,31	5,58	8	7,2	3,19	5,02
Zn	847	895	740	713	803	722	782	822
Ga	22,6	22,05	33,1	33,5	28	36,2	29,4	32
Ge	0,499	0,463	0,57	0,57	0,5	0,613	0,78	0,54
As	0,817	8,5	5	0,96	7,1	1,06	<0,261	<0,261
Sr	0,098	0,096	0,149	0,092	0,096	0,07	0,139	0,023
Y	<0,013	<0,013	0,043	0,016	0,0144	<0,013	0,051	0,014
Zr	0,63	0,61	1,02	0,83	0,63	0,74	<0,489	0,7
Mo	0,205	0,154	<0,144	<0,144	0,176	0,152	<0,144	0,23
Ru (ppb)	338	335	184	116	59	154	150	200
Rh	16,4	14,3	22,3	10,2	13,4	17,7	30	20
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	100	600
In	17,5	30	60	18,9	22,6	52	27	11
Sn	163	205	1100	310	420	540	220	230
Sb	<44	55	<44	<44	130	<44	<44	60
Hf	23,5	23	20	<8	19,6	17,5	26	<8
Ta	<4	5,6	<4	<4	16	<4	<4	<4
Os	<15	<15	<15	<15	<15	<15	21	22
Ir	17,7	14	<9	<9	<9	16	<9	<9
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	Ax43{AX4-A}.D	Ax43{AX4-B}.D	Ax43{AX4-C}.D	Ax43{AX5-A}.D	Ax43{AX5-B}.D	AX33-C.D	AX33-B.D	AX33-A.D
UTM X	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513711,2869	513697,8975	513697,8975	513697,8975
UTM Y	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5389283,652	5388954,706	5388954,706	5388954,706
Coupes	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	Pyroxène flow	SP	SP	SP
Lithologies	px spfx	px spfx	px spfx	px spfx	px spfx	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf
Cr#	69,703	67,622	69,063	63,567	69,357	68,945	72,262	69,425
Fe2+#	37,844	37,061	36,494	34,930	38,825	75,559	77,222	76,335
Fe3+/R3+	6,415	7,671	6,888	6,961	5,285	0,000	0,000	0,000
Ni/Ti	0,501	0,456	0,475	0,485	0,502	0,057	0,053	0,114
Ni/Cr	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000
Ni/Mn	0,784	0,765	0,797	0,833	0,783	0,016	0,014	0,040
SiO2 (% poids)	0,09	0,08	0,08	0,07	0,10	0,09	0,06	0,10
Al2O3	15,03	15,73	15,38	18,17	15,34	15,67	14,18	15,67
Cr2O3	51,56	48,97	51,18	47,26	51,74	51,86	55,08	53,03
MgO	13,28	13,38	13,63	14,12	13,02	7,51	7,11	7,44
Si (ppm)	439	378	388	308	481	420	290	472
Al	41795	43727	42751	50510	42631	43565	39426	43554
Cr	352670	334941	350037	323231	353902	354743	376713	362718
S	320	730	<244	740	500	446	389	324
Ca	<318	360	720	380	510	<318	<318	<318
Sc	8,4	8,37	8,4	7,82	8,63	1,75	1,35	5,84
Ti	2086	2260	2220	2199	2035	1656	1553	1520
V	1120	1238	1166	1174	1104	1923	1992	1721
Mn	1335	1347	1322	1279	1304	5830	5913	4347
Co	222,8	229,7	222	210,8	212,9	397,8	400,1	353,3
Ni	1046	1031	1054	1066	1021	95,1	81,8	173,4
Cu	3,61	5,75	3,74	4,09	4,12	1,13	1,03	0,686
Zn	690	809	810	707	779	26000	23500	14750
Ga	31,4	33,8	30	32,3	30,9	3,82	3,68	23,71
Ge	0,26	0,5	0,75	0,61	0,7	0,821	0,686	0,615
As	<0,261	0,3	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261	<0,261
Sr	0,125	0,06	0,33	0,049	0,27	0,038	0,026	0,051
Y	0,1	0,017	0,11	<0,013	0,04	<0,013	<0,013	<0,013
Zr	<0,489	0,68	0,8	0,73	<0,489	0,87	0,76	0,62
Mo	0,51	<0,144	0,18	0,4	0,49	0,524	0,548	0,311
Ru (ppb)	430	224	280	200	300	16	29	<70
Rh	50	15	15	40	70	1,8	0,04	<12
Pd	900	<79	400	600	<79	<79	<79	<79
In	33	31	17	16	17	<10	<10	<10
Sn	<55	490	219	138	730	190	175	214
Sb	<44	<44	600	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	<8	16	35	<8	22	<8	<8	<8
Ta	<4	7,1	<4	<4	7	<4	<4	<4
Os	<15	33	18	50	60	<15	<15	<15
Ir	27	20	20	90	<9	<9	<9	<9
Pt	<31	70	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	AX33-D.D	AX18-B.D	AX18-A.D	AX18-C.D	AX18-D.D	MH40-A.D	MH40-F.D	MGH167A2.D
UTM X	513697,8975	513857,0202	513857,0202	513857,0202	513857,0202	513869,5597	513869,5597	513869,5597
UTM Y	5388954,706	5389461,19	5389461,19	5389461,19	5389461,19	5389469,253	5389469,253	5389469,253
Coupes	SP	MP	MP	MP	MP	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf
Cr#	69,950	73,744	74,518	74,518	74,518	73,970	69,793	71,715
Fe2+#	76,310	55,585	57,345	57,345	57,345	57,649	53,174	55,699
Fe3+/R3+	0,000	6,035	6,435	6,435	6,435	3,999	4,219	3,613
Ni/Ti	0,064	0,205	0,310	0,170	0,248	0,354	0,244	0,181
Ni/Cr	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
Ni/Mn	0,019	0,172	0,212	0,181	0,154	0,197	0,207	0,248
SiO2 (% poids)	0,08	0,11	0,12	0,12	0,12	0,10	0,08	0,06
Al2O3	15,25	12,47	12,09	12,09	12,09	12,79	15,19	13,92
Cr2O3	52,92	52,19	52,72	52,72	52,72	54,16	52,31	52,61
MgO	7,35	8,98	8,62	8,62	8,62	8,66	9,90	9,18
Si (ppm)	396	518	582	582	582	481	378	262
Al	42395	34653	33623	33623	33623	35545	42220	38695
Cr	361944	356959	360618	360618	360618	370475	357773	359832
S	553	939	800	630	808	1560	1220	1690
Ca	<318	<318	800	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	3,88	6,04	3,48	4,52	3,38	4,32	3,39	4,65
Ti	1565	1778	1517	2390	1429	1463	1980	3342
V	1775	991	765	1004	715	836	1045	2351
Mn	5183	2117	2215	2240	2302	2627	2333	2447
Co	403	190	196	181	192	241,2	239,7	210,4
Ni	99,4	365	470	406	355	518	483	606
Cu	1,05	1,04	1,05	0,622	0,97	3,3	0,96	13,4
Zn	25890	1204	3300	2750	3170	2507	1921	2414
Ga	10,56	24,3	20,5	26,33	20,06	28,3	33,7	47,8
Ge	0,819	0,407	0,324	0,278	0,415	0,46	0,48	0,723
As	<0,261	0,89	0,74	0,702	0,707	<0,261	0,5	6,4
Sr	<0,019	0,086	0,086	0,135	0,077	0,048	0,089	0,157
Y	<0,013	0,0137	0,0137	0,026	<0,013	0,031	0,024	0,08
Zr	0,7	0,6	<0,489	1	<0,489	0,68	<0,489	1,168
Mo	0,468	0,176	0,157	<0,144	0,18	0,39	0,19	0,211
Ru (ppb)	28	357	237	275	301	264	249	7,1
Rh	0,02	11,2	14,1	7,9	13,2	23	21	4,7
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	<10	19,7	45,7	53	44,3	47	18	69
Sn	250	216	146	217	131	177	95	199
Sb	<44	60	<44	<44	<44	<44	<44	300
Hf	8,8	13,5	16,6	10,5	<8	21	37	15
Ta	<4	<4	<4	10	<4	<4	<4	<4
Os	<15	<15	26	16	34	<15	<15	<15
Ir	<9	14,3	11,6	<9	11,6	<9	<9	<9
Pt	<31	<31	80	30	<31	50	<31	<31



Échantillons	MGH167C1.D	MGH167C2.D	MH145-1.D	MH145-3.D	MH136-1.D	MH136-2.D	MH136-3.D	MH136-4.D
UTM X	513869,5597	513869,5597	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315
UTM Y	5389469,253	5389469,253	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf
Cr#	71,061	71,061	70,002	70,002	71,611	71,611	71,611	71,611
Fe2+#	54,799	54,799	41,301	41,301	49,832	49,832	49,832	49,832
Fe3+/R3+	4,059	4,059	4,230	4,230	4,527	4,527	4,527	4,527
Ni/Ti	0,145	0,149	0,286	0,209	0,152	0,142	0,158	0,089
Ni/Cr	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ni/Mn	0,130	0,137	0,265	0,218	0,127	0,121	0,135	0,116
SiO2 (% poids)	0,06	0,06	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10
Al2O3	14,26	14,26	15,15	15,15	14,04	14,04	14,04	14,04
Cr2O3	52,20	52,20	52,71	52,71	52,81	52,81	52,81	52,81
MgO	9,45	9,45	12,48	12,48	10,42	10,42	10,42	10,42
Si (ppm)	268	268	365	365	451	451	451	451
Al	39645	39645	42125	42125	39044	39044	39044	39044
Cr	357048	357048	360532	360532	361226	361226	361226	361226
S	1182	1081	779	920	815	809	869	910
Ca	400	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	3,15	4,96	7,76	7,16	4,345	4,09	5,19	5,82
Ti	2467	2382	1655	1724	1787	1915	1801	2870
V	1672	1632	875	902	1018	1334	965	1281
Mn	2750	2601	1786	1652	2136	2254	2100	2203
Co	213,6	203,1	149,4	155,1	182,5	191,9	182,9	193,7
Ni	357	356	473,1	360	270,9	272,7	284	255,2
Cu	34	2,9	0,459	0,378	0,552	0,631	0,574	0,84
Zn	1901	2374	685	900	1499	1977	1337	1212
Ga	35,2	34,6	26,8	30,1	28,9	25,66	29,72	27,6
Ge	0,578	0,543	0,43	0,52	0,509	0,525	0,565	1,113
As	1,11	1,027	0,72	0,65	0,689	0,689	0,77	0,92
Sr	0,111	0,077	0,023	0,034	0,038	0,0229	0,051	0,051
Y	0,0167	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,021
Zr	0,805	0,76	<0,489	<0,489	0,59	<0,489	0,64	0,6
Mo	0,252	0,211	<0,144	0,176	0,145	<0,144	<0,144	<0,144
Ru (ppb)	19,6	1,5	270	213	21	<70	232	100
Rh	6,8	0,9	12	5,8	2	3	14,1	60
Pd	<79	100	<79	<79	<79	80	<79	<79
In	27,1	53,6	90	13	19,6	29,4	12,4	14,7
Sn	176	161	108	113	121	69	112	104
Sb	63	<44	72	<44	90	70	<44	<44
Hf	10	16,3	<8	24,2	21,9	12,6	19,7	26
Ta	<4	<4	4	<4	<4	<4	<4	5,5
Os	<15	<15	19	22	<15	<15	21	70
Ir	<9	<9	25	<9	<9	<9	<9	50
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	100	70

Échantillons	MH47-AX.D	MH47-AY.D	MH47-Z.D	MH47-EB.D	MH47-F.D	MH172-A.D	MH172-B.D	MH172-C.D
UTM X	513772,689	513772,689	513772,689	513772,689	513772,689	513772,689	513772,689	513772,689
UTM Y	5389415,041	5389415,041	5389415,041	5389415,041	5389415,041	5389415,041	5389415,041	5389415,041
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf	ol C + sulf
Cr#	72,051	72,051	72,051	72,051	72,051	73,622	70,691	72,761
Fe2+#	50,273	50,273	50,273	50,273	50,273	49,798	49,992	57,140
Fe3+/R3+	4,217	4,217	4,217	4,217	4,217	4,242	4,951	6,042
Ni/Ti	0,285	0,329	0,399	0,241	0,471	0,204	0,166	0,064
Ni/Cr	0,002	0,002	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001
Ni/Mn	0,320	0,426	0,398	0,242	0,540	0,174	0,177	0,251
SiO2 (% poids)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,10	0,27	0,12
Al2O3	14,02	14,02	14,02	14,02	14,02	13,14	14,56	13,14
Cr2O3	53,86	53,86	53,86	53,86	53,86	54,68	52,33	52,32
MgO	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,46	10,58	8,84
Si (ppm)	593	593	593	593	593	472	1280	570
Al	38964	38964	38964	38964	38964	36538	40466	36526
Cr	368398	368398	368398	368398	368398	374025	357965	357862
S	922	659	690	1070	839	830	630	380
Ca	2410	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	13,44	13,2	14,12	8,49	11,02	4,95	4,81	4,25
Ti	2031	2270	1803	1662	2123	1636	1918	6840
V	1060	1032	977	895	1172	1097	1228	1363
Mn	1811	1750	1807	1659	1853	1920	1807	1759
Co	183,6	189	169,9	131,4	200	241	225,9	175,3
Ni	579	746	720	401	1000	334	319	441
Cu	0,307	0,26	0,33	1,06	0,504	1,29	1,07	0,82
Zn	1490	1300	1230	2360	1289	1410	1355	1722
Ga	39	32,4	34,6	31	35,57	35,9	36,2	43
Ge	0,675	0,568	0,301	0,37	0,69	0,57	0,46	0,244
As	1,3	0,54	0,67	0,71	1,19	<0,261	<0,261	0,5
Sr	0,167	0,037	0,081	0,03	0,038	0,061	<0,019	0,3
Y	0,303	0,019	0,075	<0,013	<0,013	<0,013	0,1	0,44
Zr	1,39	0,67	1,2	0,81	0,72	<0,489	0,74	10,2
Mo	<0,144	0,29	0,24	<0,144	<0,144	0,2	0,23	0,23
Ru (ppb)	319	355	240	192	390	414	278	124
Rh	13,6	13,6	22	23	18,1	10,5	80	12
Pd	<79	<79	179	<79	<79	<79	<79	<79
In	20,3	21,6	50	53	16,6	22,5	23	60
Sn	141	85	105	144	124	156	218	913
Sb	80	90	85	<44	<44	<44	104	<44
Hf	30	23	35	15	31	8,2	10	329
Ta	<4	6,7	100	<4	<4	<4	<4	8,7
Os	24	29	<15	37	20	22	28	<15
Ir	17	22	80	12	17	22,4	29	15
Pt	<31	<31	13	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH172-D.D	MH172-E.D	AX29-E.D	AX29-A.D	AX29-CS.D	AX26-C1.D	AX26-C2.D	AX26-B1.D
UTM X	513772,689	513772,689	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975	513697,8975
UTM Y	5389415,041	5389415,041	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706	5388954,706
Coupes	Stripped area	Stripped area	SP	SP	SP	SP	SP	SP
Lithologies	ol C + sulf	ol C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf
Cr#	71,739	72,200	71,603	72,937	71,526	70,611	72,671	71,399
Fe2+#	52,469	52,329	48,109	61,210	55,240	49,965	39,908	47,145
Fe3+/R3+	5,139	5,090	4,714	3,083	3,944	3,128	3,026	3,045
Ni/Ti	0,151	0,090	0,540	0,441	0,591	0,018	0,019	0,425
Ni/Cr	0,001	0,001	0,003	0,002	0,003	0,000	0,000	0,002
Ni/Mn	0,172	0,230	0,613	0,384	0,543	0,033	0,030	0,397
SiO2 (% poids)	0,10	0,15	0,55	0,15	0,26	0,09	0,14	0,09
Al2O3	14,05	13,72	13,78	13,23	13,99	14,82	14,13	14,51
Cr2O3	53,18	53,13	51,80	53,16	52,37	53,06	55,99	54,01
MgO	10,05	9,98	10,58	7,85	9,18	10,68	12,83	11,29
Si (ppm)	481	701	2559	677	1195	402	630	414
Al	39070	38150	38311	36785	38880	41186	39268	40344
Cr	363751	363401	354312	363608	358203	362937	382972	369396
S	690	780	760	1110	1460	716	760	840
Ca	<318	<318	900	<318	<318	380	500	<318
Sc	5,74	4,34	6,64	4,64	6,7	8,15	9,16	7,25
Ti	1990	4870	1979	1510	1519	3260	2973	1634
V	1218	1229	1144	727	805	3010	2689	870
Mn	1740	1899	1744	1735	1653	1840	1888	1747
Co	212,9	200,3	243,7	206,3	204	100,1	99,7	154,6
Ni	299,8	437	1069	666	898	60,2	56,9	694
Cu	0,77	3,9	4,71	2,69	3,87	0,323	0,274	0,59
Zn	1391	2053	1066	1310	940	1510	1167	957
Ga	40,4	48,9	31,2	19,5	21,9	30,2	30	19,6
Ge	0,43	0,41	0,67	0,49	0,29	0,91	0,95	0,39
As	<0,261	1	0,7	0,9	<0,261	0,73	1,01	0,96
Sr	0,09	0,034	0,063	0,36	0,071	0,093	0,166	0,05
Y	0,017	0,025	0,102	0,13	0,028	0,028	0,078	0,039
Zr	1,13	4,51	1,07	<0,489	<0,489	1,45	1,16	0,67
Mo	0,8	0,29	<0,144	<0,144	0,29	0,245	0,207	<0,144
Ru (ppb)	280	193	380	130	370	<70	<70	299
Rh	17	3,5	35	11	22	<12	<12	12,1
Pd	<79	<79	<79	1000	<79	<79	<79	<79
In	39	64	21,7	36	21	11,5	15,9	10,3
Sn	190	744	192	<55	144	212	206	170
Sb	48	<44	<44	160	<44	<44	<44	<44
Hf	9,8	167	10,2	90	<8	22	<8	19,1
Ta	<4	6,5	7	<4	<4	6,6	<4	<4
Os	41	<15	<15	40	<15	<15	<15	<15
Ir	<9	<9	15,6	<9	30	<9	<9	14,2
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH159-A.D	MH159-C1.D	MH159-C2.D	MGH140A1.D	MGH140A2.D	MGH140B2.D	MGH140C.D	MH133A.D
UTM X	513869,5597	513869,5597	513869,5597	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315
UTM Y	5389469,253	5389469,253	5389469,253	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area
Lithologies	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	ol+px C + sulf	sulf mass	sulf mass	sulf mass	sulf mass	sulf mass
Cr#	73,630	73,231	71,684	97,687	97,687	97,687	97,687	97,687
Fe2+#	64,393	64,166	64,560	65,809	65,809	65,809	65,809	65,809
Fe3+/R3+	4,786	3,230	5,020	13,819	13,819	13,819	13,819	13,819
Ni/Ti	0,358	0,413	0,158	0,032	0,035	0,034	0,039	0,102
Ni/Cr	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ni/Mn	0,294	0,352	0,400	0,061	0,062	0,071	0,058	0,112
SiO2 (% poids)	0,12	0,14	0,14	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Al2O3	12,72	13,09	13,61	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Cr2O3	52,95	53,38	51,35	56,56	56,56	56,56	56,56	56,56
MgO	7,19	7,22	7,18	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
Si (ppm)	560	658	630	448	448	448	448	448
Al	35367	36390	37830	2497	2497	2497	2497	2497
Cr	362192	365119	351255	386840	386840	386840	386840	386840
S	1120	1210	920	989	763	1198	990	707
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	328	500	<318
Sc	3,07	3,28	3,25	13,43	10,25	15,85	12,3	3,72
Ti	1558	1519	4060	11240	9270	11970	9390	5020
V	818	815	1317	3010	2720	3185	3080	3120
Mn	1896	1783	1604	5870	5270	5770	6270	4560
Co	275	273,7	251	182,3	161	194,9	183,8	207,5
Ni	557	628	642	361	327	409	364	510
Cu	4,39	5,36	3,19	4,4	1,07	43,4	5,7	32,9
Zn	1910	2198	1838	1975	2240	1964	2200	1232
Ga	23,7	23,6	32,5	43,6	38	46,4	41,2	37,8
Ge	0,485	0,56	0,48	2,9	2,64	2,76	2,18	1,97
As	<0,261	0,3	<0,261	0,876	0,911	6,42	0,674	0,53
Sr	0,102	0,055	0,185	0,189	0,322	0,41	0,196	0,155
Y	0,021	<0,013	0,094	0,0232	0,0227	0,0244	0,0183	<0,013
Zr	0,73	0,85	1,44	4,83	4,22	5,24	4,41	2,25
Mo	0,2	0,23	0,207	0,576	0,557	0,6	0,497	0,265
Ru (ppb)	284	295	310	1,8	2	1,9	7	<70
Rh	12,8	21	21,5	0,36	<12	5,7	2,2	5,3
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	80
In	12,4	15,4	10,9	78,3	70,8	78,2	108	54,8
Sn	175	182	214	199	377	186	187	204
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	19,8	21,8	25,5	149	126	167	153	61
Ta	<4	<4	<4	9,2	6,8	8,2	6,7	<4
Os	<15	19,4	21,8	<15	<15	<15	<15	<15
Ir	23	15,8	12,1	<9	<9	<9	<9	<9
Pt	<31	100	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	MH131G.D	MH131H.D	MH131I.D	MH131-1.D	MH131-2.D	AV2T-1.D	AV2T-A2.D	AV2T-B2.D
UTM X	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	513905,7315	512453,36	512453,36	512453,36
UTM Y	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5389489,651	5384048,84	5384048,84	5384048,84
Coupes	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Stripped area	Hart	Hart	Hart
Lithologies	sulf mass	sulf mass	sulf mass	sulf mass	sulf mass	alt	alt	alt
Cr#	96,398	97,341	99,568	96,203	96,203	74,067	74,067	74,346
Fe2+#	79,456	83,863	72,496	76,887	76,887	91,631	91,631	96,489
Fe3+/R3+	13,037	24,897	13,997	10,292	10,292	4,517	4,517	6,448
Ni/Ti	0,095	0,113	0,071	0,071	0,060	0,548	0,433	0,504
Ni/Cr	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,003
Ni/Mn	0,107	0,120	0,126	0,095	0,111	0,088	0,063	0,078
SiO2 (% poids)	0,02	0,01	0,05	0,05	0,05	0,12	0,12	0,14
Al2O3	1,45	0,90	0,17	1,57	1,57	12,04	12,04	11,56
Cr2O3	57,73	49,17	58,38	59,18	59,18	51,25	51,25	49,95
MgO	3,92	3,01	5,36	4,47	4,47	1,54	1,54	0,64
Si (ppm)	98	28	210	224	224	544	544	658
Al	4023	2505	473	4356	4356	33467	33467	32145
Cr	394887	336330	399326	404789	404789	350569	350569	341679
S	710	1050	582	477	317	795	596	791
Ca	<318	1283	<318	1650	<318	<318	<318	<318
Sc	3,875	3,439	8,66	4,26	5,69	6,06	3,73	5,36
Ti	5221	5240	7180	4440	5290	1778	1163	1787
V	3266	3277	3648	1987	2213	928	802	832
Mn	4640	4940	4060	3330	2860	11060	7950	11570
Co	273,2	282,2	263,8	180,5	189,5	361	275	421
Ni	497	593	512,3	316	318	975	504	901
Cu	9,9	6,2	0,78	31	1,19	1,91	0,318	1,18
Zn	1613	1787	1239	1362	903	16760	13200	18000
Ga	42,26	44	44,2	25,41	25	22,11	12,5	18,44
Ge	1,873	2,18	2,49	1,42	1,379	0,481	0,312	0,62
As	0,503	0,578	0,602	<0,261	<0,261	0,91	0,37	0,59
Sr	0,08	0,101	0,077	0,139	0,072	0,062	0,074	0,111
Y	<0,013	0,021	<0,013	0,173	0,0195	0,0177	0,058	0,0737
Zr	2,26	2,33	2,7	2,37	1,79	<0,489	<0,489	0,57
Mo	0,231	0,248	0,22	0,179	0,172	0,471	0,39	0,53
Ru (ppb)	13	<70	21	19	15	392	215	368
Rh	<12	2,1	1,6	4,5	4,1	27,2	14,1	22,3
Pd	80	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	26,6	47,3	28,7	47	31,9	<10	<10	<10
Sn	158	318	144	201	98	77	103	122
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44	46	82
Hf	60,8	73,1	84,9	79	58	13,4	14,6	24
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	5	<4	<4
Os	<15	<15	<15	<15	<15	52	35	62
Ir	<9	<9	<9	<9	<9	24	18	23
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31	<31

Échantillons	AV17T-1.D	AV17T-2.D	AV17T-3.D	AV17T-4.D	AV7T-1.D	AV7T-2.D	AV7T-3.D	AV12T-1.D
UTM X	512425,59	512425,59	512425,59	512425,59	512900,8	512900,8	512900,8	512425,59
UTM Y	5383881,04	5383881,04	5383881,04	5383881,04	5383887,5	5383887,5	5383887,5	5383881,04
Coupes	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart
Lithologies	alt	alt	alt	alt	alt	alt	alt	alt
Cr#	75,154	75,154	75,154	75,154	75,405	75,405	75,405	72,007
Fe2+#	64,518	64,518	64,518	64,518	85,464	85,464	85,464	43,849
Fe3+/R3+	3,117	3,117	3,117	3,117	3,395	3,395	3,395	5,129
Ni/Ti	0,604	0,432	0,633	0,640	0,859	0,888	0,812	0,832
Ni/Cr	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004
Ni/Mn	0,059	0,041	0,064	0,073	0,254	0,258	0,253	0,953
SiO2 (% poids)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,15
Al2O3	12,19	12,19	12,19	12,19	11,73	11,73	11,73	13,97
Cr2O3	54,96	54,96	54,96	54,96	53,62	53,62	53,62	53,55
MgO	6,68	6,68	6,68	6,68	2,79	2,79	2,79	11,76
Si (ppm)	580	580	580	580	576	576	576	687
Al	33886	33886	33886	33886	32616	32616	32616	38824
Cr	375939	375939	375939	375939	366759	366759	366759	366284
S	556	801	822	792	825	769	752	844
Ca	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	6,32	4,97	6,84	6,15	6,15	6,04	6,1	7,99
Ti	1590	1466	1643	1592	1386	1394	1447	1946
V	635	593	658	633	632	614	671	896
Mn	16340	15470	16200	13980	4680	4800	4650	1700
Co	1059	1436	1069	1182	324	371	362	243
Ni	960	633	1040	1019	1190	1238	1175	1620
Cu	4,63	4,28	2,14	4	4,19	4,31	4,02	8,69
Zn	14500	17890	13990	13180	10470	13100	12750	750
Ga	20,54	14,49	20,85	17,94	20,54	20,06	20,51	29,4
Ge	0,562	0,438	0,559	0,467	0,468	0,501	0,502	0,642
As	0,69	0,887	0,8	1,4	0,73	0,59	0,6	0,83
Sr	0,091	0,0367	0,105	0,043	0,029	0,036	<0,019	0,0363
Y	0,028	0,0264	0,0154	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013
Zr	<0,489	<0,489	0,51	0,52	0,53	0,73	<0,489	<0,489
Mo	0,705	0,619	0,687	0,633	0,192	0,267	0,204	<0,144
Ru (ppb)	321	270	323	222	290	294	316	392
Rh	17,2	8,3	4,4	6,8	18,7	20,2	24,9	19,8
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	17,7
Sn	122	114	119	115	87	66	89	109
Sb	<44	48	<44	<44	<44	<44	<44	90
Hf	19,9	29,9	31,5	24,6	14,5	19,3	23,6	23,1
Ta	<4	<4	<4	<4	<4	9	<4	<4
Os	35	21	27,9	24,8	27,9	31	23,2	25,3
Ir	41	26	15,4	12,5	<9	14	20	24,6
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31	90	<31

Échantillons	AV12T-2.D	AV12T-3.D	AV12T-4.D	AV12T-5.D	AV3T-A.D	AV3T-C.D	AV3T-B.D	AV3T-D.D
UTM X	512425,59	512425,59	512425,59	512425,59	512453,36	512453,36	512453,36	512453,36
UTM Y	5383881,04	5383881,04	5383881,04	5383881,04	5384048,84	5384048,84	5384048,84	5384048,84
Coupes	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart
Lithologies	alt	alt	alt	alt	alt	alt	alt	alt
Cr#	72,007	72,007	72,007	72,007	73,523	73,560	74,940	74,010
Fe2+#	43,849	43,849	43,849	43,849	93,628	93,421	95,213	94,202
Fe3+/R3+	5,129	5,129	5,129	5,129	3,123	3,679	3,384	3,654
Ni/Ti	0,857	0,741	0,712	0,767	0,708	0,724	0,649	0,778
Ni/Cr	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004
Ni/Mn	0,844	0,492	0,942	0,333	0,101	0,103	0,079	0,104
SiO2 (% poids)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,11	0,12	0,12
Al2O3	13,97	13,97	13,97	13,97	12,30	12,31	11,65	12,27
Cr2O3	53,55	53,55	53,55	53,55	50,93	51,07	51,93	52,10
MgO	11,76	11,76	11,76	11,76	1,15	1,21	0,86	1,07
Si (ppm)	687	687	687	687	630	509	579	579
Al	38824	38824	38824	38824	34205	34230	32387	34122
Cr	366284	366284	366284	366284	348375	349291	355222	356371
S	796	659	716	598	867	860	970	880
Ca	<318	<318	<318	<318	330	<318	<318	<318
Sc	7,5	6,9	8,52	5,93	6,93	6,79	6,51	6,83
Ti	1890	1739	2146	1473	1761	1690	1572	1624
V	868	832	1033	657	885	864	742	785
Mn	1920	2620	1624	3397	12290	11920	12850	12100
Co	229	202	230	200,2	363	357,2	381	360,5
Ni	1620	1288	1529	1130	1246	1224	1020	1264
Cu	8,76	6,33	8,18	5,5	4,31	3,8	2,31	3,56
Zn	829	953	695	2640	10190	7400	11100	7600
Ga	30,3	24	31,2	19,8	25,65	22,9	19,49	22,8
Ge	0,584	0,474	0,666	0,454	0,532	0,408	0,49	0,39
As	0,89	0,605	0,7	0,577	0,58	0,53	0,57	<0,261
Sr	0,054	0,0315	0,043	0,0318	0,035	0,038	0,074	0,044
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	0,015	0,065	0,02
Zr	0,66	0,5	0,66	0,502	<0,489	0,69	1,03	0,64
Mo	<0,144	<0,144	0,167	0,195	0,522	0,53	0,72	0,752
Ru (ppb)	385	341	406	288	304	377	406	434
Rh	22,8	22,9	32,4	14,9	25,6	39	11	37
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79	<79
In	11,6	11,9	20,1	<10	<10	<10	<10	<10
Sn	123	103	108	92	81	153	174	127
Sb	<44	<44	44	<44	<44	<44	62	<44
Hf	22,4	15,4	23,8	16,2	16,7	11	22	35
Ta	<4	8	8	8	<4	6,9	<4	<4
Os	20,8	<15	17,5	<15	<15	<15	29	25
Ir	15,4	11,1	29,6	15,9	13	49	40	11
Pt	<31	<31	<31	<31	100	<31	<31	<31

Échantillons	AV3T-F.D	AV8T-1.D	AV8T-2.D	AV8T-3.D	AV8T-4.D	AV8T-5.D
UTM X	512453,36	512900,8	512900,8	512900,8	512900,8	512900,8
UTM Y	5384048,84	5383887,5	5383887,5	5383887,5	5383887,5	5383887,5
Coupes	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart	Hart
Lithologies	alt	alt + sulf	alt + sulf	alt + sulf	alt + sulf	alt + sulf
Cr#	74,091	73,047	73,047	73,047	73,047	73,047
Fe2+#	94,124	75,251	75,251	75,251	75,251	75,251
Fe3+/R3+	3,377	4,613	4,613	4,613	4,613	4,613
Ni/Ti	0,706	0,301	0,318	0,322	0,325	0,335
Ni/Cr	0,003	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
Ni/Mn	0,092	0,223	0,223	0,295	0,240	0,292
SiO2 (% poids)	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Al2O3	12,11	12,75	12,75	12,75	12,75	12,75
Cr2O3	51,61	51,51	51,51	51,51	51,51	51,51
MgO	1,07	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88
Si (ppm)	589	533	533	533	533	533
Al	33657	35448	35448	35448	35448	35448
Cr	353018	352350	352350	352350	352350	352350
S	1086	1100	999	887	1003	950
Ca	700	<318	<318	<318	<318	<318
Sc	6,88	8,43	8,57	6,86	8,92	6,69
Ti	1644	1655	1602	1437	1829	1650
V	859	763	711	705	949	845
Mn	12570	2233	2283	1565	2472	1890
Co	354,7	265,8	260,3	250,1	277,7	285,3
Ni	1161	498	510	462	593,6	552
Cu	3,43	0,586	0,648	0,505	0,596	0,587
Zn	13200	1810	3140	3760	1810	4290
Ga	24	23,74	23,67	20,04	26,92	26,43
Ge	0,602	0,477	0,502	0,457	0,557	0,518
As	1,08	0,93	0,983	0,79	0,84	0,77
Sr	0,071	0,031	0,048	0,0294	0,041	0,037
Y	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013	<0,013
Zr	<0,489	<0,489	0,49	<0,489	0,81	<0,489
Mo	0,53	<0,144	<0,144	<0,144	<0,144	<0,144
Ru (ppb)	258	90	15	20	17	40
Rh	4,9	3,8	3,7	4,9	3,2	1,9
Pd	<79	<79	<79	<79	<79	100
In	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sn	115	116	137	99	138	104
Sb	<44	<44	<44	<44	<44	<44
Hf	26	28,1	20,2	18,2	30	16,7
Ta	<4	7	<4	<4	<4	<4
Os	<15	<15	<15	<15	<15	<15
Ir	10	<9	<9	<9	<9	<9
Pt	<31	<31	<31	<31	<31	<31



## **ANNEXE 2 : Analyses sur roche totale (éléments majeurs)**

Les coordonnées UTM et les lithologies sont identiques à celles présentées en annexe 1.

Abréviations : LD = limite de détection, Élts = élément, n.d = non disponible.

Élts Unités LD	SiO2 %poids 0.01	Al2O3 %poids 0.01	Fe2O3(T) %poids 0.01	MnO %poids 0.001	MgO %poids 0.01	CaO %poids 0.01	Na2O %poids 0.01	K2O %poids 0.01	TiO2 %poids 0.01	P2O5 %poids 0.01	Cr2O3 %poids 0.01	V2O5 %poids 0.003	LOI %poids	Total %poids 0.01
AX1	25,12	1,46	49,28	0,06	23,66	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,08	< 0,01	0,31	0,02	13,60	99,99
AX4	27,80	2,42	45,11	0,10	21,11	2,92	< 0,01	0,02	0,12	< 0,01	0,39	0,02	12,49	100,01
AX5	34,23	2,67	31,16	0,17	27,88	3,09	< 0,01	< 0,01	0,14	0,01	0,64	0,02	12,98	100,00
AX18	43,52	4,38	11,73	0,22	35,34	4,44	< 0,01	0,07	0,19	0,01	0,08	0,02	11,42	100,00
AX19	46,09	8,72	12,88	0,23	22,95	8,12	0,03	0,06	0,42	0,02	0,44	0,04	5,45	100,01
AX20	45,30	6,44	11,45	0,17	29,22	6,60	< 0,01	0,04	0,30	0,02	0,39	0,03	8,32	99,97
AX22	44,16	6,66	12,07	0,16	30,02	6,13	< 0,01	0,02	0,32	0,02	0,40	0,03	11,19	100,00
AX21	45,20	6,09	11,12	0,17	31,00	5,55	0,10	0,07	0,30	0,02	0,36	0,03	7,97	100,00
AX23	44,60	5,84	9,80	0,18	30,19	8,74	< 0,01	< 0,01	0,28	0,01	0,34	0,03	8,17	100,00
AX24	44,90	6,17	11,36	0,18	30,70	5,87	0,05	0,08	0,28	0,01	0,38	0,02	6,78	100,00
AX29	42,90	6,44	19,59	0,16	21,68	8,38	< 0,01	0,02	0,31	0,02	0,55	0,03	8,02	100,08
AX43	47,00	11,16	11,91	0,21	12,45	16,66	< 0,01	< 0,01	0,53	0,03	0,13	0,04	3,03	100,13
AX48	43,30	3,86	10,87	0,16	37,06	4,07	< 0,01	0,01	0,19	0,01	0,56	0,02	7,05	100,13
AX56	44,28	5,64	14,43	0,20	29,58	5,15	< 0,01	0,02	0,27	0,02	0,42	0,03	6,63	100,05
AX57	45,21	7,67	13,04	0,17	25,79	7,28	< 0,01	0,03	0,37	0,02	0,46	0,03	8,57	100,08
AX58	43,14	4,28	13,14	0,16	34,97	3,19	< 0,01	0,03	0,21	0,01	0,96	0,02	9,21	100,13
AX59A	44,19	3,49	9,63	0,13	39,65	2,57	< 0,01	< 0,01	0,20	0,01	0,29	0,02	12,40	100,17
AX62	47,78	9,67	12,69	0,23	17,46	10,82	0,31	0,09	0,52	0,03	0,34	0,04	3,92	100,00
AX63	43,10	4,58	12,33	0,18	34,24	4,32	< 0,01	0,04	0,23	0,01	0,92	0,02	5,55	99,97
AX64	43,98	4,94	12,60	0,20	32,75	4,79	< 0,01	0,02	0,24	0,02	0,53	0,02	6,57	100,08
AX65	44,10	5,59	9,97	0,22	30,90	8,46	< 0,01	< 0,01	0,27	0,01	0,60	0,03	9,22	100,15
02MGH-40	29,79	1,81	41,31	0,13	23,51	3,44	< 0,01	0,01	0,07	< 0,01	n.d	n.d	13,18	100,07
02-MGH-042	45,94	9,76	12,72	0,16	20,59	9,10	0,71	0,17	0,45	0,03	0,37	n.d	3,95	100,00
02-MGH-043	45,66	10,56	12,76	0,16	19,67	9,56	0,54	0,17	0,47	0,03	0,42	n.d	3,99	100,00
02-MGH-044	44,99	10,56	13,66	0,20	19,51	10,09	0,03	0,10	0,46	0,03	0,36	n.d	4,92	100,00
02-MGH-047	40,32	4,67	16,42	0,12	34,93	3,04	0,00	0,01	0,19	0,02	0,27	n.d	10,73	100,00
02MGH-133	8,82	0,02	67	0,01	0,55	0,14	< 0,02	< 0,01	< 0,01	0,002	n.d	n.d	16,77	-
02MGH-136	27,81	1,59	43,52	0,08	26,91	0,06	< 0,01	< 0,01	0,10	< 0,01	n.d	n.d	13,99	100,07
02MGH-137	46,01	4,92	6,53	0,25	36,42	5,63	< 0,01	0,01	0,28	0,02	n.d	n.d	10,82	100,07
02MGH-140	0,46	0,58	71,18	0,023	0,21	0,187	< 0,02	< 0,01	0,03	< 0,002	n.d	n.d	17,45	-
02MGH-145	27,56	1,18	44,78	0,07	26,31	0,06	< 0,01	< 0,01	0,07	< 0,01	n.d	n.d	13,92	100,05
02MGH-146	46,44	4,91	5,64	0,25	36,97	5,55	< 0,01	0,01	0,29	0,01	n.d	n.d	11,08	100,07
02MGH-148	46,14	4,30	5,91	0,23	38,88	4,31	< 0,01	0,06	0,24	0,01	n.d	n.d	11,80	100,07
02MGH-155	46,36	4,87	6,47	0,22	35,89	5,95	< 0,01	0,01	0,27	0,02	n.d	n.d	10,69	100,07
02MGH-157	43,17	3,26	11,51	0,18	39,76	1,93	< 0,01	0,06	0,17	0,01	n.d	n.d	12,18	100,06
02MGH-158	44,39	3,06	9,03	0,21	41,67	1,50	< 0,01	0,05	0,16	0,01	n.d	n.d	13,07	100,08
02MGH-159	44,60	8,29	13,18	0,23	23,48	9,33	0,41	0,04	0,42	0,01	n.d	n.d	6,27	99,99
02MGH-164	44,36	3,12	8,77	0,21	41,52	1,89	< 0,01	0,02	0,18	0,01	n.d	n.d	12,27	100,08
02MGH-165	43,32	2,72	11,24	0,21	41,20	1,25	< 0,01	0,01	0,15	0,01	n.d	n.d	13,32	100,10
02MGH-167	23,18	1,73	53,10	0,17	20,12	1,66	< 0,01	0,01	0,11	< 0,01	n.d	n.d	12,08	100,06
AV2T (JMA)	45,13	9,32	13,31	0,20	23,74	7,29	0,05	0,04	0,45	0,03	0,41	0,04	5,99	100,01
AV3T (JMB)	52,49	5,22	11,04	0,08	30,31	0,28	< 0,01	< 0,01	0,25	0,01	0,29	0,02	6,82	100,00
AV7T (JMC)	48,43	2,87	8,26	0,13	31,60	8,29	< 0,01	< 0,01	0,17	< 0,01	0,24	0,01	13,98	100,00
AV12T (JME)	53,67	4,99	9,11	0,07	30,03	1,58	< 0,01	< 0,01	0,25	0,01	0,27	0,02	6,65	100,00
AV17T (JMF)	42,83	2,43	10,21	0,14	43,57	0,23	< 0,01	< 0,01	0,13	< 0,01	0,44	0,01	13,47	99,98
AV8T (JMD)	41,68	3,53	14,84	0,14	37,67	1,56	< 0,01	< 0,01	0,18	0,01	0,38	0,02	18,01	99,99

### **ANNEXE 3 : Analyses sur roche totale (éléments traces)**

Les coordonnées UTM et les lithologies sont identiques à celles présentées en annexe 1.

Abréviations : LD = limite de détection, Élts = élément, n.d = non disponible.

Élts Unités LD	Ba ppm 0,80	Be ppm 0,04	Bi ppm 0,15	Cd ppm 0,01	Ce ppm 0,12	Co ppm 0,13	Cr ppm 3,00	Cs ppm 0,01	Cu ppm 1,40	Dy ppm 0,01	Er ppm 0,01	Eu ppm 0,00	Ga ppm 0,04
AX1	1,70	<0,04	<0,15	0,05	0,68	>187	1753,00	0,05	1059,30	0,27	0,19	0,07	1,76
AX4	1,90	0,04	<0,15	0,54	0,91	>187	2360,00	0,11	1121,60	0,51	0,31	0,10	2,72
AX5	2,50	0,06	0,25	1,03	1,47	>187	3996,00	0,14	1091,60	0,63	0,40	0,12	3,62
AX18	2,40	0,08	<0,15	0,56	1,48	>187	605,00	0,22	738,90	0,82	0,52	0,16	3,98
AX19	16,10	0,13	<0,15	0,06	2,61	92,59	3211,00	0,86	40,40	1,83	1,17	0,37	8,78
AX20	4,70	0,11	<0,15	0,05	1,92	109,94	2782,00	0,61	56,70	1,25	0,82	0,27	6,71
AX22	3,30	0,09	<0,15	0,12	1,38	106,67	2765,00	1,93	44,40	1,20	0,80	0,20	6,51
AX21	11,20	0,10	<0,15	0,05	1,81	106,97	2539,00	0,61	47,70	1,19	0,79	0,25	6,27
AX23	2,40	0,11	<0,15	0,03	1,82	99,97	2375,00	0,17	17,00	1,17	0,75	0,23	5,98
AX24	2,50	0,10	<0,15	0,04	1,82	100,76	2407,00	0,17	16,70	1,15	0,73	0,22	5,95
AX29	5,10	0,11	<0,15	0,34	2,30	>187	3826,00	0,26	463,10	1,31	0,84	0,27	7,13
AX43	6,40	0,20	<0,15	0,16	3,88	101,96	999,00	0,09	66,50	2,33	1,51	0,52	11,29
AX48	7,40	0,09	<0,15	0,21	1,78	129,20	4149,00	0,19	43,60	0,81	0,52	0,17	4,18
AX56	6,20	0,12	<0,15	0,22	1,89	140,32	3099,00	0,72	49,70	1,16	0,76	0,23	6,26
AX57	2,40	0,10	<0,15	0,16	2,17	110,08	3010,00	0,79	99,60	1,53	0,98	0,23	7,46
AX58	2,30	0,04	<0,15	0,26	1,08	130,69	6569,55	0,38	15,80	0,80	0,51	0,16	4,67
AX59A	1,80	0,05	<0,15	0,14	1,29	102,68	1889,00	0,28	8,70	0,72	0,45	0,15	3,67
AX62	22,30	0,13	<0,15	0,10	3,54	99,06	2466,00	0,46	38,70	2,22	1,47	0,44	10,71
AX63	7,10	0,11	<0,15	0,09	1,61	145,00	6263,08	0,15	35,30	0,92	0,59	0,20	5,30
AX64	8,40	0,10	<0,15	0,07	1,66	139,65	3700,00	0,27	33,70	0,94	0,61	0,20	5,26
AX65	3,90	0,07	<0,15	0,05	1,76	112,14	4090,00	0,36	13,90	1,07	0,70	0,22	5,62
02MGH-40	n.d	n.d	0,57	1,49	n.d	437,00	1737,00	n.d	1588,00	n.d	n.d	n.d	n.d
02-MGH-042	8,70	n.d	n.d	n.d	3,25	80,10	2518,30	0,38	78,20	1,82	1,18	0,38	14,00
02-MGH-043	7,70	n.d	n.d	n.d	2,65	98,30	2484,40	0,41	70,90	1,80	1,18	0,37	12,40
02-MGH-044	11,60	n.d	n.d	n.d	2,75	88,90	2531,10	0,47	65,70	1,89	1,27	0,43	12,10
02-MGH-047	3,00	n.d	n.d	n.d	n.d	172,10	1490,00	n.d	320,30	n.d	n.d	n.d	6,10
02MGH-133	<0,8	<0,04	0,36	0,361	<0,12	>187	552	<0,013	1987,9	0,012	<0,007	0,0073	0,74
02MGH-136	n.d	n.d	0,07	0,03	n.d	522,00	3419,00	n.d	1372,00	n.d	n.d	n.d	n.d
02MGH-137	<0,8	0,10	<0,15	0,02	1,16	138,43	1882,00	0,19	22,40	0,82	0,53	0,12	4,81
02MGH-140	<0,8	0,05	0,26	0,097	<0,12	>187	>4500	<0,013	1634,6	<0,009	<0,007	0,0119	2,91
02MGH-145	n.d	n.d	0,10	2,26	n.d	586,00	2532,00	n.d	3379,00	n.d	n.d	n.d	n.d
02MGH-146	1,40	0,11	<0,15	0,74	1,19	88,32	1814,00	0,18	193,10	0,91	0,59	0,14	4,23
02MGH-148	1,40	0,13	<0,15	0,04	1,04	93,65	2041,00	0,12	4,30	0,81	0,52	0,16	3,79
02MGH-155	<0,8	0,11	<0,15	0,03	1,28	93,12	1819,00	0,17	21,30	0,89	0,58	0,17	4,70
02MGH-157	1,30	0,06	<0,15	0,03	0,73	113,50	2033,00	0,11	2,00	0,59	0,38	0,13	3,43
02MGH-158	1,10	0,06	<0,15	0,02	0,73	121,42	2133,00	0,08	<1,4	0,50	0,35	0,11	2,97
02MGH-159	2,80	0,10	<0,15	0,25	2,09	139,67	3299,00	0,96	111,30	1,51	1,00	0,37	8,61
02MGH-164	1,30	0,11	<0,15	0,03	0,80	131,90	2040,00	0,07	2,40	0,59	0,39	0,15	3,23
02MGH-165	<0,8	0,07	<0,15	0,02	0,80	139,50	4888,00	0,02	3,30	0,53	0,35	0,11	2,84
02MGH-167	n.d	n.d	0,10	0,89	n.d	460,00	9239,00	n.d	3081,00	n.d	n.d	n.d	n.d
AV2T (JMA)	4,80	0,21	<0,15	0,09	2,86	114,22	2775,00	0,42	115,70	1,85	1,16	0,29	10,42
AV3T (JMB)	2,60	0,17	<0,15	0,02	0,80	183,01	2116,00	0,27	81,60	0,42	0,29	0,03	6,48
AV7T (JMC)	1,30	0,14	<0,15	0,06	0,89	95,37	1502,00	0,15	15,40	0,56	0,37	0,15	3,49
AV12T (JME)	1,10	0,08	<0,15	0,04	0,82	85,11	2128,00	0,19	42,00	0,64	0,49	0,02	6,07
AV17T (JMF)	1,10	0,05	<0,15	<0,013	0,79	143,64	3076,00	0,22	4,10	0,47	0,31	0,10	2,96
AV8T (JMD)	1,40	0,12	0,16	0,05	1,17	>187	2377,00	0,09	406,70	0,63	0,39	0,10	3,59

Élts	Gd	Hf	Ho	In	La	Li	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr
Unités	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
LD	0,01	0,14	0,00	0,00	0,04	0,40	0,00	0,08	0,03	0,06	1,60	0,60	0,01
AX1	0,22	<0,14	0,06	0,19	0,29	1,10	0,03	0,48	0,12	0,45	9300,00	1,70	0,09
AX4	0,40	0,17	0,11	0,11	0,31	3,50	0,05	0,53	0,14	0,77	21500,00	3,70	0,14
AX5	0,50	0,24	0,14	0,20	0,64	3,80	0,06	0,46	0,30	1,03	18500,00	3,40	0,22
AX18	0,66	0,31	0,18	0,06	0,58	5,50	0,08	0,24	0,25	1,25	5400,00	1,60	0,24
AX19	1,41	0,68	0,40	0,03	0,98	8,90	0,18	0,43	0,66	2,49	886,00	<0,6	0,42
AX20	1,01	0,51	0,27	0,02	0,74	7,30	0,12	0,52	0,47	1,71	1590,20	<0,6	0,32
AX22	0,90	0,42	0,26	0,03	0,47	20,90	0,11	0,16	0,33	1,44	1528,70	<0,6	0,24
AX21	0,94	0,46	0,26	0,02	0,65	3,40	0,11	0,38	0,48	1,67	1707,90	<0,6	0,30
AX23	0,91	0,47	0,25	0,02	0,70	3,40	0,11	0,30	0,44	1,67	1826,70	<0,6	0,30
AX24	0,89	0,47	0,25	0,02	0,70	3,40	0,11	0,30	0,46	1,63	1840,40	<0,6	0,31
AX29	1,03	0,50	0,28	0,07	0,90	15,75	0,12	0,79	0,45	1,89	2666,60	1,45	0,36
AX43	1,87	0,90	0,50	0,04	1,42	4,50	0,21	0,20	0,94	3,46	293,90	1,00	0,63
AX48	0,64	0,35	0,18	0,02	0,70	1,70	0,08	0,18	0,43	1,40	2086,00	2,00	0,27
AX56	0,91	0,44	0,25	0,02	0,77	6,50	0,11	0,18	0,40	1,68	1167,50	<0,6	0,31
AX57	1,21	0,59	0,33	0,03	0,80	23,30	0,14	0,13	0,49	2,04	1271,90	<0,6	0,37
AX58	0,60	0,33	0,17	0,02	0,38	1,70	0,07	0,11	0,23	0,99	1701,30	<0,6	0,18
AX59A	0,55	0,30	0,15	0,01	0,50	1,40	0,07	0,09	0,27	1,05	2180,70	<0,6	0,21
AX62	1,77	0,89	0,49	0,04	1,34	10,40	0,21	0,16	0,95	3,28	667,60	<0,6	0,61
AX63	0,72	0,38	0,20	0,02	0,60	2,30	0,09	0,12	0,39	1,37	1536,90	<0,6	0,26
AX64	0,75	0,39	0,20	0,02	0,66	2,90	0,09	0,14	0,41	1,44	1341,70	0,80	0,26
AX65	0,85	0,39	0,23	0,02	0,73	4,50	0,10	0,13	0,36	1,53	1613,20	0,60	0,28
02MGH-40	n.d	n.d	n.d	0,21	n.d	n.d	n.d	0,52	n.d	n.d	21377,00	4,60	n.d
02-MGH-042	1,47	0,70	0,39	n.d	1,08	n.d	0,17	n.d	0,60	2,57	690,30	6,80	0,47
02-MGH-043	1,41	0,70	0,40	n.d	0,98	n.d	0,18	n.d	0,70	2,58	1489,40	(1)	0,45
02-MGH-044	1,53	0,80	0,41	n.d	1,00	n.d	0,19	n.d	0,70	2,57	692,60	(2)	0,47
02-MGH-047	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	2743,30	(1)	n.d
02MGH-133	0,01	<0,14	<0,0025	0,1621	<0,04	<0,4	<0,002	0,13	<0,028	<0,06	>4100	3,9	<0,014
02MGH-136	n.d	n.d	n.d	0,15	n.d	n.d	n.d	0,23	n.d	n.d	17508,00	1,80	n.d
02MGH-137	0,63	0,37	0,18	0,02	0,40	6,70	0,08	0,10	0,29	1,08	2336,00	<0,6	0,20
02MGH-140	0,013	<0,14	<0,0025	0,1544	0,04	<0,4	<0,002	0,2	0,032	0,07	>4100	4,5	0,02
02MGH-145	n.d	n.d	n.d	0,16	n.d	n.d	n.d	0,21	n.d	n.d	21494,00	2,70	n.d
02MGH-146	0,70	0,34	0,19	0,06	0,41	6,00	0,09	0,10	0,28	1,19	2312,90	<0,6	0,20
02MGH-148	0,63	0,31	0,18	0,02	0,35	5,70	0,08	<0,08	0,19	1,04	2142,10	<0,6	0,19
02MGH-155	0,73	0,35	0,20	0,02	0,44	6,40	0,09	0,33	0,28	1,20	2115,80	<0,6	0,21
02MGH-157	0,46	0,24	0,13	0,02	0,26	3,70	0,06	0,10	0,15	0,71	2372,10	<0,6	0,13
02MGH-158	0,39	0,24	0,12	0,02	0,26	3,00	0,05	0,18	0,13	0,69	2486,50	<0,6	0,12
02MGH-159	1,17	0,57	0,33	0,05	0,68	18,20	0,14	0,25	0,46	2,08	1398,10	1,00	0,35
02MGH-164	0,46	0,25	0,13	0,02	0,29	2,90	0,06	0,59	0,18	0,82	2632,50	<0,6	0,13
02MGH-165	0,43	0,22	0,12	0,01	0,31	1,30	0,05	0,18	0,19	0,76	2565,30	<0,6	0,13
02MGH-167	n.d	n.d	n.d	0,15	n.d	n.d	n.d	0,62	n.d	n.d	21428,00	2,50	n.d
AV2T (JMA)	1,38	0,73	0,40	0,04	1,06	1,20	0,16	0,17	0,69	2,52	1107,60	0,90	0,45
AV3T (JMB)	0,29	0,40	0,09	0,02	0,35	2,20	0,04	0,09	0,40	0,54	1824,10	1,40	0,11
AV7T (JMC)	0,42	0,22	0,12	0,01	0,35	2,10	0,05	0,24	0,19	0,69	1885,20	1,40	0,14
AV12T (JME)	0,40	0,42	0,16	0,02	0,37	1,50	0,08	0,09	0,37	0,61	1709,70	<0,6	0,12
AV17T (JMF)	0,36	0,20	0,10	0,01	0,29	<0,4	0,05	0,21	0,24	0,63	2775,90	<0,6	0,12
AV8T (JMD)	0,49	0,29	0,14	0,03	0,47	0,50	0,05	0,11	0,23	0,99	>4100	1,60	0,18

Élts Unités LD	Rb ppm 0,23	Sb ppm 0,04	Sc ppm 1,10	Sm ppm 0,01	Sn ppm 0,16	Sr ppm 0,60	Ta ppm 0,02	Tb ppm 0,00	Th ppm 0,02	Ti ppm 7,00	Tl ppm 0,01	Tm ppm 0,00	U ppm 0,01
AX1	0,42	0,04	7,00	0,16	0,50	1,10	<0,023	0,04	0,09	406,00	0,34	0,03	0,65
AX4	0,67	0,04	11,00	0,28	0,19	1,70	<0,023	0,07	0,05	632,00	0,21	0,05	0,04
AX5	0,83	0,07	13,40	0,37	0,62	2,60	<0,023	0,09	0,19	764,00	0,31	0,06	0,72
AX18	1,90	0,05	19,80	0,45	0,55	2,60	<0,023	0,12	0,05	1230,00	0,43	0,08	0,06
AX19	4,57	0,05	38,80	0,96	0,31	23,20	0,04	0,26	0,08	2796,00	0,09	0,17	0,05
AX20	3,16	0,04	28,50	0,69	0,39	9,80	0,03	0,19	0,07	2016,00	0,14	0,12	0,05
AX22	3,11	<0,04	27,50	0,60	0,17	27,90	<0,023	0,17	0,03	1866,00	0,05	0,12	0,03
AX21	4,22	0,04	26,70	0,65	0,22	26,70	0,03	0,17	0,05	1892,00	0,12	0,11	0,06
AX23	0,62	<0,04	24,40	0,64	0,18	3,50	0,03	0,17	0,06	1802,00	0,01	0,11	0,05
AX24	0,64	<0,04	25,10	0,63	0,22	3,60	0,03	0,17	0,06	1820,00	0,01	0,11	0,05
AX29	0,80	0,07	29,20	0,72	0,54	5,20	0,03	0,20	0,41	2046,00	0,13	0,13	0,21
AX43	0,34	0,06	46,00	1,28	0,37	12,50	0,11	0,34	0,12	3607,00	<0,005	0,22	0,04
AX48	0,90	0,07	18,40	0,49	0,87	5,80	0,03	0,12	0,07	1294,00	0,01	0,08	0,05
AX56	2,12	0,04	27,30	0,63	0,28	13,50	0,03	0,17	0,08	1783,00	0,05	0,11	0,06
AX57	2,79	<0,04	31,50	0,81	<0,16	5,50	0,03	0,22	0,06	2261,00	0,12	0,15	0,03
AX58	1,92	<0,04	19,10	0,42	<0,16	5,70	<0,023	0,11	0,03	1181,00	0,01	0,08	0,02
AX59A	0,64	<0,04	16,40	0,39	<0,16	4,30	<0,023	0,10	0,04	1073,00	<0,005	0,07	0,03
AX62	2,21	<0,04	45,80	1,21	0,31	38,80	0,06	0,33	0,10	3510,00	0,02	0,21	0,04
AX63	2,49	<0,04	20,50	0,51	<0,16	16,50	0,04	0,13	0,05	1434,00	0,05	0,09	0,02
AX64	1,41	<0,04	21,70	0,52	<0,16	10,80	0,03	0,14	0,05	1451,00	0,02	0,09	0,03
AX65	1,21	<0,04	23,70	0,58	0,21	8,50	0,02	0,15	0,06	1592,00	0,01	0,10	0,05
02MGH-40	n.d	<0,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	605,00	1,89	n.d	n.d
02-MGH-042	0,68	n.d	n.d	0,96	n.d	12,10	N,D,	0,27	0,08	n.d	n.d	0,17	0,03
02-MGH-043	0,83	n.d	n.d	0,97	n.d	9,50	N,D,	0,27	0,08	n.d	n.d	0,18	0,02
02-MGH-044	1,78	n.d	n.d	0,98	n.d	20,40	N,D,	0,28	0,07	n.d	n.d	0,19	0,03
02-MGH-047	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
02MGH-133	<0,23	<0,04	<1,1	0,013	0,38	<0,6	<0,023	0,0025	<0,018	27	0,3	<0,0019	<0,011
02MGH-136	n.d	<0,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	691,00	0,93	n.d	n.d
02MGH-137	0,70	<0,04	16,60	0,44	0,55	1,70	<0,023	0,12	0,03	1483,00	0,13	0,08	<0,011
02MGH-140	<0,23	<0,04	<1,1	0,016	0,6	<0,6	<0,023	0,0024	<0,018	139	0,214	<0,0019	<0,011
02MGH-145	n.d	<0,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	552,00	1,19	n.d	n.d
02MGH-146	0,54	<0,04	20,80	0,49	0,72	2,00	<0,023	0,14	0,04	1412,00	0,32	0,09	0,01
02MGH-148	0,94	<0,04	16,90	0,44	0,19	2,40	<0,023	0,12	0,03	1073,00	0,03	0,07	<0,011
02MGH-155	0,39	<0,04	16,90	0,46	0,54	2,00	<0,023	0,13	0,03	1240,00	0,16	0,09	0,01
02MGH-157	1,15	<0,04	15,20	0,31	0,18	1,90	<0,023	0,08	0,03	832,00	0,03	0,06	<0,011
02MGH-158	0,76	<0,04	12,60	0,27	<0,16	2,50	<0,023	0,07	0,02	714,00	<0,005	0,05	<0,011
02MGH-159	1,36	0,04	31,10	0,79	0,29	8,80	<0,023	0,22	0,06	2240,00	0,06	0,14	0,01
02MGH-164	0,72	<0,04	16,90	0,31	0,21	2,40	<0,023	0,09	0,04	858,00	0,03	0,06	0,01
02MGH-165	<0,23	<0,04	13,40	0,29	<0,16	1,80	<0,023	0,08	0,03	761,00	<0,005	0,05	0,01
02MGH-167	n.d	<0,06	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	727,00	0,82	n.d	n.d
AV2T (JMA)	1,04	0,17	35,00	0,94	0,36	15,30	0,17	0,26	0,10	2890,00	0,02	0,17	0,05
AV3T (JMB)	0,30	0,10	15,70	0,20	0,20	3,10	0,06	0,06	0,04	1651,00	<0,005	0,04	0,03
AV7T (JMC)	0,23	0,06	13,00	0,28	<0,16	141,70	0,04	0,09	0,04	869,00	<0,005	0,05	0,02
AV12T (JME)	0,31	0,07	17,00	0,23	0,21	12,90	0,04	0,09	0,03	1608,00	0,01	0,08	0,03
AV17T (JMF)	0,35	0,54	13,20	0,26	0,19	3,70	0,12	0,07	0,03	767,00	<0,005	0,05	0,02
AV8T (JMD)	0,23	0,17	12,40	0,36	0,22	53,80	0,05	0,09	0,03	1016,00	0,45	0,06	0,02

Élts Unités LD	V ppm 0,80	W ppm 0,05	Y ppm 0,05	Yb ppm 0,01	Zn ppm 7,00	Zr ppm 6,00
AX1	68,60	4,58	1,56	0,18	24,00	<6
AX4	74,90	8,39	2,86	0,31	37,00	6,00
AX5	82,80	0,27	3,43	0,37	51,00	9,00
AX18	98,60	0,09	4,61	0,50	110,00	10,00
AX19	199,70	0,13	10,26	1,12	79,00	23,00
AX20	151,10	0,20	7,25	0,78	61,00	18,00
AX22	147,10	0,10	6,83	0,76	66,00	14,00
AX21	143,60	0,18	6,81	0,73	60,00	15,00
AX23	128,30	0,16	6,54	0,72	58,00	16,00
AX24	128,80	0,15	6,62	0,71	59,00	16,00
AX29	158,90	0,44	7,46	0,82	86,50	17,00
AX43	232,30	>141	13,11	1,44	63,00	32,00
AX48	100,90	38,88	4,53	0,49	75,00	13,00
AX56	144,20	14,47	6,53	0,73	72,00	15,00
AX57	168,80	8,23	8,86	0,93	54,00	20,00
AX58	109,90	12,64	4,53	0,51	56,00	11,00
AX59A	89,10	8,32	4,09	0,46	48,00	11,00
AX62	235,10	39,87	13,03	1,41	76,00	31,00
AX63	120,30	94,05	5,22	0,57	68,00	14,00
AX64	119,70	23,77	5,54	0,61	66,00	14,00
AX65	127,50	19,55	6,11	0,65	46,00	13,00
02MGH-40	40,00	n.d	n.d	n.d	253,00	n.d
02-MGH-042	182,00	n.d	9,91	1,13	112,40	24,40
02-MGH-043	179,80	n.d	10,51	1,15	66,30	24,90
02-MGH-044	172,60	n.d	11,12	1,22	84,10	25,70
02-MGH-047	80,70	n.d	n.d	n.d	39,70	n.d
02MGH-133	33,7	<0,05	0,05	<0,009	48	<6
02MGH-136	61,00	n.d	n.d	n.d	16,00	n.d
02MGH-137	114,90	<0,05	4,81	0,55	30,00	13,00
02MGH-140	50,5	<0,05	0,07	<0,009	56	<6
02MGH-145	48,00	n.d	n.d	n.d	572,00	n.d
02MGH-146	113,50	<0,05	5,24	0,59		11,00
02MGH-148	95,30	<0,05	4,45	0,49	36,00	10,00
02MGH-155	102,60	<0,05	5,02	0,56	26,00	12,00
02MGH-157	80,10	<0,05	3,40	0,38	39,00	8,00
02MGH-158	73,00	<0,05	2,91	0,34	41,00	9,00
02MGH-159	177,30	<0,05	8,69	0,95	63,00	19,00
02MGH-164	73,70	<0,05	3,42	0,38	37,00	9,00
02MGH-165	73,80	<0,05	3,13	0,35	51,00	8,00
02MGH-167	84,00	n.d	n.d	n.d	224,00	n.d
AV2T (JMA)	204,50	27,60	10,50	1,10	73,00	25,00
AV3T (JMB)	136,20	10,97	2,34	0,26	59,00	13,00
AV7T (JMC)	77,70	9,38	3,19	0,35	42,00	8,00
AV12T (JME)	117,30	3,63	4,09	0,47	73,00	14,00
AV17T (JMF)	76,80	23,88	2,68	0,29	56,00	7,00
AV8T (JMD)	78,10	9,00	3,46	0,35	57,00	10,00

#### **ANNEXE 4 : Analyses sur roche totale (S et EGP)**

Les coordonnées UTM et les lithologies sont identiques à celles présentées en annexe 1.

Abréviations : LD = limite de détection, Élts = élément, n.d = non disponible.

élts	S	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au
Unités	%poids	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
LD	0,01	0,12	0,08	0,47	0,07	0,03	0,08	0,48
AX1	16,10	33,57	21,52	314,07	<ld	5,55	171,94	42,95
AX4	13,20	60,03	42,11	449,74	2,61	10,36	273,50	23,40
AX5	11,00	28,49	33,76	1327,84	<ld	5,69	611,60	161,73
AX18	1,90	11,33	8,70	253,13	<ld	2,00	105,63	3,04
AX19	0,02	3,91	1,29	10,75	<ld	1,51	10,66	0,48
AX20	0,05	4,08	1,15	6,73	<ld	1,42	8,43	0,48
AX22	0,07	4,80	1,38	8,86	0,63	2,49	9,83	1,25
AX21	0,05	4,75	1,38	9,43	<ld	1,63	8,99	0,48
AX23	0,04	5,60	1,67	10,88	<ld	1,98	13,44	1,46
AX24	0,04	3,98	1,27	8,62	<ld	1,53	8,89	0,56
AX29	3,71	19,19	11,12	121,09	<ld	2,84	56,53	14,14
AX43	0,02	1,98	1,47	12,69	<ld	0,69	14,42	1,57
AX48	0,03	5,92	0,97	4,76	3,93	4,33	5,72	2,93
AX56	0,06	5,70	2,51	13,22	1,45	1,47	15,68	4,09
AX57	0,12	9,50	4,60	42,20	1,14	1,66	24,74	6,62
AX58	0,05	7,33	1,27	6,69	5,09	3,80	7,27	5,07
AX59A	0,05	3,81	2,91	6,77	3,27	3,02	n.d	9,12
AX62	0,04	4,03	1,60	14,32	0,62	1,44	16,33	4,41
AX63	0,06	7,59	1,35	7,49	2,67	2,18	9,84	2,22
AX64	0,06	4,76	1,55	6,85	0,97	0,98	9,44	1,58
AX65	0,07	4,52	0,97	9,78	0,82	1,03	9,89	3,07
02MGH-40	15,30	60,33	47,67	>1000	<ld	9,56	>300	169,29
02-MGH-042	n.d	2,49	1,05	9,17	n.d	0,44	10,3	13,7
02-MGH-043	n.d	3,37	4,55	120	n.d	0,93	58,3	6,49
02-MGH-044	n.d	2,67	1	8,94	n.d	0,43	9,51	2,49
02-MGH-047	n.d	10,1	4,93	45,9	n.d	1,99	22,6	2,03
02MGH-133	35,70	881,70	314,97	>1000	n.d	94,47	>300	26,83
02MGH-136	14,70	50,14	37,75	740,44	<ld	8,77	>300	57,47
02MGH-137	0,19	5,70	1,48	13,30	<ld	1,10	8,34	5,55
02MGH-140	35,40	369,36	177,07	>1000	n.d	44,02	>300	77,01
02MGH-145	16,60	99,87	50,56	527,00	<ld	15,31	184,10	12,75
02MGH-146	0,23	4,46	0,96	10,40	<ld	0,71	6,12	26,40
02MGH-148	0,15	4,26	0,82	4,18	<ld	0,52	4,78	1,44
02MGH-155	0,18	3,81	0,67	2,70	<ld	0,50	3,67	5,29
02MGH-157	0,14	4,78	0,70	3,85	<ld	1,72	4,65	1,60
02MGH-158	0,05	4,67	0,74	5,26	<ld	1,02	4,32	0,86
02MGH-159	1,32	8,60	3,79	35,60	<ld	1,16	21,10	2,22
02MGH-164	0,17	5,36	0,76	4,04	<ld	2,50	4,46	2,18
02MGH-165	0,09	9,51	1,71	10,93	<ld	1,94	6,57	2,62
02MGH-167	17,90	159,74	86,35	664,19	<ld	21,64	>300	94,46
AV2T (JMA)	0,13	4,40	1,49	13,20	0,71	1,04	12,58	0,48
AV3T (JMB)	0,57	9,05	3,53	52,22	1,52	2,59	15,82	0,48
AV7T (JMC)	0,37	3,76	0,62	3,87	4,04	3,04	4,04	0,48
AV12T (JME)	0,12	2,98	0,82	6,63	1,99	1,38	6,40	0,48
AV17T (JMF)	0,09	5,36	0,52	2,81	3,95	3,66	2,59	0,72
AV8T (JMD)	1,99	44,86	17,42	150,89	12,51	10,54	78,44	9,10