

DISTRIBUTION ET COMPARAISON D'ÉLÉMENTS TRACES DANS LA  
MAGNÉTITE CONTENUE DANS DES GRANITES DE TYPES I ET S

Par

Christophe Potvin-Doucet

Mémoire présenté dans le cadre du cours  
Projet de fin d'études  
(6GLG604)

# TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	vi
Remerciements .....	vii
1. Introduction .....	8
2. Provenance des échantillons.....	9
2.1 Granite de type I.....	9
2.2 Provenance des granites de type S .....	10
3. Analyse de la méthode .....	11
3.1 Préparation à l'analyse par LA-ICP-MS et par microsonde.....	11
3.1.1 Analyse pétrographique des lames polies.....	11
3.1.2 Choix des magnétites à analyser .....	11
3.1.3 Choix des éléments à analyser .....	11
3.2 Analyse à la microsonde.....	12
3.3 Analyse par LA-ICP-MS .....	13
3.3.1 Paramétrage du LA-ICP-MS.....	13
3.3.2 Limite de détection .....	13
3.3.3 Moniteur d'ablation.....	13
3.3.4 Matériaux de référence certifiés .....	14
3.3.5 Matériel de référence propre à l'UQAC (BC-28) .....	14
4. Traitement des données.....	15
4.1. Analyse des résultats de LA-ICP-MS avec Igor Pro (Iolite) .....	15
4.2. Critères de sélection des échantillons représentatifs et non-représentatifs.....	16
5. Comparaison des résultats pour les granites de type I et S .....	17
5.1 Granite de type I.....	17
5.1.1 Résultats des analyses des éléments traces pour les granites de type I .....	17
5.2 Granite de type S .....	19
5.1.2 Résultats des analyses des éléments traces pour les granites de type S .....	19
5.3 Différenciation entre les deux types de granites .....	21
6. Comparaison des résultats avec d'autres types de roches .....	23
6.1. Magnétites provenant d'un magma mafique évolué dans une intrusion litée .....	23
6.1.1 Champ moyen de magnétites dans un magma évolué pour une intrusion litée ..	23

6.1.2 Comparaison avec deux échantillons de gabbro-nelsonite de l'intrusion litée de Sept-Îles .....	24
6.2 Magnétites provenant d'un magma primitif dans une intrusion litée.....	25
6.2.1 Champ moyen de magnétites dans un magma primitif pour une intrusion litée .	25
6.2.2 Comparaison avec l'échantillon BC-28 de Bushveld.....	25
6.3 Résultats des comparaisons avec des magnétites provenant d'autres contextes géologiques.....	26
Conclusion.....	28
Références .....	29
Annexes 1 - Résultats à la microsonde en ppm .....	31
Annexes 2 - Résultats au LA-ICP-MS en ppm(les valeurs en rouge sont ceux dont l'écart-type est plus grand que 10%, les valeurs en bleu poudre correspondre à une ilménite) .....	36

### Liste des figures

Figure 1 - Photos en lame mince des différents types de granite I, (A) Magnétite en lumière réfléchiée dans EL264-3 (granodiorite). On note que la magnétite contient des inclusions silicatés mais aucune exsolution, (B) EL404 (métadiorite) en lumière naturelle (Contient des grenats et de l'hornblende). (B) a conservé ces textures ignées..... 9

Figure 2 - Photos en lame mince des différents types de granite S, (A) SL-25 (granite) en lumière naturelle, (B) SL-25 (granite) en lumière polarisé, (C) Présence d'exolutions d'ilménite dans une magnétite d'un granite (SL-25). Ce type d'exsolution est présent dans tous les granites S analysés à différents niveaux d'intensité..... 10

Figure 3 - Spectre d'une analyse par LA-ICP-MS avec le logiciel Iolite dans Igor Pro. Le spectre de Si est en mauve, celui de Ca en vert, celui du Cr en bleu et celui du Fe en brun. On remarque qu'une inclusion silicatée fait augmenter les valeurs de Si et de Ca. De cette façon, on peut exclure ces inclusions du spectre de la magnétite que l'on veut analyser.... 15

Figure 4 - Graphique des éléments traces présents dans les magnétites des granites de type I. Tous les résultats proviennent de l'analyse par LA-ICP-MS sauf pour le Si, Ca, Mg et Al où une valeur moyenne par microsonde à été utilisé pour caractériser toutes les échantillons. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012) ..... 17

Figure 5 - Comparaison d'un élément compatible dans la magnétite (Cr) versus un élément moins compatible (Sc). On note dans le cercle rouge que l'échantillon EL404 contient très peu de Cr et beaucoup de Sc par rapport à la moyenne. .... 18

Figure 6 - Graphique des éléments traces présents dans les magnétites des granites de type S. Tous les résultats proviennent de l'analyse par LA-ICP-MS sauf pour le Si, Ca, Mg et Al où une valeur moyenne par microsonde à été utilisé pour caractériser toutes les échantillons. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012) ..... 19

Figure 7 - À gauche, exsolutions d'hématites circulaires et fréquentes dans SL73E. À droite, fines exsolutions d'ilménite associées aux zones de fracturation de la magnétite dans SL-25..... 20

Figure 8 – Comparaison de la concentration de Ti (ppm) dans une magnétite vs l'enrichissement en Nb (ppm). L'échantillon SL-25 montre des caractéristiques associées habituellement à l'ilménite ou dans notre cas, à la forte présence d'exsolutions d'ilménite. .... 21

Figure 9 - Comparaison des éléments traces dans les magnétites pour les granites I vs les granites S avec les valeurs moyennes. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012) ..... 21

Figure 10 - Comparaison des champs des éléments traces dans les magnétites pour les granites I vs les granites S. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012)..... 22

Figure 11 - Comparaison des valeurs des magnétites dans deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée mafique (Dare *et al.* 2012). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012)..... 23

Figure 12 - Comparaison des valeurs d'éléments traces dans les magnétites de deux types de granite (I et S) vs les valeurs pour les magnétites contenues dans deux gabbro-nelsonites de Sept-Îles (Meric, 2011). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale..... 24

Figure 13 - Comparaison des valeurs des deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée primitive. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. .... 25

Figure 14 - Comparaison des valeurs d'éléments traces dans les magnétites de deux types de granite (I et S) vs les valeurs pour les magnétites contenues dans l'échantillon BC-28 de Bushveld. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. .... 26

Figure 15 - Comparaison des valeurs des deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée primitive (gris) et évoluées (rose). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. .... 27

### **Liste des tableaux**

Tableau 1 - Préférence des éléments traces pour certains oxydes de fer. Les éléments les plus à gauche du tableau sont les éléments les plus compatibles dans les oxydes de fer. Les données sont tirées de Meric (2011). .... 19

## Résumé

La caractérisation géochimique des magnétites a permis de comparer différents échantillons provenant de granites de type I et S entre eux et avec des échantillons provenant de deux intrusions litées mafiques, soit celle de Bushveld, Afrique du Sud et de Sept-Îles, Canada.

Le granite de type I provient de la subprovince d'Opatika dans le Bouclier Canadien. Vingt huit magnétites ont été analysées pour ce type de granite provenant de sept roches différentes. Le granite de type S lui, provient du pluton de Wuluma en Australie. Vingt magnétites ont été analysées pour ce type de granite provenant de sept roches différentes.

La méthode par LA-ICP-MS ainsi que de la méthode par microsonde, deux méthodes qui ont déjà fait leur preuve au niveau de l'analyse des éléments traces présents dans les magnétites, ont été utilisées afin de caractériser les différents éléments traces contenues dans les magnétites.

Point de vue résultats, la confiance obtenue pour les analyses d'éléments traces pour les granites I et S est très satisfaisante. Au niveau de l'homogénéité de ces derniers, les magnétites analysées dans les granites de type I donnaient des résultats plus semblables entre eux que pour ceux des granites S. La présence d'exsolutions d'ilménite dans les granites de type S a été avancé comme hypothèse afin d'expliquer ces écarts de résultats à l'intérieur même de ces granites.

Au niveau de la comparaison des résultats obtenues pour les granites I vs les granites S, on peut voir une tendance plus prononcée des granites I pour les éléments compatibles dans les magnétites (Cr, Ni, Co) alors que les granites S eux, sont plus riches en éléments traces de tous les autres éléments. Seul V et Zn sont presque identiques dans les deux types de granites.

La comparaison des deux différents granites avec des magnétites provenant d'intrusions litées ont permis d'affirmer que les éléments traces dans les magnétites des granites suivent un tracé plus près du champ attribuable à une magnétite issue d'un contexte magmatique mafique évolué. Par contre, la différence entre ce contexte évolué mafique et le contexte évolué felsique de nos granites se perçoit que par l'appauvrissement en Ti, Mg, Mn et Al et l'enrichissement marqué en Y. Dans le cas du granite I, on peut aussi noter l'appauvrissement en Zr et Hf.

## **Remerciements**

Je voudrais remercier Edward W. Sawyer de m'avoir proposé ce projet et de l'avoir financé. Un merci particulier aussi à Sarah Dare qui m'a beaucoup aidé pour ce qui attrait à l'analyse de mes données de LA-ICP-MS et de microsonde. Merci aussi à toute l'équipe du LabMaTer en particulier à Sadia Mehdi et à Dany Savard pour tout ce qui attrait à l'utilisation du LA-ICP-MS. Finalement, un grand merci à Marc Choquette qui s'occupe du laboratoire de microsonde à l'Université Laval.

# 1. Introduction

La magnétite est un minéral très répandu qui se retrouve dans plusieurs environnements géologiques et parfois associé avec des gîtes minéraux. Malgré toute son importance, la géochimie de cet oxyde de fer est très peu étudiée, surtout dans le cas de contexte granitique. Pourtant, on sait qu'elle est capable d'incorporer des éléments mineurs et traces propres de son milieu géologique et donc, qu'elle peut nous permettre de différencier certains contextes géologiques en l'étudiant (Dupuis et Beaudoin 2011).

Le principal objectif de cette étude est de tenter de comprendre les différences entre les éléments traces contenues dans les magnétites de granite de type I et S selon la nomenclature de Chappell et White (1976). La comparaison entre les deux types de granite sera poussé plus loin en comparant aussi nos résultats avec des échantillons provenant des intrusions litées mafiques de Bushveld et de Sept-Îles.

La méthode par LA-ICP-MS ainsi que de la méthode par microsonde, deux méthodes qui ont déjà fait leur preuve au niveau de l'analyse des éléments traces présents dans les magnétites, ont été utilisées afin de caractériser les différents éléments traces contenues dans les magnétites.

Cette étude sur l'analyse de la distribution des éléments traces dans la magnétite pour des granites de type I et S va dans le même sens que plusieurs études menées par la chaire de recherche Divex qui étudie les oxydes de fer comme nouvel outil d'exploration minière (Gosselin, *et al.* 2006, Rabayrol et Barnes 2009, Dare, *et al.* 2011, Dupuis et Beaudoin 2011, Meric 2011). Par contre, aucun des échantillons sélectionnés dans la présente étude ne contenait de minéralisation à caractère économique.

Cet étude permet donc de comprendre plus de chose du point de vue scientifique sur la géochimie des magnétites et permet d'obtenir des données qui pourront éventuellement être comparé avec des gisements contenues dans des granitoïdes comme les gisements de type Cu-Mo porphyrique ou W-Sn porphyrique par exemple.



## 2. Provenance des échantillons

### 2.1 Granite de type I

Les granites de type I analysés proviennent de la subprovince d'Opatika dans le Bouclier Canadien. Ils sont le résultat d'une anatexie (2,74 à 2,71 Ga) d'un orthogneiss leucogranodioritique et leucotonalitique (Sawyer, 2009). Les 7 échantillons se divisent en 5 granodiorite, 1 tonalite et 1 métadiorite. Les principaux minéraux rencontrés sont le quartz, le plagioclase, le feldspath potassique, la biotite, la chlorite, la titanite, l'apatite, le zircon, l'épidote, la magnétite et  $\pm$  la hornblende et le grenat (dans EL404). La magnétite ne présente en aucun cas des exsolutions d'ilménite. Aucune minéralisation en sulfure n'est présente. Les principales textures observées en lame mince sont des textures typiques des roches ignées. Les échantillons se ressemblent tous du point de vue minéralogique à l'exception de EL404 (métadiorite) qui est le seul qui contient de la hornblende verte ainsi que du grenat (Fig. 1).

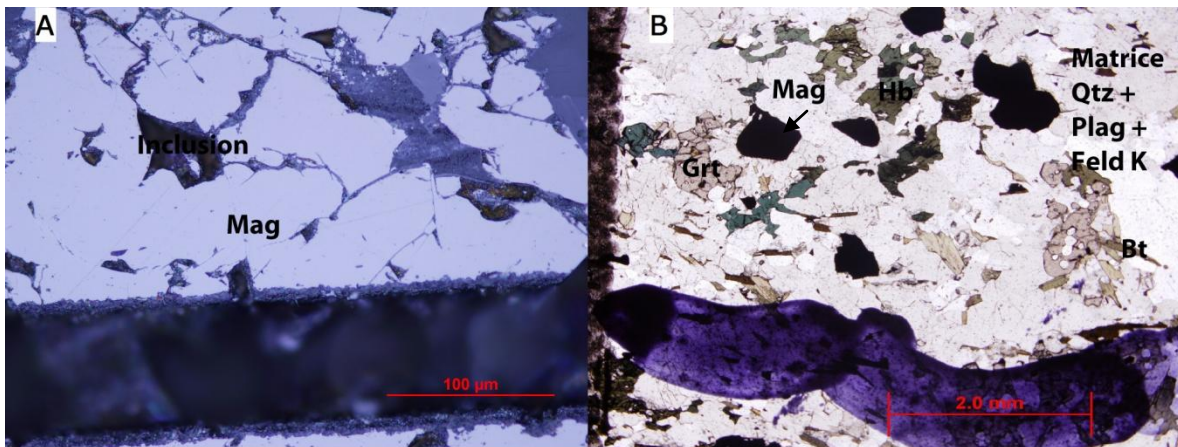


Figure 1 - Photos en lame mince des différents types de granite I, (A) Magnétite en lumière réfléchi dans EL264-3 (granodiorite). On note que la magnétite contient des inclusions silicatés mais aucune exsolution, (B) EL404 (métadiorite) en lumière naturelle (Contient des grenats et de l'hornblende). (B) a conservé ces textures ignées

## 2.2 Provenance des granites de type S

Les granites de type S analysés proviennent du pluton de Wuluma qui est localisé au sud du complexe métamorphique de Strangways qui fait partie de la province d'Aileron dans la partie méridionale du Craton Nord Australien (Lavaure et Sawyer, 2011). Le pluton de Wuluma s'est formé il y a de cela 1,73 à 1,69 Ga durant un épisode de métamorphisme qui a formé des roches de faciès granulitique et l'emplacement de plutons granitiques, comme le pluton de Wuluma dans notre cas (Lavaure et Sawyer, 2011). L'étude en lame mince de 7 échantillons de ce pluton nous ont donné 6 roches de type granite et une un peu plus intermédiaire que l'on peut classer de granodiorite. Les principaux minéraux rencontrés sont le quartz, le plagioclase, le feldspath potassique, la biotite, le grenat, la chlorite, le zircon, la magnétite et l'ilménite. La magnétite présente dans certains cas des exsolutions d'ilménite contrairement au granite de type I d'Opatca. L'ilménite se présente aussi sous forme granulaire. La différenciation en lame mince des grains d'ilménites vs magnétites est bien importante dans ce cas étant donné que les deux phases sont présentes et que cette étude se concentre seulement sur l'analyse des magnétites. Aucune minéralisation en sulfure n'est présente. (Fig. 2)

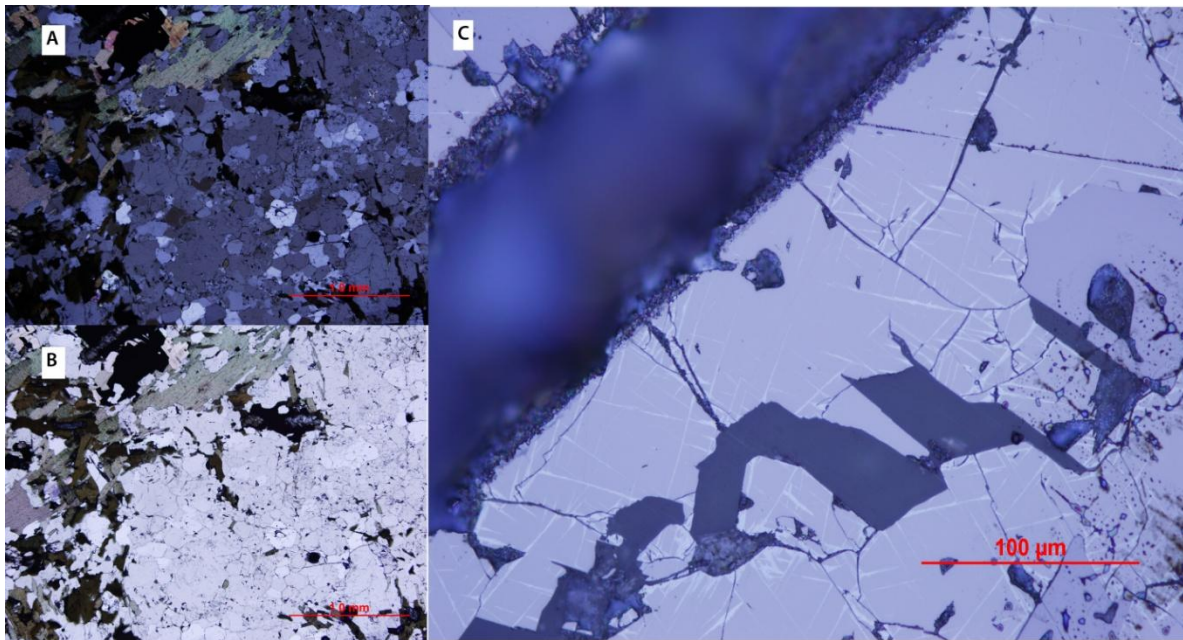


Figure 2 - Photos en lame mince des différents types de granite S, (A) SL-25 (granite) en lumière naturelle, (B) SL-25 (granite) en lumière polarisé, (C) Présence d'exsolutions d'ilménite dans une magnétite d'un granite (SL-25). Ce type d'exsolution est présent dans tous les granites S analysés à différents niveaux d'intensité.

## 3. Analyse de la méthode

### 3.1 Préparation à l'analyse par LA-ICP-MS et par microsonde

#### 3.1.1 Analyse pétrographique des lames polies

L'analyse pétrographique des échantillons s'est fait principalement en lames minces. Des échantillons macroscopiques n'étaient pas disponibles pour observation. Les échantillons choisis ont déjà fait l'objet d'étude soit par Sawyer (1998,2009) pour les granites de type I et par Lavaure et Sawyer (2011) pour les granites de type S.

La principale raison de l'analyse pétrographique en lame mince fut d'observer de plus près les magnétites dans les roches au niveau du pourcentage contenu dans la lame, de la présence ou non d'exsolutions et au niveau de la contamination par des inclusions silicatées.

L'analyse pétrographique à aussi permis de quantifier grossièrement le pourcentage de chaque minéral afin de pouvoir donner un nom à la roche. Une attention particulière à été porté à la présence ou non d'autres oxydes de fer dans la roche.

#### 3.1.2 Choix des magnétites à analyser

L'objectif de départ était d'analyser 5 magnétites par lame pour chacune des 14 lames pour un total de 70 analyses de magnétite. Les magnétites furent choisies selon 2 critères soit : la pureté de la magnétite ainsi que la taille du grain.

Le premier critère de pureté permet d'exclure les magnétites qui contiennent trop d'exsolutions et/ou d'inclusions silicatées.

Le deuxième critère de taille est uniquement dicté par le diamètre du faisceau du laser utilisé lors des tests avec le LA-ICP-MS. Dans notre cas, nous avons choisi un faisceau laser de 75  $\mu\text{m}$  et par conséquent, la largeur arbitraire minimale d'une magnétite a été fixée à 100  $\mu\text{m}$ .

#### 3.1.3 Choix des éléments à analyser

Il est important avant de choisir la liste d'éléments à analyser de bien comprendre les lois qui régissent les substitutions à l'intérieur d'une magnétite (Rabayrol et Barnes 2009). Trois règles régissent la façon dont ce fait ces substitutions :

1. La taille de l'élément qui tente de substituer Fe doit être équivalente ou presque ( $\pm 15\%$ ).
2. L'élément doit aussi avoir le même degré d'oxydation, soit 2+ ou 3+ dans notre cas.

3. La valeur d'électronégativité de l'élément. Cette valeur permettra de définir si un élément est lithophile (attiré par O) ou chalcophile (attiré par S). Pour qu'un élément soit lithophile, il faut que sa valeur d'électronégativité soit inférieure à 1,83 selon l'échelle de Pauling. Dans notre cas, les éléments lithophiles ont beaucoup plus de chance de se retrouver dans les magnétites. Par contre, les éléments chalcophiles comme Ni, Cu, Zn, Sn, Mo et Pb peuvent aussi être présents selon Dare et Al. (2011)

Il faudra aussi considérer lors de l'analyse la composition du magma originel dans lequel la magnétite a cristallisé. Si un élément ne se trouve pas dans le magma d'origine où a cristallisé la magnétite, il ne peut pas être présent dans cette magnétite.

En respectant les critères mentionnés précédemment, la liste d'éléments suivants a été sélectionnée pour l'analyse au LA-ICP-MS :  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{65}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{92}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{182}\text{W}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . Le choix des éléments s'est aussi basé sur les études de méthodes de calibration du LA-ICP-MS pour les éléments mineurs et traces dans les magnétites par Rabayrol et Barnes (2009) et modifié par Dare, *et al.* (2011), Dupuis et Beaudoin (2011) et Meric (2011). D'autres éléments comme

### 3.2 Analyse à la microsonde

Au total, 5 lames minces de magnétite contenue dans un granite de type I et 5 lames minces de magnétite contenue dans un granite de type S ont pu être analysées par la microsonde électronique CAMECA SX-100 à l'université Laval en compagnie de M. Marc Choquette. Les lames minces polies contenant les magnétites sélectionnées ont été recouvertes d'une couche de carbone, puis analysées pour les éléments traces mentionnés précédemment soit Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Sn. Trois magnétites par lame ont été analysées. Chaque magnétite a été testée à trois endroits différents afin de pouvoir valider les résultats entres-eux.

Au niveau des paramètres utilisés pour cette expérience, la durée d'analyse d'un point à la microsonde était de 6 minutes à un voltage de 15 kV et un ampérage de 100 nA.

Les résultats des analyses ainsi que les limites de détection sont présentés à l'Annexe 1.

Le Fe a été fixé stoechiométriquement à 72,4% et l'oxygène à 27,6% pour les analyses à la microsonde.

### 3.3 Analyse par LA-ICP-MS

Le spectromètre de masse à torche plasma Agilent 7700x couplé avec le laser RESolution M-50 (Exciment 293nm) de l'UQAC a permis d'analyser les éléments traces dans les magnétites de deux différents types de granite.

#### 3.3.1 Paramétrage du LA-ICP-MS

Les paramètres sélectionnés pour l'analyse de la magnétite par LA-ICP-MS sont les suivants : faisceau à 75µm, fréquence de coups de 12Hz, énergie du laser de 5 mJ avec un dwell de 12,0 millisecondes. La durée d'un essai variait de 90 secondes à 120 secondes dépendamment de la longueur et de la pureté du grain. Les premières trente secondes sont consacrées à l'analyse du bruit de fond par l'appareil. Après ces trente secondes, l'ablation par le laser commence et la magnétite est analysée. On tente de régler le temps d'analyse afin qu'il reste un dernier dix secondes à la fin afin d'enregistrer encore une fois le bruit de fond. Les paramètres sont demeurés inchangés tout au long de l'expérimentation à l'exception du temps d'analyse qui dépendait de la longueur du grain analysé.

Bien que certains éléments comme  $^{75}\text{As}$ ,  $^{101}\text{Ru}$ ,  $^{105}\text{Pd}$ ,  $^{107}\text{Ag}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{187}\text{Re}$ ,  $^{193}\text{Ir}$ ,  $^{195}\text{Pt}$ ,  $^{197}\text{Au}$  et  $^{209}\text{Bi}$  sont étudiés dans certains cas (Dare *et al.* 2011, Meric 2011), ils sont rarement au dessus de la limite de détection. Ils ont donc été ignorés pour cette étude.

#### 3.3.2 Limite de détection

Les limites de détection sont de 0,1 – 0,9 ppm pour  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{74}\text{Ge}$ ,  $^{118}\text{Sn}$  et de 0,005 – 0,09 ppm pour  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{182}\text{W}$ ,  $^{187}\text{Re}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . (Meric 2011)

#### 3.3.3 Moniteur d'ablation

Le  $^{57}\text{Fe}$  a été choisi comme moniteur d'ablation, car il s'agit du seul qui peut être estimée par stœchiométrie (72,28%) dans la magnétite. Elle correspond à la proportion molaire du fer dans la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Des analyses de ce taux de Fe pourront être conduites dans l'avenir afin de venir ajuster les résultats obtenues par le laser en les comparants à leur taux réel de Fe et non la valeur stœchiométrique de 72,28%.

Par contre dans notre cas, étant donné que la concentration totale des éléments traces dans la magnétite est près de 1%, la valeur obtenue stœchiométriquement est valable.

### 3.3.4 Matériaux de référence certifiés

Les deux matériaux de référence certifiés utilisés sont GSD-1G et GSE-1G produit par le United States Geological Survey. Ces deux verres de basalte ont aussi été utilisé pour l'analyse d'éléments traces dans les magnétites par Meric (2011) et Dare *et al.* (2011). GSE-1G est utilisé principalement pour la calibration de l'appareil alors que GSD-1G permet de vérifier la justesse (accuracy) et la précision de cette calibration.

L'erreur sur les résultats obtenues avec l'utilisation de ces verres synthétiques versus leurs valeurs documentées était sous la barre des 5% pour la plupart des éléments et allant jusqu'à 10% d'écart dans de rares cas.

### 3.3.5 Matériel de référence propre à l'UQAC (BC-28)

L'échantillon de magnétite naturel BC-28 est un matériel de référence qui fut utilisé par Barnes *et al.* (2004), Dare *et al.* (2011) et Meric (2011). Cet échantillon est en faite une magnétite provenant de la base du complexe de Bushveld en Afrique du Sud.

Un peu comme avec GSD-1G et GSE-1G, la précision sur les résultats obtenues sous la barre des 5% pour la plupart des éléments et allant jusqu'à 10% d'écart dans de rares cas en comparant avec les valeurs Dare *et al.* (2011) et Meric (2011), qui ont eux aussi utilisés le LA-ICP-MS.

En plus de servir de matériel de référence, BC-28 peut servir de comparaison pour les résultats d'éléments traces étant donné qu'il s'agit d'une magnétite naturelle. Les comparaisons entre les résultats obtenues pour BC-28 et les résultats obtenus pour les magnétites des granites de type I et S sont d'ailleurs discutés ultérieurement dans une autre section.

## 4. Traitement des données

### 4.1. Analyse des résultats de LA-ICP-MS avec Igor Pro (Iolite)

Le logiciel Iolite, complément du logiciel Igor Pro, permet d'évaluer le signal obtenu lors de l'analyse des échantillons par la méthode du LA-ICP-MS. Les données obtenues sous forme de spectre sont alors analysées afin de sortir la valeur moyenne de chaque élément en compte par seconde (Fig. 3). Les inclusions de silicates sont détectées à l'aide de l'analyse du spectre de la silice et du calcium. On retient donc le temps d'analyse dépourvu du signal d'inclusion pour pouvoir être représentatif d'un signal obtenu par une magnétite sans inclusion.

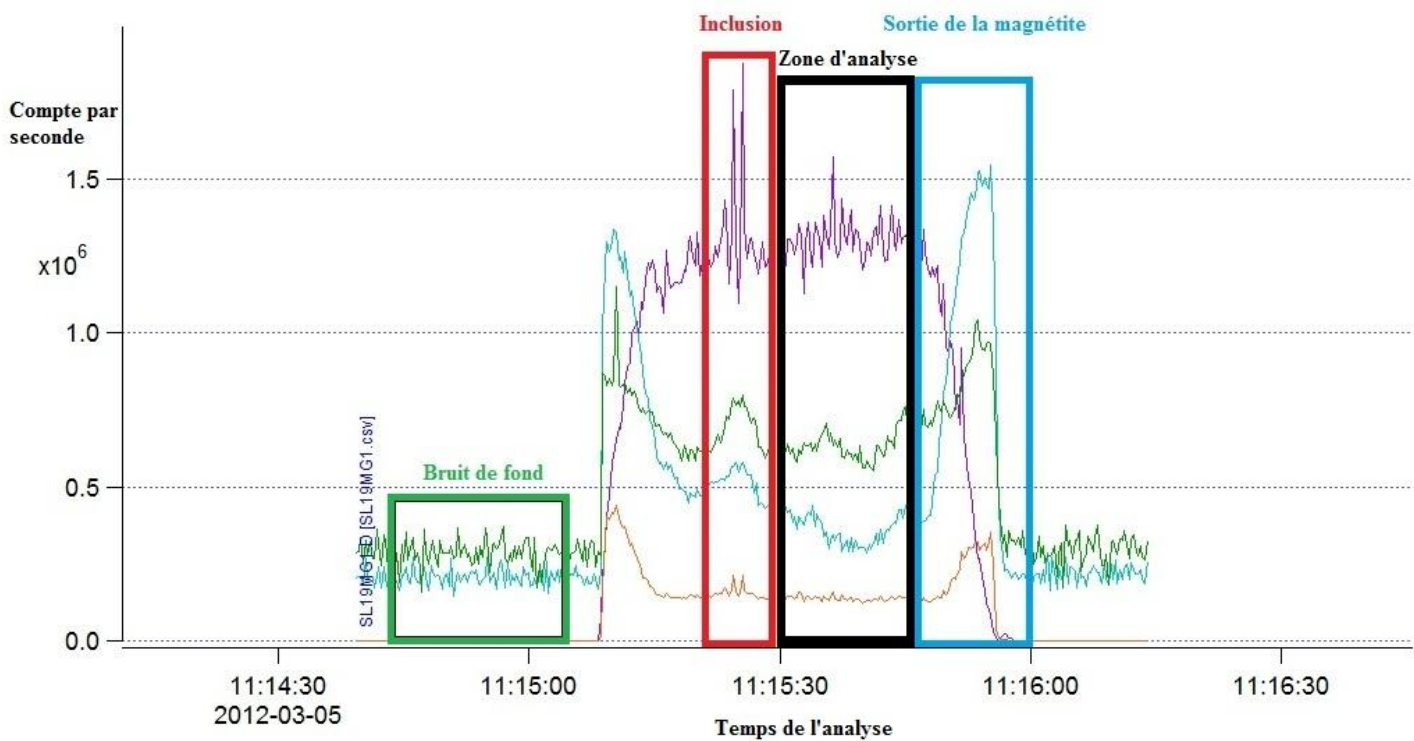


Figure 3 - Spectre d'une analyse par LA-ICP-MS avec le logiciel Iolite dans Igor Pro. Le spectre de Si est en mauve, celui de Ca en vert, celui du Cr en bleu et celui du Fe en brun. On remarque qu'une inclusion silicatée fait augmenter les valeurs de Si et de Ca. De cette façon, on peut exclure ces inclusions du spectre de la magnétite que l'on veut analyser.

## **4.2. Critères de sélection des échantillons représentatifs et non-représentatifs**

Les résultats obtenus à l'aide de l'analyse par Iolite nous donnent des valeurs en ppm pour notre suite d'éléments. Malgré le traitement à l'aide du logiciel Iolite, quelques résultats demeurent non-représentatifs d'une magnétite. En effet, certains grains de magnétite contenaient trop d'inclusions, ce qui fait en sorte que même en ayant tenté de sélectionner le signal le plus homogène avec Iolite, le taux de Si, Ca et Al demeure anormal. Ces données sont donc jugées inutilisables dans le cas d'une étude sur les éléments traces dans les magnétites et sont donc par conséquent, exclus dans la compilation des résultats. Ce fût le cas pour 4 magnétites dans le granite de type I et 9 dans le granite de type S.

Le deuxième critère est basé sur la mesure de dispersion des données. Dans le cas de cette étude, un résultat dont l'écart-type est supérieur à 15% a été jugé non précis et a donc été exclu du calcul de la valeur moyenne d'un élément. Bien que cette formule marche très bien avec les éléments majeurs, certains éléments près de la limite de détection ont un écart-type très élevé et donc, un signal au LA-ICP-MS très instable. C'est le cas entre autres pour Ni, Cu, Y, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta et W. Les écart-types de ces éléments tournent autour de 20-25% et va même jusqu'à 40% pour Ta et W, très peu abondant dans les magnétites et dont les résultats approchent la limite de détection. Les résultats de ces éléments traces ont quand même été utilisés mais leur degré de confiance est moins élevé.

Les inclusions dans les magnétites étant difficiles à éviter lors de l'utilisation du LA-ICP-MS, les valeurs de Mg, Si, Ca et Al ont tendance à être surévaluer. Pour palier à ce problème, les données de la microsonde ont été utilisées pour ces éléments afin de mieux représenter le contenu en Mg, Si, Ca et Al d'une magnétite.



## 5. Comparaison des résultats pour les granites de type I et S

### 5.1 Granite de type I

#### 5.1.1 Résultats des analyses des éléments traces pour les granites de type I

Les résultats obtenus pour les granites I sont assez homogènes (Fig. 4). Al, Mn, Ti, Zn, V, Cr se retrouvent entre 100-1000 ppm. Si, Ca, Y, Ga, Mg, Co, Ni se retrouvent entre 100-10 ppm. Zr, Sn se retrouvent entre 10-1 ppm. Mo, Nb, Ta, Sc, W et Hf se retrouvent sous 1 ppm.

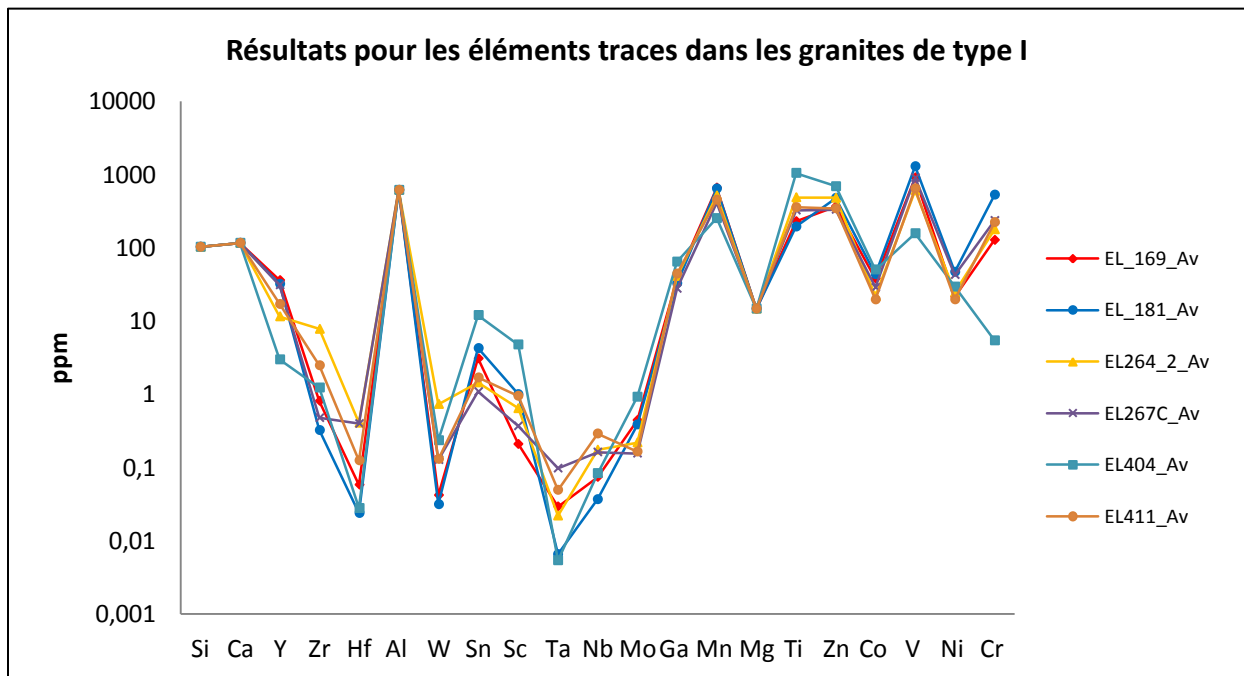
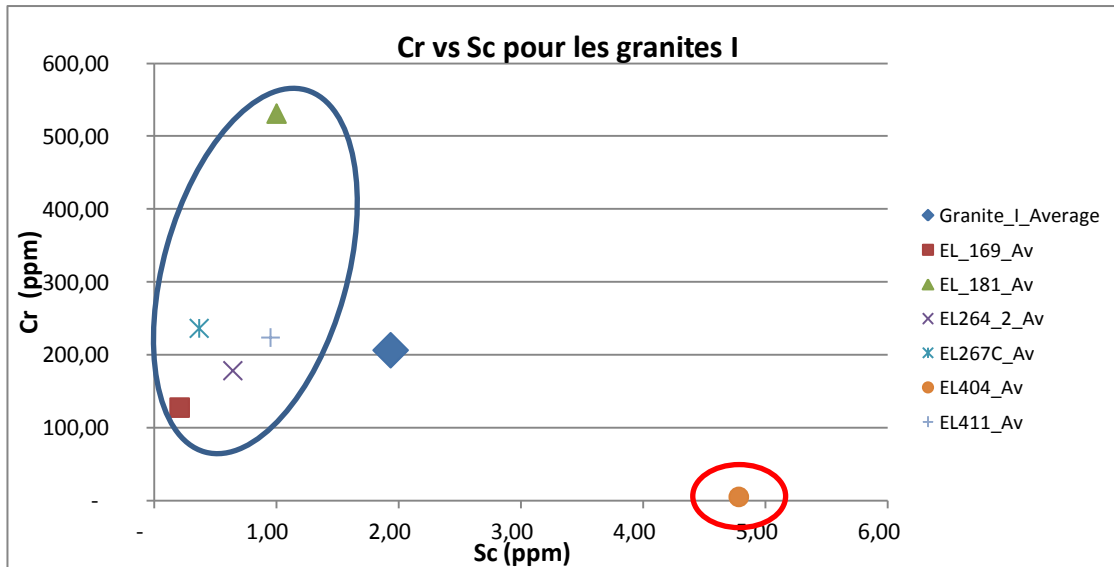


Figure 4 - Graphique des éléments traces présents dans les magnétites des granites de type I. Tous les résultats proviennent de l'analyse par LA-ICP-MS sauf pour le Si, Ca, Mg et Al où une valeur moyenne par microsonde a été utilisée pour caractériser toutes les échantillons. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012)

Seul l'échantillon EL404 sort du lot avec des concentrations en éléments traces différents du reste des échantillons de granite I comme peut nous démontrer le graphique du Cr vs Sc (Fig. 5).



**Figure 5 - Comparaison d'un élément compatible dans la magnétite (Cr) versus un élément moins compatible (Sc). On note dans le cercle rouge que l'échantillon EL404 contient très peu de Cr et beaucoup de Sc par rapport à la moyenne.**

Les valeurs en Cr et V très basse pour l'échantillon EL404 nous laissent croire que cette roche a cristallisé dans un milieu appauvri en ces éléments. Sa minéralogie différente des autres échantillons (présence de hornblende et grenat entre autres) nous confirme que le magma originel devait avoir une composition différente des autres granites analysés. Un bilan de masse ainsi qu'une analyse des éléments traces des autres minéraux contenus dans cet échantillon nous permettrait de mieux comprendre ces différences.

On voit aussi sur ces deux dernières figures que l'échantillon EL181 semble beaucoup plus riche en Cr (500 ppm) que les autres (< 300 ppm). Par contre, les résultats de Cr à la microsonde pour cet échantillon se rapproche beaucoup plus de la moyenne (393 ppm à la microsonde vs 531 ppm au LA-ICP-MS) et n'est donc pas jugé anormal. Il faut aussi noter dans ce cas que l'échantillon EL264-3 n'a pas pu être représenté, étant donné que 4 des 5 magnétites analysées dans ce granite contenaient trop d'inclusions rendant les données inutilisables et par le fait même, diminuant grandement la justesse des résultats pour cette roche.

## 5.2 Granite de type S

### 5.1.2 Résultats des analyses des éléments traces pour les granites de type S

Les résultats obtenus pour l'analyse des éléments traces contenus dans les granites de type S sont plutôt homogène (Fig. 6). Al et Ti se retrouvent entre 1000-10000 ppm. Si, Mn, Mg, Zn et V se retrouvent entre 100-1000ppm. Ca, Y, Zr, Ga, Co, Ni se retrouvent entre 100-10 ppm. Sc, Sn, Mo se retrouvent entre 10-1 ppm. W, Nb, Ta, et Hf se retrouvent sous 1 ppm.

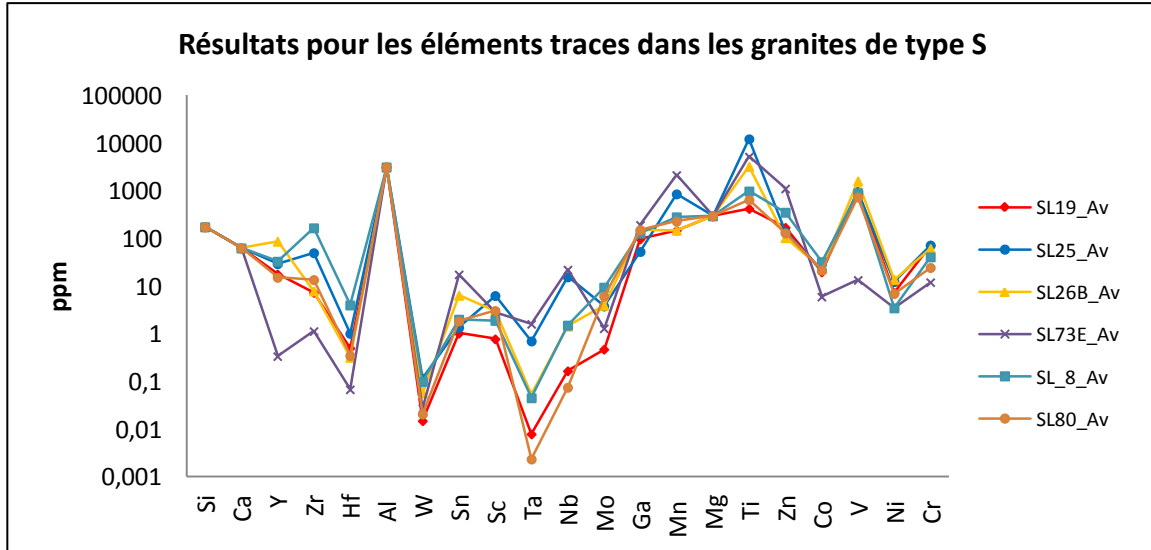


Figure 6 - Graphique des éléments traces présents dans les magnétites des granites de type S. Tous les résultats proviennent de l'analyse par LA-ICP-MS sauf pour le Si, Ca, Mg et Al où une valeur moyenne par microsonde a été utilisée pour caractériser toutes les échantillons. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représentés à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012)

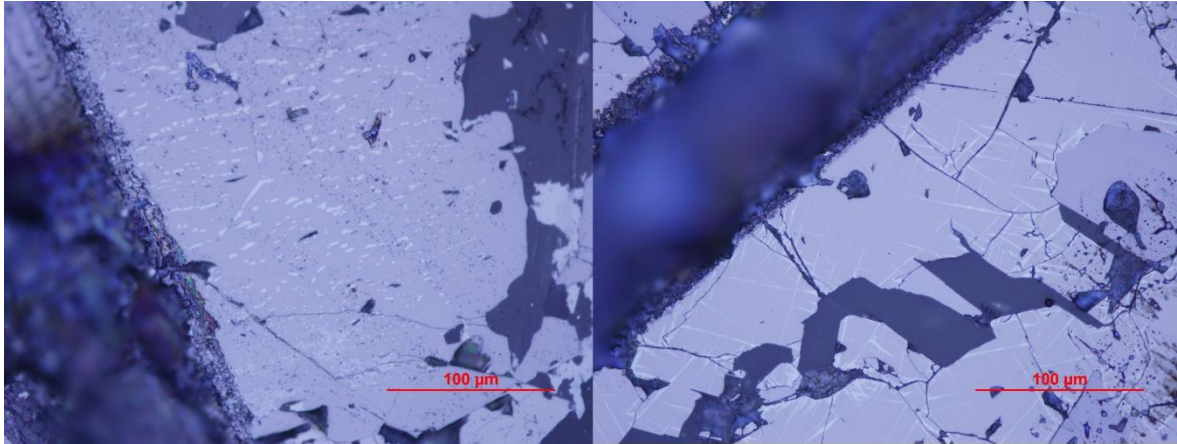
Les résultats obtenus pour l'échantillon SL-25 sont expliqués en partie avec la présence d'exsolutions d'ilménite.

En proposant cette hypothèse, les valeurs obtenues par SL-25 devraient avoir quelques caractéristiques d'une ilménite, tout de moins des ressemblances. L'ilménite a tendance à se concentrer davantage en certains éléments traces et la magnétite de même (Meric, 2011) (Tableau. 1).

Tableau 1 - Préférence des éléments traces pour certains oxydes de fer. Les éléments les plus à gauche du tableau sont les éléments les plus compatibles dans les oxydes de fer. Les données sont tirées de Meric (2011).

<b>Ilménite</b>	Ti	Mg	Mn	Nb	Ta	Sc	W	Zr	Hf	
<b>Magnétite</b>	Cr	Ni	V	Co	Ga	Mo	Sn	Ge	Al	Pb

Par contre, au niveau de l'échantillon SL73E, on observe un appauvrissement en Co, V et Cr prononcés ainsi qu'un enrichissement en éléments moins compatibles comme Mn, Nb, Ta et Ti par exemple. Une altération en hématite est présente dans ces magnétites ce qui pourraient influencer les résultats finaux (Fig. 7).



**Figure 7 - À gauche, exsolutions d'hématites circulaires et fréquentes dans SL73E. À droite, fines exsolutions d'ilménite associées aux zones de fracturation de la magnétite dans SL-25.**

Par contre, le seul fait qu'il y ait de l'hématite dans cet échantillon n'explique pas tout ces valeurs différentes des autres magnétites. Un bilan de masse et une analyse des éléments traces des autres minéraux présents dans la roche permettraient de mieux comprendre le comportement de la magnétite.

Toujours selon Meric (2011), les enrichissements en Nb, Ta sont particulièrement importantes pour l'ilménite. Les résultats obtenus vont dans ce sens pour la plupart des éléments analysés et surtout pour ceux dont le niveau de confiance est élevé comme Cr, V, Co, Ti et Mn. La figure 8 démontre bien le rapport entre un niveau de Nb (ppm) élevé et un enrichissement en Ti (ppm).

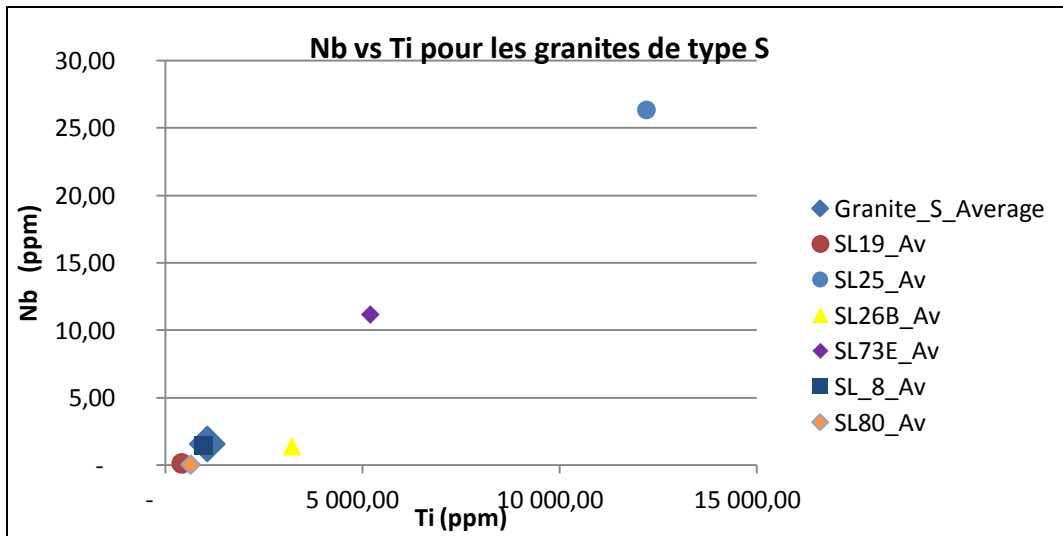


Figure 8 – Comparaison de la concentration de Ti (ppm) dans une magnétite vs l’enrichissement en Nb (ppm). L’échantillon SL-25 montre des caractéristiques associées habituellement à l’ilménite ou dans notre cas, à la forte présence d’exsolutions d’ilménite.

### 5.3 Différenciation entre les deux types de granites

L’observation des données moyennes pour les granites I vs les granites S normalisées sur les données de la croûte continentale (Ruddick et Gao, 2003) est très intéressante à prime abord (Fig. 9).

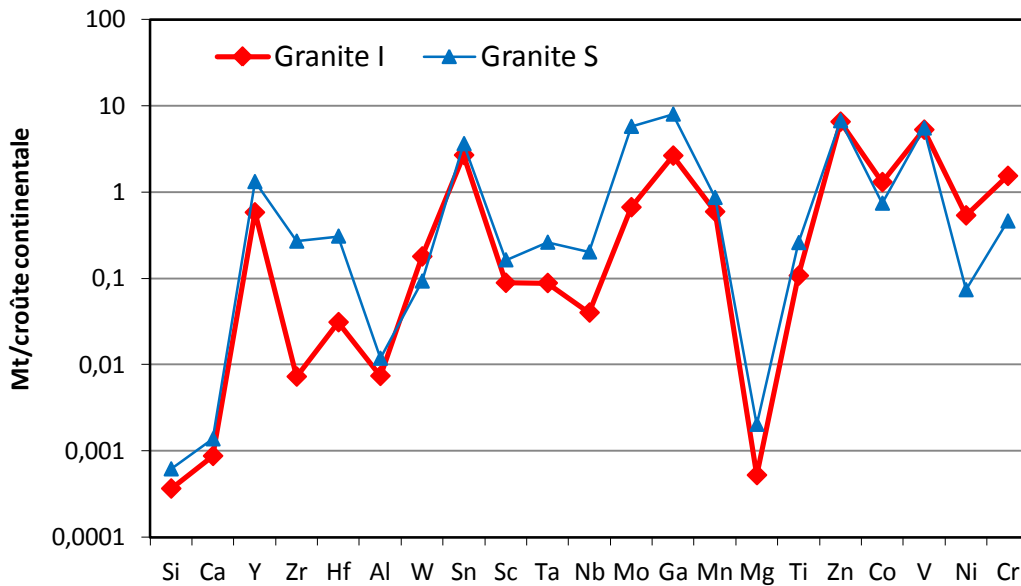


Figure 9 - Comparaison des éléments traces dans les magnétites pour les granites I vs les granites S avec les valeurs moyennes. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représenté à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare et al. 2012)

On peut voir une tendance plus prononcée des granites I pour les éléments compatibles comme Cr, Ni, Co (à droite du graphique) dans les magnétites alors que leur concentration en éléments moins compatibles (à gauche du graphique) semble plus faible que les granites S. Les granites S eux, réagissent à l'opposé avec des concentrations plus faibles en Cr, Ni et Co et avec une concentration plus élevée dans tous les éléments moins compatibles exceptés pour W. La présence d'exsolutions d'ilménite dans les magnétites des granites de type S permet d'expliquer en partie les enrichissements en Mn, Mg, Ti, Nb, Ta, Sc, Zr et Hf mais ne peut pas expliquer les différences pour ce qui est de Al, W, Ga, V, Mo, Sn. On ne peut donc pas expliquer les différences dans les éléments traces que par la présence d'exsolutions d'ilménite dans les magnétites des granites de type S.

La concentration plus élevée en zircon dans les échantillons de type I vs de type S pourraient expliquer en partie pourquoi les granites de type I sont plus pauvres en Zr et Hf.

Donc, il y a donc bel et bien une différence entre les éléments traces contenues dans une magnétite d'un granite de type I vs une magnétite contenue dans un granite de type S qui sont liée au fait que ses deux granites sont formés dans des environnements complètement différents.

Des résultats semblables sont observables en comparant l'amplitude du champ attribuable au granite de type S vs un granite de type I (Fig. 10). Ce graphique nous permet aussi de remarquer que les granites S analysés couvrent un champ plus large alors que les données pour les granites de type I sont plus homogènes.

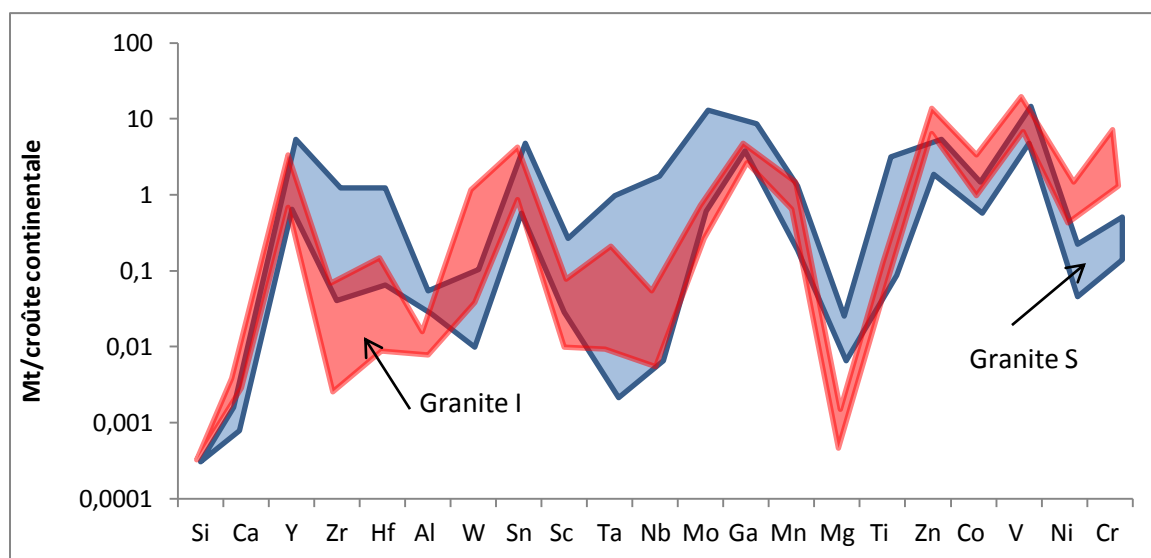


Figure 10 - Comparaison des champs des éléments traces dans les magnétites pour les granites I vs les granites S. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représentés à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare *et al.* 2012)

## 6. Comparaison des résultats avec d'autres types de roches

### 6.1. Magnétites provenant d'un magma mafique évolué dans une intrusion litée

#### 6.1.1 Champ moyen de magnétites dans un magma évolué pour une intrusion litée

La zone en rose de la figure 11 représente la composition en éléments traces dans les magnétites pour un magma mafique évolué (oxydes + apatite) provenant d'une intrusion litée, dans ce cas-ci du complexe de Bushveld et de Sept-îles (Dare et Al., 2012). On peut observer que les deux granites semblent très bien corrélés avec le champ du magma évolué comme on devrait s'en attendre étant donné que nous sommes en présence d'un magma felsique. La différenciation majeure avec les magnétites retrouvées dans les magmas mafiques les plus évolués d'une intrusion litée est la concentration de Ti, Mg et Mn qui est inférieure pour les magnétites contenues dans des magmas évolués felsiques. On note aussi une différence notable dans le cas de Sc, Al et Y. Les données de Hf et Zr sont aussi beaucoup plus basses dans les magnétites de granites de type I que dans le champ représenté par les magnétites de l'intrusion litée.

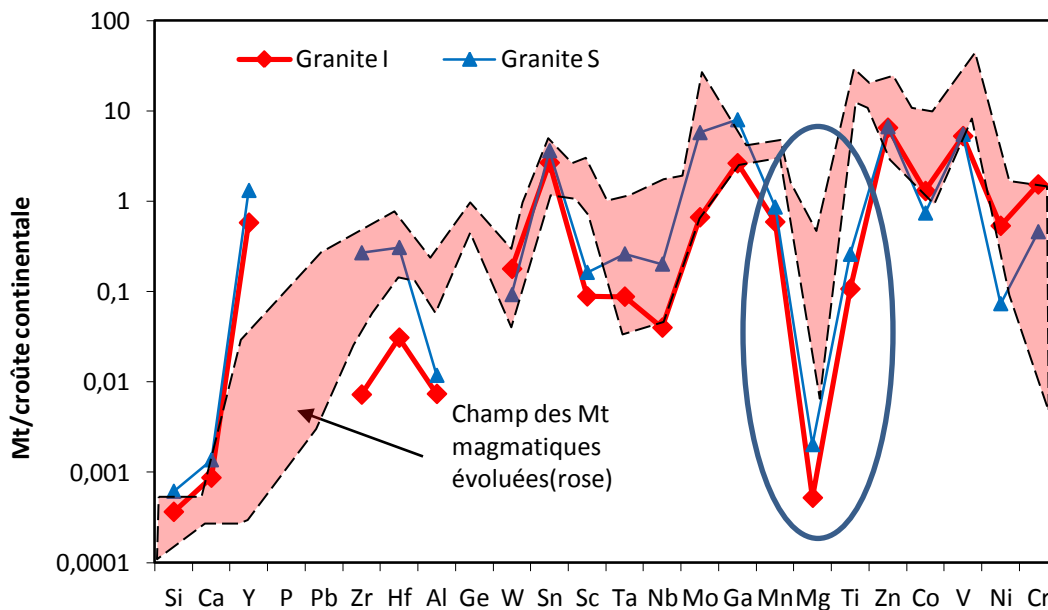


Figure 11 - Comparaison des valeurs des magnétites dans deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée mafique (Dare et al. 2012). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale. Les éléments les plus compatibles dans la magnétite sont représentés à droite du graphique alors que ceux qui sont moins compatibles se retrouvent à gauche (Dare et al. 2012)

### 6.1.2 Comparaison avec deux échantillons de gabbro-nelsonite de l'intrusion litée de Sept-Îles

Les deux échantillons sélectionnés afin d'être comparés avec les résultats obtenus pour l'étude des magnétites disséminées dans les granites sont des magnétites disséminées provenant d'un gabbro-nelsonite de la région de Sept-Îles. Ces deux échantillons représentent des magnétites provenant du milieu le plus évolué de l'étude sur une intrusion litée à Sept-îles (Meric, 2011). Les résultats de cette étude ont aussi été obtenus par le LA-ICP-MS de l'UQAC avec des paramètres semblables, ce qui en fait des résultats de choix à titre de comparaison.

Les résultats obtenus à la (Fig. 12) abondent dans le même sens que lorsque l'on compare avec les champs plus générales des intrusions litées évolués : les valeurs de Ti, Mg, Mn, Nb, Ta, Sc et Al sont beaucoup plus basses dans les magnétites de granite alors que les valeurs de Cr, Ni et Y sont plus abondantes.

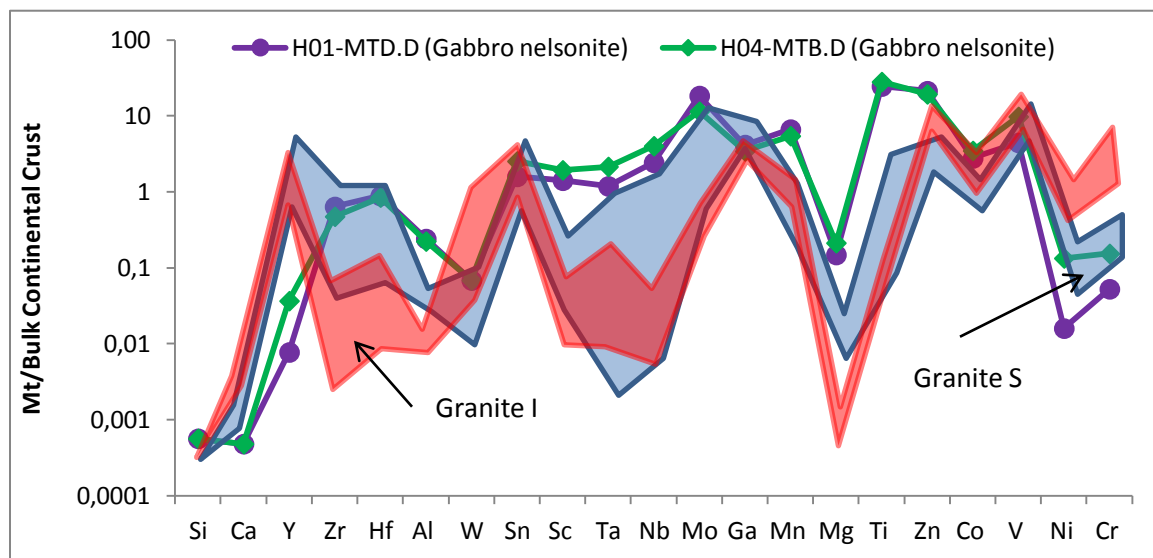


Figure 12 - Comparaison des valeurs d'éléments traces dans les magnétites de deux types de granite (I et S) vs les valeurs pour les magnétites contenues dans deux gabbros-nelsonites de Sept-Îles (Meric, 2011). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale.



## 6.2 Magnétites provenant d'un magma primitif dans une intrusion litée

### 6.2.1 Champ moyen de magnétites dans un magma primitif pour une intrusion litée

La zone en gris de la Figure 13 représente la composition en éléments traces dans les magnétites pour un magma primitif provenant d'une intrusion litée, dans ce cas-ci du complexe de Bushveld (Dare *et al.*, 2012). Bien qu'il y ait corrélation avec les éléments plus incompatibles à gauche du graphique à quelques exceptions près (Al, Zr, Hf, Y), 6 des 7 éléments les plus compatibles (Cr, Ni, V, Co, Mg, Mn) dans une magnétite sauf Zn ont des concentrations plus basses que des magnétites se situant à la base d'une intrusion litée.

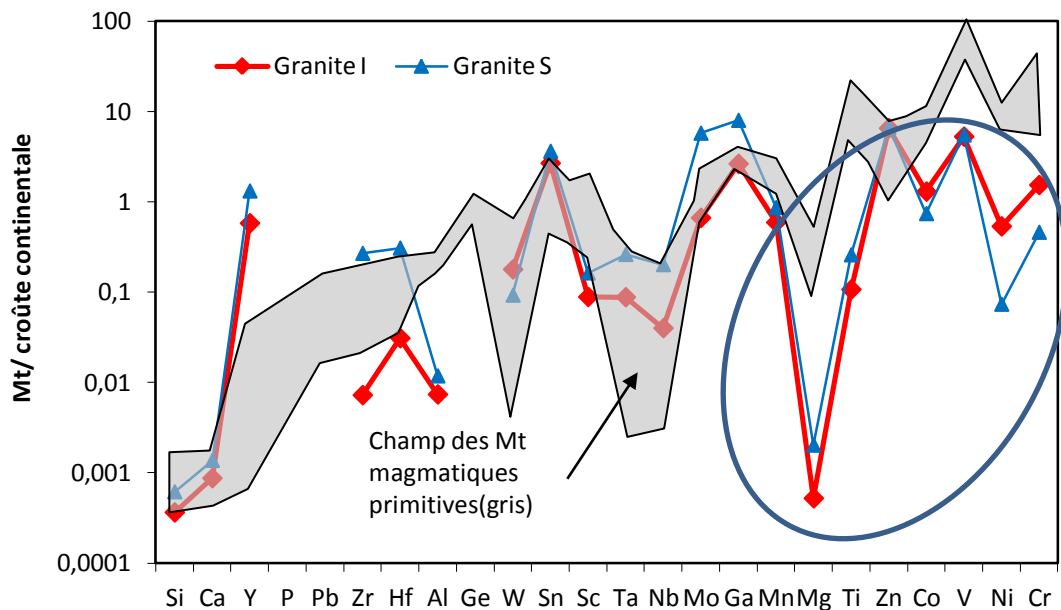


Figure 13 - Comparaison des valeurs des deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée primitive. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale.

### 6.2.2 Comparaison avec l'échantillon BC-28 de Bushveld

L'échantillon de contrôle de magnétite BC-28 provient du complexe de Bushveld situé en Afrique du Sud et représente une magnétite qui a cristallisé dans un magma primitif (Barnes *et al.* 2004). L'intrusion litée de Bushveld est reconnue comme une des plus grandes au monde et représente la plus grande ressource mondiale de Ti-V (Goldberg *et al.* 1992).

En l'absence d'une autre magnétite naturelle de référence qui aurait pu se former dans un contexte granitique, l'échantillon BC-28 permet de faire le pont entre certaines études sur les magnétites dans des contextes géologiques différents (Dare *et al.* 2011, Meric 2011) et l'étude des magnétites présents dans les granites de type I et de type S.

Les résultats présentés à la Figure 14 sont comparables avec la comparaison du champ des magnétites primitives de Bushveld (Dare et al. 2012) présenté plus tôt. Encore une fois on note que les magnétites contenues dans les granites sont beaucoup plus faibles en Cr, Ni, V, Co, Ti, Mg et Al. Tous ces éléments, sauf Al, sont habituellement très compatibles dans la structure de la magnétite.

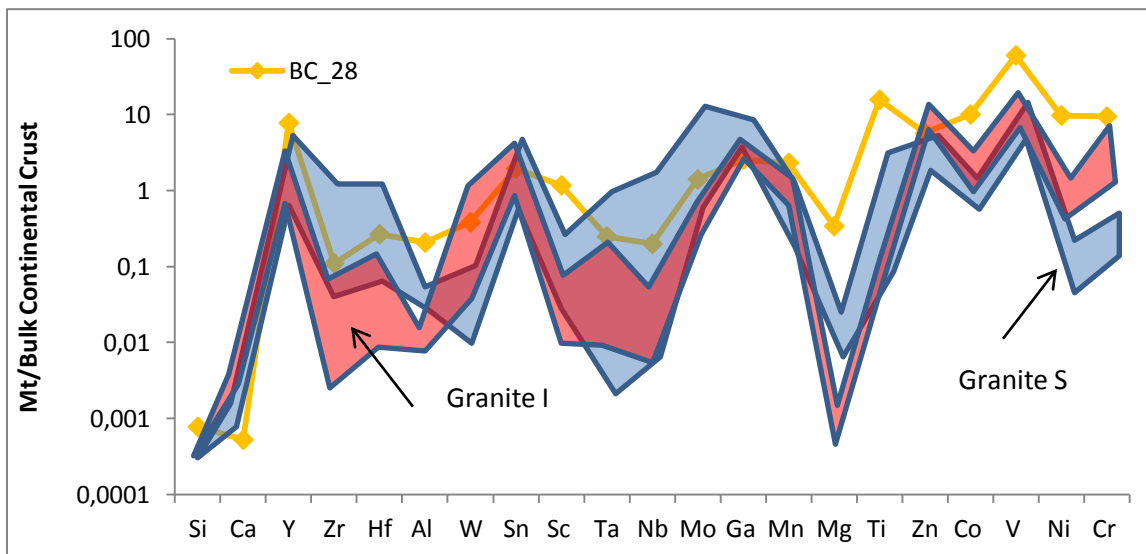


Figure 14 - Comparaison des valeurs d'éléments traces dans les magnétites de deux types de granite (I et S) vs les valeurs pour les magnétites contenues dans l'échantillon BC-28 de Bushveld. Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale.

### 6.3 Résultats des comparaisons avec des magnétites provenant d'autres contextes géologiques

Une superposition des champs couverts par les magnétites évoluées et primitives d'une intrusion mafique litée permet de voir que les résultats obtenues dans les magnétites des granites sont plus comparables au champ couvert par les magnétites évoluées du Bushveld et de Sept-Îles, surtout en ce qui attrait aux éléments les plus compatibles (Cr, Ni, V, Co, Zn) (Fig. 15).

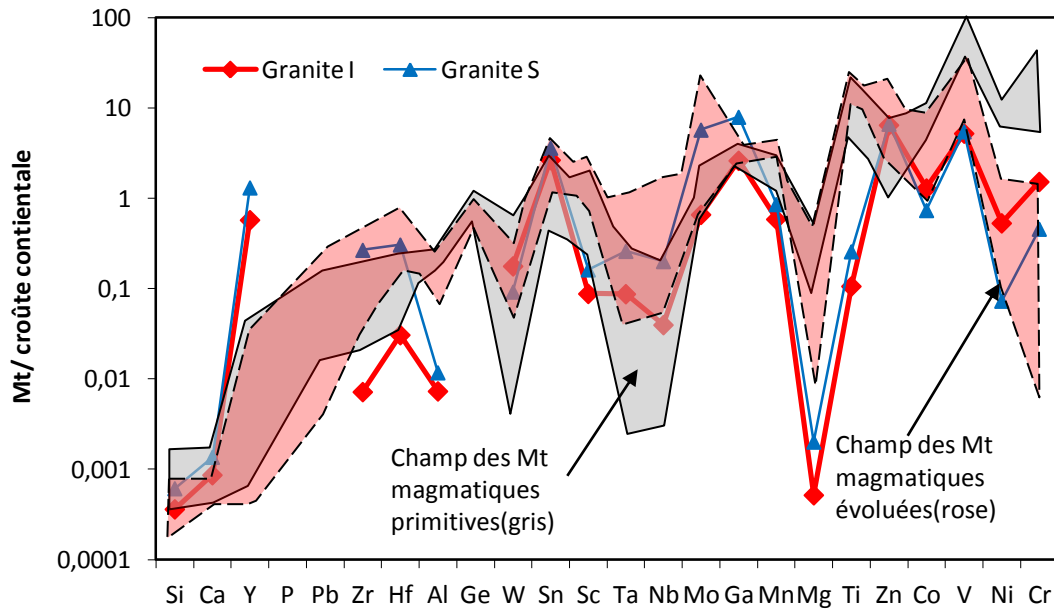


Figure 15 - Comparaison des valeurs des deux types de granite vs les valeurs pour les magnétites contenues dans une intrusion litée primitive (gris) et évoluées (rose). Les résultats sont normalisés sur la croûte continentale.

Par contre, l'évolution d'un contexte évolué mafique vers un contexte évolué felsique ne se perçoit presque pas mise à part l'appauvrissement en Ti, Mg, Mn et Al et l'enrichissement marqué en Y. Dans le cas du granite I, on peut aussi noter l'appauvrissement en Zr et Hf.

Ces résultats laissent envisager que plusieurs autres facteurs entre en ligne de compte pour évaluer l'évolution des éléments traces dans une magnétite. Les conditions de cristallisation (T, P,  $fO_2$ , composition du magma originel) ainsi que la compétition des éléments traces dans les différentes phases cristallines (Meric 2011) sont de nombreux exemples de facteurs à tenir en compte lors de la comparaison des éléments traces dans les magnétites issues de différents milieux.

Cette étude ne pousse pas plus loin cette réflexion et reste donc générale par rapport à l'explication de ces résultats. Il serait intéressant de continuer les études dans ce domaine, notamment au niveau du bilan de masse total de la roche.

## Conclusion

La caractérisation géochimique des magnétites a permis de comparer différents échantillons provenant de granites de type I et S entre eux et avec des échantillons provenant de deux intrusions litées différentes, soit celle de Bushveld et de Sept-îles. L'utilisation de la méthode par LA-ICP-MS ainsi que de la méthode par microsonde, deux méthodes qui ont déjà fait leur preuve au niveau de l'analyse des éléments traces présents dans les magnétites, apparaissent comme deux méthodes efficaces pour analyser les oxydes de fer.

Au niveau de l'homogénéité des données, les magnétites analysées dans les granites de type I donnaient des résultats plus semblables entre eux que pour ceux des granites S. La présence d'exsolutions d'ilménite dans les magnétites de type S a été avancée comme hypothèse afin d'expliquer ces écarts de résultats à l'intérieur même de ces granites.

Point de vue comparaison des résultats obtenues pour les granites I vs les granites S, on peut voir une tendance plus prononcée des granites I pour les éléments compatibles dans les magnétites (Cr, Ni, Co) alors que les granites S eux, sont plus riches en éléments traces de tous les autres éléments. Seul V et Zn sont presque identiques dans les deux granites.

La comparaison des deux différents granites avec des magnétites provenant d'intrusions litées ont permis d'affirmer que les éléments traces dans les magnétites des granites suivent un tracé plus près du champ attribuable à une magnétite issue d'un contexte magmatique évolué. Par contre, la différence entre ce contexte évolué mafique et le contexte évolué felsique de nos granites se perçoit que par l'appauvrissement en Ti, Mg, Mn et Al et l'enrichissement marqué en Y. Dans le cas du granite I, on peut aussi noter l'appauvrissement en Zr et Hf. Cet appauvrissement pourrait être expliqué par le plus grand nombre de zircons présents dans le granite de type I, phase minérale compatible avec Zr et Hf.

Ces résultats laissent envisager que plusieurs autres facteurs entre en ligne de compte pour évaluer l'évolution des éléments traces dans une magnétite. Il serait intéressant de faire un bilan de masse afin de voir l'influence des autres phases minérales sur la composition de la magnétite. L'influence de la titanite (Ti), du plagioclase (Al) et du zircon (Zr, Hf) serait particulièrement intéressant à vérifier.

De plus, afin d'améliorer la compréhension du comportement des éléments traces dans les magnétites issues d'un contexte granitique, plus de magnétites de la famille des granitoïdes doivent être analysées. Bien que certaines données existent déjà (Razjigaeva N.G. et Naumova V.V 1992, Wang *et al* 2012), beaucoup de chemin reste à faire dans ce milieu afin de bien comprendre comment la magnétite évolue. L'analyse d'échantillons de composition intermédiaire permettrait de mieux faire le pont entre les magnétites retrouvées dans les contextes mafiques les plus évolués d'une intrusion litée et les magnétites produites par un contexte igné felsique.

## Références

Barnes, S.-J., Maier, W. D. et Ashwal, L. D., 2004. Platinum-group element distribution in the Main Zone and Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Chemical Geology* 208 (1-4):293-317.

Chappell, B.J. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. *Pac. Geol.*, v8, pp.173-174.

Dare, SAS, Barnes S-J et Beaudoin, G., 2011 Evolution of trace element concentrations in magnetite from a fractionating magmatic sulphide liquid: an example from the Sudbury (Canada) Ni-Cu-PGE deposits. 11<sup>th</sup> SGA Biennial Meeting. 3 pp.

Dare, SAS, Barnes S-J et Beaudoin, G., Meric, J., 2012 Are the “magnetite lava flows” of El Laco (Chile) magmatic? Comparison of trace elements in magnetite with other magmatic Fe-oxide deposits. Abstract. 1 pp.

Dupuis, C. et Beaudouin, G., 2007. Signature géochimique des oxydes de fer et application à l’exploration minière – 2e volet. Rapport Divex - Sous-projet SC22, 24 pp.

Georem. © 2011 (7 Janvier). [En ligne] <<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>> Consulté le 2011.03.05

Goldberg, L, Hammerbeck, E. C. L, Labuschagne, L. S. et Rossouw, C, 1992. International Strategic Minerals Inventory summary report; vanadium. U. S. Geological Survey Circular, Report: C 093 0-K, 45 pp.

Gosselin, P., Beaudouin, G. et Jébrak, M., 2006. Signature géochimique des oxydes de fer et application à l’exploration minière. Rapport Divex SC16, 14 pp.

Lavaure, S., Sawyer E.W., 2011. Source of biotite in the Wuluma Pluton: Replacement of ferromagnesian phases and disaggregation of enclaves and schlieren. *Lithos* 12 pp. 757-780

Meric, J. 2011. Caractérisation géochimique des magnétites de la zone critique de l’intrusion magmatique de Sept-Îles (Québec, Canada) et intégration à une base de données utilisant la signature géochimique des oxydes de fer comme outil d’exploration. Rapport de stage de fin d’étude du master. 66 pp.

Rabayrol, F., Barnes S-J., 2009. Méthode de calibration des éléments mineurs et traces dans les magnétites par LA-ICP-MS. Rapport Divex SC29, 37 pp.

Razjigaeva, N.G., Naumova V.V. 1992. Trace element composition of detrital magnetite from coastal sediments of northeastern Japan Sea for provenance study. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 62, No. 5. 802-809 pp.

Sawyer, E.W., 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites. *Journal of Petrology* 39, pp. 1147–1167.

Sawyer. E.W., 2009. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith : Microstructures in the residual rocks and source of the fluid. *Lithos* 116 pp. 273-286

Wang et al. 2012. Cassiterite exsolution with ilmenite lamellae in magnetite from the Huashan metaluminous tin granite in southern China. *Springer-Verlag* 14 pp.

## Annexes 1 - Résultats à la microsonde en ppm

	SL73E Mt1a	SL73E Mt1b	SL73E Mt1c	SL73E Mt2a	SL73E Mt2b	SL73E Mt2c	SL73E Mt3a	SL73E Mt3b	SL73E Mt3c
V	0,000	0,000	0,004	0,000	0,008	0,005	0,000	0,000	0,001
Cr	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000
Zn	0,163	0,003	0,000	0,044	0,017	0,023	0,379	0,021	0,020
Cu	0,014	0,005	0,000	0,000	0,000	0,010	0,004	0,000	0,005
Ni	0,002	0,000	0,000	0,007	0,003	0,008	0,000	0,000	0,002
Mn	0,095	0,098	0,098	0,028	0,041	0,056	0,197	0,060	0,058
K	0,002	0,001	0,003	0,001	0,003	0,002	0,048	0,000	0,011
Sn	0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000
Ca	0,007	0,002	0,003	0,002	0,006	0,000	0,005	0,003	0,003
Ti	0,038	0,028	0,023	0,041	0,038	0,030	0,240	0,026	0,017
Al	0,205	0,051	0,060	0,051	0,098	0,037	0,521	0,045	0,076
Si	0,042	0,007	0,032	0,006	0,018	0,012	0,165	0,020	0,094
Mg	0,001	0,006	0,006	0,003	0,001	0,001	0,004	0,002	0,015
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,569	100,201	100,230	100,186	100,234	100,194	101,563	100,177	100,302

	SL73E Mt3c	SL85A Mt1a	SL85A Mt1b	SL85A Mt1c	SL85A Mt2a	SL85A Mt2b	SL85A Mt2c	SL85A Mt3a	SL85A Mt3b
V	0,001	0,066	0,059	0,067	0,050	0,050	0,054	0,066	0,072
Cr	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,010	0,003	0,033	0,037
Zn	0,020	0,009	0,004	0,005	0,000	0,000	0,000	0,010	0,001
Cu	0,005	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004	0,001	0,001	0,008
Ni	0,002	0,005	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,003	0,000
Mn	0,058	0,025	0,010	0,007	0,010	0,009	0,009	0,010	0,003
K	0,011	0,003	0,000	0,002	0,006	0,004	0,003	0,001	0,001
Sn	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,003	0,001	0,000	0,007
Ca	0,003	0,005	0,004	0,006	0,007	0,015	0,025	0,001	0,003
Ti	0,017	0,034	0,024	0,019	0,035	0,032	0,034	0,018	0,020
Al	0,076	0,098	0,085	0,081	0,075	0,119	0,127	0,094	0,088
Si	0,094	0,008	0,009	0,017	0,022	0,086	0,070	0,010	0,011
Mg	0,015	0,009	0,004	0,010	0,019	0,034	0,023	0,010	0,008
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,302	100,262	100,205	100,215	100,231	100,366	100,353	100,257	100,259

	SL85A Mt3c	SL19 Mt1a	SL19 Mt1b	SL19 Mt1c	SL19 Mt2a	SL19 Mt2b	SL19 Mt2c	SL19 Mt3a	SL19 Mt3b
V	0,070	0,084	0,085	0,077	0,072	0,071	0,079	0,133	0,133
Cr	0,041	0,000	0,004	0,010	0,002	0,000	0,004	0,003	0,014
Zn	0,000	0,010	0,017	0,006	0,011	0,005	0,020	0,006	0,000
Cu	0,000	0,003	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	0,007	0,000
Ni	0,000	0,000	0,000	0,002	0,005	0,002	0,000	0,000	0,008
Mn	0,011	0,009	0,015	0,014	0,010	0,010	0,014	0,015	0,016
K	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001
Sn	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,008	0,007
Ca	0,001	0,002	0,004	0,002	0,003	0,004	0,000	0,002	0,002
Ti	0,017	0,020	0,040	0,054	0,029	0,033	0,052	0,026	0,016
Al	0,086	0,029	0,049	0,046	0,026	0,031	0,043	0,027	0,031
Si	0,009	0,005	0,008	0,005	0,005	0,005	0,007	0,008	0,007
Mg	0,008	0,004	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,004
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,243	100,172	100,222	100,221	100,173	100,162	100,221	100,237	100,239

	SL19 Mt3c	SL8 Mt1a	SL8 Mt1b	SL8 Mt1c	SL8 Mt2a	SL8 Mt2b	SL8 Mt2c	SL8 Mt3a	SL8 Mt3b
V	0,148	0,096	0,092	0,091	0,109	0,106	0,104	0,078	0,084
Cr	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000
Zn	0,007	0,079	0,014	0,000	0,010	0,001	0,017	0,000	0,020
Cu	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Ni	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,006	0,000
Mn	0,009	0,073	0,028	0,019	0,028	0,029	0,015	0,004	0,010
K	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,003
Sn	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,002	0,002	0,000	0,002	0,008	0,001	0,001	0,002	0,001
Ti	0,022	0,175	0,021	0,023	0,023	0,033	0,017	0,033	0,053
Al	0,031	0,144	0,080	0,079	0,068	0,069	0,064	0,066	0,079
Si	0,004	0,010	0,017	0,009	0,008	0,006	0,004	0,007	0,005
Mg	0,002	0,008	0,004	0,007	0,003	0,005	0,001	0,004	0,001
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,228	100,595	100,260	100,230	100,258	100,251	100,229	100,204	100,257



	SL8 Mt3c	SL26B Mt1a	SL26B Mt1b	SL26B Mt1c	SL26B Mt2a	SL26B Mt2b	SL26B Mt2c	SL26B Mt3a	SL26B Mt3b
V	0,087	0,149	0,151	0,157	0,154	0,167	0,159	0,161	0,183
Cr	0,002	0,000	0,000	0,006	0,009	0,000	0,003	0,011	0,000
Zn	0,000	0,006	0,000	0,002	0,011	0,000	0,007	0,036	0,005
Cu	0,004	0,001	0,000	0,009	0,005	0,006	0,003	0,000	0,000
Ni	0,007	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004
Mn	0,013	0,004	0,010	0,005	0,008	0,011	0,011	0,008	0,004
K	0,000	0,001	0,002	0,000	0,002	0,003	0,001	0,002	0,002
Sn	0,000	0,003	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,002	0,000	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,030	0,042
Ti	0,057	0,026	0,160	0,211	0,019	0,018	0,047	0,098	0,110
Al	0,068	0,104	0,515	0,460	0,105	0,147	0,232	0,108	0,091
Si	0,007	0,020	0,015	0,021	0,019	0,022	0,019	0,021	0,015
Mg	0,004	0,000	0,009	0,005	0,005	0,009	0,004	0,003	0,003
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,251	100,314	100,866	100,883	100,338	100,385	100,487	100,479	100,459

	SL26B Mt3c	EL404 Mt3a	EL404 Mt3b	EL404 Mt3c	EL404 Mt2a	EL404 Mt2b	EL404 Mt2c	EL404 Mt1a	EL404 Mt1b
V	0,184	0,008	0,006	0,004	0,016	0,019	0,010	0,023	0,019
Cr	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,015	0,019
Cu	0,003	0,000	0,008	0,000	0,000	0,007	0,000	0,005	0,004
Ni	0,001	0,002	0,000	0,000	0,010	0,005	0,000	0,000	0,000
Mn	0,012	0,016	0,017	0,018	0,009	0,012	0,012	0,011	0,011
K	0,004	0,004	0,001	0,005	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000
Sn	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,064	0,000	0,003	0,003	0,000	0,011	0,001	0,002	0,000
Ti	0,034	0,037	0,027	0,029	0,032	0,028	0,029	0,024	0,026
Al	0,087	0,121	0,116	0,115	0,135	0,125	0,136	0,135	0,158
Si	0,015	0,013	0,015	0,014	0,016	0,011	0,017	0,014	0,020
Mg	0,003	0,003	0,006	0,001	0,000	0,002	0,005	0,004	0,002
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,420	100,206	100,199	100,191	100,220	100,222	100,213	100,234	100,259

	EL404 Mt1c	EL181 Mt1a	EL181 Mt1b	EL181 Mt1c	EL181 Mt2a	EL181 Mt2b	EL181 Mt2c	EL181 Mt3a	EL181 Mt3b
V	0,024	0,154	0,152	0,144	0,149	0,153	0,152	0,140	0,149
Cr	0,000	0,032	0,043	0,045	0,051	0,043	0,045	0,025	0,037
Zn	0,011	0,026	0,049	0,157	0,109	0,048	0,017	0,060	0,030
Cu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,011	0,002	0,000
Ni	0,000	0,008	0,006	0,001	0,003	0,013	0,000	0,003	0,002
Mn	0,015	0,050	0,045	0,056	0,132	0,131	0,117	0,055	0,049
K	0,001	0,003	0,001	0,000	0,001	0,012	0,001	0,000	0,002
Sn	0,001	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001	0,003	0,004	0,003
Ti	0,052	0,045	0,022	0,047	0,027	0,017	0,000	0,017	0,017
Al	0,159	0,017	0,054	0,143	0,060	0,024	0,004	0,045	0,030
Si	0,013	0,004	0,006	0,006	0,007	0,006	0,005	0,007	0,007
Mg	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,002	0,000	0,001
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,281	100,340	100,382	100,601	100,545	100,454	100,357	100,358	100,327

	EL181 Mt3c	EL264_3 Mt1a	EL264_3 Mt1b	EL264_3 Mt1c	EL264_3 Mt2a	EL264_3 Mt2b	EL264_3 Mt2c	EL264_3 Mt3a	EL264_3 Mt3b
V	0,143	0,039	0,049	0,047	0,056	0,047	0,049	0,056	0,054
Cr	0,033	0,004	0,017	0,014	0,055	0,045	0,039	0,047	0,054
Zn	0,008	0,000	0,010	0,021	0,017	0,015	0,000	0,045	0,026
Cu	0,000	0,017	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,007	0,002
Ni	0,005	0,008	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,006
Mn	0,056	0,032	0,033	0,047	0,028	0,031	0,048	0,038	0,039
K	0,003	0,007	0,006	0,026	0,006	0,005	0,007	0,003	0,002
Sn	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Ca	0,005	0,018	0,012	0,052	0,008	0,005	0,012	0,003	0,002
Ti	0,006	0,011	0,011	0,018	0,008	0,008	0,043	0,008	0,068
Al	0,024	0,004	0,013	0,323	0,013	0,017	0,018	0,049	0,024
Si	0,009	0,007	0,005	0,625	0,005	0,007	0,005	0,009	0,008
Mg	0,003	0,000	0,001	0,216	0,006	0,004	0,000	0,004	0,000
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,295	100,149	100,158	101,392	100,202	100,189	100,221	100,271	100,285

	EL264_3 Mt3c	EL411A Mt2a	EL411A Mt2b	EL411A Mt2c	EL411A Mt3a	EL411A Mt3b	EL411A Mt3c	EL411A Mt1a	EL411A Mt1b
V	0,053	0,070	0,070	0,069	0,048	0,048	0,048	0,064	0,075
Cr	0,063	0,012	0,001	0,007	0,022	0,026	0,017	0,024	0,022
Zn	0,067	0,039	0,017	0,016	0,019	0,007	0,051	0,033	0,039
Cu	0,000	0,002	0,005	0,002	0,004	0,013	0,000	0,007	0,000
Ni	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,001	0,003	0,012
Mn	0,059	0,042	0,044	0,038	0,034	0,038	0,057	0,032	0,041
K	0,002	0,001	0,003	0,003	0,006	0,001	0,000	0,003	0,005
Sn	0,006	0,002	0,004	0,000	0,005	0,004	0,006	0,000	0,000
Ca	0,005	0,004	0,004	0,002	0,003	0,006	0,004	0,001	0,003
Ti	0,048	0,025	0,031	0,010	0,018	0,013	0,033	0,036	0,014
Al	0,056	0,037	0,023	0,019	0,013	0,022	0,038	0,032	0,042
Si	0,006	0,009	0,014	0,010	0,010	0,014	0,009	0,011	0,012
Mg	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,369	100,246	100,216	100,176	100,182	100,198	100,264	100,248	100,265

	EL411A Mt1c	EL264_2 Mt1a	EL264_2 Mt1b	EL264_2 Mt1c	EL264_2 Mt2a	EL264_2 Mt2b	EL264_2 Mt2c	EL264_2 Mt3a	EL264_2 Mt3b	EL264_2 Mt3c
V	0,083	0,069	0,054	0,069	0,078	0,064	0,080	0,063	0,065	0,072
Cr	0,030	0,005	0,013	0,008	0,043	0,030	0,016	0,012	0,014	0,016
Zn	0,007	0,007	0,006	0,061	0,409	0,014	0,000	0,015	0,007	0,034
Cu	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
Ni	0,006	0,008	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,006	0,000	0,000
Mn	0,037	0,056	0,060	0,054	0,042	0,041	0,039	0,032	0,028	0,034
K	0,004	0,004	0,006	0,004	0,004	0,000	0,002	0,006	0,010	0,003
Sn	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,003	0,004	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,014	0,009	0,006
Ti	0,010	0,048	0,004	0,269	0,129	0,030	0,005	0,057	0,028	0,042
Al	0,025	0,013	0,013	0,068	0,425	0,044	0,016	0,032	0,017	0,042
Si	0,013	0,006	0,007	0,010	0,007	0,011	0,009	0,035	0,018	0,007
Mg	0,000	0,002	0,000	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400	72,400
O	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600	27,600
Total	100,220	100,222	100,164	100,547	101,143	100,236	100,167	100,276	100,196	100,256

**Annexes 2 - Résultats au LA-ICP-MS en ppm (les valeurs en rouge sont ceux dont l'écart-type est plus grand que 10%, les valeurs en bleu poudre correspondre à une ilménite)**

	EL169_1	EL169_2	EL169_3	EL169_4	EL169_5	EL181_1	EL181_2	EL181_3
Al	4 307,89	3 324,88	2 009,38	2 038,30	1 691,35	1 554,02	1 510,65	1 221,53
Si	3 548,95	2 717,73	2 168,40	983,01	1 734,72	932,41	1 351,64	1 525,11
Ca	133,00	462,59	115,65	80,23	138,05	109,87	37,59	122,88
Sc	0,26	0,25	0,22	0,16	0,16	1,29	2,15	0,20
Ti47	236,36	226,96	228,40	163,35	299,24	192,26	200,22	146,80
Ti49	229,13	213,23	222,62	166,97	326,71	198,05	198,77	151,07
V	1 024,93	811,70	903,50	931,69	896,99	1 340,07	1 439,82	1 039,39
Cr52	136,46	127,86	130,97	121,43	123,31	356,34	506,68	731,47
Cr53	133,43	125,19	130,10	121,43	119,33	344,05	471,27	724,97
Mn	666,42	506,68	547,16	996,02	599,92	524,03	1 270,68	318,75
Co	41,20	54,21	35,34	40,19	38,53	57,10	53,49	25,30
Ni	46,98	1 084,20	33,97	31,08	21,47	130,10	144,56	39,03
Cu63	16,62	14,46	4,12	4,41	7,95	2,56	5,42	13,73
Cu65	21,68	10,91	5,93	10,84	15,18	4,63	7,66	7,44
Zn66	349,11	303,58	334,66	414,89	443,08	520,42	917,96	122,88
Ga69	50,09	17,85	38,81	41,56	39,97	47,70	46,19	5,54
Ga71	55,80	18,50	42,72	50,38	45,68	53,85	54,14	6,12
Y	28,19	35,42	18,79	54,21	26,74	37,59	25,30	39,75
Zr90	0,76	1,37	0,45	0,25	1,23	0,22	0,60	0,22
Zr92	1,16	1,09	0,66	0,42	1,05	1,45	1,30	0,68
Nb	0,08	0,09	0,08	0,01	0,11	0,03	0,02	0,03
Mo	0,93	0,38	0,31	0,35	0,25	0,27	0,56	0,29
Sn	3,61	3,69	2,96	4,05	1,10	0,87	1,81	10,84
Hf	0,08	0,07	0,02	0,00	0,06	0,00	0,01	0,03
Ta	0,02	(0,00)	0,02	0,03	0,07	0,00	0,01	0,01
W	0,11	0,01	0,01	0,05	0,03	0,06	5,06	0,03
Pb	3,76	3,83	3,40	2,96	4,19	3,47	3,47	1,99

	EL181_4	EL264_2_1	EL264_2_2	EL264_2_3	EL264_2_4	EL264_2_5	EL264_3_1	EL264_3_2
Al	1 243,22	795,80	1 814,23	954,10	902,78	7 733,96	#####	3 830,84
Si	1 908,19	1 590,16	3 845,30	2 674,36	1 207,08	#####	#####	#####
Ca	61,44	109,87	344,05	211,78	62,16	#####	#####	5 926,96
Sc	0,36	0,58	0,88	0,52	0,60	2,16	23,85	1,23
Ti47	240,69	547,88	452,47	517,52	438,74	497,29	3 035,76	319,48
Ti49	240,69	549,33	452,47	518,25	431,51	478,49	3 108,04	307,91
V	1 377,66	700,39	573,90	579,69	584,75	568,84	443,80	508,85
Cr52	599,92	228,33	201,37	137,12	147,81	250,09	367,91	459,70
Cr53	395,37	226,60	198,05	133,93	146,44	195,59	214,67	419,95
Mn	470,54	393,28	420,67	637,51	617,99	499,45	889,04	481,38
Co	38,24	21,76	21,70	21,76	21,97	23,41	21,68	20,38
Ni	54,93	20,17	26,74	32,53	19,28	31,59	3 180,32	22,77
Cu63	5,57	3,90	24,43	4,84	4,99	75,89	101,19	22,77
Cu65	29,63	3,90	25,23	5,06	5,35	76,62	59,99	20,82
Zn66	399,71	537,04	400,43	430,07	560,89	571,01	325,26	360,68
Ga69	31,88	37,92	35,03	47,70	44,02	49,37	131,55	36,28
Ga71	36,36	42,56	39,90	55,51	51,68	41,20	49,87	34,48
Y	26,02	10,84	11,56	20,24	14,46	13,01	16,62	14,46
Zr90	0,25	2,82	27,11	0,95	0,32	47,34	284,06	23,06
Zr92	0,61	1,78	14,17	0,80	0,45	25,44	162,63	13,01
Nb	0,07	0,53	6,51	0,26	0,09	1,58	48,43	2,96
Mo	0,43	0,16	0,38	0,12	1,81	1,03	1,23	0,43
Sn	3,54	1,46	2,28	1,00	1,04	4,48	22,41	2,10
Hf	0,02	0,11	1,47	0,04	0,01	1,13	7,08	0,61
Ta	0,01	0,01	0,06	0,01	0,00	0,13	1,45	0,09
W	0,04	0,30	2,39	0,17	0,08	0,72	1,66	0,09
Pb	13,15	1 344,41	5 037,92	2 240,68	2 002,16	#####	2 312,96	173,47

	EL264_3_3	EL264_3_4	EL267C_1	EL267C_2	EL267C_3	EL267C_4	EL404_1	EL404_2
Al	1 517,88	1 590,16	398,26	350,56	3 180,32	954,10	3 563,40	1 872,05
Si	#####	#####	1 532,34	693,89	6 794,32	2 067,21	4 026,00	1 134,80
Ca	2 240,68	3 975,40	93,96	17,64	852,90	59,27	498,73	94,69
Sc	0,80	1,34	0,09	0,15	0,77	0,18	3,96	2,00
Ti47	307,91	409,83	317,31	336,10	1 301,04	419,22	880,37	708,34
Ti49	315,14	404,05	323,09	340,44	1 301,04	448,14	890,49	722,80
V	451,03	558,72	932,41	839,17	1 007,58	847,84	167,98	108,85
Cr52	537,04	701,12	338,27	181,57	252,26	174,92	7,30	4,26
Cr53	511,02	519,69	325,98	175,50	234,19	163,28	3,18	2,45
Mn	440,19	487,17	332,49	284,78	604,26	428,62	242,14	187,93
Co	19,22	19,66	21,25	19,91	38,96	35,20	93,96	47,42
Ni	38,31	24,21	60,72	41,34	44,45	52,76	130,10	15,68
Cu63	17,35	15,54	11,56	1,95	36,14	13,01	153,96	117,09
Cu65	23,13	11,85	23,85	4,05	37,59	7,23	187,93	132,27
Zn66	462,59	291,29	169,14	204,55	571,01	390,31	676,54	344,05
Ga69	36,50	39,32	24,07	7,63	52,11	27,47	65,56	51,03
Ga71	38,45	40,91	27,11	8,16	58,69	29,71	73,36	54,79
Y	10,12	19,52	137,33	19,52	33,25	40,48	5,64	1,95
Zr90	8,75	14,24	2,96	0,63	117,82	0,48	0,57	0,82
Zr92	4,92	8,31	1,90	0,42	65,77	0,51	0,95	0,79
Nb	1,84	5,06	0,30	0,02	7,23	0,05	0,19	0,03
Mo	0,47	0,36	0,19	0,06	0,29	0,09	1,21	0,11
Sn	1,24	2,46	0,54	2,53	1,84	0,33	10,26	6,43
Hf	0,26	0,40	0,06	0,02	1,12	0,00	0,01	0,02
Ta	0,05	0,08	0,06	0,00	0,31	0,01	0,00	0,00
W	0,11	0,16	0,14	0,04	0,21	0,13	0,10	0,12
Pb	267,44	722,80	1 322,72	233,46	2 038,30	722,80	1 322,72	1 178,16

	EL404_3	EL404_4	EL404_5	EL411_1	EL411_2	EL411_3	EL411_4	EL411_5	Granite I Average
Al	2 999,62	3 093,58	1 872,05	2 096,12	1 062,52	547,16	823,27	657,75	1 605,67
Si	2 609,31	2 341,87	954,10	6 360,64	2 609,31	563,78	1 142,02	2 696,04	2 582,81
Ca	520,42	477,05	137,33	491,50	271,05	46,98	98,30	72,28	203,11
Sc	12,06	4,05	1,82	1,13	0,98	0,81	1,03	0,80	1,93
Ti47	1 373,32	1 329,95	978,67	420,67	398,99	276,11	357,79	339,72	448,31
Ti49	1 366,09	1 329,95	977,23	412,72	414,89	280,45	357,06	333,21	449,58
V	67,87	93,75	350,85	454,64	700,39	649,07	744,48	687,38	725,28
Cr52	5,49	5,49	4,63	264,54	176,80	211,78	324,54	142,90	206,70
Cr53	2,55	2,91	1,90	247,92	176,51	211,85	328,87	135,89	222,66
Mn	271,05	315,14	253,70	456,09	439,97	438,74	505,24	429,63	456,63
Co	54,14	55,08	45,54	17,37	25,30	19,83	20,43	21,21	34,49
Ni	505,96	55,66	17,06	20,53	18,72	29,63	20,66	19,08	31,49
Cu63	331,77	434,40	155,40	30,36	16,99	6,65	21,32	5,71	20,91
Cu65	318,03	403,32	171,30	31,80	17,85	6,14	21,68	3,77	21,59
Zn66	910,73	1 084,20	445,24	269,60	362,85	385,25	311,53	399,71	468,15
Ga69	61,44	61,15	84,28	18,29	61,51	41,34	51,61	49,37	42,06
Ga71	63,39	59,27	95,12	20,46	75,17	46,48	60,72	56,74	47,17
Y	1,37	1,45	6,14	15,90	8,67	27,47	21,68	11,56	11,56
Zr90	1,71	2,47	0,59	6,58	3,90	0,21	1,06	0,67	1,76
Zr92	2,02	1,71	0,58	4,05	2,20	0,42	0,87	0,69	0,95
Nb	0,06	0,09	0,05	8,24	0,90	0,03	0,38	0,20	0,32
Mo	2,28	0,79	0,23	0,90	0,16	0,12	0,20	0,18	0,53
Sn	15,18	16,34	20,24	2,02	1,29	1,50	2,37	1,29	4,54
Hf	0,04	0,05	0,02	0,31	0,22	0,01	0,04	0,05	0,11
Ta	0,01	0,01	0,00	0,18	0,02	0,00	0,01	0,04	0,06
W	0,29	0,53	0,13	0,23	0,16	0,03	0,17	0,07	0,18
Pb	3 238,14	4 300,66	1 105,88	1 416,69	571,01	263,10	862,30	368,63	792,94

	SL19_1	SL19_2	SL19_3	SL19_4	SL19_5	SL25_1	SL25_2	SL25_3	SL25_4
Mg	77,1	75 171,2	609,3	278,3	534,9	773,4	828,3	751,7	842,4
Al	1 582,9	2 175 628,0	19 877,0	2 580,4	5 233,1	7 155,7	5 131,9	7 083,4	990,0
Si	2 161,2	5 637 840,0	46 765,2	5 290,9	11 564,8	8 023,1	9 974,6	13 299,5	3 744,0
Ca	79,5	49 873,2	2 060,0	133,0	236,4	362,8	585,5	397,5	986,4
Sc	0,6	263,1	2,1	0,8	0,9	5,6	6,9	17,9	26,7
Ti47	344,1	33 248,8	738,0	443,8	477,8	23 852,4	551,5	81 676,4	244 080
Ti49	343,3	32 526,0	707,6	445,2	472,7	23 852,4	560,2	81 676,4	243 720
V	1 364,6	961,3	1 679,8	776,3	797,2	927,4	1 001,1	1 077,0	550,8
Cr52	105,0	361,4	11,1	57,8	52,0	91,8	52,3	4,2	3,0
Cr53	101,9	148,2	5,9	54,0	47,4	36,9	39,2	3,3	1,3
Mn	146,2	1 973,2	230,0	156,7	141,5	1 395,0	311,5	1 785,3	5 994,0
Co	18,9	144,6	26,6	19,5	20,7	23,6	19,7	37,6	24,9
Ni	6,4	650,5	4,6	11,6	3,8	15,5	9,2	4,3	0,7
Cu63	4,5	264,5	16,7	15,5	18,3	33,5	32,2	22,3	4,3
Cu65	4,7	276,8	16,6	16,4	18,6	32,4	32,1	24,9	8,7
Zn66	126,5	1 163,7	395,4	181,4	200,2	156,8	117,0	338,3	403,2
Ga69	109,4	4 127,2	161,2	89,3	93,4	50,4	55,2	157,6	14,3
Ga71	124,6	983,0	147,3	101,8	104,8	92,5	86,2	123,6	6,7
Y	35,4	115,6	37,6	12,3	23,1	22,4	36,1	86,7	50,4
Zr90	0,6	76,6	19,4	7,1	14,2	34,5	65,1	187,2	49,3
Zr92	0,8	39,7	10,1	4,0	7,5	21,5	40,3	110,6	28,4
Nb	0,1	206,7	0,4	0,1	0,2	29,6	1,4	104,1	338,4
Mo	0,2	3,6	0,4	0,5	0,7	3,3	4,2	6,9	1,1
Sn	1,4	174,9	0,7	0,9	0,8	1,5	1,2	3,8	8,4
Hf	0,0	4,3	0,9	0,3	0,7	0,8	1,3	4,1	1,4
Ta	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	1,3	0,1	8,5	26,6
W	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	1,2
Pb	8,6	2 233,5	3 173,1	1 062,5	2 284,0	121,4	148,9	274,7	61,2



	SL26B_1	SL26B_2	SL73E_1	SL73E_2	SL73E_3	SL73E_4	SL73E_5	SL8_1
Mg	477,0	881,8	484,3	53 487,2	404,8	353,4	203,1	491,5
Al	3 527,3	5 413,8	3 585,1	86 736,0	2 616,5	4 944,0	1 676,9	2 674,4
Si	3 086,4	8 268,8	5 204,2	961 324	3 823,6	10 336,0	2 197,3	4 842,8
Ca	61,4	223,3	932,4	80 230,8	73,0	498,7	138,1	257,3
Sc	2,2	3,7	4,4	116,4	3,8	1,6	1,5	2,1
Ti47	1 619,1	4 813,8	12 143,0	412 719	7 589,4	2 898,4	562,3	491,5
Ti49	1 756,4	4 929,5	12 215,3	411 996	7 734,0	2 891,2	563,1	549,3
V	1 597,4	1 590,2	14,2	12,9	14,0	13,6	11,8	805,9
Cr52	63,4	59,0	15,8	64,3	14,5	10,7	7,0	80,1
Cr53	62,2	51,5	13,6	14,4	7,9	6,7	4,0	74,6
Mn	145,3	149,9	3 614,0	102 638	2 103,3	1 546,8	1 220,1	229,9
Co	22,2	22,8	5,0	18,8	5,0	8,1	5,8	21,6
Ni	14,8	12,6	10,8	28,9	3,3	3,8	3,3	5,7
Cu63	2,9	4,7	26,7	41,0	2,4	2,4	1,2	20,0
Cu65	2,5	5,0	2,4	29,8	3,1	2,5	1,5	21,7
Zn66	117,8	88,2	1 301,0	4 553,6	1 185,4	1 351,6	596,3	144,6
Ga69	156,1	149,5	175,9	397,5	172,1	212,5	203,1	88,0
Ga71	174,9	166,3	196,6	128,7	190,1	235,3	229,9	96,5
Y	94,0	79,5	0,4	0,8	0,3	0,3	0,3	29,6
Zr90	6,3	9,4	2,5	161,9	0,4	1,1	0,5	399,0
Zr92	5,1	7,1	2,1	83,1	0,5	1,0	0,8	234,2
Nb	0,4	2,4	57,8	1 243,2	49,9	6,4	2,0	1,4
Mo	3,9	4,0	2,3	19,9	0,5	0,9	0,7	16,4
Sn	3,9	8,8	26,7	244,3	16,7	15,9	9,7	0,9
Hf	0,2	0,4	0,1	3,9	0,0	0,0	0,0	9,3
Ta	0,0	0,1	4,4	41,6	3,9	0,4	0,0	0,1
W	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2
Pb	7,7	19,8	6,4	123,6	3,2	10,3	2,5	122,6

	SL8_2	SL8_3	SL8_4	SL80_1	SL80_2	SL80_3	SL80_4
Mg	910,7	585,5	585,5	457,5	1 901,0	190,8	616,5
Al	3 527,3	2 652,7	2 732,2	3 202,0	11 420,2	2 811,7	5 045,1
Si	4 322,3	2 117,8	4 517,5	3 845,3	16 624,4	3 028,5	4 445,2
Ca	159,7	71,6	134,4	140,2	1 705,8	87,5	119,3
Sc	1,9	1,5	2,1	4,5	3,6	1,8	2,9
Ti47	408,4	438,0	2 587,6	558,0	666,4	1 156,5	730,0
Ti49	406,9	446,7	2 688,8	539,9	662,1	1 185,4	715,6
V	1 033,6	873,1	886,2	641,1	689,6	777,7	779,9
Cr52	37,4	25,6	19,7	28,8	40,1	24,5	19,8
Cr53	31,6	19,4	16,3	24,8	22,1	18,9	15,2
Mn	250,8	256,6	389,6	339,0	115,6	173,5	174,3
Co	50,6	27,2	29,9	17,2	14,8	23,8	23,4
Ni	6,6	57,8	3,5	11,6	7,0	7,1	6,8
Cu63	5,7	3,5	4,3	6,8	39,8	11,0	22,2
Cu65	7,0	23,9	5,4	8,6	42,6	11,3	23,6
Zn66	322,4	315,9	417,8	97,6	89,6	67,9	221,9
Ga69	133,5	143,4	149,0	127,0	135,7	176,9	148,4
Ga71	157,6	163,4	174,0	148,2	161,2	200,7	172,5
Y	40,5	23,1	35,4	13,7	25,3	30,4	16,6
Zr90	168,4	41,9	53,5	12,5	70,8	10,8	14,7
Zr92	98,6	25,2	31,9	9,5	48,9	7,8	11,8
Nb	0,1	0,1	4,5	0,1	0,3	0,1	0,1
Mo	10,8	4,3	6,2	5,9	19,8	4,8	7,6
Sn	1,4	1,4	2,6	1,2	2,7	1,3	3,0
Hf	5,3	0,5	0,7	0,3	1,6	0,2	0,4
Ta	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
W	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Pb	48,8	14,7	34,9	20,2	107,6	10,1	23,3

	SL85A_1	SL85A_2	SL85A_3	SL85A_4	SL85A_5	Granite_S_Average
Mg	459 701	14 672,8	27 394,1	6 266,7	1 113,1	545,9
Al	389 589	15 612,5	94 686,8	9 541,0	4 228,4	3 581,2
Si	1 568 480	49 439,5	244 306	25 659,4	8 456,8	7 907,4
Ca	3 368,2	8 384,5	15 034,2	1 279,4	261,7	406,9
Sc	275,4	208,9	350,6	112,8	2,4	3,6
Ti47	79 074,3	253 703	1 937 104	620 885	361,4	1 083,9
Ti49	79 363,4	252 257	1 958 788	620 162	354,2	1 068,3
V	731,5	468,4	2 334,6	1 749,2	713,4	758,5
Cr52	225,5	162,6	983,0	280,4	416,3	62,0
Cr53	176,3	99,0	845,7	273,9	408,4	51,5
Mn	3 006,8	10 697,4	22 912,8	12 967,0	149,6	667,0
Co	231,3	69,2	80,2	64,4	24,8	19,7
Ni	161,2	23,6	37,2	23,6	19,9	4,3
Cu63	78,1	35,9	433,7	142,4	46,8	15,8
Cu65	281,9	42,1	455,4	156,8	46,0	18,9
Zn66	2 681,6	946,9	1 264,9	1 056,0	203,8	480,3
Ga69	1 293,8	81,7	433,7	54,2	67,1	127,4
Ga71	315,1	71,6	112,0	23,1	75,9	145,0
Y	15,2	15,2	477,0	101,2	44,1	26,3
Zr90	114,2	156,8	2 941,8	360,7	391,8	59,3
Zr92	67,3	92,5	1 669,7	209,6	226,2	35,4
Nb	347,7	1 474,5	5 999,2	4 206,7	1,7	1,6
Mo	1,7	3,3	10,0	9,8	1,7	4,6
Sn	86,2	33,3	216,8	129,4	1,4	6,2
Hf	3,5	3,7	120,7	7,7	9,1	1,1
Ta	21,0	68,7	186,5	171,3	0,2	0,2
W	0,2	0,2	4,0	1,1	0,0	0,1
Pb	317,3	292,0	8 818,2	2 197,3	284,8	280,4