



**CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES OXYDES DE
FE-TI DANS UN DÉPÔT DE FE-TI-P ASSOCIÉ À LA
SUITE ANORTHOSITIQUE DU LAC-SAINT-JEAN,
QUÉBEC, CANADA SECTEUR LAC À PAUL ET
INTÉGRATION DES DONNÉES DU SECTEUR LAC À LA
MINE**

NÉRON Alexandre

Avec la collaboration de :
DARE Sarah et BARNES, Sarah-Jane



24 avril 2011

Table des matières

Table des matières	ii
Liste des figures	iii
Liste des tables	iv
Résumé	v
Remerciements	vi
1.0 Introduction	2
1.1 Problématique	2
1.2 Objectifs	4
1.3 Localisation de la zone d'étude	5
1.4 Choix des échantillons et pétrographie	6
2.2 Caractérisation des oxydes.....	7
1.5 Protocole analytique.....	8
1.5 Bilan de masse	10
2.0 Résultats	10
2.1 Résultat du LA-ICP-MS	10
2.1 Bilan de masse par lithologie	12
2.2 Bilan de masse pour les nelsonites	14
3.0 Argumentation.....	15
3.1 Contrôle des oxydes	15
3.2 Contrôle des silicates	15
3.3 Détermination d'une relation lithologique avec les oxydes de Fe-Ti dans l'anorthosite.....	17
3.4 Comparaisons des anorthosites avec les intrusions litées	20
3.5 Impacts sur la géologie économique	22
4.0 Conclusion.....	23
5.0 Recommandations.....	23
6.0 Références.....	25
Annexe 1 : Composition des échantillons	27
Annexe 2 : Comparaison des Standard.....	28
Annexe 3 : Teneur obtenue du LA-ICP-MS	29
Annexe 4 : Résultat du bilan de masse	41

Liste des figures

Figure 1 : Relation entre la stratigraphie et la géochimie du complexe lité du Bushveld (Barnes et al. 2004).....	2
Figure 2 : Classification des types de gisement en fonction des éléments traces dans la magnétite (Tirée de Dupuis et Beaudoin 2011).....	3
Figure 3 : Classification des intrusions litées en fonction de la géochimies des magnétites (Méric 2011)	4
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (Fredette 2007).....	5
Figure 5 : localisation des échantillons dans le secteur du Lac à Paul (Fredette 2007)	6
Figure 6 : Composition % poids des échantillons sélectionnées (modifiée de Fredette 2006) – Voir annexe 1	7
Figure 7 : Diagramme tétraédrique Fe-Ti-Al-Mg montrant la composition des oxyde de Fe-Ti (magnétite = bleu, ilménite = rouge et spinelle = vert)	7
Figure 8 : Photographie en lumière réfléchie des oxydes analysés	8
Figure 9 : Bilan de masse entre les lithologies.....	13
Figure 10 : Bilan de masse entre les préridotiques nelsonitiques étudiées (PAU2-5, PAU2-80 et 1116)	14
Figure 11 : Influence de l'olivine sur le Mg, Mn, Co et Ni	16
Figure 12 : Influence du plagioclase sur l'Al et Ga entre les lithologies	16
Figure 13 : Influence des pyroxènes dans les nelsonites sur le Cr, V et Sc.....	17
Figure 14 : Diagramme binaire montrant le comportement du Zr et Hf dans les ilménites du Lac à Paul.....	17
Figure 15 : Comparaison entre les éléments traces dans le magnétite de la partie évoluée de Bushveld (rose) et ceux de la partie plus primitive de Bushveld (gris) (Dare et al. 2012)	18
Figure 16 : Spider diagramme montrant la variation des spectres en fonction des lithologies	19
Figure 17 : Comportement du Nb et Ta dans l'ilménite du lac à Paul.	19
Figure 18 : Comparaison du comportement des éléments traces dans la magnétite du secteur de lac à Paul et du secteur de lac à la Mine (Dalpé 2012)	20
Figure 19 : Comparaisons des anorthosites avec les intrusions litées à l'aide du Ti et Cr dans les magnétites (modifiés de Méric 2011)	21
Figure 20 : Comparaison des anorthosites et des intrusion litées à l'aide des spider diagrammes pour les lithologies sans apatite (modifiée de Dare et al. 2012) ...	22
Figure 21 : Classification des anorthosites comparativement des intrusions litées (modifiée de Méric 2011, Dupuis et Beaudion 2011)	23

Liste des tables

Table 1 : Valeurs moyennes de concentration des éléments traces dans les oxydes de Fe-Ti en fonction des lithologies	11
Table 2 : Contrôle des phases minérales (magnétite Mg, ilménite Im, spinelle Sp, silicate Si et oxydes de fer en générale Ox) sur les éléments par lithologie.....	14
Table 3 : Composition modal des échantillons (Fredette 2006)	27
Table 4 : Composition % poids des échantillons recalculer avec le pourcentage modale.	27
Table 5 : Densités utilisées pour le bilan de masse et pour calculer les pourcentages poids.....	27
Table 6 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Oxydes de Fe-Ti massif.....	29
Table 7 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Dunites.....	30
Table 8 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Nelsonites	31
Table 9 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Troctolites	32
Table 10 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des oxydes de Fe-Ti massif.....	33
Table 11 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des Dunites	34
Table 12 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des Nelsonites	35
Table 13 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des Troctolites.....	36
Table 14 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Oxydes de Fe-Ti massif.....	37
Table 15 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Dunites.....	38
Table 16 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Nelsonites	39
Table 17 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Troctolites	40
Table 18 : Résultat du bilan de masse par échantillon.....	41

Résumé

Dans les intrusions litées, la caractérisation géochimique des oxydes de Fe-Ti marque l'évolution du magma en regard sur la stratigraphie (Barnes 2004, Méric 2010). L'analyse par ablation laser jumelé avec le ICP-MS sur des échantillons provenant du secteur du Lac à Paul (Fredette 2006) correspondant à un dépôt d'oxyde Fe-Ti-P associé à la suite anorthositique du Lac-St-Jean (SALSJ), a permis de déterminer les différences et les similitudes avec les intrusions litées.

Pour ce faire, des analyses, par LA-ICP-MS, ont été effectuées sur la magnétite, l'ilménite et le spinelle de 10 échantillons (3 oxydes de Fe-Ti massif, 2 dunites riche en Fe-Ti, 3 péridotites nelsonitiques et 2 troctolites). Un bilan de masse a déterminé que, pour la SALSJ, l'olivine contrôle Mg, Mn, Co et Ni, le plagioclase contrôle Al et Ga, les pyroxènes contrôlent Sc, Ni, V et Cr, l'ilménite contrôle Ti, Nb et Ta et finalement Y, Mo, Zr et Hf sont compris dans des phases accessoires. Parmi les oxydes de Fe-Ti, c'est l'ilménite qui contrôle la majorité des éléments traces.

À l'intérieur de ce même secteur, on ne note pratiquement aucune variation de concentration des éléments traces dans les unités pétrographiques à l'exception de Zr, Hf, Ni et Cr. Pour Zr et Hf, ils sont reliés à la quantité de zircons présents dans la roche total. Pour Cr et Ni, la variation est probablement causée par la présence de pyroxène. Selon le bilan de masse, seul le Ta et Nb est présent dans une seule phase minérale (l'ilménite), et ce, dans toutes les lithologies. Le comportement de ces éléments ne montre pas de distinction entre les unités pétrographiques.

La comparaison avec un autre secteur anorthositique, Lac à La Mine, a été effectuée. Les spectres pour les éléments traces dans la magnétite concordent parfaitement. La comparaison avec une intrusion litée, le Bushveld, a aussi été effectuée. Globalement, pour les éléments qui sont contrôlés par l'ilménite, on observe un appauvrissement des éléments traces dans la magnétite de l'anorthosite comparativement à celles des intrusions litées. Ce comportement peut être expliqué par 1) l'ilménite qui aurait cristallisé avant la magnétite, ce qui laisse moins d'éléments dans le liquide résiduel pour la magnétite ou 2) l'ilménite est exsolvée de la magnétite pour former des grains et ainsi appauvrir les magnétites.

Au final, ce présent projet montre que le comportement des éléments traces dans les oxydes de Fe-Ti de l'anorthosite n'est pas similaire qu'à celui dans les intrusions litées. De plus, il n'est pas possible d'observer une évolution du magma à l'aide des éléments traces suggérant que la cristallisation fractionnée n'est pas le processus le plus important. De plus, une classification pour la géologie d'exploration a été déterminée permettant de distinguer les anorthosites avec les intrusions litées.

Remerciements

J'aimerais d'abord remercier Sarah Dare, co-directrice du projet, qui semaines après semaines était là pour me soutenir, me conseiller, me diriger et surtout de m'encourager. Merci beaucoup j'ai adoré travailler avec vous.

Merci à Sarah-Jane Barnes, directrice du projet et titulaire de la Chaire de Recherche du Canada en Métallogénie Magmatique, qui a initié le projet et qui m'a orienté dans la bonne direction pour la présentation. Merci de vos conseils.

Merci à Danny Savard et Sadia Mehdi du laboratoire LabMaTer pour leur patience et de leur aide pour l'utilisation et l'interprétation avec le LA-ICP-MS.

Merci à Paul Bédard, second lecteur, pour les conseils lors de la rédaction de cet ouvrage.

Merci à Hugues Guérin Tremblay de la compagnie Ressources d'Ariane qui ma ouvert ses portes pour répondre à mes questions.

1.0 Introduction

1.1 Problématique

Le projet s'inscrit dans une série de caractérisations géochimiques d'oxydes de fer par ablation laser ICP-MS pour les gisements magmatiques dirigée par la Chaire de Recherche du Canada en Métallogénie Magmatique. Les éléments traces composant les oxydes de fer peuvent être des indicateurs discriminants pour l'élaboration de l'histoire géologique d'un secteur et pour l'exploration. Cette série de projet vise à caractériser deux types de gisement magmatique de Fe-Ti-V/P soit les intrusions litées et les oxydes massifs des suites anorthositiques.

Pour les intrusions litées, les oxydes de fer peuvent permettre de suivre l'évolution d'un magma lors de la cristallisation. Barnes et al. (2004) ont montré que les éléments plus compatibles dans les oxydes de fer tel que le vanadium ou le chrome dans la magnétite entre plus facilement dans la structure de la magnétite en début de cristallisation. Ainsi, les magnétites plus primitives sont plus enrichies en V_2O_5 que les magnétites plus évoluées. La figure 1 montre cette relation pour le complexe lité du Bushveld, Afrique du Sud.

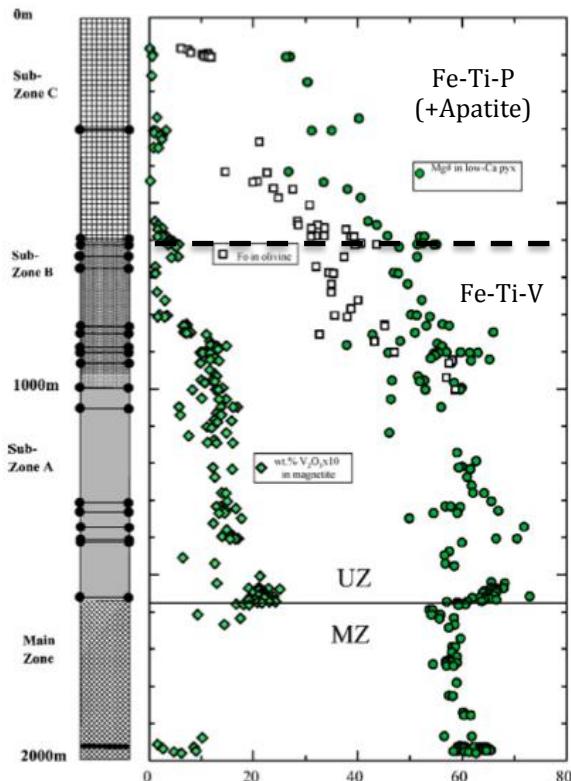


Figure 1 : Relation entre la stratigraphie et la géochimie du complexe lité du Bushveld (Barnes et al. 2004)

La teneur en vanadium tend à diminuer avec l'évolution du magma, tel que suggéré en présentant la concentration en forstérite dans l'olivine selon la stratigraphie (Barnes et al 2004). De plus ils ont démontré qu'il existe un lien entre la fractionation lors de la cristallisation et la concentration des éléments traces dans les oxydes de fer. Cette hypothèse a été par la suite testée et démontrée sur le complexe lité de la suite intrusive de Sept-Îles (Méric 2010).

Dupuis et Beaudoin (2011) ont effectué une classification des différentes types de gisements en fonction de la composition en éléments traces des magnétites. La figure 2 montre cette classification. Les gisements magmatiques Fe-Ti, V sont peu documentés. C'est pourquoi la Chaire de Recherche de Canada en Métallogénie Magmatique effectue cette série de projets.

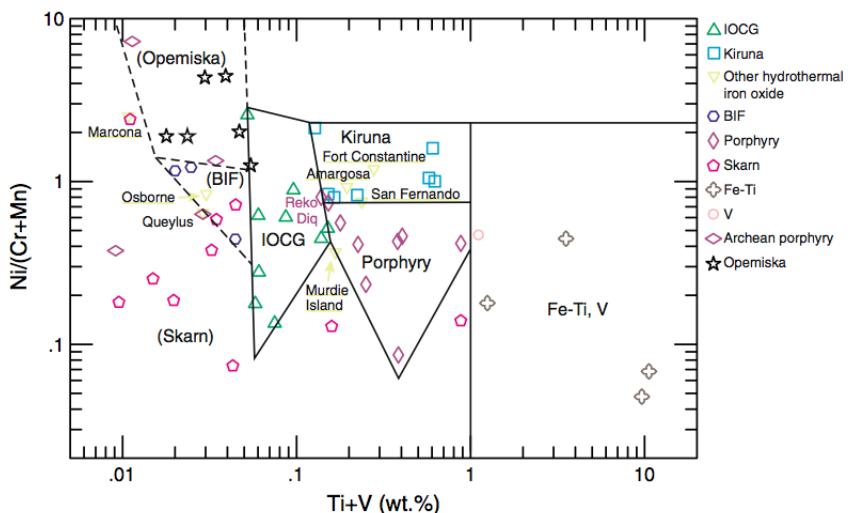


Figure 2 : Classification des types de gisement en fonction des éléments traces dans la magnétite (Tirée de Dupuis et Beaudoin 2011)

Méric (2011) a modifié le champ de la classification des gisements magmatiques (Dupuis et Beaudoin 2011) afin d'y distinguer les magnétite des intrusions litées plus primitives à Fe-Ti-V de celles des intrusions litées plus évoluées à Fe-Ti-P (Figure 3).

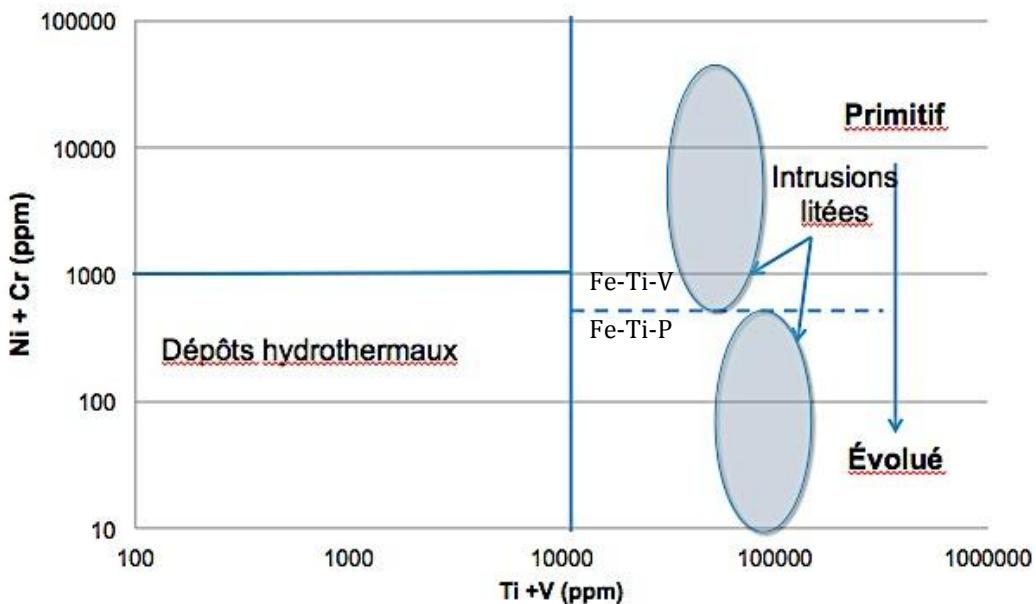


Figure 3 : Classification des intrusions litées en fonction de la géochimie des magnétites (Méric 2011)

1.2 Objectifs

L'objectif global des projets est d'établir une classification distinguant les gisements magmatiques l'un par rapport à l'autre par la caractérisation géochimique des oxydes de fer (magnétite, ilménite et spinelle) pour 1) établir un guide d'exploration (Dupuis et Beaudoin 2011) et 2) comprendre les processus de la genèse des dépôts. Pour ce faire, le comportement des oxydes de fer dans les anorthosites sera comparé avec celui des intrusions litées pour déterminer s'il y a une distinction. De façon spécifique, ce projet recueille des données sur un secteur anorthositique, plus précisément celui du Lac à Paul. À titre de comparatif, les données du Lac à la Mine (Dalgé 2012) seront utilisées afin de comparer deux secteurs de la SALSJ et les données de Sept-Îles (Meric 2011) et de Bushveld (Dare et al. 2012) seront utilisées pour comparer avec les intrusions litées.

L'objectif à plus petite échelle est d'observer le comportement géochimique dans les oxydes de fer entre les différentes lithologies à l'intérieur d'un même secteur. Pour ce faire, un bilan de masse permet de déterminer les éléments contrôlés par les oxydes de fer et ceux contrôlés par les silicates. Par la suite, à l'aide de diagrammes multi-élémentaires comparant chacune des unités pétrographiques étudiées, une relation pourra être déterminé.

1.3 Localisation de la zone d'étude

Ce projet se situe dans le secteur du Lac à Paul, à environ 200 km au nord de Chicoutimi (Figure 4), associé à la suite anorthositique du Saguenay-Lac Saint-Jean (SALSJ). La SALSJ possède plusieurs unités d'oxydes massifs et de roches de type nelsonitiques. Pour l'instant le débat ne fait pas l'unanimité sur l'explication de leur origine. Plusieurs modèles sont proposés, mais deux sont plus couramment mentionnés. L'un est le processus de cristallisation fractionné et l'autre est le processus d'immiscibilité (Naslund 1983).

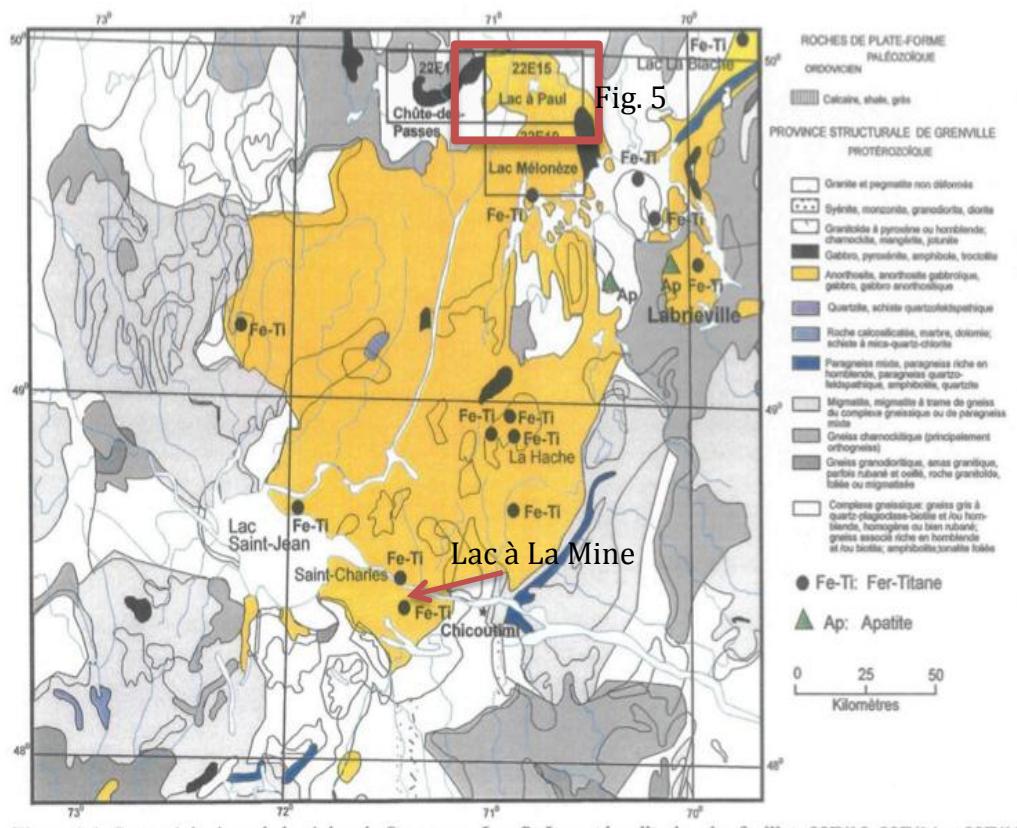


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (Fredette 2007)

On s'intéresse aux suites anorthositiques notamment pour la présence de nelsonite qui est constitué d'oxyde de Fe-Ti et d'apatite. Ces apatites peuvent former des gisements de phosphore. Ainsi, il est intéressant de déterminer s'il y a un facteur discriminant les magnétites associées aux unités pétrographiques à phosphore et de celles sans phosphore.

1.4 Choix des échantillons et pétrographie

Les échantillons ont été sélectionnés à partir de la collection de Julie Fredette (2006). Les analyses pétrographiques et géochimiques pour la roche totale et des minéraux en microsonde étant déjà effectuées, 10 de ces échantillons ont été choisis pour le présent projet. Plusieurs paramètres ont été considérés lors de l'échantillonnage. Quatre lithologies ont été choisies. Trois oxydes massifs de Fe-Ti (2288, 4047 et 2453), deux dunites à oxydes de Fe-Ti (NAI-7 et 2236B), trois périclases nelsonitiques (1116B, PAU2-5 et PAU2-80) et deux troctolite \pm oxydes de Fe-Ti (C140 et C555). Une répartition homogène dans le secteur a été privilégiée par la localisation géographique (figure 5). Finalement, un regard sur l'analyse en roche totale des échantillons a été effectué pour s'assurer une bonne représentabilité des échantillons choisis.

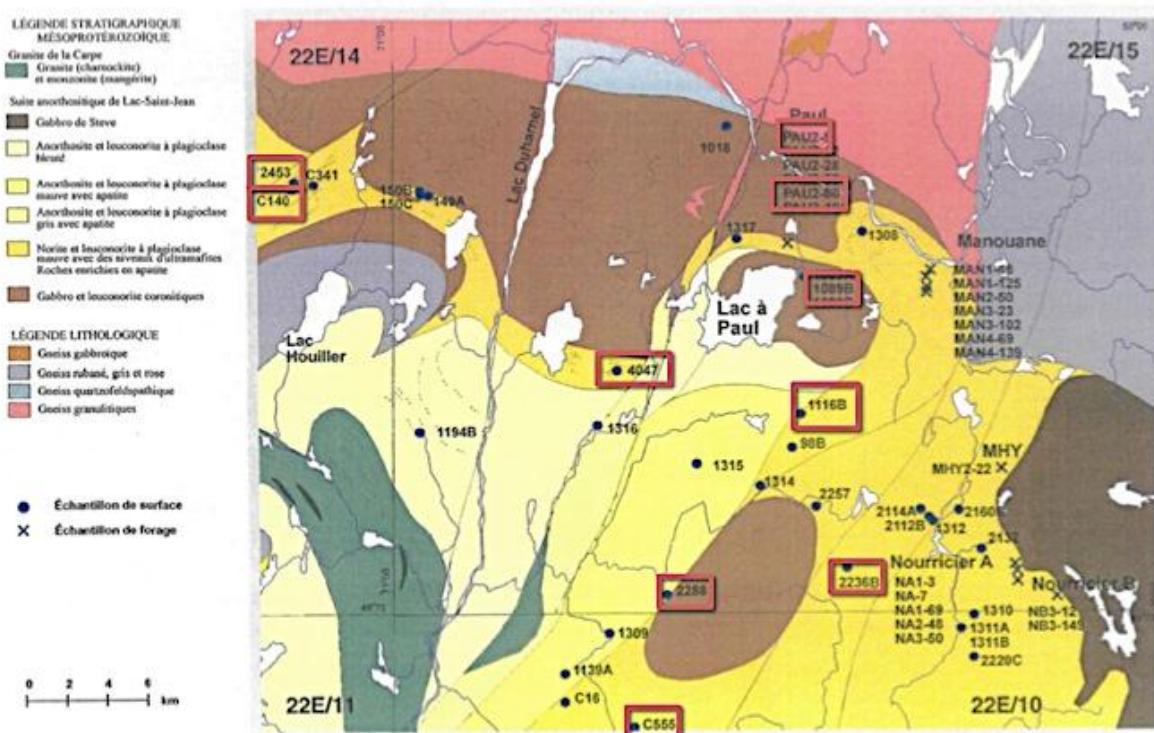


Figure 5 : localisation des échantillons dans le secteur du Lac à Paul (Fredette 2007)

La figure 6 montre la composition pourcentage poids moyenne pour chacune des unités pétrographiques. Les compositions en pourcentage poids entre les échantillons d'un même unité pétrographique sont relativement constantes (Annexe 1). L'équation suivante a permis de calculer le pourcentage poids des éléments.

$$\%poids = \%modale * \frac{densité_{minérale}}{densité_{total}}$$

L'annexe 1 donne les pourcentages modales utilisés et les densités utilisées.

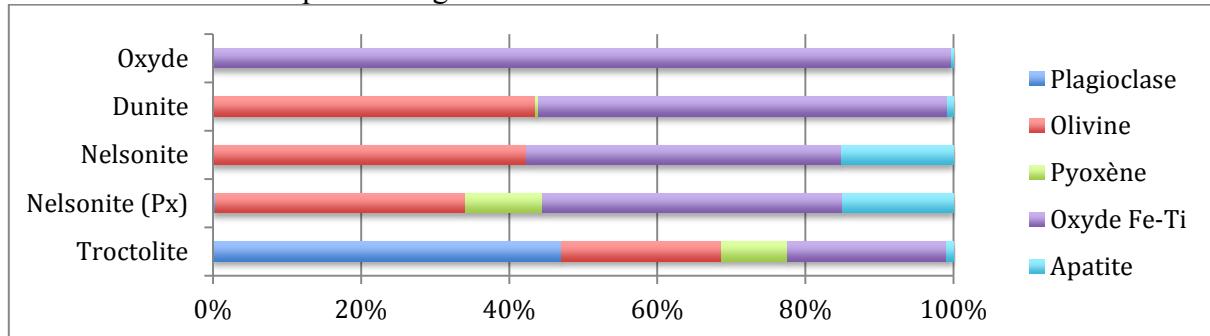


Figure 6 : Composition %poids des échantillons sélectionnées (modifiée de Fredette 2006) – Voir annexe 1

2.2 Caractérisation des oxydes.

Les oxydes analysés sont l'ilménite, la magnétite et le spinelle. La figure 7 montre la composition de ces oxydes dans un diagramme tétraédrique ayant comme pôle Fe, Ti, Al et Mg. La magnétite $[FeO^*\text{Fe}_2\text{O}_3]$ est constitué principalement de Fe avec parfois légèrement de Ti et Al. L'ilménite $[Fe\text{TiO}_3]$ est à l'intermédiaire de Fe et Ti avec légèrement de Mg. Finalement, le spinelle $[(Mg,\text{Fe})\text{Al}_2\text{O}_4]$ est un intermédiaire de Fe et Al et a environ 10-15% de Mg.

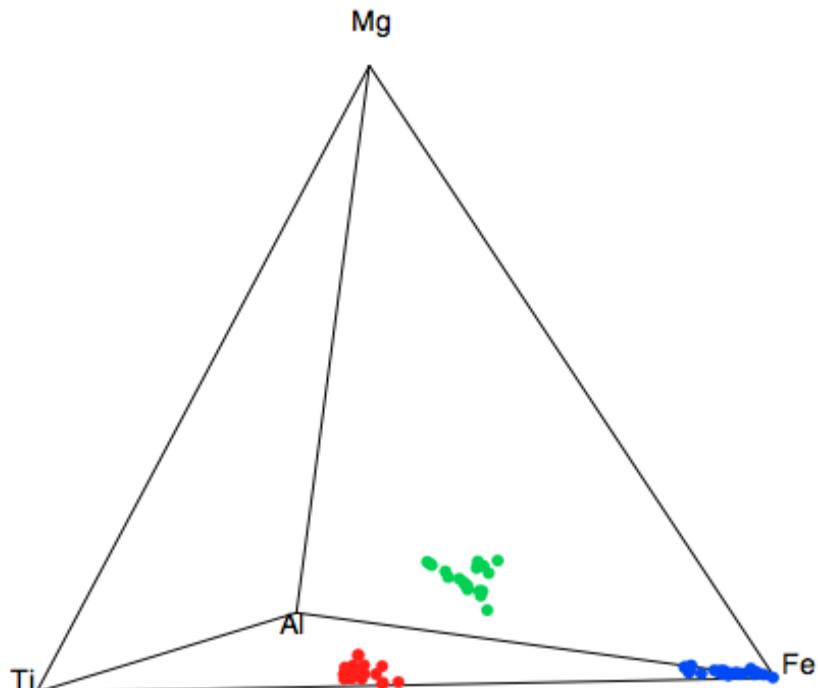
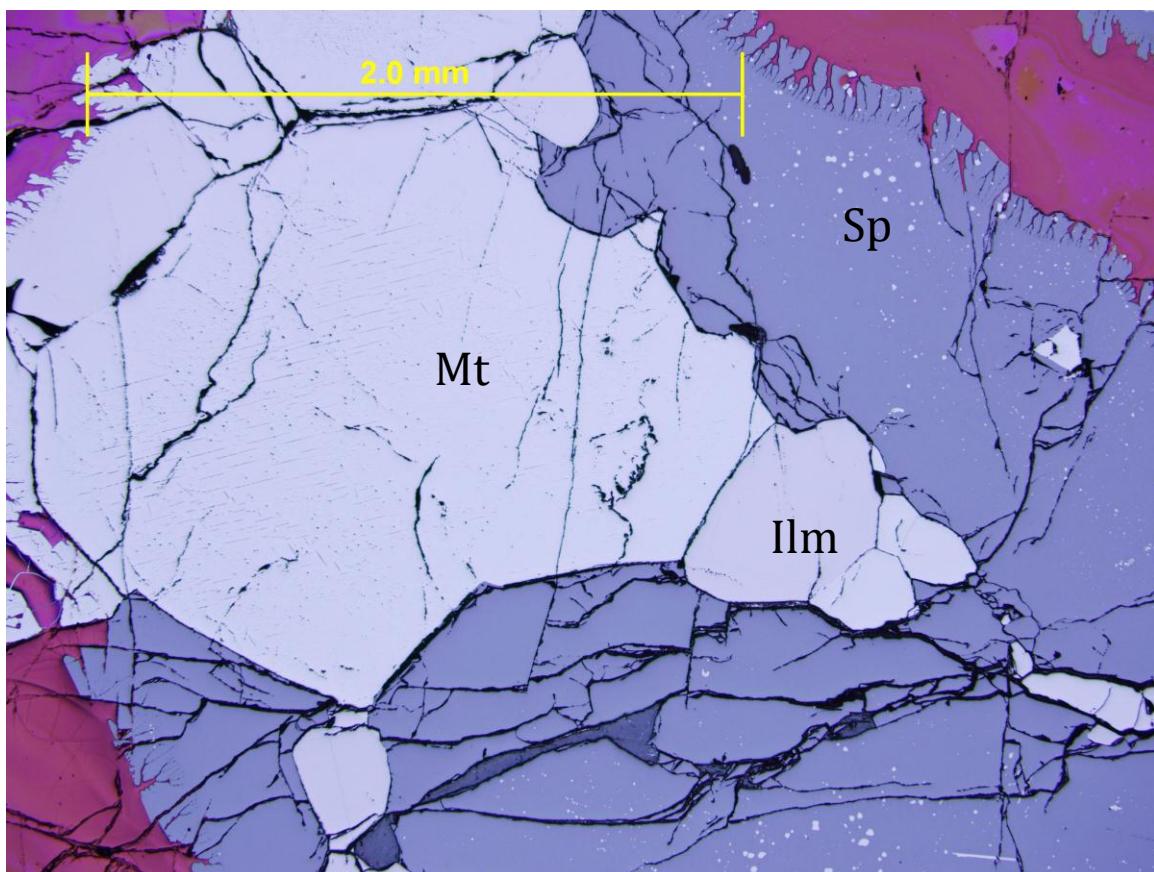


Figure 7 : Diagramme tétraédrique Fe-Ti-Al-Mg montrant la composition des oxydes de Fe-Ti (magnétite = bleu, ilménite = rouge et spinelle = vert)

L'étude pétrographique des oxydes (figure 8) montre que :

- La magnétite est granulaire et a généralement des exsolutions laminaire d'ilménite et de spinelle.
- L'ilménite est granulaire et possède parfois des exsolutions de magnétite.
- Le spinelle est aussi granulaire et possède des exsolutions d'ilménite en son cœur ce qui montre une zonation primaire.

La présence de spinelle sous forme granulaire est limitée aux anorthosites. En effet, dans l'intrusion litée de Sept-Îles on retrouve du spinelle, mais seulement sous forme d'exsolutions laminaire dans la magnétite (Méric 2011).



1.5 Protocole analytique

La méthode d'ablation laser couplée avec un ICP-MS est utilisée pour ce type d'étude. Celle-ci offre :

- Une limite de détection suffisamment basse (< 1ppm) pour détecter les éléments traces avec un niveau d'incertitude acceptable.
- La possibilité d'effectuer une étude multiélémentaire ayant un grand nombre d'éléments. Dans le présent projet, 39 éléments ont été analysés : ^{24}Mg , ^{27}Al , ^{29}Si , ^{31}P , ^{33}S , ^{44}Ca , ^{45}Sc , ^{47}Ti , ^{51}V , ^{52}Cr , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{69}Ga , ^{74}Ge , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{93}Nb , ^{95}Mo , ^{101}Ru , ^{106}Pd , ^{107}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{118}Sn , ^{121}Sb , ^{178}Hf , ^{181}Ta , ^{182}W , ^{186}Re , ^{193}Ir , ^{195}Pt , ^{197}Au , ^{208}Pb et ^{209}Bi .
- La possibilité d'inclure les exsolutions afin d'obtenir la composition magmatique de oxydes initiaux. Contrairement à la microsonde, le LA-ICP-MS effectue une analyse sur un trait et non sur un point. Le résultat est donc une valeur moyenne sur toute la distance du trait.

Une taille de faisceau de 75 microns avec une vitesse de déplacement de 10 $\mu\text{m/s}$ et une fréquence laser de 15 Hz ont été paramétrés par analyser les oxydes. Puisque nos oxydes sont riches en Fer, des matériaux de référence riche en fer sont utilisés pour effectuer notre analyse. Le matériel de référence utilisé pour calibrer l'ICP-MS est GSE-1. Les matériaux de références pour contrôler la qualité du résultat utilisés sont GSD-1 et BC-28

L'interprétation du ICP-MS, comptant des coups par seconde, s'effectue avec la comparaison de matériaux de calibration ayant des valeurs en $\mu\text{g/g}$ connues. L'analyse des matériaux de références (GSE-1, GSD-1 et BC-28) est effectuée avant et après chaque bloc d'analyse. Afin de détecter et mesurer le bruit de fond produit par les gaz utilisés, l'ICP-MS commence 30 secondes avant que l'ablation débute. La période d'ablation est de 60 secondes pour une durée totale de 90 secondes par analyse.

Afin d'inclure les exsolutions, les traits sont effectués perpendiculairement à ces dernières. De plus, des photographies de tous les grains sélectionnés ont été effectuées afin d'éviter d'inclure des intrusions ou des imperfections. Afin de s'assurer que les phases oxydes sont pures on utilise les valeurs de Si, P, S et Ca pour éviter les inclusions.

Le traitement des données commence sous le logiciel IgorPro/Iolite. Ce dernier transforme les coups par seconde en $\mu\text{g/g}$ en comparant avec la valeur de calibration. Ici, puisqu'il est un élément majeur de notre analyse, le fer a été utilisé pour normaliser toutes les analyses. Le fer présent dans chaque phase minérale a été obtenu par l'étude pétrographique. En fait, en connaissant la composition des phases et en quantifiant la présence d'exsolutions, la proportion de fer dans chaque phase est déterminable (magnétite 65%_{Fe}, ilménite 33%_{Fe} et spinelle 25%_{Fe}). De plus, le logiciel soustrait le bruit de fond en enlevant la valeur des 30 premières secondes. Le traitement des données se poursuit sur Excel. Ce dernier permet de valider l'interpolation de GSE-1 avec les autres matériaux de référence en comparant la valeur interpolée avec la valeur

réelle (Annexe 2). De plus, il y est possible de juger de la validité des résultats. En fait, une valeur est dite fiable si la justesse exprimée par l'écart relatif à la moyenne et la précision exprimé par le RDS sont inférieures à 10%.

Au total, 30 grains de magnétites, 32 grains d'ilménites et 19 grains de spinelles ont été analysés par cette méthode ce qui donne un total de 81 analyses.

1.5 Bilan de masse

Un bilan de masse s'effectue pour calculer la proportion d'un élément par chaque phase minérale. Pour obtenir la proportion d'un élément dans une phase minérale ($C_{Minéral}^{\text{Élément}}$), on multiplie le pourcentage poids de cette phase dans la roche ($F\% \text{ poids}$) par la moyenne de concentrations de l'élément de chaque grain analysé pour une phase minérale donnée ($C_{minéral}$). Finalement, on divise le tout par la concentration de l'élément dans la roche totale ($C_{Roche \text{ total}}$). Les analyses en roches totales sont tirées de Fredette (2006).

$$C_{Minéral}^{\text{Élément}} = \frac{F\% \text{ poids} * C_{minéral}}{C_{Roche \text{ total}}}$$

Dans notre cas, on effectuera un bilan de masse pour la magnétite, l'ilménite et le spinelle. Dans la théorie, la somme des bilans de toutes les phases minérales dans une roche donne 100%. Or, cela est variable dû aux incertitudes des méthodes d'analyse. Puisque la proportion des phases minérales dans la roche totale a été estimée en lame mince et de manière visuelle par Fredette (2006), il y a là aussi un risque d'erreur. Une incertitude total dans le bilan de masse jusqu'à 20% est acceptable. Afin d'obtenir la proportion qu'occupe les silicates, dans le bilan de masse, on soustrait la proportion des oxydes à 100%.

2.0 Résultats

2.1 Résultat du LA-ICP-MS

Suite à l'analyse ICP-MS par ablation laser, les concentrations des éléments traces ont été déterminées. Les moyennes pour chaque lithologie et pour chaque oxyde sont présentées à la Table 1 et l'ensemble des résultats sont à l'annexe 3

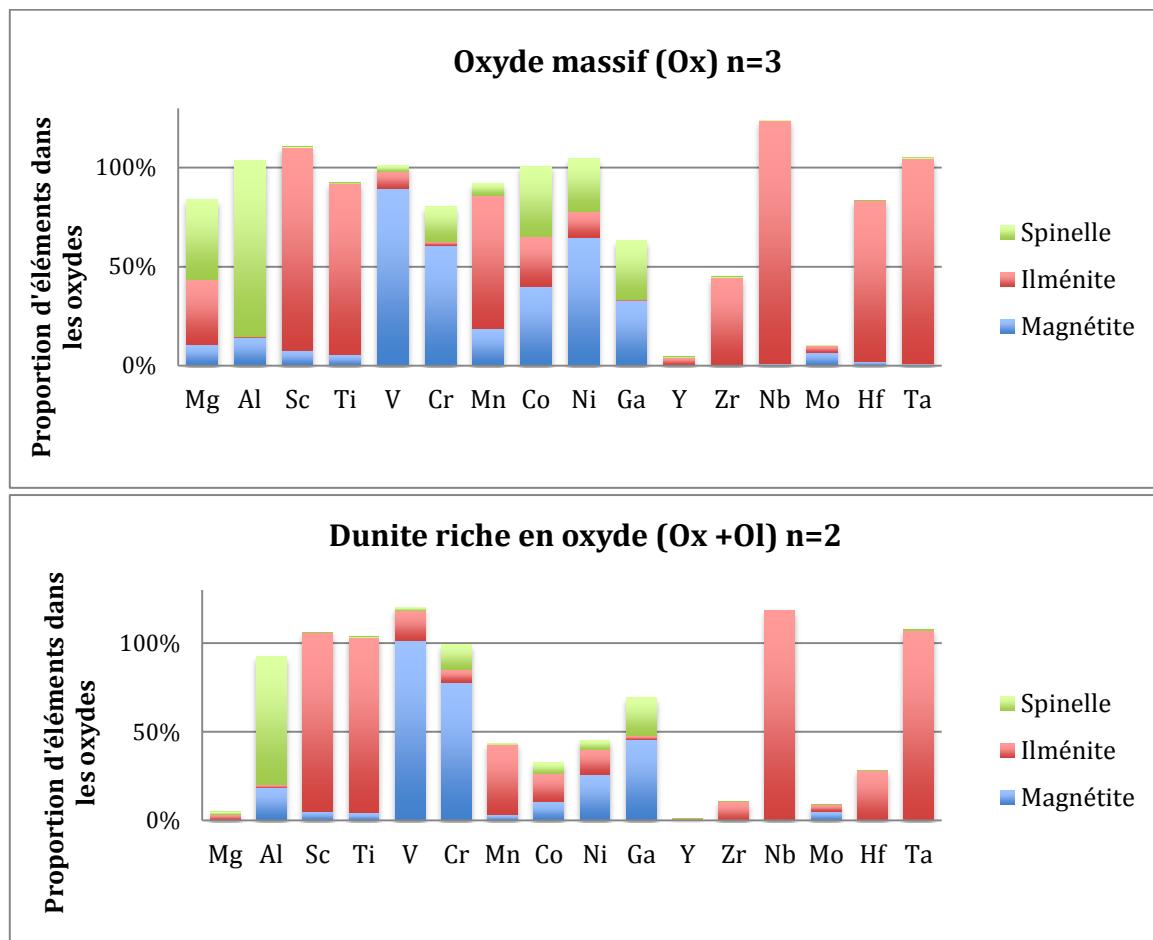
Table 1 : Valeurs moyennes ($\mu\text{g/g}$) de concentration des éléments traces dans les oxydes de Fe-Ti en fonction des lithologies

	Magnétite				Ilménite				Spinelle			
	Oxyde	Dunite	Nelsonite	Troctolite	Oxyde	Dunite	Nelsonite	Troctolite	Oxyde	Dunite	Nelsonite	Troctolite
24Mg	4731	3176	3290	3613	17865	9328	11204	8018	89836	57320	76231	38958
27Al	13153	15112	16184	20418	603	775	2231	483	379964	341100	393063	305583
31P	8,35	9,59	28,23	27,85	9,21	7,43	4,88	23,58	23,21	20,85	18,81	28,33
44Ca	17,66	40,87	187,83	1623,16	19,76	24,43	48,47	1798,08	82,75	122,50	59,69	290,00
45Sc	2,96	5,80	9,53	1,37	43,01	79,48	81,48	21,74	0,39	0,53	0,62	0,29
47Ti	17095	18427	28555	14729	292513	296640	282323	290943	1099	747	523	521
51V	5812	6431	4606	4106	645	471	414	652	868	801	780	896
52Cr	10422	4908	410	5323	389	197	34	242	14171	6043	739	6383
55Mn	862	661	1301	593	3773	4539	4274	3665	1332	1389	1343	1279
59Co	185	105	99	160	138	83	77	110	787	456	585	608
60Ni	819	307	80	419	180	82	60	65	1525	532	299	588
65Cu	22,4	1,5	47,2	9,3	38,2	4,9	17,7	10,1	79,1	18,4	74,5	3,3
66Zn	166	190	416	219	41	33	149	20	3839	6604	8906	6408
69Ga	59,24	70,01	76,75	63,64	1,53	1,38	2,98	2,10	225,29	198,45	221,06	192,50
74Ge	1,16	1,53	1,93	1,26	0,20	0,16	0,19	0,20	0,33	0,38	0,23	0,16
75As	8,61	10,48	5,98	34,51	10,28	5,18	3,79	31,70	31,75	8,54	11,78	12,17
89Y	0,03	0,03	0,06	0,09	0,26	0,26	0,28	0,31	0,07	0,04	0,04	0,04
90Zr	1,26	0,90	5,07	5,25	80,66	55,21	129,46	29,11	0,17	0,14	0,04	0,04
93Nb	0,09	0,23	0,21	0,09	17,32	35,41	37,76	41,88	0,12	-0,11	0,02	0,31
95Mo	1,11	2,66	3,15	2,50	0,82	1,07	1,01	1,43	0,19	0,16	0,14	0,20
101Ru	1,78	1,41	1,22	1,32	0,47	0,93	0,95	0,09	0,43	0,18	0,12	-0,05
106Pd	7,83	3,48	6,95	3,49	4,03	1,42	1,74	1,47	0,49	0,35	0,34	0,67
107Ag	0,09	0,34	0,11	0,13	0,24	0,07	0,09	0,06	0,32	0,09	0,13	0,09
111Cd	1,75	0,72	0,48	0,49	0,43	0,33	0,57	0,22	0,48	1,73	0,17	0,30
115In	0,14	0,10	0,15	0,06	0,21	0,31	0,21	0,23	0,13	0,04	0,01	0,16
118Sn	1,25	2,09	1,51	1,51	1,54	1,41	0,98	0,90	0,26	0,18	0,85	0,36
121Sb	0,83	0,19	0,42	0,41	0,62	0,24	0,38	0,40	1,04	0,89	1,06	1,48
178Hf	0,10	0,05	0,33	0,15	3,26	3,22	4,84	1,82	0,02	0,01	0,02	0,02
181Ta	0,01	0,02	0,03	0,01	1,52	2,86	3,25	3,34	0,07	0,00	0,00	0,01
182W	0,04	0,01	0,02	0,04	0,16	0,06	0,08	0,13	0,03	0,01	0,03	0,02
186Re	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
193Ir	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01
195Pt	0,02	0,00	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,00	0,08	-0,01	0,00	0,01
197Au	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,01
208Pb	1,22	1,01	1,53	1,30	1,87	1,25	2,50	2,48	1,81	-0,12	0,40	0,69
209Bi	0,39	0,14	0,30	0,24	0,12	0,05	0,28	0,15	0,32	0,08	0,14	0,13

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

2.1 Bilan de masse par lithologie

La première étape de cette étude consiste à produire un bilan de masse. Ce dernier permet de déterminer la phase minérale (magnétite, spinelle, ilménite ou silicate) accueillant les éléments traces. Avec cette information, il sera possible de déterminer la phase minérale contrôlant la concentration des éléments. La figure 9 montre le résultat de ce bilan sous forme graphique pour chaque unité pétrographique. Tous les résultats sont à l'annexe 4.



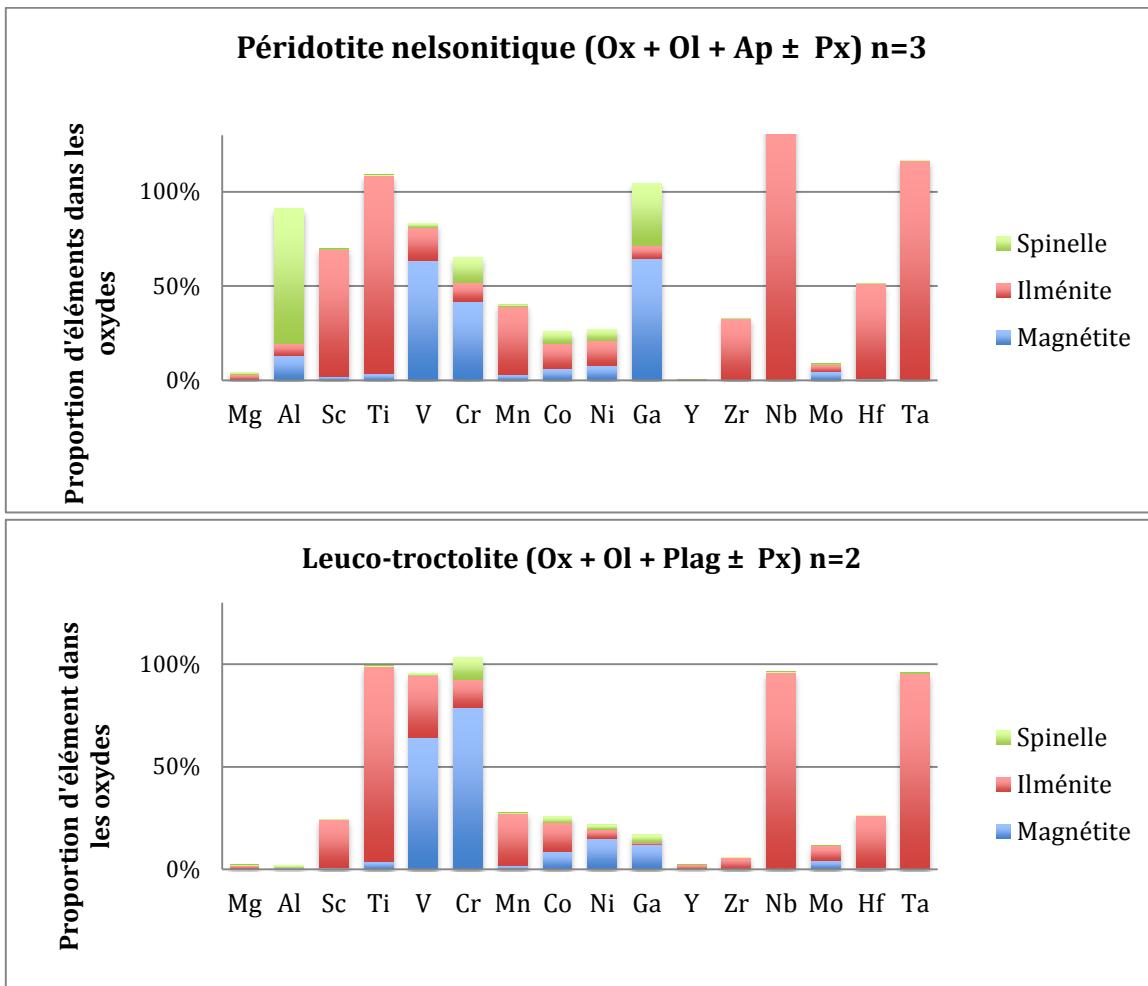


Figure 9 : Bilan de masse entre les unités pétrographique

Ainsi, le contrôle d'une phase minérale sur un élément est observable dans une unité pétrographique. Lorsque le minéral avoisine les 100% du bilan de masse pour un élément donné, cet élément est presqu'entièrement hébergé cette phase. Dans ce cas, cette phase contrôle cet élément. Parfois, comme dans le cas du Mg dans les oxydes massifs de Fe-Ti la phase principale le contrôlant est impossible à déterminer puisqu'il semble être réparti uniformément dans plusieurs phases. Lorsque la somme des bilans de masse pour les trois oxydes étudiés ne donne pas 100% c'est qu'un ou plusieurs silicates qui contrôle l'élément. La table 2 ci-dessous présente les phases minérales contrôlant la liste d'éléments sélectionnés en fonction des diverses unités pétrographiques.

Table 2 : Contrôle des phases minérales (magnétite Mt, ilménite Ilm, spinelle Sp, silicate Sil et oxydes de fer en générale Ox) sur les éléments par unité pétrographique.

	Mg	Al	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Ga	Y	Zr	Nb	Mo	Hf	Ta
Oxyde	Ox	Sp	IIm	IIm	Mt	Mt	Ox	Ox	Ox	Mt/Sp	Sil	Sil	IIm	Sil	IIm	IIm
Dunite	Sil	Sp	IIm	IIm	Mt	Mt	Sil	Sil	Sil	Mt/Sp	Sil	Sil	IIm	Sil	Sil	IIm
Nelsonite	Sil	Sp	IIm	IIm	Mt/Sil	Mt/Sil	Sil	Sil	Sil	Mt/Sp	Sil	Sil	IIm	Sil	Sil	IIm
Troctolite	Sil	Sil	Sil	IIm	Mt	Mt	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	Sil	IIm	Sil	Sil	IIm

2.2 Bilan de masse pour les nelsonites

Puisqu'une différence minéralogique est identifiable entre les nelsonites, le bilan de masse à l'intérieur de la nelsonite pourrait lui aussi être variable. La différence minéralogique est marqué par la présence de pyroxènes. La figure 10 montre le bilan de masse des trois péridotites nelsonitiques étudiées.

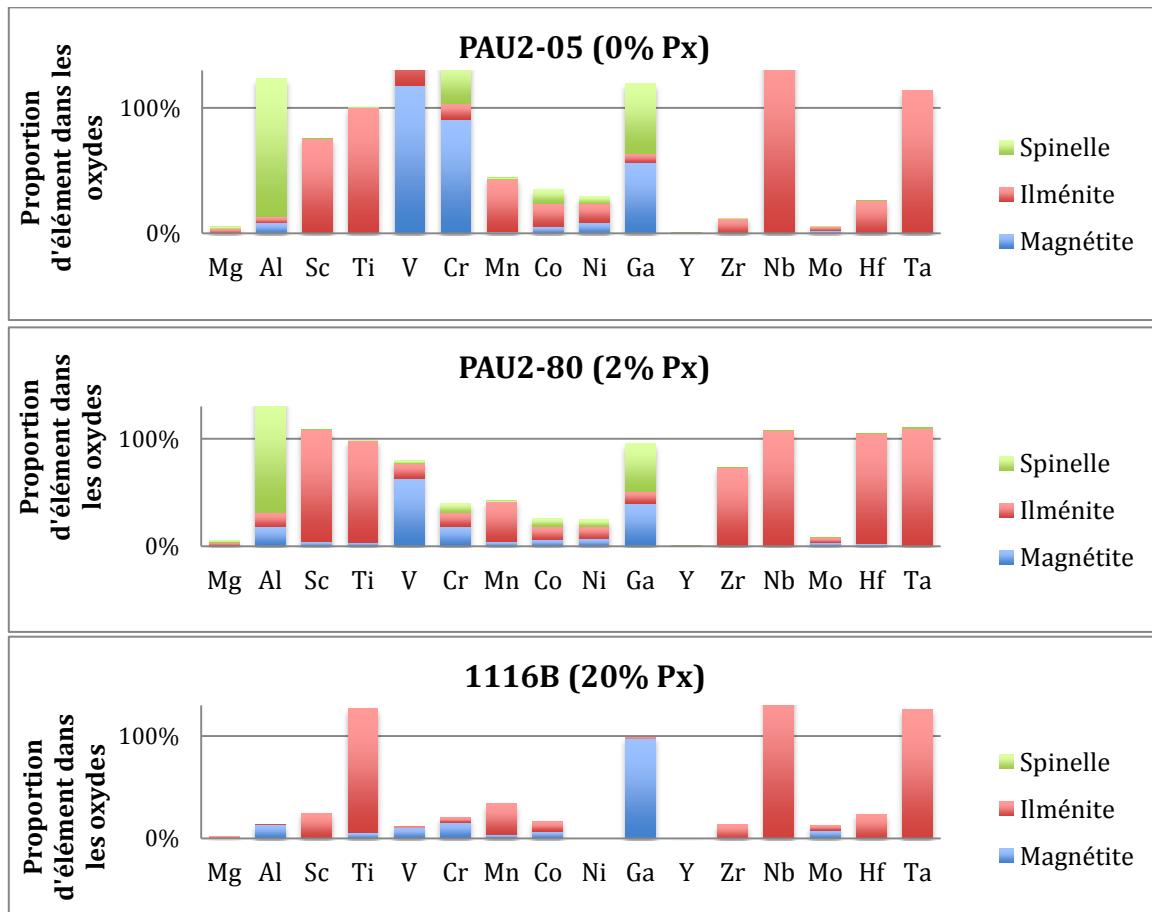


Figure 10 : Bilan de masse entre les péridotites nelsonitiques étudiées (PAU2-5, PAU2-80 et 1116)

Des variations dans le bilan de masse sont identifiables. Le Cr et le V diminuent entre PAU2-O5, PAU2-80 et 1116 respectivement. Le Sc dans l'échantillon 1116B est nettement contrôlé par un silicate. L'aluminium de cet échantillon ne semble pas être contrôlé par les oxydes, cependant il y a eu des difficultés avec le spinelle lors de l'analyse ce qui rend le résultat non utilisable. Finalement, le Ni semble être contrôlé par un autre silicate dans l'échantillon 1116B. En effet, pour cet échantillon, les oxydes n'ont presque plus de contrôle sur cet élément.

3.0 Argumentation

3.1 Contrôle des oxydes

Lorsqu'il n'y a pas de silicates, il est intéressant de déterminer les oxydes contrôlant les éléments traces. Le bilan de masse indique que Sc, Ti, Mn, Nb, Ta, Y, Zr et Hf sont contrôlés par l'ilménite ce qui est similaire aux résultats obtenus pour les intrusions litées (Méric 2011). Pour ce qui est du spinelle, il contrôle principalement Al, et Mg puisqu'ils sont compris dans sa composition $[(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_2\text{O}_4]$, mais aussi le Zn (Table 1). On retrouve légèrement de Mg parmi les éléments majeurs des ilménites se qui transparaît aussi dans le bilan de masse. Le V et le Cr sont contrôlés par la magnétite. Finalement, le Co, le Ni et le Ga sont contrôlés par la magnétite et le spinelle. En fait, de manière générale le spinelle semble être associé avec la magnétite. En effet, lorsque la magnétite contrôle un élément le spinelle est presque automatiquement le second, en ordre d'importance, à contrôler l'élément et vice versa.

3.2 Contrôle des silicates

L'olivine $[(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4]$ contrôle le Mg, Mn, Co et Ni. La figure 11 montre le comportement de ces éléments. Le Mg est un élément majeur dans sa formule chimique, il est normal de retrouver une diminution marquante du contrôle des oxydes lorsque l'olivine apparaît. De plus, avec l'apparition de l'olivine, on observe une diminution du Mn, Co et Ni. Ces éléments auraient donc une affinité à entrer dans la structure de l'olivine.

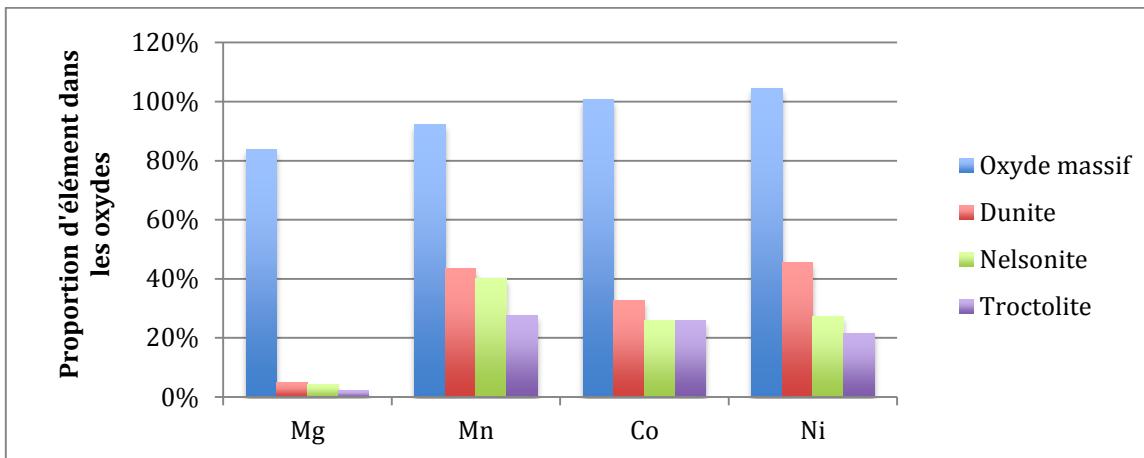


Figure 11 : Influence de l'olivine sur le Mg, Mn, Co et Ni

Le plagioclase contrôle l'Al et le Ga. L'Al est un élément majeur dans les plagioclase et le Ga est un élément mineur qui semble, à la lumière du bilan de masse, préférer le plagioclase que l'ilménite. La figure 12 montre la diminution de l'Al et Ga avec la Troctolite qui est composé à près de 50% de plagioclase.

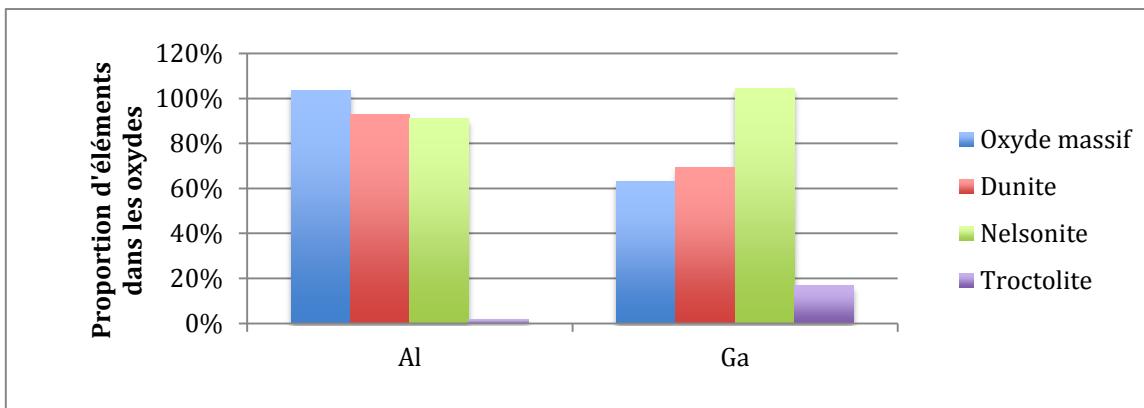


Figure 12 : Influence du plagioclase sur l'Al et Ga entre les lithologies

Les pyroxènes contrôlent le Sc, Cr, V et Ni. De PAU2-5 à PAU2-80 à 1116B on constate une diminution dans la concentration de pyroxène de paire avec une diminution en Sc, Cr et V (Figure 13). De plus, le bilan de masse des péridotites nelsonitiques (Figure 10) montre que pour l'échantillon riche en Px (1116B) les oxydes n'ont pratiquement plus de Ni dans leurs structures cristallines.

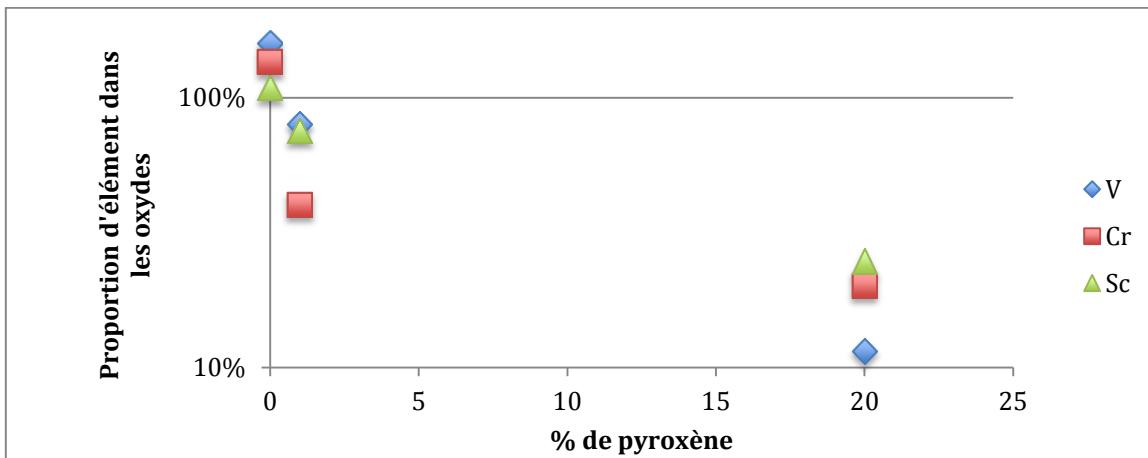


Figure 13 : Influence des pyroxènes dans les nelsonites sur le Cr, V et Sc.

L'Y, Le Zr, le Mo et l'Hf sont, semble-t-il, contrôlés par une ou plusieurs phases minérales non identifiées lors de l'étude pétrographique en lame mince. Il semble y avoir une corrélation avec le Hf et le Zr dans le bilan de masse. On observe soit les deux avec un contrôle par les oxydes élevé ou soit les deux faibles. Ainsi, il semble y avoir une phase minérale trace qui contrôle ces deux éléments. Cette phase pourrait être des grains de zircon ($ZrSiO_4$) ou baddéleyite (ZrO_2) qui sont présent dans la roche totale, mais que l'on n'a pas interceptés dans les lames minces. La figure 14 montre la concentration dans l'ilménite de Hf et Zr. La corrélation observée pourrait confirmer l'hypothèse que les deux éléments sont dans la même phase minérale car leurs comportements dans l'ilménite semblent être liés.

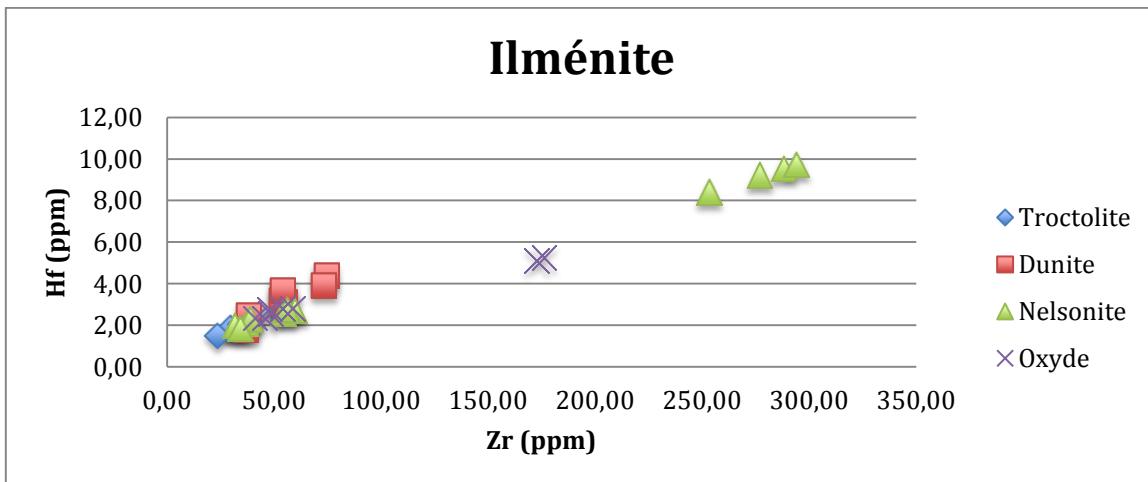


Figure 14 : Diagramme binaire montrant le comportement du Zr et Hf dans les ilménites du Lac à Paul

3.3 Détermination d'une relation lithologique avec les oxydes de Fe-Ti dans l'anorthosite.

Dans les intrusions litées, on note que le comportement des éléments traces dans les magnétites varie en fonction de la stratigraphie (Barnes 2004, Méric 2011, Dare et al.

2012). La figure 15 compare les éléments traces dans la magnétite de la partie évoluée des intrusions litées (le sommet stratigraphique en rose) avec ceux de la partie plus primitive (la base stratigraphique saturée en apatite en gris). L'axe des ordonnées montre la concentration dans la magnétite normalisée avec la croute continentale moyenne et l'axe des abscisses montre les éléments analysés ordonnés selon leur compatibilité croissante dans la magnétite. Les éléments les plus compatibles (eg. Cr, Ni, V, Co) sont à droite et les éléments les moins compatibles (eg. Sc, Ta, Nb) sont à gauche. Les éléments plus compatibles dénotent un appauvrissement dans la phase évoluée comparativement à celle plus primitive. Inversement, les éléments moins compatibles se retrouvent enrichis dans la phase plus évoluée par rapport à la phase plus primitive. Cette relation peut être expliquée par le principe de cristallisation fractionnée. En effet, les premières magnétites qui cristallisent accueilleront les éléments plus compatibles et refuseront les éléments incompatibles dans sa structure. Ceci entraînera un appauvrissement en éléments compatibles et un enrichissement des éléments incompatibles dans le liquide résiduel.

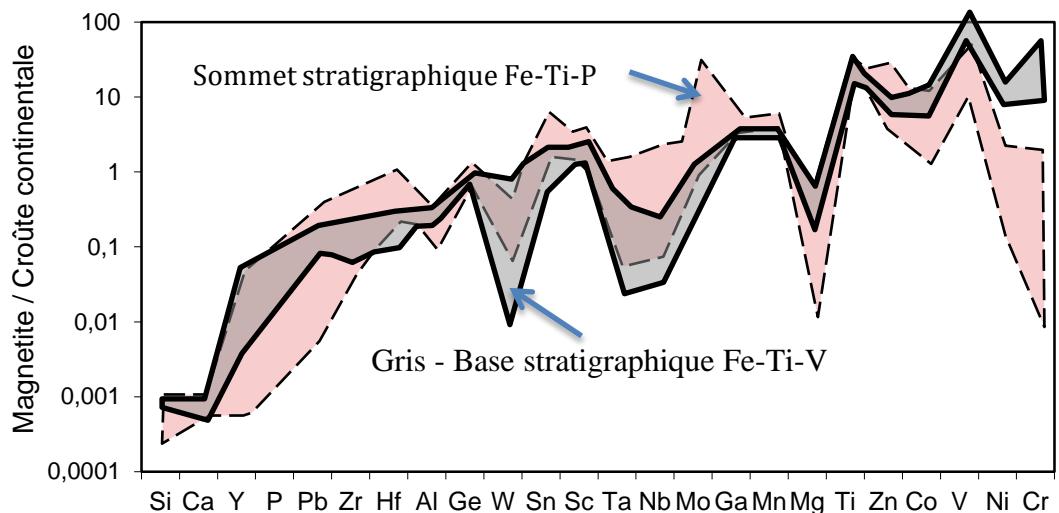


Figure 15 : Comparaison entre les éléments traces dans la magnétite de la partie évoluée de Bushveld (rose) et ceux de la partie plus primitive de Bushveld (gris) (Dare et al. 2012)

Un diagramme similaire (Figure 16) montre qu'il n'y a pas de relation entre les unités pétrographiques et le comportement des éléments traces dans la magnétite du secteur du Lac à Paul. En effet, globalement, les spectres des diverses unités pétrographiques sont pratiquement identiques. Ainsi, le processus de mise en place par cristallisation fractionnée est moins important. Deux exceptions sont notables par la variabilité du comportement des spectres. Pour le cas du Zr et Hf, la présence de zircon ou baddéleyite plus ou moins abondante dans la roche peut expliquer ce phénomène. Finalement, la variabilité du Ni et du Cr est justifiée par la présence de pyroxènes dans la nelsonite et peut être expliquée par un léger effet de cristallisation fractionnée superposée par le contrôle des pyroxènes qui peuvent appauvrir la magnétite.

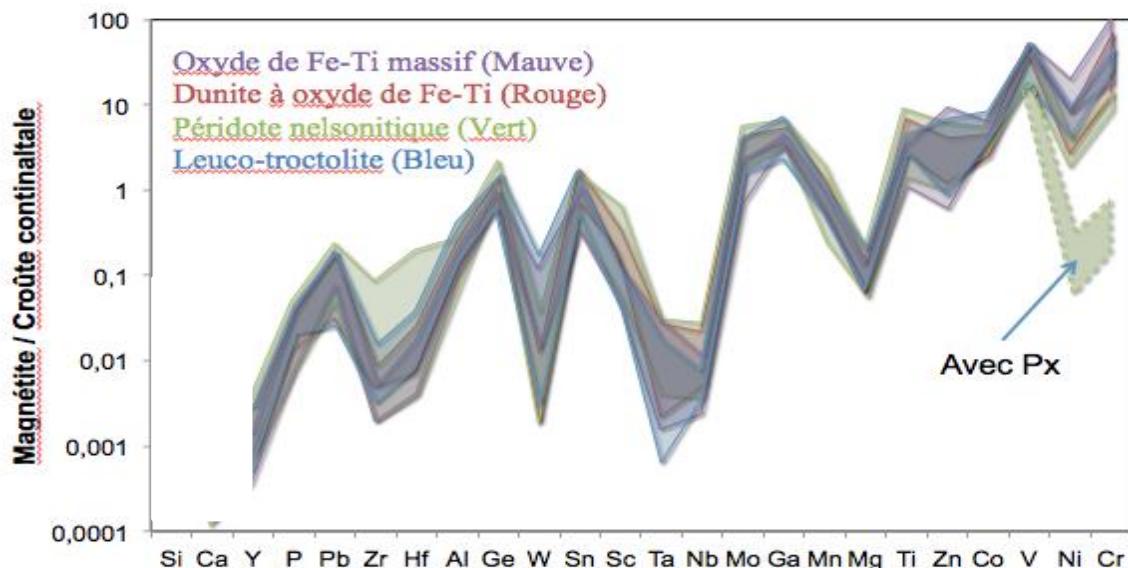


Figure 16 : Diagramme multi-élémentaire montrant la variation des spectres de la magnétite en fonction des lithologies à Lac à Paul (Croûte continental Rudnick R. L 2003)

De plus, dans la liste d’éléments sélectionnées, seul le Ta et le Nb sont contrôlés par l’ilménite seule (Figure 9). Ainsi, il n’y a pas d’influence externe que l’ilménite sur la concentration de ces éléments. Le phénomène observable est une corrélation positive parfaitement proportionnelle entre Ta et Nb (Figure 17). La relation de proportionnalité n’est pas clairement explicable. La concentration de Nb est légèrement plus élevée que 12 fois la concentration en Ta. Aucune corrélation n’est attribuable aux lithologies ne distinguant guère de regroupement de ces dernières. Le processus d’un magma unique en cristallisation fractionnée n’est donc, encore une fois, pas acceptable.

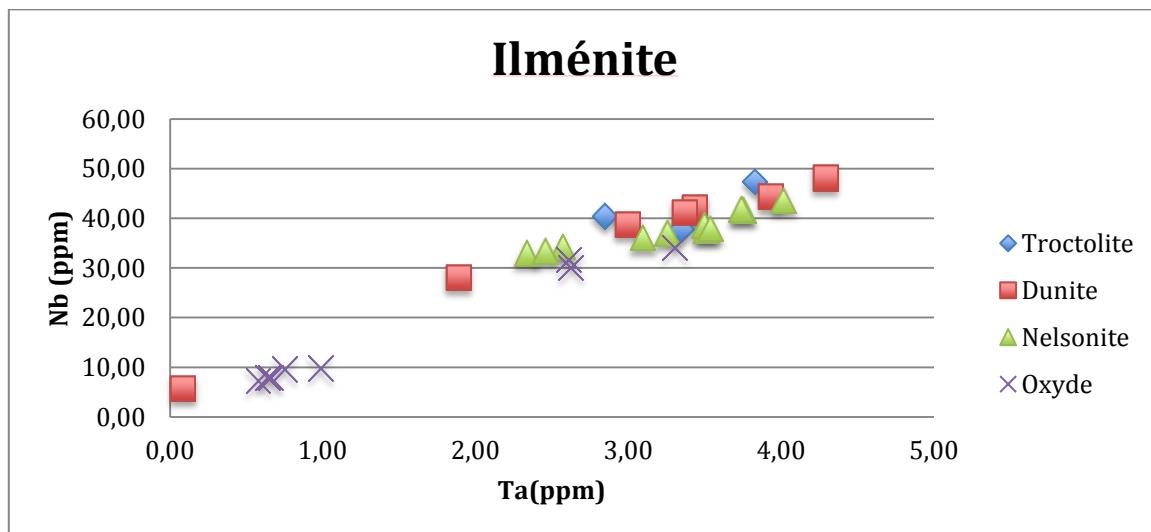


Figure 17 : Comportement du Nb et Ta dans l’ilménite du lac à Paul.

3.4 Comparaisons des anorthosites avec les intrusions litées

Avant de comparer les anorthosites avec les intrusions litées, il faut déterminer si la concentration des éléments traces des oxydes de anorthosites présentent des variations importantes. Pour ce faire, le secteur de Lac à la Mine situé dans la partie sud de la SALSJ (Figure 4) a été sélectionné. Une étude de terrain et pétrographique (Guérin 2011) et des analyses en microsonde et en LA-ICP-MS (Dalgé 2012) ont été faites. Les échantillons utilisés de cette section proviennent de troctolites, de dunites et d'oxydes massif. Ce secteur ne présent pas non plus de variation des éléments traces dans les magnétites entre les lithologies. La comparaison des diagrammes multi-élémentaires de ces deux secteurs (figure 18) montre que les teneurs en éléments traces dans la magnétite sont similaires pour ces deux zones pour les éléments traces dans les magnétites. À titre comparatif, les échantillons choisis dans les deux secteurs n'ont pas d'apatite. Deux exceptions sont à noter. La première fait référence au Zr et Hf qui peut être contrôlé par la présence de zircon ou baddéleyite et la deuxième est que le Cr est plus enrichi dans le secteur de Lac à Paul.

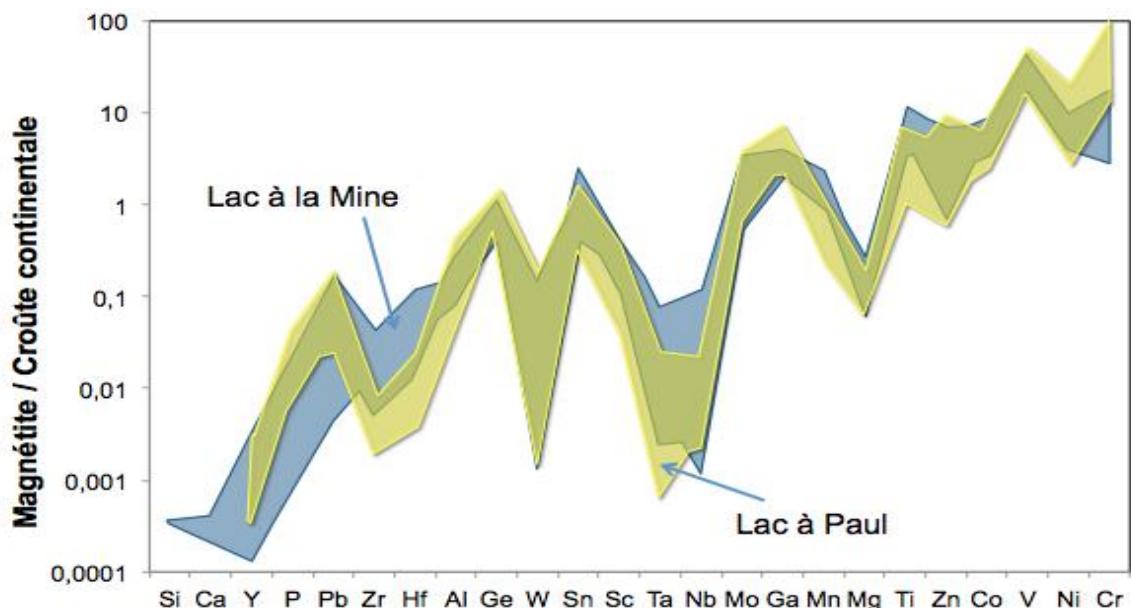


Figure 18 : Comparaison du comportement des éléments traces dans la magnétite du secteur de Lac à Paul (8 échantillons) et du secteur de Lac à la Mine (9 échantillons, Dalgé 2012)

La figure 19 utilisé par Méric (2011) pour illustrer le positionnement des magnétites des intrusions litées montre très bien que les anorthosites de Lac à Paul et de Lac à la Mine (Dalgé 2012) sont appauvri en Ti comparativement aux intrusions litées. De plus, la phase évoluée des intrusions litées, correspondant aux lithologies avec apatite, se retrouve dans le même champ que les nelsonites à pyroxène du Lac à Paul. Ces dernières peuvent représenter une phase plus évoluée.

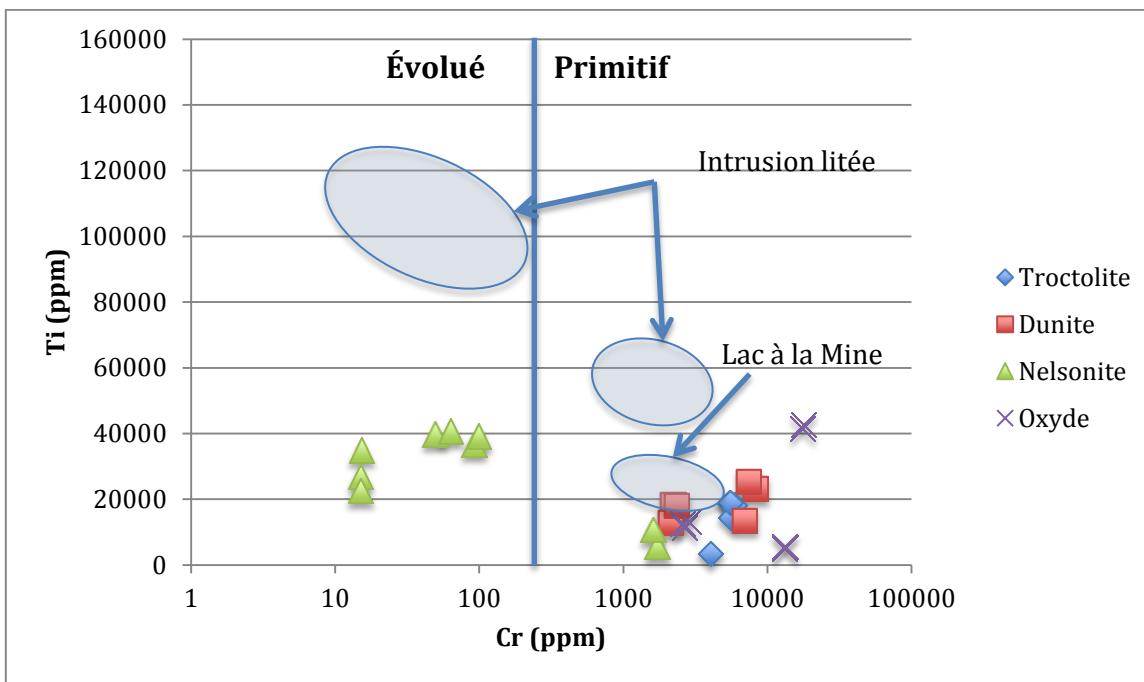


Figure 19 : Comparaisons des magnétites des anorthosites avec les intrusions litées à l'aide du Ti et Cr dans les magnétites (modifiés de Méric 2011)

La comparaison de tous les éléments (figure 20) montre ce même appauvrissement des anorthosites comparativement aux intrusions litées. En fait cet appauvrissement est observable principalement pour les éléments contrôlés par l'ilménite (eg. Ti, Sc, Mn, Nb, Ta, Hf, Zr). Sachant que la magnétite cristallise avant l'ilménite dans l'intrusion litée du Bushveld on pourrait supposer que pour les anorthosités c'est l'ilménite qui cristallise avant la magnétite. Ce qui traduit des conditions d'environnement plus réducteur (Toplis 1995). Une deuxième hypothèse peut être émise pour expliquer cet appauvrissement. Puisque l'on retrouve du spinelle seulement en exsolutions dans l'intrusion litée de Sept-Îles (Méric 2011) et que le spinelle est sous forme granulaire dans les anorthosités (Figure 8), il peut y avoir suffisamment d'exsolutions d'ilménite pour qu'ils puissent se regrouper pour former des exsolutions granulaires. Ainsi, la magnétite s'appauvrirait en éléments plus compatibles dans l'ilménite.

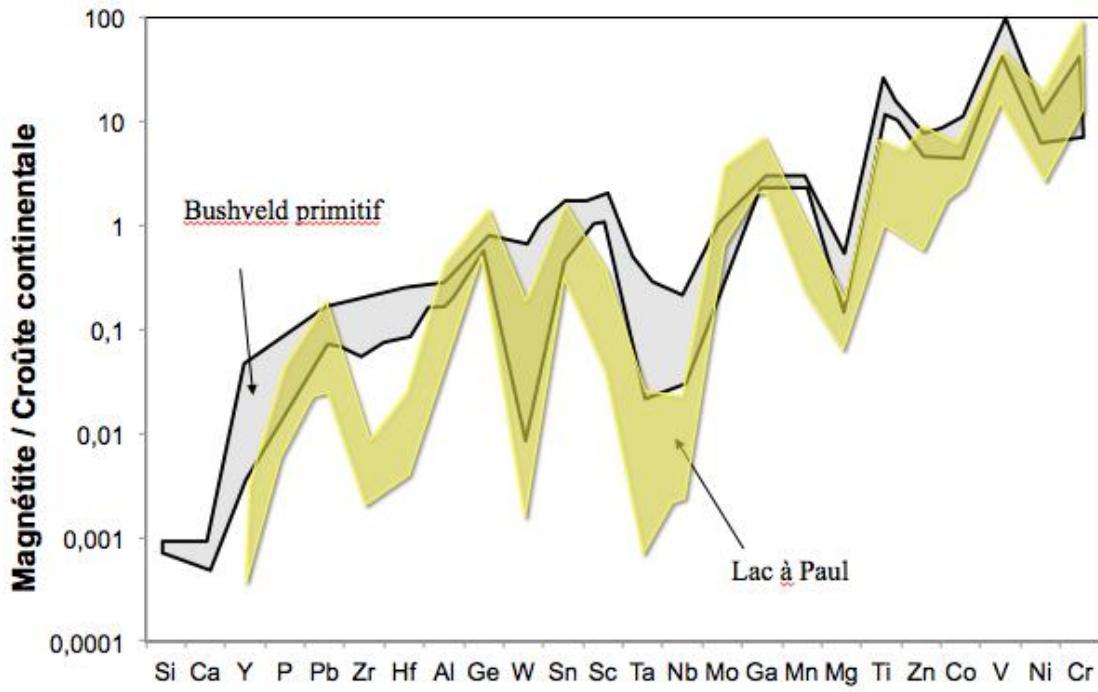


Figure 20 : Comparaison des magnétites des anorthosites et des intrusions litées à l'aide des spider diagrammes pour les lithologies sans apatite (modifiée de Dare et al. 2012)

3.5 Impacts sur la géologie économique

Cette distinction des magnétites des anorthosites avec celle des intrusions litées peut être utilisée pour la géologie économique. En effet, en illustrant le positionnement des magnétites des anorthosites dans le diagramme Ni + Cr sur Ti + V proposé par Dupuis et Beaudoin (2011) et modifié par Méric (2011), un champ caractéristique des anorthosites se retrouve dans le champ des gisements magmatiques et appauvri en Ti + V par rapport au champ des intrusions litées (figure 21). Or, si l'hypothèse l'appauvrissement des magnétites est due à l'ilmenite qui cristallise avant la magnétite pour les anorthosites étudiées est, la différence entre le champ des anorthosites et celui des intrusions litées n'est que le reflet de la condition de fugacité d'oxygène (Toplis). Donc la magnétite serait appauvrie en Ti dans un milieu réducteur et plus riche dans un milieu oxydant.

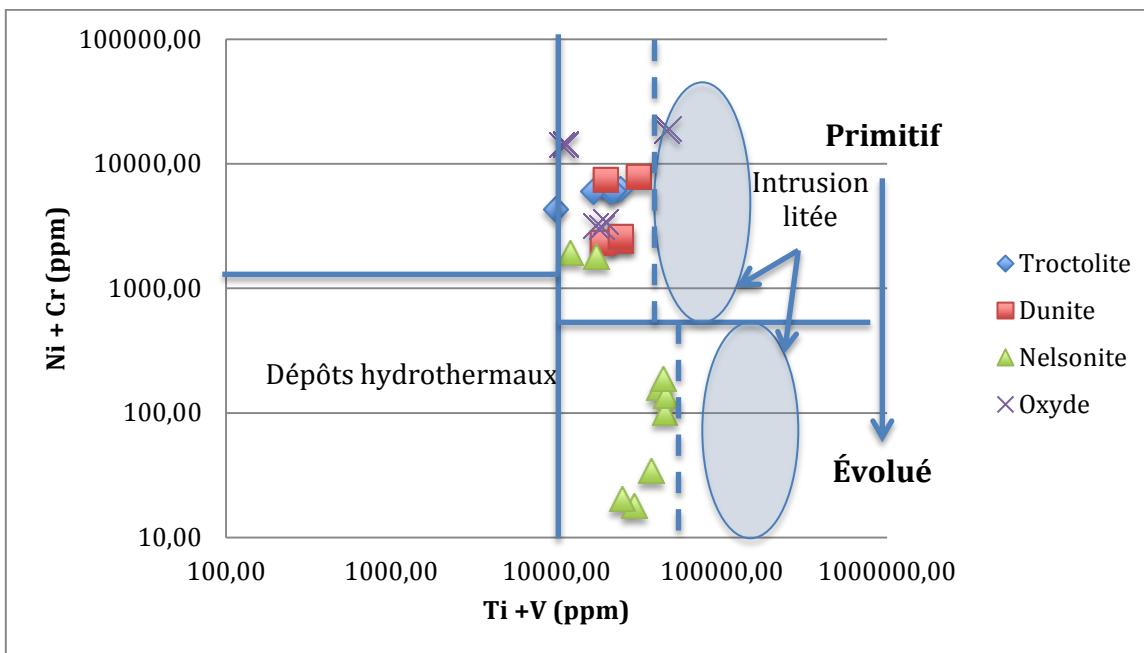


Figure 21 : Classification des magnétites des anorthosites comparativement des intrusions litées (modifiée de Méric 2011, Dupuis et Beaudion 2011)

4.0 Conclusion

Ce projet initié par la Chaire de Recherche du Canada en Métallogénie Magmatique a permis d'établir que, pour les anorthosites, qu'il n'y a pas de relation pétrographique entre la séquence de cristallisation et la géochimie dans les oxydes de Fe-Ti. Ainsi, le processus de cristallisation fractionnée utilisé pour expliquer les intrusions litées n'est pas applicable pour les suites anorthositiques. De plus, le signal géochimique des oxydes de Fe-Ti est différent dans les anorthosites des intrusions litées. En effet, les éléments traces dans la magnétite des anorthosites qui sont davantage contrôlés par l'ilménite sont appauvri comparativement aux intrusions litées. Cette différence peut être expliquée par le fait que l'ilménite qui cristallise avant la magnétite et/ou que la magnétite des anorthosites est eue des exsolutions granulaires de spinelle et/ou d'ilménite. Finalement, pour la géologie économique, un champ a pu être identifié discriminant les intrusions litées des anorthosites.

5.0 Recommandations

Ce projet met en lumière d'autres problématiques. Premièrement, pour la caractérisation des gisements magmatiques, pour l'instant, seule la magnétite est utilisée pour expliquer les différents processus. Or, comme il est démontré ci-haut, l'ilménite joue un grand rôle dans le contrôle des éléments traces dans les oxydes de fer.

Deuxièmement, pour les anorthosites, l'ilménite semble cristalliser avant la magnétite, ainsi, peut être que l'ilménite enregistre plus de variation entre les lithologies ce qui pourra appuyer le processus de cristallisation fractionné. Troisièmement, le secteur de Lac à Paul montre une grande variation du comportement des éléments traces dans les magnétites des péridotites nelsonitiques. Ainsi, l'étude systématique à l'intérieur d'un forage par LA-ICP-MS pourrait nous permettre d'expliquer cette variation.

6.0 Références

- BACHARI, Hanan (2004) *La génèse des dépôts d'oxydes de fer, titane et vanadium associés aux anorthosites massives de la région de Lac-Saint-Jean (Saint-Charles et lac Élan) et de la région de Havre Saint-Pierre (massif de la Rivière-au-tonnerre, massif de la rivière Romaine et massif de lac Allard, Québec, Canada.* Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, pp. 151
- BARNES et Al. (2004) *Platinum-group element distribution in the Main Zone and Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa,* Chemical Geology 208, pages 293-317
- DALPÉ, Gabriel (2012) *Rapport d'analyse géochimique des oxydes du secteur du Lac à la Mine, Saguenay-Lac St. Jean , Rapport technique, UQAC* pp. 17
- Dare, S.A.S., Barnes, S.-J., 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.* 22nd Goldschmidt Conference, Montreal, Canada.
- DUPUIS C., BEAUDOIN G., (2011) *Discriminant diagrams for iron-oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types.* Mineralium Deposita. pp.23
- FREDETTE, Julie (2006) *Pétrographie, géochimie et potentiel économique en Fe-Ti-P du secteur du Lac à Paul, partie nord de la suite anorthositique de Lac-Saint-Jean, Province de Grenville, Québec.* Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, pp.304
- MÉRIC, Julien (2010) *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 outils d'exploration.* Mémoire de maîtrise, Montpellier/UQAC, pp.63
- NALUND, H.R. (1983). *The effect of oxygen fugacity on liquid immiscibility in iron-bearing silicate melts.* American Journal of Science, **283:** 1034-1059.
- RUDNICK R. L. and Gao S. (2003) Composition of the continental crust. In *The Crust* (ed. R. L. Rudnick) in *Treatise on Geochemistry* (eds. H. D. Holland and K. K. Turekian) Elsevier, Oxford. Vol. 3 pp. 1–64
- TOLLARI, Nadège (2007) *Saturation des minéraux phosphatés dans les magma silicatés- Implications sur la génèse des roches riches en Fe-Ti-P.* Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, pp. 262

TOPLIS, M.J., et CARROLL, M.R. (1995). *An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferrobasaltic systems*. Journal of Petrology, 36: 1137-1170.

Annexe 1 : Composition des échantillons

Table 3 : Composition modal des échantillons (Fredette 2006)

Litho	# Éch.	Plagioclase	Olivine	Pyroxène	Magnétite	Ilménite	Spinel	Apatite
Dunite	NAI7	0%	52%	1%	8%	36%	2%	1%
Dunite	2236	0%	56%	0%	20%	20%	2%	1%
Nelsonite	PAU-80	0%	48%	1%	5%	22%	2%	22%
Nelsonite	PAU-05	0%	49%	0%	11%	22%	2%	15%
Nelsonite	1116	1%	29%	23%	9%	21%	2%	15%
Oxyde	4147	0%	0%	0%	44%	44%	11%	0%
Oxyde	2453	0%	0%	0%	59%	32%	9%	0%
Oxyde	2288	0%	0%	0%	33%	44%	22%	1%
Troctolite	C555	57%	19%	14%	5%	4%	1%	1%
Troctolite	C140	57%	23%	1%	1%	16%	1%	1%

Table 4 : Composition minéralogique (%poids) des échantillons recalculée avec le pourcentage modale.

Litho	# Éch.	Plagioclase	Olivine	Pyroxène	Magnétite	Ilménite	Spinel	Apatite
Dunite	NAI7	0%	43%	1%	11%	43%	2%	1%
Dunite	2236	0%	47%	0%	26%	24%	2%	1%
Nelsonite	PAU-80	0%	44%	1%	7%	27%	2%	18%
Nelsonite	PAU-05	0%	43%	0%	15%	27%	2%	13%
Nelsonite	1116	1%	25%	21%	12%	26%	2%	12%
Oxyde	4147	0%	0%	0%	48%	44%	8%	0%
Oxyde	2453	0%	0%	0%	62%	31%	6%	0%
Oxyde	2288	0%	0%	0%	37%	45%	17%	1%
Troctolite	C555	48%	20%	16%	8%	6%	1%	1%
Troctolite	C140	47%	24%	1%	2%	24%	1%	1%

Table 5 : Densités utilisées pour le bilan de masse et pour calculer les pourcentages poids.

Minérale	Densité (g/cm ³)
Plagioclase	2,7
olivine	3,4
Pyroxène	3,5
magnétite	5,2
Ilménite	4,8
Spinel	3,58
Apatite	3,2

Annexe 2 : Comparaison des Standard

	GSE-1			GSD-1				BC-28			
	Teneur réel	Teneur obtenue	RSD	Teneur réel	Teneur obtenue	Justesse	RSD	Teneur réel	Teneur obtenue	Justesse	RSD
24Mg	21106	21101	0%	21709	21720	0%	5%	10860	11149	3%	15%
27Al	68804	68784	0%	70921	71042	0%	7%	19440	18742	-4%	14%
29Si	250994	250957	0%	248686	257107	3%	4%	-	-	-	-
31P*	70	70	0%	860,0	860	0%	10%	-	-	-	-
44Ca	52858	52857	0%	51429	52499	2%	5%	-	-	-	-
45Sc	530	530	0%	52,0	55,0	6%	8%	28,7	28,2	-2%	6%
47Ti	450	450	0%	7431	8005	8%	3%	82020	72964	-11%	6%
51V	440	440	0%	44,0	48,3	10%	5%	9059	8638	-5%	5%
52Cr	400	400	0%	42,0	46,2	10%	17%	1096	1262	15%	4%
55Mn	590	590	0%	220,0	230,5	5%	2%	1988	1922	-3%	5%
59Co	380	380	0%	40,0	41,5	4%	2%	225	267	19%	7%
60Ni	440	440	0%	58,0	61,3	6%	6%	536	579	8%	4%
65Cu	380	380	0%	42,0	54,0	29%	10%	31,0	36,7	18%	77%
66Zn	460	460	0%	54,0	59,0	9%	12%	500	440	-12%	17%
69Ga	490	490	0%	54,0	57,5	6%	3%	39	43	10%	4%
74Ge	320	320	0%	32,0	33,5	5%	4%	-	-	-	-
75As	260	260	0%	27,0	26,3	-3%	12%	-	-	-	-
89Y	410	410	0%	42,0	40,9	-3%	10%	-	-	-	-
90Zr	410	410	0%	42,0	43,0	2%	9%	26	23	-10%	10%
93Nb	420	420	0%	42,0	44,6	6%	4%	1,47	1,57	7%	7%
95Mo	390	390	0%	39,0	41,1	5%	4%	-	-	-	-
101Ru	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106Pd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
107Ag	200	200	0%	23,0	22,2	-4%	6%	-	-	-	-
111Cd	160	160	0%	18,0	14,9	-17%	15%	-	-	-	-
115In	370	370	0%	38,0	40,5	7%	4%	-	-	-	-
118Sn	280	280	0%	29,0	29,9	3%	3%	2,29	3,07	34%	24%
121Sb	450	450	0%	43,0	47,6	11%	4%	-	-	-	-
178Hf	395	395	0%	39,0	39,4	1%	11%	2,04	0,96	-53%	8%
181Ta	390	390	0%	40,0	40,2	1%	9%	0,06	0,09	50%	43%
182W	430	430	0%	43,0	45,9	7%	4%	-	-	-	-
186Re	120	120	2%	-	-	-	-	-	-	-	-
193Ir	120	119	3%	12,0	16,9	41%	56%	-	-	-	-
195Pt	30	29	0%	6,0	5,9	-1%	61%	-	-	-	-
197Au	7	7	0%	4,0	4,4	11%	16%	-	-	-	-
208Pb	378	378	0%	50,0	64,6	29%	4%	-	-	-	-
209Bi	320	320	0%	35,0	33,6	-4%	5%	-	-	-	-

Annexe 3 : Teneur obtenue du LA-ICP-MS

Table 6 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Oxydes de Fe-Ti massif

	4147M3	4147M2	4147M1	4147	2453M1	2453M2	2453M3	2453	2283M1	2283M3	2283
24Mg	3974	4002	3767	3915	2985	2366	2230	2527	9638	8888	9263
27Al	9867	9060	9660	9529	16660	12376	12172	13736	17629	17800	17714
31P	3,35	6,09	2,74	4,06	4,32	1,86	6,84	4,34	7,54	-3,26	2,14
44Ca	6,21	1,31	15,18	7,57	41,48	-29,92	85,00	32,19	6,77	15,25	11,01
45Sc	1,28	1,04	1,40	1,24	2,41	2,02	2,44	2,29	6,25	6,84	6,55
47Ti	5423	4885	5568	5292	13124	11186	12634	12315	41358	42578	41968
51V	5879	5824	5865	5856	6705	6052	6154	6304	4978	5039	5008
52Cr	13469	13138	13165	13257	2842	2679	2577	2700	17507	17995	17751
55Mn	543	532	548	541	637	547	617	600	1757	1718	1737
59Co	162	228	164	185	161	135	154	150	243	234	238
60Ni	1076	959	987	1007	547	496	514	519	949	1025	987
65Cu	2,00	5,04	5,11	4,05	38,76	95,20	5,64	46,53	23,18	4,33	13,76
66Zn	165,6	67,6	141,5	124,9	77,5	46,2	612,0	245,3	124,4	90,3	107,4
69Ga	58,3	57,6	58,1	58,0	73,2	60,5	62,5	65,4	49,8	54,0	51,9
74Ge	1,10	1,01	1,19	1,10	1,32	1,18	1,34	1,28	0,96	1,15	1,06
75As	6,90	4,69	6,56	6,05	10,20	5,10	12,24	9,18	7,32	15,86	11,59
89Y	0,02	0,06	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,05	0,07	0,06
90Zr	0,34	0,68	0,27	0,43	0,34	0,46	0,40	0,40	3,94	3,66	3,80
93Nb	0,07	0,07	0,09	0,08	0,04	0,09	0,02	0,05	0,16	0,18	0,17
95Mo	0,77	0,65	0,78	0,73	1,60	1,67	1,56	1,61	0,85	1,05	0,95
101Ru	1,31	1,73	3,04	2,02	1,29	1,02	3,88	2,06	0,06	1,95	1,01
106Pd	15,87	10,35	3,93	10,05	5,10	9,52	9,52	8,05	4,33	4,03	4,18
107Ag	0,08	0,16	0,07	0,10	0,05	0,08	0,04	0,06	0,03	0,21	0,12
111Cd	0,08	0,34	8,97	3,13	0,27	1,70	1,36	1,11	0,85	0,43	0,64
115In	0,04	0,11	0,25	0,13	0,05	0,09	0,25	0,13	0,17	0,12	0,15
118Sn	0,55	0,75	0,74	0,68	1,69	1,33	1,69	1,57	1,63	1,65	1,64
121Sb	2,07	2,00	0,28	1,45	0,11	0,10	0,52	0,24	0,32	1,22	0,77
178Hf	0,05	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04	0,07	0,05	0,26	0,30	0,28
181Ta	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
182W	0,02	0,04	0,02	0,03	0,08	0,01	0,01	0,04	0,13	0,00	0,07
186Re	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
193Ir	0,03	0,03	0,01	0,03	0,05	0,00	0,06	0,04	0,02	0,05	0,04
195Pt	0,00	0,01	0,01	0,01	0,12	-0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00
197Au	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01
208Pb	1,10	1,04	0,81	0,98	1,90	1,22	0,95	1,36	0,73	2,01	1,37
209Bi	2,55	0,14	0,08	0,93	0,04	0,15	0,10	0,10	0,00	0,03	0,02

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 7 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Dunites

	NAI7M1	NAI7M3	NAI7M4	NAI-7	2236M1	2236M2	2236M3	2236
24Mg	2674	2534	4179	3129	3584	1904	4182	3223
27Al	10430	10073	20090	13531	20580	11480	18020	16693
31P	2,50	3,92	4,36	3,60	5,90	2,69	6,03	4,88
44Ca	18,90	-14,70	22,40	<i>8,87</i>	<i>101,50</i>	<i>53,90</i>	<i>63,24</i>	72,88
45Sc	5,23	4,31	6,22	5,25	7,62	6,13	5,32	6,36
47Ti	18130	12810	23100	18013	25200	13440	17884	18841
51V	6293	6251	6629	6391	6398	6461	6555	6471
52Cr	2233	2128	8288	4216	7469	6972	2360	5600
55Mn	754	479	674	636	889	592	580	687
59Co	88	93	123	102	121	85	118	108
60Ni	184	204	483	290	332	427	213	324
65Cu	2,80	2,24	0,85	<i>1,96</i>	<i>1,82</i>	<i>0,42</i>	<i>0,67</i>	<i>0,97</i>
66Zn	126,7	154,0	280,0	186,9	259,0	97,3	225,1	193,8
69Ga	66,2	61,8	79,0	69,0	74,9	61,7	76,4	71,0
74Ge	1,32	1,60	1,53	1,48	1,67	1,51	1,53	1,57
75As	12,60	2,52	9,80	<i>8,31</i>	34,30	1,96	1,68	<i>12,65</i>
89Y	0,02	0,02	0,04	<i>0,03</i>	0,05	0,05	0,02	<i>0,04</i>
90Zr	1,10	0,82	0,76	0,89	0,95	0,76	1,01	0,90
93Nb	0,89	0,05	0,09	0,34	0,12	0,06	0,17	0,12
95Mo	2,25	2,14	3,21	2,53	2,98	3,04	2,37	2,80
101Ru	3,50	-0,07	0,00	<i>1,14</i>	<i>3,50</i>	<i>0,91</i>	<i>0,61</i>	<i>1,67</i>
106Pd	0,56	2,45	4,20	2,40	7,00	2,80	3,88	4,56
107Ag	0,07	0,41	0,34	0,28	0,15	0,01	1,03	0,40
111Cd	0,36	0,07	2,45	0,96	0,91	0,07	0,48	0,49
115In	0,07	0,04	0,11	0,08	0,17	0,12	0,07	0,12
118Sn	1,75	1,20	2,63	1,86	2,72	2,64	1,61	2,32
121Sb	0,03	0,36	0,14	0,18	0,39	0,11	0,09	0,20
178Hf	0,03	0,05	0,07	0,05	0,05	0,04	0,09	0,06
181Ta	0,05	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01
182W	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01
186Re	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,00	0,02
193Ir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
195Pt	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
197Au	0,00	0,08	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
208Pb	1,19	0,35	1,82	1,12	1,40	0,74	0,57	0,90
209Bi	0,00	0,02	0,41	0,14	0,14	0,01	0,04	0,06

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 8 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Nelsonites

	<i>PA80M1</i>	<i>PA80M2</i>	<i>PA80M3</i>	<i>PA80M4</i>	PAU2-80	<i>PA05M2</i>	<i>PA05M4</i>	PAU2-5	<i>1116M1</i>	<i>1116M2</i>	<i>1116M3</i>	1116
24Mg	6385	3678	3451	6787	5075	1635	1887	1761	1533	2478	1778	1930
27Al	27470	18559	16951	25125	22026	5594	8064	6829	12467	18270	13160	14632
31P	4,35	1,48	10,65	7,99	6,12	4,70	6,68	5,69	55,63	17,00	3,71	25,44
44Ca	<i>18,09</i>	<i>-73,03</i>	<i>-35,51</i>	<i>57,62</i>	<i>-8,21</i>	<i>11,76</i>	<i>5,60</i>	<i>8,68</i>	<i>20,30</i>	<i>1652,00</i>	<i>33,60</i>	<i>568,63</i>
45Sc	10,04	12,13	11,56	11,56	11,32	1,47	2,81	2,14	11,77	14,87	9,56	12,07
47Ti	36649	39798	40736	39195	39095	5578	10690	8134	26880	34930	22540	28117
51V	5246	5206	5119	5052	5156	6524	6658	6591	2625	2524	2502	2550
52Cr	92	49	64	100	76	1729	1612	1671	15	15	15	15
55Mn	1618	1688	1636	1728	1668	217	467	342	1318	1897	1142	1453
59Co	145	122	118	157	135	79	94	87	55	67	51	58
60Ni	67	52	74	87	70	213	201	207	3	19	5	9
65Cu	<i>20,77</i>	<i>2,61</i>	<i>5,83</i>	<i>2,48</i>	<i>7,92</i>	<i>3,42</i>	<i>3,58</i>	<i>3,50</i>	<i>25,20</i>	<i>3,85</i>	<i>357,00</i>	<i>128,68</i>
66Zn	<i>931,3</i>	<i>162,1</i>	<i>221,1</i>	<i>924,6</i>	559,8	<i>94,1</i>	<i>75,0</i>	84,6	<i>455,0</i>	<i>455,7</i>	<i>427,0</i>	445,9
69Ga	<i>78,1</i>	<i>61,0</i>	<i>60,3</i>	<i>67,3</i>	66,7	<i>47,3</i>	<i>52,7</i>	50,0	<i>117,6</i>	<i>104,9</i>	<i>101,5</i>	108,0
74Ge	<i>1,74</i>	<i>1,72</i>	<i>1,61</i>	<i>1,84</i>	1,73	<i>1,25</i>	<i>1,29</i>	1,27	<i>2,60</i>	<i>2,80</i>	<i>2,53</i>	2,65
75As	<i>3,82</i>	<i>8,04</i>	<i>8,71</i>	<i>4,49</i>	6,26	<i>2,58</i>	<i>2,58</i>	2,58	<i>5,25</i>	<i>3,64</i>	<i>14,70</i>	7,86
89Y	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	<i>0,08</i>	0,05	<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	0,04	<i>0,05</i>	<i>0,19</i>	<i>0,03</i>	<i>0,09</i>
90Zr	<i>8,62</i>	<i>12,46</i>	<i>8,15</i>	<i>12,02</i>	10,31	<i>0,46</i>	<i>0,26</i>	0,36	<i>0,85</i>	<i>1,91</i>	<i>0,87</i>	1,21
93Nb	<i>0,19</i>	<i>0,33</i>	<i>0,15</i>	<i>0,25</i>	0,23	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	0,03	<i>0,56</i>	<i>0,07</i>	<i>0,29</i>	0,31
95Mo	<i>2,18</i>	<i>2,27</i>	<i>2,37</i>	<i>2,41</i>	2,31	<i>1,63</i>	<i>1,52</i>	1,57	<i>5,52</i>	<i>5,20</i>	<i>5,26</i>	5,33
101Ru	<i>-1,01</i>	<i>0,40</i>	<i>0,40</i>	<i>0,40</i>	0,05	<i>0,90</i>	<i>0,90</i>	0,90	<i>6,30</i>	<i>0,07</i>	<i>2,59</i>	<i>2,99</i>
106Pd	<i>6,03</i>	<i>1,07</i>	<i>6,03</i>	<i>6,70</i>	4,96	<i>4,03</i>	<i>3,98</i>	4,00	<i>4,20</i>	<i>1,12</i>	<i>29,40</i>	11,57
107Ag	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>	<i>0,07</i>	<i>0,34</i>	0,14	<i>0,09</i>	<i>0,03</i>	0,06	<i>0,29</i>	<i>0,00</i>	<i>0,06</i>	0,12
111Cd	<i>0,04</i>	<i>0,21</i>	<i>0,29</i>	<i>0,24</i>	0,19	<i>0,67</i>	<i>2,07</i>	1,37	<i>0,42</i>	<i>0,32</i>	<i>0,05</i>	0,26
115In	<i>0,21</i>	<i>0,18</i>	<i>0,14</i>	<i>0,14</i>	0,17	<i>0,20</i>	<i>0,05</i>	0,13	<i>0,14</i>	<i>0,15</i>	<i>0,10</i>	0,13
118Sn	<i>1,86</i>	<i>2,10</i>	<i>2,28</i>	<i>2,08</i>	2,08	<i>0,77</i>	<i>1,26</i>	1,01	<i>1,04</i>	<i>1,10</i>	<i>1,06</i>	1,07
121Sb	<i>0,08</i>	<i>0,60</i>	<i>0,87</i>	<i>0,40</i>	0,49	<i>0,10</i>	<i>0,41</i>	0,26	<i>0,40</i>	<i>0,61</i>	<i>0,29</i>	0,43
178Hf	<i>0,53</i>	<i>0,68</i>	<i>0,56</i>	<i>0,81</i>	0,65	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	0,01	<i>0,10</i>	<i>0,14</i>	<i>0,09</i>	0,11
181Ta	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,18</i>	0,06	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>
182W	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,06</i>	<i>0,01</i>	0,02	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	0,04	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
186Re	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	0,01	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>
193Ir	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	0,02	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>
195Pt	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,11</i>	<i>0,00</i>	0,03	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	0,01	<i>0,01</i>	<i>-0,02</i>	<i>-0,01</i>	<i>-0,01</i>
197Au	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	0,00	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
208Pb	<i>1,27</i>	<i>0,85</i>	<i>2,55</i>	<i>2,81</i>	1,87	<i>2,13</i>	<i>1,18</i>	1,65	<i>0,95</i>	<i>1,47</i>	<i>0,55</i>	<i>0,99</i>
209Bi	<i>0,02</i>	<i>1,07</i>	<i>0,21</i>	<i>0,67</i>	0,49	<i>0,37</i>	<i>0,09</i>	0,23	<i>0,15</i>	<i>0,09</i>	<i>0,05</i>	0,10

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 9 : Concentration (ppm) dans la magnétite des Troctolites

	C555M1	C555M2	C555M2	C555M3	C555	C140M2
24Mg	3213	2730	2170	3584	2924	6370
27Al	32760	16940	13468	23940	21777	14980
31P	6,06	4,26	8,34	5,72	6,10	37,08
44Ca	<i>112,00</i>	<i>83,30</i>	<i>60,90</i>	<i>19,60</i>	<i>68,95</i>	<i>7840</i>
45Sc	2,30	0,94	0,78	0,93	1,24	1,92
47Ti	18130	18760	14385	18900	17544	3472
51V	6167	2401	2394	3164	3532	6405
52Cr	5971	5502	5572	5523	5642	4046
55Mn	751	595	480	706	633	434
59Co	212	161	146	180	175	100
60Ni	357	525	434	532	462	249
65Cu	<i>8,40</i>	<i>1,47</i>	<i>4,20</i>	<i>3,71</i>	<i>4,45</i>	<i>28,49</i>
66Zn	462,0	93,8	67,6	296,8	230,1	176,4
69Ga	113,9	35,7	35,4	50,0	58,7	83,3
74Ge	1,70	0,86	0,96	0,89	1,10	1,89
75As	<i>3,08</i>	<i>37,80</i>	<i>1,66</i>	<i>3,29</i>	<i>11,46</i>	<i>126,70</i>
89Y	<i>0,05</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,35</i>
90Zr	0,78	0,62	0,51	0,74	0,66	23,59
93Nb	0,06	0,06	0,03	0,04	0,05	0,25
95Mo	3,07	1,37	3,36	1,56	2,34	3,12
101Ru	-0,07	2,80	0,56	-1,82	0,37	5,11
106Pd	2,94	0,35	-2,17	0,91	0,51	15,40
107Ag	0,35	0,00	0,03	0,15	0,13	0,13
111Cd	0,35	0,11	0,19	1,54	0,55	0,27
115In	0,11	0,04	0,02	0,04	0,05	0,09
118Sn	2,52	1,16	0,95	0,95	1,39	2,00
121Sb	0,18	0,12	0,11	1,05	0,37	0,60
178Hf	0,04	0,05	0,06	0,06	0,05	0,56
181Ta	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01
182W	0,03	0,01	0,00	0,02	0,01	0,17
186Re	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	0,00
193Ir	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
195Pt	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,22
197Au	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
208Pb	0,60	0,57	0,30	1,96	0,86	3,08
209Bi	0,08	0,42	0,30	0,23	0,26	0,17

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 10 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des oxydes de Fe-Ti massif

	4147/3	4147/2	4147/1	4147	2453/1	2453/2	2453/3	2453	2283/1	2283/3	2283
24Mg	18025	17150	18130	17768	9905	9499	9765	9723	29295	31150	30223
27Al	735	448	1043	742	483	525	271	426	385	935	660
31P	<i>3,86</i>	<i>-1,55</i>	<i>10,20</i>	<i>4,17</i>	<i>5,25</i>	<i>5,87</i>	<i>6,12</i>	<i>5,75</i>	<i>4,02</i>	<i>-1,24</i>	<i>1,39</i>
44Ca	<i>7,70</i>	<i>1,05</i>	<i>10,15</i>	<i>6,30</i>	<i>40,60</i>	<i>23,80</i>	<i>63,00</i>	<i>42,47</i>	<i>4,31</i>	<i>7,49</i>	<i>5,90</i>
45Sc	40	34	37	37	40	41	45	42	52	56	54
47Ti	298550	281750	291200	290500	277550	266350	275450	273117	317450	331800	324625
51V	940	882	883	902	616	557	599	591	398	287	343
52Cr	522	634	615	590	116	94	99	103	623	414	518
55Mn	4130	3941	4179	4083	3283	3185	3056	3175	4130	4277	4204
59Co	128,1	151,2	153,3	144,2	128,8	123,9	123,6	125,4	151,9	145,4	148,6
60Ni	121,1	385,0	192,5	232,9	115,9	91,7	150,5	119,4	199,9	183,1	191,5
65Cu	<i>5,1</i>	<i>5,5</i>	<i>4,9</i>	<i>5,2</i>	<i>224,0</i>	<i>6,1</i>	<i>3,3</i>	<i>77,8</i>	<i>19,6</i>	<i>37,1</i>	<i>28,4</i>
66Zn	<i>63,0</i>	<i>23,1</i>	<i>31,2</i>	<i>39,1</i>	<i>11,2</i>	<i>43,8</i>	<i>91,0</i>	<i>48,7</i>	<i>18,9</i>	<i>42,7</i>	<i>30,8</i>
69Ga	1,48	2,31	2,04	1,94	1,72	1,37	0,92	1,33	1,09	1,32	1,21
74Ge	<i>0,08</i>	<i>0,13</i>	<i>0,14</i>	<i>0,12</i>	<i>0,39</i>	<i>0,19</i>	<i>0,18</i>	<i>0,25</i>	<i>0,26</i>	<i>0,27</i>	<i>0,27</i>
75As	<i>16,80</i>	<i>2,59</i>	<i>11,55</i>	<i>10,31</i>	<i>3,78</i>	<i>28,00</i>	<i>6,65</i>	<i>12,81</i>	<i>3,43</i>	<i>9,45</i>	<i>6,44</i>
89Y	<i>0,20</i>	<i>0,17</i>	<i>0,17</i>	<i>0,18</i>	<i>0,21</i>	<i>0,23</i>	<i>0,22</i>	<i>0,22</i>	<i>0,48</i>	<i>0,39</i>	<i>0,43</i>
90Zr	58,6	45,5	48,4	50,9	41,3	48,1	54,2	47,9	172,9	176,2	174,5
93Nb	8,0	8,0	7,4	7,8	31,7	30,1	34,1	31,9	9,8	9,6	9,7
95Mo	0,74	0,79	0,95	0,82	0,92	0,99	0,93	0,95	0,66	0,57	0,61
101Ru	<i>-0,04</i>	<i>-0,31</i>	<i>1,09</i>	<i>0,25</i>	<i>0,00</i>	<i>1,75</i>	<i>0,74</i>	<i>0,83</i>	<i>0,18</i>	<i>0,39</i>	<i>0,28</i>
106Pd	<i>0,00</i>	<i>5,95</i>	<i>2,42</i>	<i>2,79</i>	<i>0,21</i>	<i>1,37</i>	<i>5,60</i>	<i>2,39</i>	<i>0,28</i>	<i>16,45</i>	<i>8,37</i>
107Ag	<i>1,37</i>	<i>0,02</i>	<i>0,24</i>	<i>0,54</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,17</i>	<i>0,10</i>
111Cd	<i>0,53</i>	<i>0,49</i>	<i>0,17</i>	<i>0,40</i>	<i>0,19</i>	<i>0,24</i>	<i>1,12</i>	<i>0,52</i>	<i>0,42</i>	<i>0,25</i>	<i>0,33</i>
115In	<i>0,27</i>	<i>0,20</i>	<i>0,18</i>	<i>0,22</i>	<i>0,14</i>	<i>0,18</i>	<i>0,23</i>	<i>0,18</i>	<i>0,26</i>	<i>0,23</i>	<i>0,24</i>
118Sn	<i>1,95</i>	<i>1,95</i>	<i>2,01</i>	<i>1,97</i>	<i>1,54</i>	<i>1,44</i>	<i>1,43</i>	<i>1,47</i>	<i>1,10</i>	<i>0,89</i>	<i>1,00</i>
121Sb	<i>0,81</i>	<i>0,45</i>	<i>0,60</i>	<i>0,62</i>	<i>0,24</i>	<i>0,39</i>	<i>0,70</i>	<i>0,44</i>	<i>0,84</i>	<i>0,98</i>	<i>0,91</i>
178Hf	2,81	2,35	2,58	2,58	2,36	2,78	2,82	2,65	5,10	5,25	5,17
181Ta	0,66	0,64	0,58	0,62	2,61	2,63	3,30	2,85	0,98	0,75	0,87
182W	0,35	0,32	0,18	0,28	0,04	0,05	0,11	0,07	0,08	0,12	0,10
186Re	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
193Ir	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,06</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>
195Pt	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>-0,01</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>
197Au	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
208Pb	<i>1,54</i>	<i>0,95</i>	<i>1,65</i>	<i>1,38</i>	<i>1,04</i>	<i>1,79</i>	<i>2,70</i>	<i>1,84</i>	<i>2,21</i>	<i>3,08</i>	<i>2,64</i>
209Bi	<i>0,15</i>	<i>0,07</i>	<i>0,17</i>	<i>0,13</i>	<i>0,07</i>	<i>0,18</i>	<i>0,10</i>	<i>0,11</i>	<i>0,05</i>	<i>0,15</i>	<i>0,10</i>

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 11 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des Dunites

	NAI7/1	NAI7/2	NAI7/3	NAI7/4	NAI-7	2236/1	2236/2	2236/3	2236
24Mg	10343	10084	10393	8831	9913	9724	6239	9680	8548
27Al	164	1015	272	346	449	1008	2124	493	1208
31P	<i>0,06</i>	<i>3,19</i>	<i>2,21</i>	<i>5,15</i>	2,65	<i>5,72</i>	<i>1,38</i>	<i>5,23</i>	4,11
44Ca	-27,00	1,80	-5,04	50,40	5,04	82,08	21,60	47,16	50,28
45Sc	77	81	77	74	77	74	90	83	83
47Ti	298800	298440	293760	285480	294120	298440	307080	294480	300000
51V	469	468	548	511	499	452	334	512	433
52Cr	69	56	112	456	173	234	342	111	229
55Mn	4133	3989	4025	4216	4091	4086	7117	4205	5136
59Co	74,7	78,1	88,6	89,1	82,6	94,0	70,9	84,6	83,2
60Ni	205,2	29,1	41,0	58,0	83,3	62,6	144,0	36,5	81,0
65Cu	<i>4,75</i>	<i>4,60</i>	<i>5,83</i>	<i>6,84</i>	5,51	<i>4,18</i>	<i>3,78</i>	<i>4,21</i>	4,06
66Zn	<i>13,3</i>	<i>59,4</i>	<i>12,9</i>	<i>14,0</i>	24,9	<i>40,7</i>	<i>51,8</i>	<i>36,4</i>	43,0
69Ga	<i>0,47</i>	<i>1,51</i>	<i>1,76</i>	<i>1,48</i>	1,31	<i>1,22</i>	<i>2,09</i>	<i>1,09</i>	1,47
74Ge	<i>0,23</i>	<i>0,06</i>	<i>0,19</i>	<i>0,15</i>	0,16	<i>0,19</i>	<i>0,10</i>	<i>0,16</i>	0,15
75As	<i>1,31</i>	<i>1,76</i>	<i>3,24</i>	<i>12,96</i>	4,82	<i>10,44</i>	<i>4,68</i>	<i>1,85</i>	5,66
89Y	<i>0,26</i>	<i>0,25</i>	<i>0,27</i>	<i>0,25</i>	0,26	<i>0,31</i>	<i>0,26</i>	<i>0,25</i>	0,27
90Zr	37,0	74,6	55,0	54,0	55,2	54,1	38,4	73,4	55,3
93Nb	42,0	48,1	44,3	28,1	40,6	41,0	5,7	38,7	28,5
95Mo	<i>0,81</i>	<i>0,91</i>	<i>1,06</i>	<i>1,16</i>	0,99	<i>1,31</i>	<i>1,19</i>	<i>1,02</i>	1,17
101Ru	<i>0,47</i>	<i>0,94</i>	<i>3,24</i>	<i>1,37</i>	1,50	<i>0,47</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,16
106Pd	<i>0,68</i>	<i>1,44</i>	<i>2,12</i>	<i>1,37</i>	1,40	<i>3,60</i>	<i>0,72</i>	<i>0,00</i>	1,44
107Ag	<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	<i>0,04</i>	<i>0,02</i>	0,04	<i>0,14</i>	<i>0,12</i>	<i>0,05</i>	0,11
111Cd	<i>1,69</i>	<i>0,06</i>	<i>0,15</i>	<i>0,08</i>	0,50	<i>0,14</i>	<i>0,14</i>	<i>0,03</i>	0,10
115In	<i>0,29</i>	<i>0,24</i>	<i>0,20</i>	<i>0,29</i>	0,25	<i>0,20</i>	<i>0,69</i>	<i>0,27</i>	0,39
118Sn	<i>1,55</i>	<i>1,19</i>	<i>1,16</i>	<i>1,65</i>	1,39	<i>1,34</i>	<i>1,68</i>	<i>1,32</i>	1,45
121Sb	<i>0,08</i>	<i>0,18</i>	<i>0,12</i>	<i>0,29</i>	0,17	<i>0,47</i>	<i>0,10</i>	<i>0,47</i>	0,34
178Hf	1,81	4,40	3,08	3,17	3,11	3,68	2,46	3,92	3,35
181Ta	<i>3,44</i>	<i>4,29</i>	<i>3,93</i>	<i>1,89</i>	3,39	<i>3,37</i>	<i>0,09</i>	<i>3,00</i>	2,15
182W	<i>0,12</i>	<i>0,06</i>	<i>0,06</i>	<i>0,06</i>	0,07	<i>0,09</i>	<i>0,00</i>	<i>0,05</i>	0,05
186Re	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,00
193Ir	<i>0,01</i>	<i>0,13</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,04	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	0,01
195Pt	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,05</i>	<i>0,00</i>	0,02	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,00
197Au	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,00	<i>0,04</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,01
208Pb	<i>1,26</i>	<i>0,94</i>	<i>1,76</i>	<i>2,45</i>	1,60	<i>1,25</i>	<i>1,53</i>	<i>-0,45</i>	0,78
209Bi	<i>0,12</i>	<i>0,08</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	0,05	<i>0,04</i>	<i>0,09</i>	<i>0,02</i>	0,05

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 12 : Concentration (ppm) dans l'ilmenite des Nelsonites

	PA80/1	PA80/2	PA80/3	PA80/4	PAU2-80	PA05/1	PA05/2	PA05/3	PA05/4	PAU2-05	1116/1	1116/2	1116/3	1116
24Mg	12740	15050	13615	13307	13678	14630	11043	11449	11603	12181	6461	6699	6647	6602
27Al	5285	7980	396	5005	4666	4480	333	266	257	1334	178	195	163	179
31P	2,16	4,40	6,34	6,03	4,73	2,63	2,32	6,18	6,80	4,48	-5,41	-4,79	-2,94	-4,38
44Ca	-39,90	11,55	23,80	41,30	9,19	18,20	7,25	10,75	15,75	12,99	115,50	105,00	224,00	148,17
45Sc	84	81	82	77	81	50	57	58	55	55	117	122	114	118
47Ti	278950	291550	284550	280700	283938	277900	279300	281750	273350	278075	283850	289450	284200	285833
51V	385	292	326	326	332	624	823	677	641	691	159	152	148	153
52Cr	10	11	11	26	14	99	100	55	53	77	2	2	2	2
55Mn	4165	4407	4214	4169	4239	3791	3486	3717	3423	3604	5215	5250	5177	5214
59Co	72,0	95,9	67,4	88,2	80,9	113,8	100,8	100,8	98,1	103,4	35,0	37,7	34,3	35,7
60Ni	87,5	14,0	11,9	16,8	32,6	185,5	161,0	77,0	40,3	115,9	1,3	63,0	2,1	22,1
65Cu	59,5	5,4	6,2	4,9	19,0	20,3	10,7	30,1	35,0	24,0	7,2	7,1	8,1	7,5
66Zn	248,5	511,0	34,0	268,8	265,6	311,5	20,7	73,5	23,1	107,2	50,1	37,1	55,7	47,6
69Ga	5,53	9,00	1,75	5,25	5,38	5,29	2,24	0,86	0,72	2,28	0,74	0,75	0,71	0,73
74Ge	0,26	0,15	0,15	0,21	0,20	0,17	0,21	0,13	0,30	0,20	0,16	0,16	0,20	0,18
75As	5,43	1,86	5,25	2,03	3,64	10,50	2,80	1,33	5,25	4,97	3,82	1,11	2,28	2,40
89Y	0,24	0,25	0,23	0,23	0,24	0,25	0,22	0,30	0,20	0,24	0,39	0,43	0,34	0,39
90Zr	276,9	288,1	253,4	294,0	278,1	31,6	36,9	38,8	34,2	35,4	54,4	59,7	56,2	56,8
93Nb	41,6	43,6	36,1	41,8	40,8	37,1	37,6	38,7	38,0	37,8	34,3	33,0	33,5	33,6
95Mo	0,75	0,78	0,79	0,91	0,81	0,79	0,97	0,92	0,85	0,88	1,50	1,37	1,50	1,46
101Ru	-0,18	-0,30	0,21	0,21	-0,01	0,00	0,00	0,04	0,28	0,08	10,50	-0,28	0,00	3,41
106Pd	0,07	0,84	11,55	0,21	3,17	0,56	0,42	0,56	1,02	0,64	-0,28	2,45	1,75	1,31
107Ag	0,23	0,04	0,05	0,15	0,12	0,18	0,03	0,11	0,11	0,11	0,05	0,01	0,04	0,03
111Cd	0,39	0,06	0,53	0,07	0,26	2,52	0,14	1,40	0,63	1,17	0,53	0,00	0,04	0,19
115In	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,31	0,20	0,25	0,16	0,23	0,25	0,21	0,19	0,22
118Sn	0,98	0,87	0,97	0,96	0,94	1,38	1,37	1,21	1,32	1,32	0,61	0,65	0,45	0,57
121Sb	0,39	0,07	0,44	0,22	0,28	0,49	0,17	0,49	1,65	0,70	0,08	0,11	0,10	0,10
178Hf	9,22	9,54	8,41	9,74	9,23	1,99	2,10	2,31	1,84	2,06	2,58	2,72	2,77	2,69
181Ta	3,75	4,01	3,09	3,74	3,65	3,26	3,51	3,50	3,54	3,45	2,57	2,33	2,46	2,45
182W	0,07	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,18	0,11	0,10	0,13
186Re	0,01	0,07	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
193Ir	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,01
195Pt	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
197Au	0,06	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
208Pb	1,38	1,68	1,39	0,90	1,34	5,25	2,38	5,25	2,42	3,82	0,98	4,55	1,33	2,29
209Bi	0,42	0,05	0,25	0,04	0,19	0,53	0,03	0,42	0,56	0,38	0,25	0,01	0,60	0,28

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 13 : Concentration (ppm) dans l'ilménite des Troctolites

	C555I2	C140/I	C140/I3	C140
24Mg	6379	8077	9598	8018
27Al	172	359	918	483
31P	<i>5,59</i>	<i>11,27</i>	<i>14,37</i>	<i>10,41</i>
44Ca	<i>66,23</i>	<i>1258,00</i>	<i>4070,00</i>	<i>1798,08</i>
45Sc	12	26	28	22
47Ti	298220	294520	280090	290943
51V	185	916	855	652
52Cr	262	249	216	242
55Mn	4655	3164	3178	3665
59Co	120,6	113,6	95,2	109,8
60Ni	76,6	75,5	43,4	65,2
65Cu	<i>5,0</i>	<i>15,2</i>	<i>10,0</i>	<i>10,1</i>
66Zn	<i>3,8</i>	<i>40,7</i>	<i>15,4</i>	<i>20,0</i>
69Ga	0,34	2,29	3,66	2,10
74Ge	<i>0,19</i>	<i>0,16</i>	<i>0,26</i>	<i>0,20</i>
75As	<i>2,59</i>	<i>27,38</i>	<i>65,12</i>	<i>31,70</i>
89Y	0,23	0,27	0,42	0,31
90Zr	29,5	23,6	34,2	29,1
93Nb	37,9	40,4	47,4	41,9
95Mo	0,92	1,76	1,61	1,43
101Ru	<i>0,78</i>	<i>-0,51</i>	<i>0,00</i>	<i>0,09</i>
106Pd	<i>1,15</i>	<i>3,26</i>	<i>0,00</i>	<i>1,47</i>
107Ag	<i>0,10</i>	<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	<i>0,06</i>
111Cd	<i>0,22</i>	<i>0,44</i>	<i>0,00</i>	<i>0,22</i>
115In	<i>0,44</i>	<i>0,14</i>	<i>0,11</i>	<i>0,23</i>
118Sn	<i>0,82</i>	<i>0,94</i>	<i>0,93</i>	<i>0,90</i>
121Sb	<i>0,23</i>	<i>0,50</i>	<i>0,46</i>	<i>0,40</i>
178Hf	1,86	1,51	2,08	1,82
181Ta	3,34	2,85	3,83	3,34
182W	<i>0,13</i>	<i>0,15</i>	<i>0,13</i>	<i>0,13</i>
186Re	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
193Ir	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
195Pt	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
197Au	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>
208Pb	<i>2,11</i>	<i>2,89</i>	<i>2,44</i>	<i>2,48</i>
209Bi	<i>0,01</i>	<i>0,07</i>	<i>0,37</i>	<i>0,15</i>

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 14 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Oxydes de Fe-Ti massif

	4147S3	4147S2	4147S1	4147	2453S2	2453S3	2453	2283S1	2283S3	2288
24Mg	89500	111750	98750	100000	52525	58575	55550	101750	116000	108875
27Al	1675	3325	4725	3242	7525	3900	5713	2525	2950	2738
31P	75	28	63	<i>55</i>	34	3	<i>18</i>	-20	-20	-20
44Ca	10	7	43	<i>20</i>	185	-68	<i>59</i>	78	325	<i>201</i>
45Sc	0,23	0,14	0,28	<i>0,21</i>	0,31	0,41	<i>0,36</i>	0,78	0,58	<i>0,68</i>
47Ti	1175	1025	350	850	394	750	572	3225	775	2000
51V	933	843	828	868	770	788	779	1005	912	959
52Cr	12825	19525	13700	15350	2750	3625	3188	21775	25000	23388
55Mn	1358	1503	1483	1448	1168	1128	1148	1293	1395	1344
59Co	845	1088	800	911	641	793	717	580	765	673
60Ni	1543	1930	1800	1758	923	1055	989	1550	1875	1713
65Cu	12,50	13,33	500,00	<i>175,28</i>	3,25	15,50	<i>9,38</i>	7,50	1,75	<i>4,63</i>
66Zn	3303	5675	4050	4343	4150	4375	4263	2488	2830	2659
69Ga	230	291	217	246	200	209	204	188	243	215
74Ge	0,25	0,37	0,23	<i>0,28</i>	0,15	0,21	<i>0,18</i>	0,50	0,60	<i>0,55</i>
75As	9,75	8,25	150,00	56,00	11,00	18,00	14,50	5,25	20,00	12,63
89Y	0,05	0,01	0,04	<i>0,03</i>	0,00	0,05	<i>0,02</i>	0,08	0,25	<i>0,16</i>
90Zr	0,08	0,15	0,15	<i>0,13</i>	0,25	0,16	<i>0,20</i>	0,32	0,07	<i>0,19</i>
93Nb	0,20	0,12	0,09	<i>0,14</i>	0,03	0,06	<i>0,04</i>	0,20	0,16	<i>0,18</i>
95Mo	0,15	0,05	0,13	<i>0,11</i>	0,11	0,63	<i>0,37</i>	0,10	0,19	<i>0,14</i>
101Ru	0,15	0,78	0,00	0,31	1,10	0,18	0,64	0,60	0,20	0,40
106Pd	0,48	0,70	0,33	<i>0,50</i>	0,33	0,63	<i>0,48</i>	0,78	0,20	<i>0,49</i>
107Ag	0,30	0,25	0,03	<i>0,19</i>	0,01	0,28	<i>0,14</i>	0,19	1,23	<i>0,71</i>
111Cd	0,93	0,78	0,73	<i>0,81</i>	0,08	0,70	<i>0,39</i>	0,04	0,08	<i>0,06</i>
115In	0,40	0,01	0,03	<i>0,14</i>	0,01	0,38	<i>0,19</i>	0,06	0,02	<i>0,04</i>
118Sn	-0,03	0,32	0,25	<i>0,18</i>	0,23	0,21	<i>0,22</i>	0,33	0,50	<i>0,41</i>
121Sb	0,98	1,35	0,93	<i>1,08</i>	0,50	0,57	<i>0,53</i>	1,40	1,58	<i>1,49</i>
178Hf	0,00	0,01	0,00	<i>0,00</i>	0,05	0,02	<i>0,03</i>	0,07	0,01	<i>0,04</i>
181Ta	0,00	0,01	0,01	<i>0,00</i>	0,01	0,02	<i>0,01</i>	0,30	0,13	<i>0,21</i>
182W	0,01	0,00	0,06	<i>0,02</i>	0,01	0,01	<i>0,01</i>	0,02	0,07	<i>0,04</i>
186Re	0,02	0,00	0,00	<i>0,01</i>	0,00	-0,01	<i>0,00</i>	-0,01	0,00	<i>-0,01</i>
193Ir	0,02	0,09	0,13	<i>0,08</i>	-0,02	0,03	<i>0,00</i>	0,00	0,01	<i>0,00</i>
195Pt	0,03	0,01	0,48	<i>0,17</i>	0,00	0,07	<i>0,04</i>	-0,01	0,00	<i>-0,01</i>
197Au	0,01	0,01	0,11	<i>0,05</i>	0,01	0,00	<i>0,00</i>	0,01	0,02	<i>0,01</i>
208Pb	0,80	0,89	2,50	<i>1,40</i>	0,50	1,85	<i>1,18</i>	0,88	5,25	<i>3,06</i>
209Bi	0,02	0,08	0,28	<i>0,12</i>	0,02	1,23	<i>0,62</i>	0,02	0,60	<i>0,31</i>

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 15 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Dunites

	NAI7S2	NAI7S4	NAI7	2236S1	2236S2	2236S3	2236
24Mg	62750	57800	60275	51775	52750	61525	55350
27Al	7325	3000	5163	5225	4100	3875	4400
31P	21	22	22	12	22	27	20
44Ca	108	40	74	-55	238	283	155
45Sc	0,39	0,44	0,41	0,74	0,63	0,46	0,61
47Ti	413	516	464	1530	953	324	936
51V	765	920	843	831	800	689	773
52Cr	2445	2545	2495	7850	7975	9400	8408
55Mn	1370	1433	1401	1380	1353	1408	1380
59Co	438	455	447	405	432	550	462
60Ni	400	438	419	595	553	673	607
65Cu	2,75	1,23	1,99	72,50	12,75	2,90	29,38
66Zn	9100	10050	9575	4350	4443	5075	4623
69Ga	203	205	204	196	183	207	195
74Ge	0,21	0,46	0,33	0,31	0,39	0,55	0,42
75As	5,50	7,78	6,64	13,50	5,15	10,75	9,80
89Y	0,02	0,00	0,01	0,02	0,06	0,07	0,05
90Zr	0,16	0,10	0,13	0,24	0,10	0,10	0,14
93Nb	0,02	-0,85	-0,41	0,05	0,09	0,14	0,09
95Mo	0,14	0,14	0,14	0,12	0,17	0,22	0,17
101Ru	0,10	-0,15	-0,03	0,33	0,48	0,15	0,32
106Pd	0,95	-0,46	0,24	0,48	0,15	0,63	0,42
107Ag	0,03	0,03	0,03	0,11	0,13	0,18	0,14
111Cd	7,00	0,20	3,60	0,02	0,05	1,40	0,49
115In	0,02	0,09	0,06	0,01	0,03	0,06	0,03
118Sn	0,26	0,03	0,14	0,26	0,21	0,14	0,20
121Sb	0,53	0,43	0,48	0,30	0,45	2,75	1,17
178Hf	0,00	-0,03	-0,02	0,01	0,03	0,02	0,02
181Ta	0,00	-0,04	-0,02	0,00	0,00	0,04	0,01
182W	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,02
186Re	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,00
193Ir	0,02	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,02	0,00
195Pt	-0,05	-0,01	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
197Au	-0,02	0,06	0,02	0,01	0,00	0,03	0,01
208Pb	0,24	-3,17	-1,47	0,24	0,83	1,28	0,78
209Bi	0,03	0,04	0,03	0,09	0,04	0,23	0,12

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 16 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Nelsonites

	PA80S1	PA80S2	PA80S4	PAU2-80	PAU2-05
24Mg	75225	74675	78325	76075	76700
27Al	12350	1650	4725	6242	1575
31P	49	7	35	<i>30</i>	-15
44Ca	138	-78	173	<i>78</i>	6
45Sc	0,62	0,79	0,76	<i>0,72</i>	<i>0,32</i>
47Ti	522	745	438	568	388
51V	698	718	647	687	1058
52Cr	165	31	139	112	2620
55Mn	1368	1335	1405	1369	1265
59Co	508	493	530	510	808
60Ni	137	168	255	187	638
65Cu	<i>290,00</i>	<i>0,85</i>	<i>4,75</i>	<i>98,53</i>	<i>2,58</i>
66Zn	8450	8225	9025	8567	9925
69Ga	212	233	216	220	224
74Ge	0,18	0,18	0,01	<i>0,13</i>	<i>0,53</i>
75As	6,35	<i>12,50</i>	<i>12,25</i>	10,37	<i>16,00</i>
89Y	0,01	0,01	0,13	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>
90Zr	0,02	0,06	0,02	<i>0,03</i>	<i>0,06</i>
93Nb	0,00	0,02	0,03	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>
95Mo	0,13	0,16	0,12	<i>0,13</i>	<i>0,14</i>
101Ru	0,35	0,20	0,00	<i>0,18</i>	-0,08
106Pd	1,43	0,20	-0,27	<i>0,45</i>	<i>0,00</i>
107Ag	0,18	0,03	0,11	<i>0,10</i>	<i>0,19</i>
111Cd	0,08	0,17	0,43	<i>0,23</i>	<i>0,01</i>
115In	0,00	0,03	0,01	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>
118Sn	2,75	0,20	0,17	<i>1,04</i>	<i>0,28</i>
121Sb	0,55	0,54	0,66	<i>0,58</i>	<i>2,50</i>
178Hf	0,01	0,00	0,05	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>
181Ta	0,01	0,00	0,01	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
182W	0,02	0,00	0,05	<i>0,02</i>	<i>0,04</i>
186Re	0,00	0,01	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>
193Ir	-0,01	0,01	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>
195Pt	-0,01	0,00	0,00	<i>0,00</i>	-0,01
197Au	0,01	-0,01	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
208Pb	0,30	0,51	0,32	<i>0,37</i>	<i>0,48</i>
209Bi	0,50	0,01	0,05	<i>0,19</i>	<i>0,01</i>

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Table 17 : Concentration (ppm) dans le spinelle des Troctolites

	C555S1	C555S3	C555	C140
24Mg	26500	50250	38375	40125
27Al	3125	9375	6250	10250
31P	9	43	<i>26</i>	<i>33</i>
44Ca	-80	200	<i>60</i>	<i>750</i>
45Sc	0,27	0,21	<i>0,24</i>	<i>0,41</i>
47Ti	394	475	434	695
51V	758	370	564	1560
52Cr	6275	5875	6075	7000
55Mn	1503	1295	1399	1040
59Co	575	620	598	630
60Ni	463	698	580	605
65Cu	<i>1,88</i>	<i>1,83</i>	<i>1,85</i>	<i>6,25</i>
66Zn	8325	4550	6438	6350
69Ga	206	115	160	257
74Ge	0,21	0,19	<i>0,20</i>	<i>0,10</i>
75As	<i>11,50</i>	<i>8,50</i>	10,00	16,50
89Y	0,08	0,02	<i>0,05</i>	<i>0,03</i>
90Zr	0,03	0,05	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>
93Nb	0,03	0,73	<i>0,38</i>	<i>0,16</i>
95Mo	0,18	0,18	<i>0,18</i>	<i>0,25</i>
101Ru	-0,20	-0,25	<i>-0,23</i>	<i>0,30</i>
106Pd	0,15	1,25	<i>0,70</i>	<i>0,60</i>
107Ag	0,08	0,08	<i>0,08</i>	<i>0,10</i>
111Cd	0,58	0,04	<i>0,31</i>	<i>0,28</i>
115In	0,00	0,03	<i>0,01</i>	<i>0,45</i>
118Sn	0,34	0,49	<i>0,41</i>	<i>0,25</i>
121Sb	2,50	1,10	<i>1,80</i>	<i>0,83</i>
178Hf	0,01	0,00	<i>0,00</i>	<i>0,06</i>
181Ta	0,01	0,00	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>
182W	0,07	0,00	<i>0,03</i>	<i>-0,01</i>
186Re	0,01	0,01	<i>0,01</i>	<i>-0,01</i>
193Ir	0,00	0,02	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>
195Pt	0,01	0,01	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>
197Au	0,00	-0,02	<i>-0,01</i>	<i>-0,01</i>
208Pb	0,93	0,30	<i>0,61</i>	<i>0,84</i>
209Bi	0,20	0,11	<i>0,15</i>	<i>0,07</i>

* Les données en gris et en italiques sont jugées moins fiable ou en dessous de la limite de détection

Annexe 4 : Résultat du bilan de masse

Table 18 : Résultat du bilan de masse par échantillon

		Mg	Al	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Ga	Y	Zr	Nb	Mo	Hf	Ta
Oxyde 4147	Magnétite	8%	9%	4%	2%	89%	81%	11%	39%	107%	32%	0%	0%	2%	1%	2%	
	Iilménite	37%	1%	118%	100%	14%	4%	86%	30%	25%	1%	3%	47%	165%	105%	92%	
	Spinelle	49%	81%	0%	0%	3%	22%	7%	45%	44%	32%	0%	0%	1%	0%	0%	
Oxyde 2453	Magnétite	3%	7%	6%	5%	86%	7%	11%	23%	34%	24%	0%	0%	0%	2%	0%	
	Iilménite	11%	0%	110%	98%	8%	0%	53%	18%	7%	0%	3%	48%	186%	95%	199%	
	Spinelle	149%	398%	2%	0%	23%	19%	44%	234%	139%	163%	1%	0%	1%	3%	2%	
Oxyde 2288	Magnétite	20%	27%	13%	10%	93%	94%	34%	58%	53%	42%	1%	1%	0%	7%	3%	0%
	Iilménite	51%	1%	80%	62%	5%	2%	63%	28%	8%	1%	5%	37%	18%	3%	43%	20%
	Spinelle	56%	145%	0%	0%	4%	29%	6%	39%	22%	41%	1%	0%	0%	0%	0%	1%
Dunite NAI7	Magnétite	0%	18%	2%	1%	89%	80%	2%	7%	11%	47%	0%	0%	0%	3%	0%	0%
	Iilménite	4%	3%	98%	99%	27%	11%	44%	21%	19%	3%	1%	13%	112%	4%	31%	112%
	Spinelle	1%	111%	0%	0%	3%	20%	1%	7%	5%	31%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dunite 2236	Magnétite	1%	19%	9%	7%	114%	76%	5%	14%	41%	44%	0%	0%	0%	8%	0%	1%
	Iilménite	2%	1%	103%	100%	7%	3%	35%	10%	8%	1%	1%	8%	125%	3%	25%	102%
	Spinelle	1%	34%	0%	0%	1%	8%	1%	6%	6%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Nelsonite PAU-80	Magnétite	0%	18%	4%	4%	63%	19%	4%	6%	7%	40%	0%	1%	0%	3%	2%	0%
	Iilménite	3%	13%	104%	95%	14%	12%	37%	12%	11%	11%	0%	72%	107%	4%	103%	110%
	Spinelle	2%	105%	0%	0%	3%	9%	1%	8%	6%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Nelsonite PAU-05	Magnétite	0%	8%	1%	1%	118%	91%	1%	5%	9%	56%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
	Iilménite	3%	5%	74%	99%	37%	13%	42%	19%	15%	8%	0%	12%	146%	3%	26%	114%
	Spinelle	2%	110%	0%	0%	4%	32%	1%	11%	6%	56%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Nelsonite 1116	Magnétite	0%	13%	1%	6%	10%	16%	4%	7%		97%	0%	0%	1%	8%	0%	0%
	Iilménite	2%	0%	24%	122%	1%	4%	30%	9%		1%	0%	13%	160%	5%	23%	126%
	Spinelle	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Troctolite C555	Magnétite	0%	1%	1%	8%	86%	114%	3%	15%	27%	17%	0%	0%	0%	6%	1%	0%
	Iilménite	1%	0%	10%	95%	3%	4%	16%	8%	3%	0%	1%	5%	101%	2%	32%	111%
	Spinelle	0%	2%	0%	0%	1%	11%	1%	5%	3%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Troctolite C140	Magnétite	0%	0%	0%	0%	43%	43%	0%	2%	3%	7%	0%	1%	0%	2%	1%	0%
	Iilménite	3%	0%	37%	95%	57%	24%	35%	21%	6%	2%	3%	6%	91%	12%	18%	79%
	Spinelle	0%	1%	0%	0%	1%	10%	0%	2%	1%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

P