

Université du Québec à Chicoutimi

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

Par

Guillaume Lefebvre

**Géochimie des apatites de la Zone Paul,
dépôts du Lac à Paul, Québec, Canada
Corrélation avec l'imagerie spectrale**

14 Décembre 2011

RÉSUMÉ

Le but de ce travail de recherche était de vérifier la présence de différents types d'apatite dans les faciès nelsonitiques montrant les plus fortes concentrations en phosphore sur roche totale ($P_2O_5 \geq 12,75$ % poids) du gisement de P-Ti du Lac à Paul de la compagnie Les Ressources d'Arianne Inc (LRA) comme le suggèrent les images spectrales réalisées par le Core Mapper de la compagnie Photonic Knowledge. Pour tester cette hypothèse, dix (10) lames minces polies ont été réalisées à partir de dix (10) échantillons provenant du forage PAU-08-07 de la compagnie LRA. Ces échantillons ont été sélectionnés de la façon suivante : huit (8) échantillons proviennent des faciès les plus enrichis en P_2O_5 (des concentrations atteignant 16,5 % poids de la roche totale), et deux (2) échantillons provenant des faciès montrant des concentrations typiques en P_2O_5 (6 à 9 % poids de la roche totale).

Pour réaliser cette étude, les lames ont fait l'objet d'une étude pétrographique et géochimique approfondie. Ces lames ont également été soumises à une cartographie des éléments majeurs à la microfluorescence-X (XRF). Par la suite, les 300 apatites (à raison de 30 par lames) sélectionnées au cours de l'étude pétrographique ont été analysées par ablation au laser couplée à la spectrométrie de masse à émission de plasma (LA-ICP-MS). Les données sur la géochimie des éléments traces (P, Cl, Sr, Ba, REE, Th et U) ont servi à comparer la composition des apatites à l'aide de graphiques binaires par un logiciel (JMP) permettant de visualiser graphiquement et simultanément toutes les combinaisons possibles d'éléments chimiques. Cela a permis de produire une matrice de graphiques binaires dans lesquels toutes nos analyses sont projetées. Ces graphiques montrent clairement qu'il n'y a qu'un seul type d'apatite dans les roches à fortes concentrations de P_2O_5 ainsi que dans les roches montrant des concentrations en P_2O_5 plus typiques.

Par contre, ces travaux ont permis de montrer la présence d'apatites de compositions légèrement différentes pour certaines roches montrant des particularités. En effet, la partie silicatée d'un des échantillons est dominée par de l'amphibole et plusieurs apatites montrent un appauvrissement relatif en Terres Rares Lourdes par rapport au Terres Rares Légères. L'autre échantillon montrant des apatites légèrement différentes contient une veinule de sulfure et plusieurs apatites montrent des ratios Th/U plus élevés que l'ensemble des données. En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence différents types d'apatite « géochimique » mais ils pourraient être associés à des phénomènes plus locaux au sein du gisement (amphibolitisation, veinule de sulfure) plutôt qu'aux concentrations élevées de P_2O_5 dans la roche totale.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier profondément Nadège Tollari de Les Ressources d'Arianne Inc. pour sa confiance et son engagement dans ce projet qu'elle m'a elle-même confié. Elle a su se montrer très généreuse envers moi.

Un second merci tout particulier à Philippe Pagé. Son sens critique et sa détermination dans ce projet m'a beaucoup fait avancer. Son travail de moine à la correction de mon texte est tout à son honneur.

Un très gros merci aux dirigeants de Les Ressources d'Arianne Inc. soit, Bernard Lapointe et Daniel Boulianne qui m'ont fait confiance depuis trois années et qui continuent à m'appuyer en me confiant ce projet qu'ils ont financé d'un bout à l'autre. Merci de m'avoir donné accès au matériel, de m'avoir apporté du support technique et logistique.

Un merci spécial avec les collaborateurs de Photonic Knowledge Christian Sasseville et Éric Roberge avec qui le partenariat fût enrichissant.

Merci à Sarah Dare, qui m'a montré à reconnaître les sulfures et les oxydes.

Merci à Dany qui m'a patiemment montré comment fonctionne le LA-ICP-MS et qui m'a jaser des résultats obtenus.

Merci à Paul Bédard pour la cartographie des éléments majeurs.

Merci à Sarah-Jane Barnes qui a gardé un œil sur mon projet et d'en être la lectrice.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES ANNEXES SUR SUPPORT ÉLECTRONIQUE (CD-Rom).....	VII
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : PROJET DU LAC À PAUL – ZONE PAUL.....	4
2.1 – Localisation	4
2.2 – Géologie	5
2.2.1 – Géologie régionale	5
2.2.2 – Géologie de la propriété	5
2.2.3 – Nelsonite.....	8
CHAPITRE 3 : PROJET DE RECHERCHE.....	9
3.1 – Méthodologie	9
3.1.1 – Description Microscopique	9
3.1.2 – Analyses des éléments majeurs (XRF).....	12
3.1.3 – Analyses des éléments traces	13
3.2 – Résultats	20
3.2.1 - Description microscopique et classification des roches.....	20
3.2.2 – Discussion de la cartographie des éléments majeurs de l'échantillon 9275-80 à la microfluorescence-X	26
3.2.3 – Discussion des résultats d'analyses des apatites par ablation au laser et ICP-MS29	
CHAPITRE 4 : CONCLUSIONS	34
4.1 - Description microscopique	34
4.1.1 - Les tableaux	34
4.1.2 - Les proportions modales et les classifications	35
4.2 - La sélection des apatites et les associations minéralogiques	36
4.3 - La caractérisation géochimique des apatites.....	36
4.3.1 - Les éléments majeurs analysés à la microfluorescence-X.....	36
4.3.2 - Les éléments traces analysés au LA-ICP-MS.....	36
4.4 - Atteinte des objectifs de départ.....	37
CHAPITRE 5 : RECOMMANDATIONS	38
ANNEXES	39
RÉFÉRENCES.....	40

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1A** - Image créée par le Core Mapper d'une carotte de roche quelconque provenant d'un forage dans le secteur du Lac à Paul représentant les diverses phases minéralogiques. Parmi ces phases minéralogiques, il y a quatre (4) types d'apatite «spectrale»..... 3
- Figure 1.1B** - Phases minéralogiques de la figure 1.1 séparées en deux groupes pour alléger la présentation. À gauche il y a les types d'apatite «spectrales» A (rouge) et D (orange), tandis qu'à droite il y a les types d'apatite «spectrales» B (mauve) et C (vert) 3
- Figure 2.1** - Figure du Saguenay-Lac-Saint-Jean avec emplacement de la propriété du secteur du Lac à Paul de LRA, avec les deux (2) accès principaux au chemin de fer le plus proche en trait plein et l'accès par le port de la ville de Saguenay en trait pointillé..... 4
- Figure 2.2** - Carte géologique régionale et localisation de la propriété du Lac à Paul, Saguenay Lac-St-Jean, Qc, Canada (LRA 2011). Contour de la propriété, localisation des différentes zones, emplacement des forages antérieurs et actuels. Les échantillons utilisés dans cette étude proviennent du forage PAU-08-07 sur la Zone Paul. La roche encaissante contenant la minéralisation d'apatite est la norite à niveaux d'ultramafites. Les unités lithologiques proviennent de Cimon et Hébert 1998. 7
- Figure 3.1** - Emplacement des échantillons le long du forage PAU-08-07 vue en coupe. Le métrage ainsi que les lithologies sont indiqués. On peut voir que la plupart des échantillons proviennent d'un gabbro anorthositique. Après avoir fait la classification des échantillons, nous verrons que cette unité lithologique est un faciès nelsonitique contenant deux (2) troctolites, cinq (5) mélatroctolites, deux (2) dunites et une (1) amphibolite. 10
- Figure 3.2** - Carotte de forage cassée en deux ayant servi à faire la lame mince polie 9275-80. Troctolite homogène à texture équigranulaire, de couleur noire verdâtre en cassure fraîche, magnétique, composée essentiellement de magnétite, d'ilménite, d'apatite et d'olivine..... 11
- Figure 3.3** - Microscope optique Olympus BX51 de l'Université du Québec à Chicoutimi. Ce microscope a servi à identifier et à sélectionner les 300 apatites. 11
- Figure 3.4** - La microfluorescence-X est une méthode non destructrice qui permet d'analyser les éléments majeurs des grains en utilisant un faisceau de 50 µm. L'appareil utilisé se nomme Micro-XRF EDAX Eagle III. 12
- Figure 3.5** - Spectromètre de masse à émission de plasma. Cette technique d'analyse possède des limites de détection très basses et permet le dosage d'un large spectre d'éléments mineurs et sous la forme de trace. 14
- Figure 3.6** - Système d'ablation par laser. L'ablation par laser permet d'analyser du matériel solide en dirigeant la matière vaporisée vers le spectromètre de masse afin d'en analyser la composition. 14
- Figure 3.7** - Micrographie de la lame 9275-75 en lumière naturelle d'un grain d'apatite analysé comme étant associé au spinelle hercynite (vert foncé). Cette image montre un exemple de la limitation de la technique de classification qui est de prendre un grain d'apatite partiellement en contact avec un grain d'hercynite..... 17
- Figure 3.8** - Notes à la main sur une impression de photo couleur des emplacements approximatifs des groupes d'apatites. Ces notes ont servi à repérer les emplacements des apatites sélectionnées pour la LA-ICP-MS. 17

- Figure 3.9** - Micrographie de l'échantillon 9275-75 en lumière polarisée d'une vue d'ensemble des apatites numérotées pour l'ICP-MS Laser. Les grains d'apatites associés aux hercynites sont numérotés d'un chiffre bleu, ceux associés aux oxydes de Fe-Ti sont numérotés en rouge et lorsqu'il y a des apatites associées aux silicates (plagioclase, olivine ou amphibole), elles sont numérotées en vert. 18
- Figure 3.10** - Exemple de sélection et de numérotation de référence des apatites de la lame mince polie 9275-77 (annexe électronique 5) en lien avec l'annexe électronique 3 contenant les résultats d'analyses. L'encadré rouge est agrandi à la figure 3.11. 18
- Figure 3.11** - Agrandissement de l'encadré de la figure 3.10 montrant les numéros correspondant aux analyses des grains et «sous-grains» d'apatites. 19
- Figure 3.12** - Signal du LA-ICP-MS du grain numéro 3 de la lame 9275-84 associé avec un oxyde de Fe-Ti (84-O-3) après traitement sur IOLITE. Les cinq (5) boîtes rectangulaires correspondent à des données d'analyses formant un plateau acceptable pour être pris en compte. Il y aura donc cinq (5) résultats pour l'analyse de cette même apatite. L'échelle de temps est sur l'axe des abscisses, l'analyse de cette apatite a pris environ 105 secondes. 19
- Figure 3.13** - Classification des échantillons à l'étude dans le diagramme ternaire pyroxènes-olivine-plagioclase. Diagramme ternaire des roches intrusives mafiques, basé sur la composition modale silicatée des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976). 24
- Figure 3.14** - Classification des échantillons à l'étude dans le diagramme ternaire pyroxènes-amphibole-olivine. Diagramme ternaire des roches intrusives ultramafiques, basée sur la composition modale des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976). 25
- Figure 3.15** - Composition modale des échantillons en termes de silicates, apatite et oxydes de Fe-Ti. Séparation des échantillons provenant d'un faciès nelsonitiques ($\geq 30\%$ apatite) et des autres échantillons ($< 30\%$ apatite) qui sont une amphibolite (9275-93) et une dunite (9275-75). 25
- Figure 3.16** - Photo de la lame 9275-80. On y observe des phénocristaux de plagioclase et d'olivines. Les minéraux interstitiels noirs sont les oxydes. Les figures 3.17 et 3.18 sont des cartographies des éléments majeurs provenant toutes de cette lame mince analysée à la microfluorescence-X. 27
- Figure 3.17** - Spectre du phosphore obtenu à la microfluorescence-X superposé sur une photo de lame 9275-80. En bleu, on observe la distribution de la concentration du phosphore contenu dans les grains d'apatite. En noir, les zones où il n'y a pas de phosphore correspondent aux silicates et aux oxydes. 27
- Figure 3.18** - Figure comparative des quatre (4) spectres de la lame 9275-80 obtenus par microfluorescence-X : Le calcium en mauve, le titane et bleu clair, le fer en rouge et la silice en vert. La cartographie du calcium est très similaire à celle du phosphore, tandis que la silice permet d'identifier tous les minéraux silicatés et en particulier les grains de plagioclase. Quant à la distribution du titane, elle correspond partiellement à celle du fer. Les zones les plus brillantes correspondent à des grains d'ilménites, puis les autres zones moins brillantes reflètent plutôt les titanomagnétites ou magnétites à exsolutions d'ilménite. La cartographie du fer semble aussi aller dans le sens où les zones foncées correspondent aux magnétites et celles pâles à des grains d'ilménites contenant un peu de fer. 28

- Figure 3.19** – Exemple de matrice de graphiques de nuages de points regroupant toutes les analyses sauf les apatites de l'échantillon 9275-93 qui ne sont pas représentatives des apatites de cette étude. Les éléments chimiques utilisés dans la matrice les REE sont les suivants : Sr, Ba, REE_{nc}, U, Th, et les ratios sont les suivants : (La/Sm)_{nc} et (La/Yb)_{nc}. Les graphiques contenus dans la matrice sont tous binaires et permettent de vérifier les corrélations de tous les éléments par rapport à tous les éléments. 31
- Figure 3.20** – Graphique LREE_{nc} (La) vs. HREE_{nc} (Yb) montrant l'effet de l'appauvrissement du Yb_{nc} par rapport au La_{nc} des apatites de la lame 9275-93. Les apatites appauvries en Yb_{nc} par rapport au La_{nc} forment un groupe de quinze (15) analyses (représentés par les carrés mauves dans la partie gauche du graphique), soient la moitié des apatites analysées de l'échantillon. Le graphique ((LREE/MREE) vs (LREE/HREE))_{nc} à la figure 3.21 ci-dessous montre également l'effet de l'appauvrissement des HREE_{nc} des apatites de l'amphibolite..... 32
- Figure 3.21** – Le graphique (LREE/MREE)_{nc} vs. (LREE/HREE)_{nc} montre que les apatites de l'échantillon 9275-93 (carrés rouges) ont de plus faibles teneurs en Yb (HREE_{nc}). 32
- Figure 3.22** – Les apatites de l'échantillon 9275-77 montre, à des concentrations données en U, un léger enrichissement en Th par rapport aux résultats d'analyses des apatites des autres échantillons. Cette s'explique probablement par le fait que c'est le seul échantillon qui est parcouru par une veinule de pyrrhotite. 33
- Figure 3.23** – Graphique multi-éléments des profils normalisés des REE permettant de voir les variations géochimiques des apatites de l'échantillon 9275-78 associées aux oxydes de fer et titane (Ox), aux hercynites (H) et aux silicates (S). 33

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 3.1** - Valeur en P₂O₅ des intersections de 1,5 mètre échantillonnées provenant de plusieurs sections de carottes du forage numéro 7 de la Zone Paul en 2008 (PAU-08-07). Les deux (2) lames test (9275-75 et 9275-93) ont des valeurs de 6,3% et 8,9% poids, tandis que les huit (8) péridotites nelsonitiques ont des valeurs variant de 13,5 à 16,5% poids..... 10
- Tableau 3.2** - Paramètres d'utilisation de la microfluorescence-X. Un second calibrage fût nécessaire, c'est pour cette raison qu'il y a deux (2) groupes de paramètres d'analyses..... 12
- Tableau 3.3** - Paramètres du LA-ICP-MS et liste des éléments analysés 13
- Tableau 3.4** - Tableau minéralogique des lames minces polies synthétisant les estimations visuelles des proportions modales des dix (10) échantillons. 21
- Tableau 3.5** – Traits caractéristiques de chacun des échantillons décrits au microscope optique. Textures, tailles, altérations, aspects, morphologies, associations minéralogiques et structures.....22
- Tableau 3.6** - Relations minéralogiques entre les différentes phases minéralogiques. Notes sur la présence de certains indices concernant l'évolution des différents minéraux..... 23
- Tableau 3.7** - Critères caractéristiques : Présence de textures coronitiques, de régions de sous-grains, la granulométrie générale et la distribution minéralogique..... 24

LISTE DES ANNEXES SUR SUPPORT ÉLECTRONIQUE (CD-Rom)

-Brève description à la page 39-

- Annexe 1** - Résultats d'analyses des carottes du forage Pau-08-07 pour les éléments P et Ti
- Annexe 2** - Cartographie des éléments majeurs à la microfluorescence-X
- Annexe 3** - Fichier Excel des résultats d'analyses des apatites à la LA-ICP-MS
- Annexe 4** - Travail préalable à la LA-ICP-MS
- Annexe 5** - Apatite numérotée correspondant aux résultats d'analyses de la LA-ICP-MS
- Annexe 6** - Matrice de corrélation binaire produite avec JMP

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Voici un bref aperçu de l'histoire de la compagnie d'exploration minière Les Ressources d'Arianne Inc. (LRA) qui finance ce Projet de Fin d'Études fait sur leur propriété du Lac à Paul. LRA œuvre principalement dans le secteur du Lac à Paul sur un gisement magmatique de P et Ti depuis 2003. L'apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$), minéral phosphaté le plus abondant sur terre, est un des principaux constituants des roches riches en Fer-Titane-Phosphore formant le dépôt de la compagnie LRA. La minéralisation en phosphore-titane de la propriété du Lac à Paul est connue depuis la fin des années 90. En 1997, des forages réalisés par Mines Virginia et SOQUEM au nord du Lac à Paul ont donné des intersections très intéressantes telles que 7,56 % poids P_2O_5 et 9,65 % poids TiO_2 sur 117,96 m. En 2008, LRA a renforcé sa position en acquérant 100% des claims couvrant les intersections de Mines Virginia et SOQUEM, tout en désignant plus de 200 nouveaux claims dans ce secteur. Depuis 2008, de nombreux travaux d'exploration et de développement ont été effectués sur la propriété. Les résultats de l'étude de pré faisabilité ont été rendu publics en novembre 2011 et confirment la viabilité et la rentabilité d'un projet minier pour une durée de vie estimée à 25 ans.

Au départ, les analyses sur roches totales des carottes de roches de certains forages de la Zone Paul dans le secteur du Lac à Paul ont soulevé un questionnement quant aux fortes concentrations en phosphore. Les résultats de certaines analyses dépassent les 16 % poids de P_2O_5 sur 1,5 mètre, comparativement au 12,75 % poids de P_2O_5 , correspondant à la concentration théorique maximale en phosphore d'une nelsonite. Pour arriver à 12,75 % poids de P_2O_5 , on estime qu'une nelsonite théorique contient 30 % d'apatite dans la roche, sachant qu'il y a 42,5 % de P_2O_5 dans l'apatite, alors on obtient 12,75 % poids de P_2O_5 dans la roche. L'annexe électronique 1 montre les résultats d'analyses du phosphore et du titane des carottes de roches du forage Pau-08-07. Ces analyses ont été réalisées par ALS Chemex sur des intervalles de 1,5 mètre.

Ce projet vise à développer et à tester de nouveaux outils d'exploration pour les gisements magmatiques de P-Ti-Fe. Ce qui procurerait un avantage stratégique pour la compagnie LRA. Puisque la compagnie LRA réalise actuellement des travaux pour améliorer la connaissance de ces dépôts, les nouvelles données géochimiques contribueront à améliorer notre compréhension de la formation de ce type de dépôt. Ces travaux sont faits avec la collaboration de la compagnie Photonic Knowledge (PK) qui développe un appareil portant le nom de Core Mapper. Cette technologie utilise l'imagerie spectrale et la compagnie PK tente de développer son utilisation pour caractériser rapidement les roches lors des campagnes d'exploration. Les travaux préliminaires menés par PK sur les échantillons de LRA avait permis de mettre en évidence la présence de quatre (4) types d'apatite «spectrales» (figure 1.1A). L'actuel projet de fin d'études se propose de vérifier certaines hypothèses qui découlent des travaux menés par PK.

Ces hypothèses sont les suivantes : est-ce que les roches enrichies en phosphore (>12,75 % poids de P_2O_5) contiennent des apatites différentes des roches montrant des concentrations en phosphore plus typiques (environ 6-9 % poids de P_2O_5) ? Est-ce qu'il existe des critères géochimiques pour confirmer la présence de quatre (4) types d'apatite «spectrale ». Les figures 1.1A et 1.1B représentent une image créée par le Core Mapper d'une carotte quelconque provenant d'un forage de la Zone Paul dans le secteur du Lac à Paul. C'est à partir de la figure 1.1A obtenue par le Core Mapper que l'hypothèse des divers types d'apatite a vu le jour.

Le travail effectué dans le projet actuel comporte : une étude pétrographique des faciès nelsonitiques, une sélection des apatites à analyser, l'analyse des éléments majeurs, l'analyse des éléments traces, le traitement des données des analyses des éléments traces et les interprétations. Ces tâches ont été faites sur dix lames minces polies provenant du forage numéro sept (7) de la Zone Paul en 2008 dans le secteur du Lac à Paul. De ces dix (10) lames, trois cents (300) apatites ont été analysé pour les éléments traces, soit trente (30) par lame.

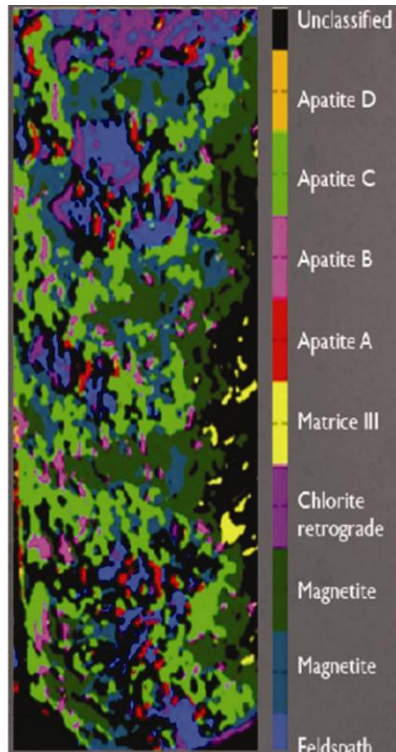


Figure 1.1A -

Image créée par le Core Mapper d'une carotte de roche quelconque provenant d'un forage dans le secteur du Lac à Paul représentant les diverses phases minéralogiques. Parmi ces phases minéralogiques, il y a quatre (4) types d'apatite «spectrale»

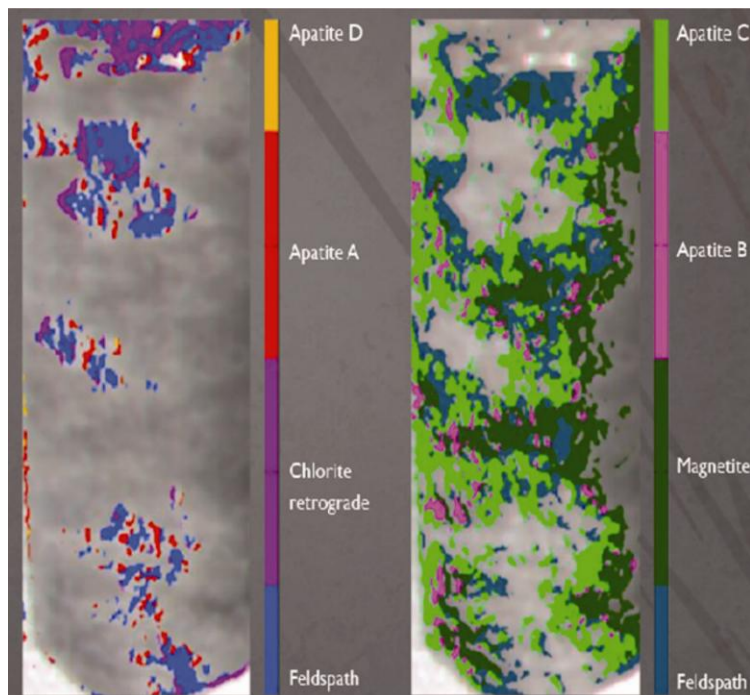


Figure 1.1B -

Phases minéralogiques de la figure 1.1A séparées en deux groupes pour alléger la présentation. À gauche il y a les types d'apatite «spectrales» A (rouge) et D (orange), tandis qu'à droite il y a les types d'apatite «spectrales» B (mauve) et C (vert)

CHAPITRE 2 : PROJET DU LAC À PAUL – ZONE PAUL

2.1 – Localisation

Le projet du Lac à Paul est localisé à 200 km au nord de la ville de Saguenay et 200 km au nord-est de la ville de Dolbeau-Mistassini, dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean, Québec, Canada (figure 2). La propriété du Lac à Paul est constituée de 451 claims désignés sur la carte géologique. Elle se situe dans le feuillet SNRC 22E15. La propriété couvre une superficie de plus de 25 000 hectares, soit plus de 250 km². Les accès à la propriété sont à 170 km à partir de Saint-Ludger-de-Milot, 160 km à partir de Saint-David-de-Falardeau et plus de 250 km à partir de Saint-Fulgence. Toutes ces routes sont des chemins forestiers. Le chemin de Saint-Ludger-de-Milot est le plus recommandé.

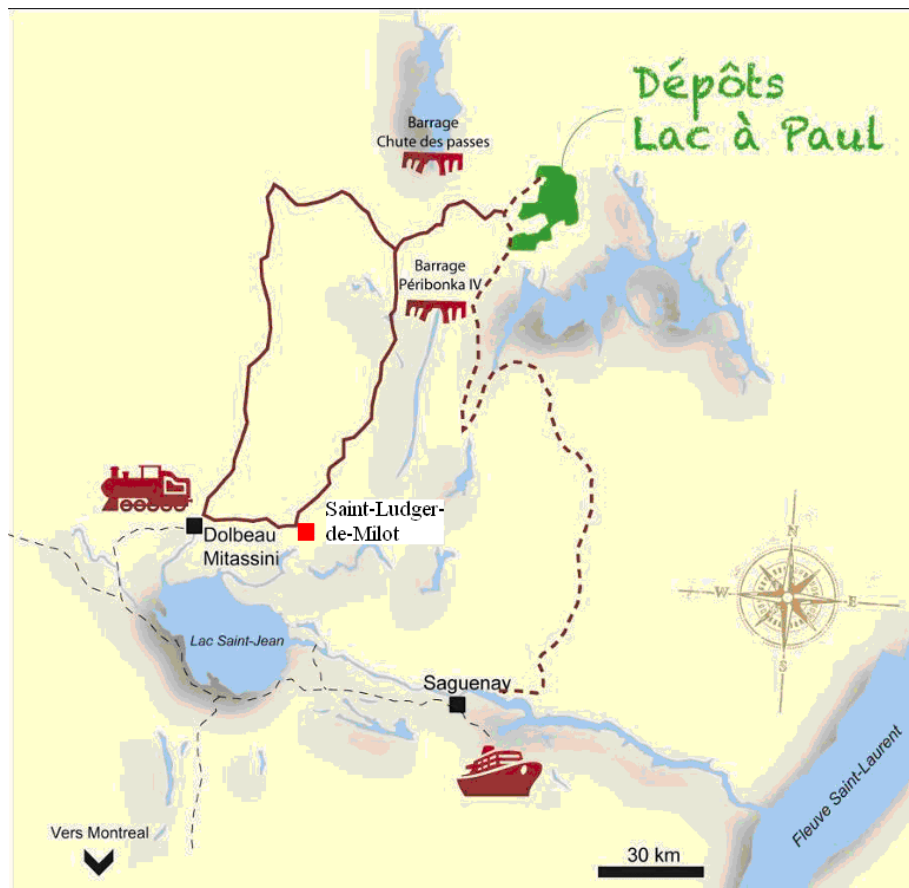


Figure 2.1 - Figure du Saguenay-Lac-Saint-Jean avec emplacement de la propriété du secteur du Lac à Paul de LRA, avec les deux (2) accès principaux au chemin de fer le plus proche en trait plein et l'accès par le port de la ville de Saguenay en trait pointillé.

2.2 – Géologie

2.2.1 – Géologie régionale

Les roches du secteur du Lac à Paul appartiennent à la Suite Anorthositique du Lac-Saint-Jean (SALSJ). La SALSJ est localisée dans la partie centrale de la Province de Grenville (Turcotte 2001) et sa superficie est de plus de 20 000 km². Elle regroupe plusieurs lobes coalescents d'âge Protérozoïque constitués d'anorthosites et de différentes lithologies variant entre les gabbros, les norites, les troctolites, les anorthosites et, en quantité moindre, les pyroxénites, les dunités et les péridotites (Cimon et Hébert 1998; Turcotte 2001). Ces roches montrent des signes d'événements tectoniques, soit du rubanement, de la migmatisation et leur degré de métamorphisme est généralement élevé. Il se situe fréquemment au faciès amphibolite supérieur jusqu'au faciès des granulites (Hébert et Beaumier 1999). Le seul événement structural visible à l'échelle de la géologie locale du secteur du Lac à Paul est la présence de couloirs de déformation NE-SW. Ces couloirs définissent les contacts des unités lithologiques (figure 2.2).

Il existe d'autres suites anorthositiques dans la Province de Grenville. On y retrouve la suite anorthositique de Morin et de Havre Saint-Pierre. Elles ont une chose en commun, soit la présence de gîtes de fer, titane et phosphore.

2.2.2 – Géologie de la propriété

Les roches présentes sur la propriété du Lac à Paul se composent de plusieurs lobes différenciés. Les lithologies rencontrées sont de composition mafique (anorthosites, norites, gabbros) et quelques fois ultramafique (pyroxénites, péridotites, dunités). La géologie de la propriété ainsi que les 451 claims sont présentées à la figure 2.2. Elle provient de la cartographie du feuillet SNRC 22E15 du secteur du Lac à Paul (Cimon et Hébert 1998).

Les trois (3) faciès lithologiques se retrouvant sur la propriété du Lac à Paul sont;

Faciès 1 : Norite à niveaux d'ultramafites

Norite et leuconorite à plagioclase mauve, avec ou sans apatite et avec des niveaux d'ultramafites;

Faciès 2 : Anorthositique

Anorthosite et leuconorite à plagioclase mauve ou gris avec apatite et;

Faciès 3 : Gabbronorite à texture coronitique

Gabbronorite et leuconorite coronitiques.

La propriété est couverte à environ 85% par le Faciès 1. Il se caractérise par la présence de norite et de leuconorite ayant un faible contenu en oxyde de Fe-Ti (2 à 5%), de gabbro à olivine ainsi que des niveaux de roches ultramafiques dont la plupart montrent un contenu en magnétite-ilménite variant de 8 à 20% et en apatite de 2 à 20%. Lorsque la concentration en apatite atteint 30%, le terme «nelsonitique» peut être employé pour qualifier ces roches, et dans certaines conditions, le terme «nelsonite» (voir section 2.2.3) est indiqué.

Les roches du Faciès 2 couvrent la partie sud-ouest, soit 10% de la propriété. Les lithologies ont une granulométrie grossière variant de 5 à 20 cm. De plus, elles montrent un enrichissement en apatite variant de 1 à 15% (Hébert et Beaumier, 2000).

En ce qui concerne les roches du Faciès 3, elles occupent moins de 5 % de la superficie de la propriété. Elles s'y trouvent principalement dans la partie nord-ouest et dans la partie sud-ouest. Les roches sont généralement magnétiques et leur granulométrie varie de moyenne à fine. Une texture coronitique est observée dans ce faciès lorsque le degré d'altération des roches augmente.

Sur le terrain, les diverses lithologies décrites d'après Hébert et Beaumier (2000) ont été observées. Dans le détail, la géologie du secteur du Lac à Paul est plus complexe. On y observe des pegmatites, des granites, des syénites, des schistes, des ferrogabbros, et des diorites ont également été rencontrées.

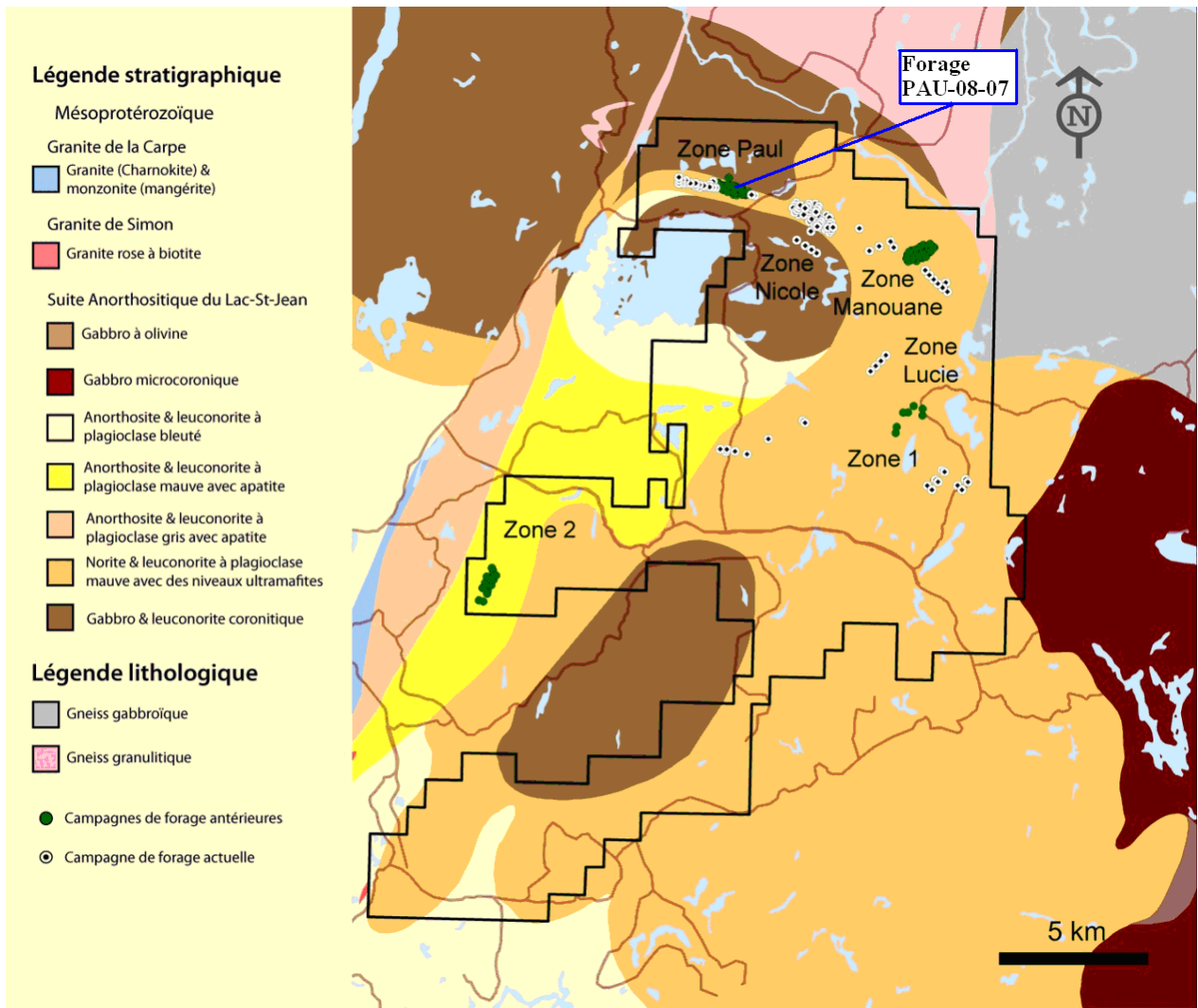


Figure 2.2 - Carte géologique régionale et localisation de la propriété du Lac à Paul, Saguenay Lac-St-Jean, Qc, Canada (LRA 2011). Contour de la propriété, localisation des différentes zones, emplacement des forages antérieurs et actuels. Les échantillons utilisés dans cette étude proviennent du forage PAU-08-07 sur la Zone Paul. La roche encaissante contenant la minéralisation d'apatite est la norite à niveaux d'ultramafites. Les unités lithologiques proviennent de Cimon et Hébert 1998.

2.2.3 – Nelsonite

Une nelsonite est une roche composée essentiellement d'apatite, d'ilménite et de magnétite, et donc, peut être très riche en phosphore. Une des particularités importantes des nelsonites, c'est qu'elles sont des roches à oxyde-apatite, de texture granulaire, et pratiquement dépourvues de matériel silicaté (Nabil 2003). Dans le cas de l'intrusion de Sept-Îles, le terme nelsonite est utilisé pour désigner les roches riches en apatite et en oxydes de Fe-Ti (magnétite et ilménite) avec du matériel silicate inférieur à 5 %. Alors que le nom gabbro-nelsonite désigne les roches à oxydes de Fe-Ti et à apatite matriciels et disséminés (10 à 50 %), dont la composante silicatée est de nature gabbroïque (Nabil 2003). Maintenant, dans le cas du Lac à Paul, la nomenclature actuelle employée pour les roches riches en apatite et en oxydes de Fe-Ti (magnétite et ilménite) avec du matériel silicaté composé de 15 à 25% d'olivine est «nelsonite». Ce terme pris au sens stricte devrait être utilisé pour désigner des roches presque exclusivement composés d'apatite et d'oxydes de Fe-Ti. Par conséquent, les roches de cette étude devraient être appelées péridotites nelsonitiques. Cette nomenclature rassemble les roches de cette étude appelées troctolites riches en oxydes de Fe-Ti et en apatite et dunités riches en oxydes de Fe-Ti et en apatite.

Watson (1907) a introduit le terme «nelsonite» pour décrire des dykes composés d'apatite et d'oxydes de Fe-Ti associés à de l'anorthosite dans les comtés de Nelson et d'Amherst en Virginie. Généralement, les nelsonites démontrent une texture homogène, équi-granulaire et à grains fins (Philpotts 1967; Kolker 1982) et se retrouvent sous forme de dykes, d'horizons ou de ségrégations associés à des gîtes massifs de magnétite et/ou d'ilménite (Dymek et Owens 2001). La formation de ce type de roche est toujours sujet à discussion et dépend fortement de la saturation du magma en apatite, qui est un de ces composants majeurs. Afin d'expliquer la formation des nelsonites de nombreux processus pétrogénétiques ont été proposés : elles se seraient formées par le métasomatisme, par l'immiscibilité entre deux liquides magmatiques ou par la cristallisation fractionnée (Tollari 2007). Malgré des résultats intéressants, aucun des modèles proposés ne s'applique à l'ensemble des nelsonites (Nabil 2003).

CHAPITRE 3 : PROJET DE RECHERCHE

3.1 – Méthodologie

3.1.1 – Description Microscopique

Dix (10) échantillons ont été choisis à la carothèque de LRA. Ils proviennent du forage PAU-08-07, la figure 3.1 montre l'emplacement des échantillons et le modèle stratigraphique du forage. Le critère de sélection le plus important lors de l'échantillonnage a été de prendre les échantillons dans les intersections les plus riches en phosphore (annexe électronique 1). Le deuxième critère auquel une grande importance a été accordée est l'homogénéité. La préparation des 10 lames minces polies a été aisée puisque les roches ne sont pas orientées. Donc, il a suffi de couper les blocs des sections de carottes (figure 3.2) prélevées et de les envoyer pour la confection des lames minces polies.

Les descriptions minéralogiques et les photos ont été faites à l'aide du microscope optique Olympus BX51 de l'Université du Québec à Chicoutimi (figure 3.3). Une semaine de description minéralogique a été nécessaire à l'élaboration d'un tableau résumant les principales caractéristiques minéralogiques pour les dix lames minces polies (tableau 3.4). Dans le forage PAU-08-07, il y a dix-neuf (19) intersections de 1,5 m analysées qui sont supérieures à 12.75 % P_2O_5 . Le tableau 3.1 met en évidence les huit (8) intersections sélectionnées pour en faire des lames minces polies. Les deux (2) lames restantes, soit la 9275-75 et la 9275-93, sont des lames de test qui ont été choisies comme étant représentatives des faciès montrant des concentrations en P_2O_5 plus typiques de la minéralisation du gisement de LRA (6 à 9% poids).

Tableau 3.1 -

Valeur en P₂O₅ des intersections de 1,5 mètre échantillonnées provenant de plusieurs sections de carottes du forage numéro 7 de la Zone Paul en 2008 (PAU-08-07). Les deux (2) lames test (9275-75 et 9275-93) ont des valeurs de 6,3% et 8,9% poids, tandis que les huit (8) péridotites nelsonitiques ont des valeurs variant de 13,5 à 16,5% poids

Analyse roche totale (% P ₂ O ₅)	Métrage	Lames minces polies
6,3	35	9275-75
14,5	38	9275-77
15,5	40	9275-78
13,5	42	9275-79
15,9	44	9275-80
13,7	49	9275-84
13,6	50,5	9275-85
15,6	52	9275-86
8,9	62	9275-93
16,5	64	9275-94

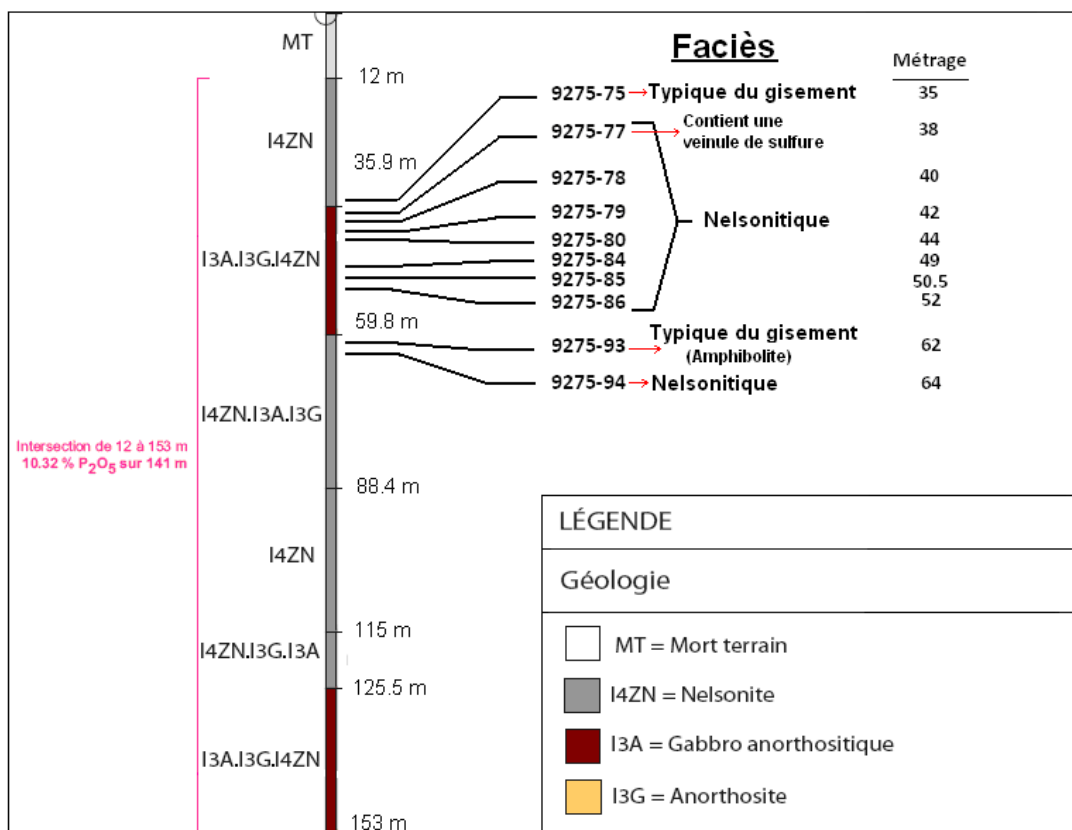


Figure 3.1 - Emplacement des échantillons le long du forage PAU-08-07 vue en coupe. Le métrage ainsi que les lithologies sont indiqués. On peut voir que la plupart des échantillons proviennent d'un gabbro anorthositique. Après avoir fait la classification des échantillons, nous verrons que cette unité lithologique est un faciès nelsonitique contenant deux (2) troctolites, cinq (5) mélatroctolites, deux (2) dunites et une (1) amphibolite.



Figure 3.2 - Carotte de forage cassée en deux ayant servi à faire la lame mince polie 9275-80. Troctolite homogène à texture équigranulaire, de couleur noire verdâtre en cassure fraîche, magnétique, composée essentiellement de magnétite, d'ilménite, d'apatite et d'olivine.



Figure 3.3 - Microscope optique Olympus BX51 de l'Université du Québec à Chicoutimi. Ce microscope a servi à identifier et à sélectionner les 300 apatites.

3.1.2 – Analyses des éléments majeurs (XRF)

La microfluorescence-X est une méthode non destructrice qui permet d'analyser les éléments majeurs des grains en utilisant un faisceau de 50 μm . L'appareil utilisé (figure 3.4) se nomme Micro-XRF EDAX Eagle III. Les échantillons requièrent peu de préparation et l'appareil peut procéder à l'analyse de plusieurs éléments de façon simultanée.

Les dix (10) lames minces polies ont été analysé par microfluorescence-X de façon à dresser une cartographie des éléments majeurs (P, Ca, Fe, Si et Ti). On cherchait à voir si les apatites pouvaient montrer des variations de compositions suffisantes pour être visible à la microfluorescence-X et ainsi identifier différents types d'apatite géochimique. L'opérateur de la Micro-XRF fût Paul Bédard et les paramètres utilisés sont présentés dans le tableau 3.2.



Figure 3.4 – La microfluorescence-X est une méthode non destructrice qui permet d'analyser les éléments majeurs des grains en utilisant un faisceau de 50 μm . L'appareil utilisé se nomme Micro-XRF EDAX Eagle III.

Tableau 3.2 - Paramètres d'utilisation de la microfluorescence-X. Un second calibrage fût nécessaire, c'est pour cette raison qu'il y a deux (2) groupes de paramètres d'analyses.

Détails sur les paramètres de la microfluorescence-X			
Lames	Voltage (kV)	Ampérage (micro-A)	Temps d'exposition (micro-secondes)
79, 80, 85 et 86	40	40	17
75, 77, 78, 84, 93 et 94	40	30	35

3.1.3 – Analyses des éléments traces

L'outil utilisé pour analyser les éléments traces des grains d'apatite est le laser couplé à la spectrométrie de masse à émission de plasma (LA-ICP-MS). Le laser et la spectrométrie de masse qui ont servi pour ce présent travail sont présentés aux figures 3.5 et 3.6. La technique de LA-ICP-MS consiste en une ablation de matière à l'aide d'un laser et le matériel vaporisé est dirigé vers un spectromètre de masse pour en analyser la composition. La spectrométrie de masse possède des limites de détection très basses et permet le dosage d'un large spectre d'éléments mineurs et sous la forme de trace, alors que l'ablation par laser permet d'analyser du matériel solide. La combinaison de ces deux appareils permet d'analyser les teneurs en éléments traces dans une grande variété de minéraux (sulfures, oxydes, silicates, phosphates).

D'abord, trente (30) grains d'apatites par lames ont été sélectionnés sur dix (10) lames pour un total de 300 analyses géochimiques par LA-ICP-MS. Se sont des analyses linéaires (raster). La calibration de la machine est a été faite à l'aide des verres NIST (calibration régulièrement répétée - toutes les 11 à 13 analyses). Les éléments analysés et les paramètres du LA-ICP-MS sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 - Paramètres du LA-ICP-MS et liste des éléments analysés

LA-ICP-MS et sa calibration	Éléments analysés		
Résolution du laser : M-50 Excimer (193nm) de Resonetics	Fe	Nb	Dy
ICP-MS = Agilent 7700x	Mg	Ba	Ho
Calibration = NIST-610	Ca	La	Er
Vérification (moniteur) = NIST-612	Na	Ce	Tm
Diamètre du laser= 43 um	P	Pr	Yb
Impulsion = 10 Hz	F	Nd	Lu
Energie = 4mJ	Cl	Sm	Hf
Gaz vecteur= He = 650 mL / min + N2 = 1.5mL / min	Sr	Eu	Ta
Vitesse = 2.5 um/s à 10um/s	Y	Gd	Th
	Zr	Tb	U



Figure 3.5 – Spectromètre de masse à émission de plasma. Cette technique d'analyse possède des limites de détection très basses et permet le dosage d'un large spectre d'éléments mineurs et sous la forme de trace.



Figure 3.6 – Système d'ablation par laser. L'ablation par laser permet d'analyser du matériel solide en dirigeant la matière vaporisée vers le spectromètre de masse afin d'en analyser la composition.

3.1.3.1 - Méthodologie employée pour sélectionner et analyser les grains

Afin de sélectionner des grains ayant une susceptible variation géochimique, les apatites doivent être en contacts avec certains minéraux qui forment trois (3) groupes d'associations minéralogiques. Ces trois (3) groupes d'associations minéralogiques sont : les oxydes de Fe-Ti, les hercynites et les silicates. Les apatites dans les oxydes sont souvent complètement enveloppées dans la matrice interstitielle d'ilménite et de magnétite. Tandis que les apatites en contact avec les hercynites ou avec les silicates ne le sont réellement qu'à environ 25-75% du pourtour des grains comme le montre la figure 3.7. Cette image montre une limitation de la technique de classification, car il faut sélectionner des grains d'apatites ayant le plus de contact possible avec une des trois (3) associations minéralogiques. De plus, il y a aussi l'effet de la troisième dimension, donc même complètement enrobée dans les oxydes de Fe-Ti en deux (2) dimensions, les grains peuvent être en contact avec les deux (2) autres associations minéralogiques.

Durant la période de sélection des apatites au microscope, les emplacements des groupes d'apatites ont été noté à la main sur une copie papier des photos des lames minces comme le montre la figure 3.8. Puis, les photos prises avec le microscope furent modifiées afin d'y inscrire les numéros des apatites avec leurs couleurs correspondantes (selon leur association minéralogique), la figure 3.9 en montre un exemple. Toutes les autres figures montrant les d'apatites numérotées se retrouvent à l'annexe électronique 4, l'annexe électronique 5 montre leurs emplacement sur les lames minces polies. Il sera ensuite facile de retrouver et d'analyser les bons grains à l'ICP-MS Laser.

Une des étapes importantes au cours du traitement des données brutes, on doit éliminer du signal analytique l'effet dû au matériel «exotique», tel des fractures remplies ou des inclusions, pour éviter que leur contribution chimique ne contamine le signal analytique de l'apatite seule. Cela a pour effet de fragmenter les profils analytiques en «sous-grains» qui seront considérés dans la présente étude comme des grains individuels de même associations minéralogiques. Ceci explique pourquoi, à partir de l'analyse de trois cents (300) apatites, la base de données contient cinq cents soixante-quatorze (572) analyses.

Dans ce projet, en général les apatites ne semblent pas zonées. Il y a de faibles variations aléatoires. Autant les valeurs en phosphore du cœur que celles des bordures montrent une baisse ou une hausse, lorsque l'on compare la composition des trois (3) ou quatre (4) «sous-grains» d'une même apatite, si l'on se fie aux analyses parfois triple ou quadruple.

La figure 3.10 montre un exemple de sélection et de numérotation de référence des apatites de la lame mince polie 9275-77. Pour les autres lames, le même travail a été fait (voir l'annexe électronique 3). La figure 3.11 est un agrandissement d'une zone de la figure 3.10.

À la suite de l'analyse, un fichier de résultats est créé. Au cours du traitement à l'aide du logiciel IOLITE, Dany Savard n'a conservé que les données qu'il a jugées acceptables. Puis il a fait un fichier Excel contenant les résultats d'analyses. La figure 3.12 montre le signal des éléments chimiques d'un grain d'apatite de la lame 9275-84 en contact avec un oxyde. Puisque les grains d'apatites ont été analysés en mode «raster», c'est-à-dire qu'on effectue une tranchée linéaire dans le grain, et allant parfois jusqu'à le traverser complètement de manière à analyser également les bordures et les inclure dans la base de données. Par contre, l'analyse détaillée visant à comparer les variations cœur-bordure en fonction des différentes phases minérales au contact des bordures avec les grains reste à faire.

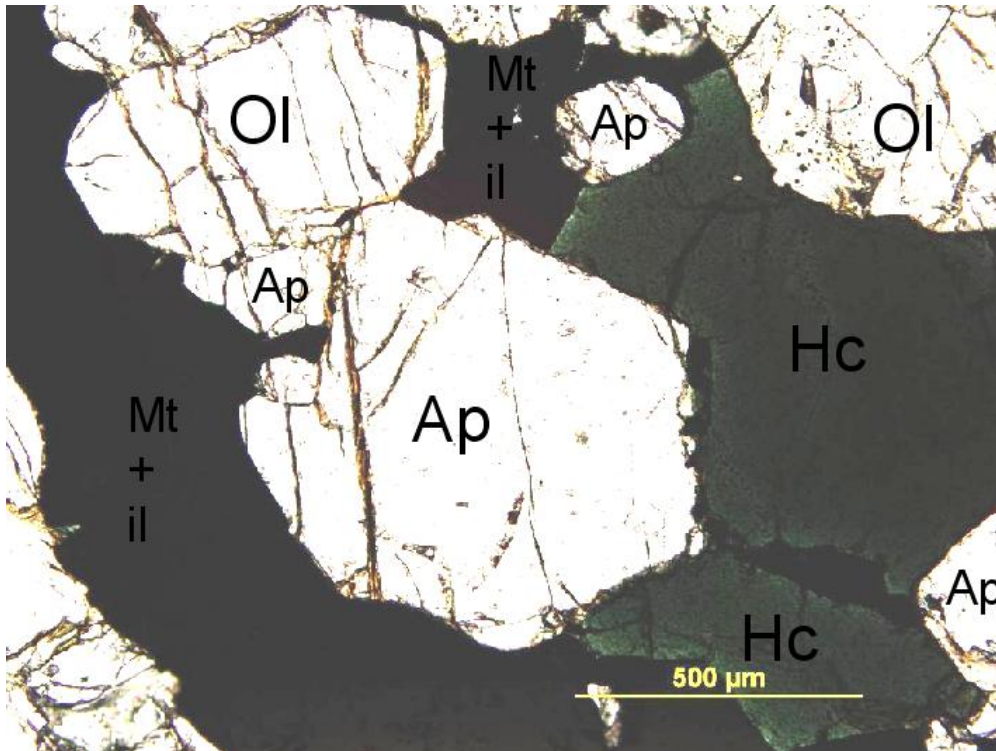


Figure 3.7 - Micrographie de la lame 9275-75 en lumière naturelle d'un grain d'apatite analysé comme étant associé au spinelle hercynite (vert foncé). Cette image montre un exemple de la limitation de la technique de classification qui est de prendre un grain d'apatite partiellement en contact avec un grain d'hercynite.

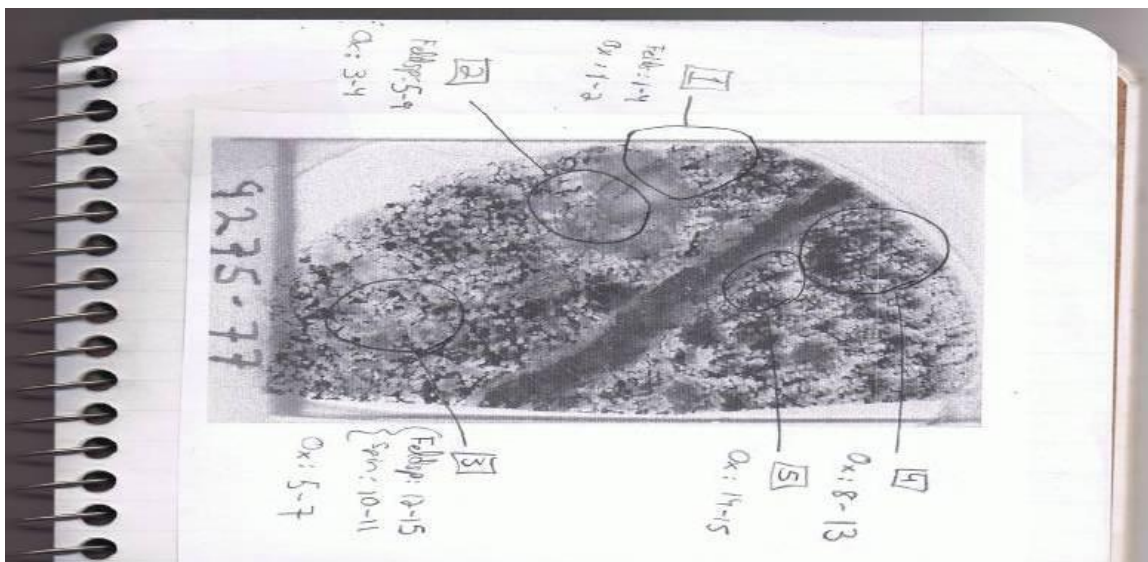


Figure 3.8 – Notes à la main sur une impression de photo couleur des emplacements approximatifs des groupes d'apatites. Ces notes ont servi à repérer les emplacements des apatites sélectionnées pour la LA-ICP-MS.

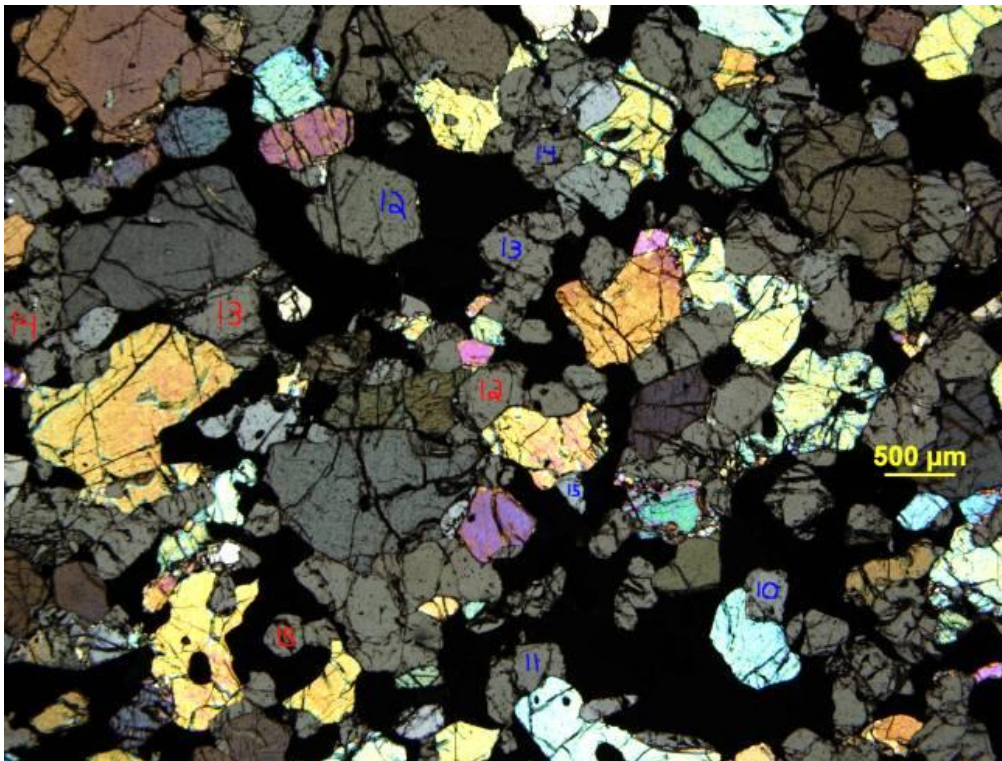


Figure 3.9 - Micrographie de l'échantillon 9275-75 en lumière polarisée d'une vue d'ensemble des apatites numérotées pour l'ICP-MS Laser. Les grains d'apatites associés aux hercynites sont numérotés d'un chiffre bleu, ceux associés aux oxydes de Fe-Ti sont numérotés en rouge et lorsqu'il y a des apatites associées aux silicates (plagioclase, olivine ou amphibole), elles sont numérotées en vert.

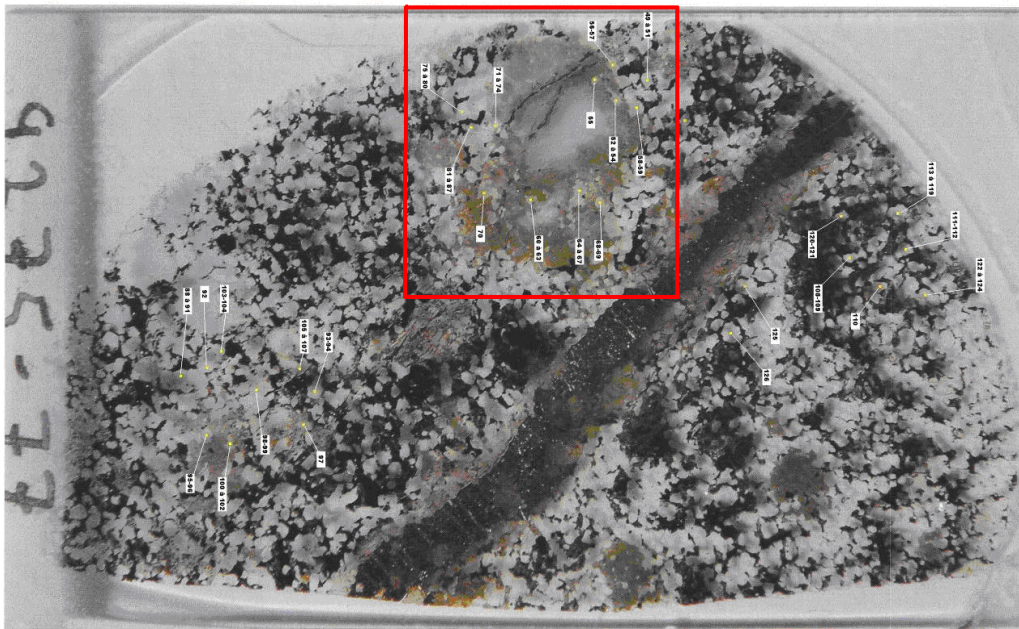


Figure 3.10 -Exemple de sélection et de numérotation de référence des apatites de la lame mince polie 9275-77 (annexe électronique 5) en lien avec l'annexe électronique 3 contenant les résultats d'analyses. L'encadré rouge est agrandi à la figure 3.11.

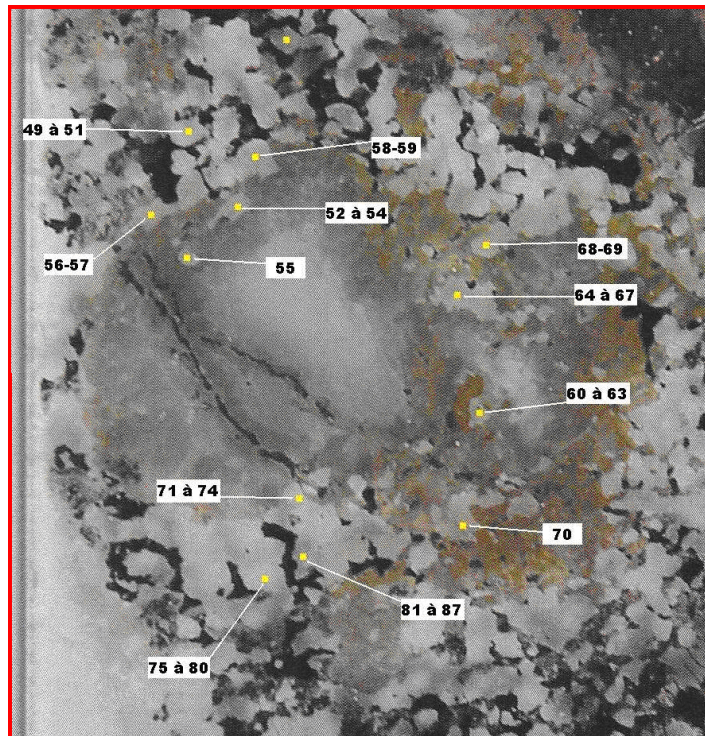


Figure 3.11 -Agrandissement de l'encadré de la figure 3.10 montrant les numéros correspondant aux analyses des grains et «sous-grains» d'apatites.

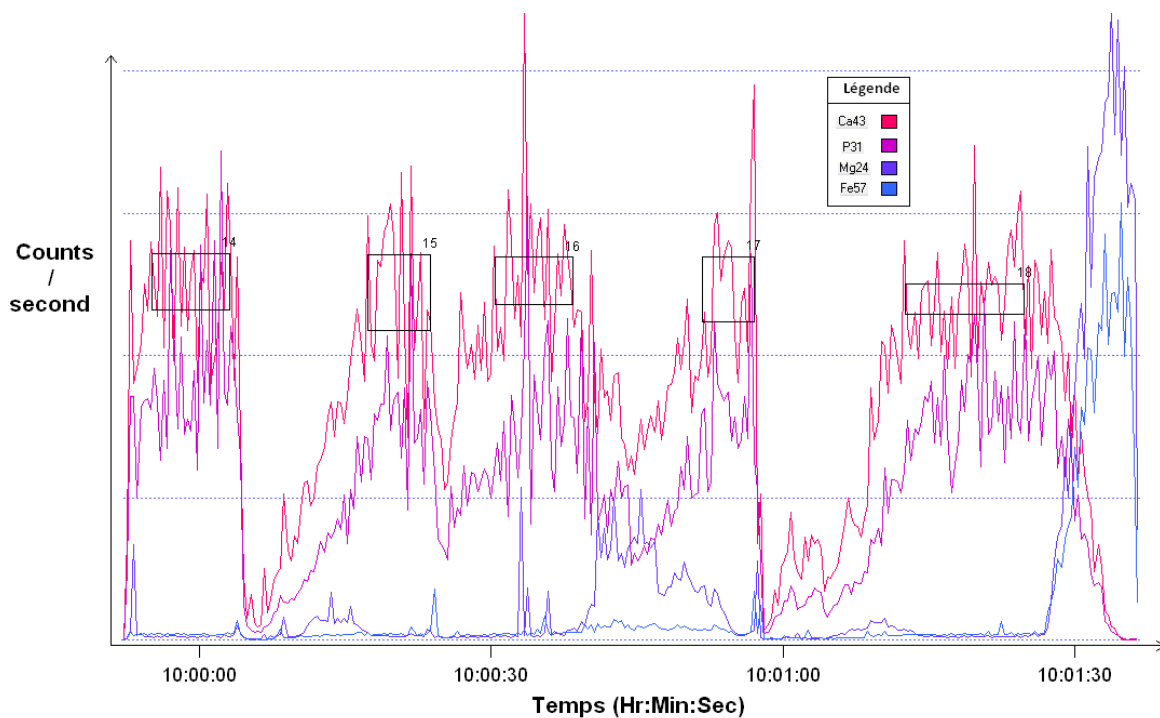


Figure 3.12 -Signal du LA-ICP-MS du grain numéro 3 de la lame 9275-84 associé avec un oxyde de Fe-Ti (84-O-3) après traitement sur IOLITE. Les cinq (5) boîtes rectangulaires correspondent à des données d'analyses formant un plateau acceptable pour être pris en compte. Il y aura donc cinq (5) résultats pour l'analyse de cette même apatite. L'échelle de temps est sur l'axe des abscisses, l'analyse de cette apatite a pris environ 105 secondes.

3.2 – Résultats

3.2.1 - Description microscopique et classification des roches

Les descriptions minéralogiques des dix (10) lames minces polies sont très détaillées. Afin de ne pas être redondant ou perdre l'attention du lecteur, la majeure partie des descriptions a été fait sous la forme de tableaux. On retrouve une description minéralogique synthétisée des dix (10) lames minces polies au tableau 3.4 correspondant aux proportions modales en pourcentage basées sur des estimations visuelles. Ainsi que des descriptions plus détaillées de chacune des lames sont présentés dans les tableaux 3.5, 3.6 et 3.7. Le tableau 3.5 met en valeur les particularités de chacun des échantillons décrits au microscope optique. Soit, les textures, le diamètre moyen et maximal de certains grains, les minéraux d'altérations, etc., le tableau 3.6 présente les relations minéralogiques entre les différentes phases minéralogiques.

Le tableau 3.7 décrits les critères caractéristiques comme la présence de textures coronitiques, de régions de sous-grains, la granulométrie générale et la distribution minéralogique. Afin permettre de classifier correctement les échantillons, les proportions modales estimées visuellement ont été projetées dans les différents diagrammes ternaires suivants :

- Le diagramme ternaire pyroxènes-olivine-plagioclase (figure 3.13) des roches intrusives mafiques, basé que sur la portion silicatée des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976).
- Le diagramme ternaire pyroxènes-amphibole-olivine (figure 3.14) des roches intrusives ultramafiques, basée sur la composition modale des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976).
- Le diagramme ternaire basé sur la composition modale des échantillons en termes de silicates, apatite et oxydes de Fe-Ti (Figure 3.15). Il y a une ligne de séparation servant à différencier les échantillons provenant d'un faciès nelsonitiques ($\geq 30\%$ apatite) et des autres échantillons de faciès typiques du gisement ($< 30\%$ apatite) qui sont une amphibolite (9275-93) et une dunite (9275-75).

D'après les projections dans les différents diagrammes ternaires, les échantillons étudiés peuvent être nommés de diverses manières. On pourrait présenter les échantillons comme ceci : il y a deux (2) troctolites nelsonitiques, cinq (5) mélanotroctolites nelsonitiques, une (1) dunite nelsonitique, une (1) dunite à oxydes de Fe-Ti et à apatite et une (1) amphibolite à oxydes de Fe-Ti et à apatite.

Tableau 3.4 - Tableau minéralogique des lames minces polies synthétisant les estimations visuelles des proportions modales des dix (10) échantillons.

	MINÉRALOGIE	9275-75	9275-77	9275-78	9275-79	9275-80	9275-84	9275-85	9275-86	9275-93	9275-94
Phosphate	APATITE	22	35	38	37	38	37	33	38	22	33
Oxydes	ilménite	19	12 + 4 ^a	10	14	16	11	11	15	9	12
	magnétite	6	10	4	6	6	7	4	8	-	3
	hercynite	2	2	3	2	Tr	Tr	1	1	-	Tr
	TOTAL OXYDES	27	28	17	22	22	18	16	24	9	15
Silicates	olivine	46	9	17	20	8	15	21	26	-	23
	opx	-	-	-	-	tr	-	-	tr	-	tr
	cpx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	feldspath	-	4	8	5	7	2	13	-	-	11
	amphibole	-	6	7	7	9	8	5	2	53	4
	biotite	tr	1	4	1	4	5	5	2	2	4
	rutile	-	1	tr	2	2	2	tr	tr	-	3
	grenat	-	1	1	-	-	-	-	-	5	-
	<i>Altération:</i> serpentine	3	1	2	2	2	2	2	2	-	2
	<i>Altération:</i> chlorite	-	-	tr	tr	2	6	1	1	4	2
TOTAL SILICATES	49	22	39	37	34	38	47	34	64	49	
Carbonates	calcite	-	3	2	2	3	3	2	1	3	2
Sulfures	pyrrhotite	2	12 ^b	2	2	3	4	2	3	2	1
	pentlandite	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
	chalcopyrite	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr	tr
	TOTAL SULFURES	2	12	4	2	3	4	2	3	2	1
	Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- = Aucune proportion modale

^a = Ilménite en intercroissance avec silicate

^b = Veine + Disséminé

Tableau 3.5 – Traits caractéristiques de chacun des échantillons décrits au microscope optique. Textures, tailles, altérations, aspects, morphologies, associations minéralogiques et structures.

	Traits caractéristiques
9275-75	Olivine et traces de pyroxène (Dmax = 2mm)
9275-77	12% Pyrrhotite disséminé + veinule principale de 1,8 mm de large en moyenne. Micro-veinules perpendiculaires de 30 à 40 µm de large à la veinule principale. Ilménite en intercroissance avec les silicates.
9275-78	Apatite altéré près des feldspaths. Olivine (Dmax= 4mm). Traces de pyroxène (Dmax= 2.5mm). Feldspath (Dmax= 4mm). Foliation perpendiculaire aux mégacristsaux de feldspaths avec biotite et sous-grains d'olivine.
9275-79	Amas d'apatite (Dmoy= 0,5mm) en contact avec mégacristsaux. Olivine Dmax= 5mm. Régions de sous-grains (7% de la section polie) foliées.
9275-80	Feldspath (Dmax=7mm). Olivine (Dmax= 3,5mm).
9275-84	Veinule principale (Dmoy= 0,8mm) emplie de biotite et d'amphibole (Dmoy= 0,1 à 0,4mm). Feldspath Dmax= 2mm). Beaucoup d'altération : 14% Biotite, 6% Chlorite, 11% Olivine et 4% Serpentine. Olivine très déformée (Dmax= 2mm et Dmoy= 0,6mm). Foliation sub-perpendiculaire à la veinule principale.
9275-85	Zone 1: Feldspath avec auréole (sous-grains avec biotite et amphibole, mais peu ou pas d'oxydes). Apatite (Dmoy= 0,6mm). Olivine (Dmoy= 1,7mm). Zone 2: Apatite (Dmoy= 1 à 1,2mm) et olivine grossière.
9275-86	Texture de fluage (Dconduit= 0,7mm) avec Olivine mylonitisé dans ce conduit de fluage. Olivine (Dmax= 3,5mm. Apatite fracturé avec serpentine ressemble à Olivine sans pléochroïsme (toujours éteinte). Veinule de calcite (Dmoy= 20µm).
9275-93	Amphibole 50%. Pas de Magnétite. Grenat (Dmax= 8mm). Veinule de calcite (Dmoy= 50µm) passant part en part de toute la roche (et des oxydes).
9275-94	Feldspath (Dmax=17mm). Olivine (Dmax= 2,5mm).

Dmax = Diamètre maximal
 Dmoy = Diamètre moyen

Tableau 3.6 - Relations minéralogiques entre les différentes phases minéralogiques. Notes sur la présence de certains indices concernant l'évolution des différents minéraux.

Minéralogie	Relation minéralogique
APATITE	Inclusion fréquente d'oxydes. Rarement en inclusion dans Olivine. Distribution toujours uniforme Semble être arrivée en premier, puis elle se fait déformer. Dans les lames 9275-80, on voit des apatites altéré ou déformées et d'autres bien formées dans la même zone.
Ilménite	Contacts suturés avec la Magnétite. En intercroissance avec les silicates dans la lame 9275-77.
Magnétite	Exsolution d'ilménite. Contacts suturés avec l'Ilménite.
Hercynite	Toujours en contact avec les oxydes (Magnétite ou Ilménite ou les 2)
Olivine	Toujours partiellement serpentinisée. Souvent deux groupes granulométriques, 1er groupe: Dmoy=0.1 à 0.3mm et 2e groupe: Dmoy= 0.8 à 1.6mm. Rarement déformée, souvent cassée ou réduite, mais contient parfois en inclusion, des grains d'apatite peu déformés.
Pyroxène	Pas de relation.
Feldspath	Souvent peu présent mais très grossier. Accompagné de biotite et de sous-grains dans son auréole. Couronnes réactionnelles toujours associées aux cristaux.
Amphibole	Quelques amas de cristaux dans tous les échantillons sauf le 9275-75. En abondance dans la lame 9275-93. Aspect de cristaux fibreux toujours en contact avec apatite et oxydes dans la lame 9275-84.
Biotite	Peu à moyennement chloritisée. Contient souvent de l'Ilménite en inclusion.
Grenat	Il y a des minéraux d'altérations en bordure du phénocrystal de la lame 9275-93.
Serpentine	Altération de l'olivine.
Rutile	Souvent présent dans la plupart des grains (sauf oxydes et sulfures) lorsque la roche possède une foliation (réseau de micro-fractures).
Chlorite	Altération de la chlorite.
Calcite	Associé aux remplissages des fractures (lame 9275-86).
Pyrrhotite	Principal sulfure, veinule de 1,8 mm de large dans la lame 9275-77.
Pentlandite	Associé à la pyrrhotite.
Chalcopyrite	Associé à la pyrrhotite.

Tableau 3.7 - Critères caractéristiques : Présence de textures coronitiques, de régions de sous-grains, la granulométrie générale et la distribution minéralogique.

<i>Lames minces polies</i>	Textures coronitiques	Sous-grains (%)	Granulométrie générale (mm)		Distribution minéralogique
9275-75			0,6-0,7		Hj+
9275-77	X	5	0,6-0,7		Hj
9275-78	X	13	0,1-0,6	1,2	Hq
9275-79	X	8	0,3	1,6	Hq
9275-80	X	17	0,1	0,6	Hj
9275-84	X	1	0,6-0,7		Hj
9275-85	X	15	0,2	0,8	Hq
9275-86	X		0,1	0,5 1,0	Hj
9275-93	X		0,3		Hj
9275-94	X	10	0,1-0,3	1,0	Hq

Texture coronitique = Couronne réactionnelle, associée à de la déformation, produisant des minéraux d'altérations aux pourtours de phénocristaux de plagioclases.

Sous-grains = Grains ayant une granulométrie réduite par érosion physique formant des «micro-amas» distribués dans certains secteurs des lames.

Hj = Homogène
 Hj+ = Très homogène
 Hq = Hétérogène

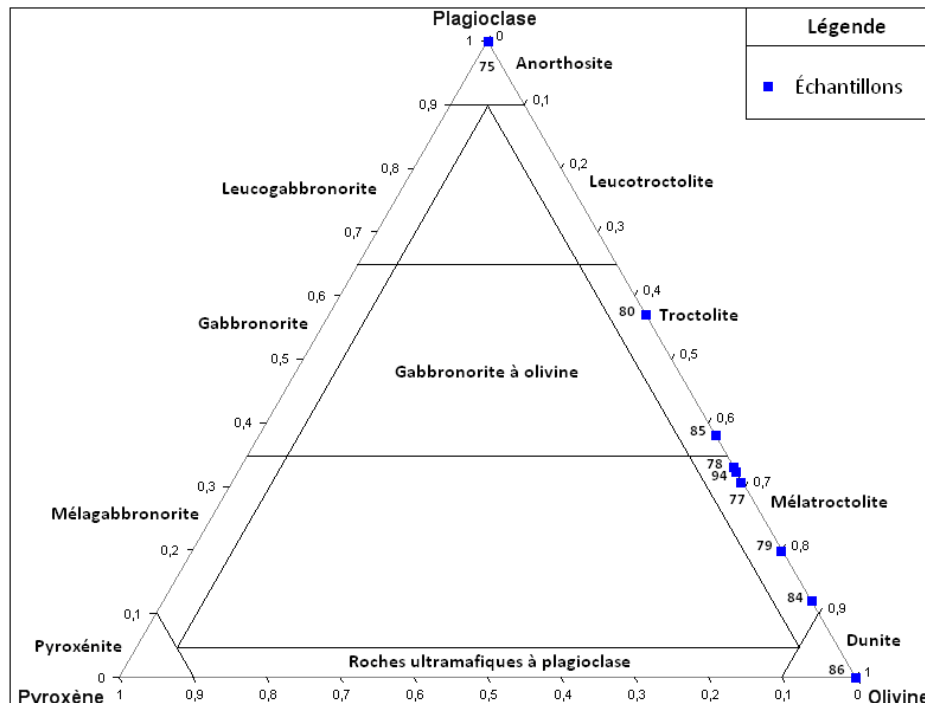


Figure 3.13 -Classification des échantillons à l'étude dans le diagramme ternaire pyroxènes-olivine-plagioclase. Diagramme ternaire des roches intrusives mafiques, basé sur la composition modale silicatée des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976).

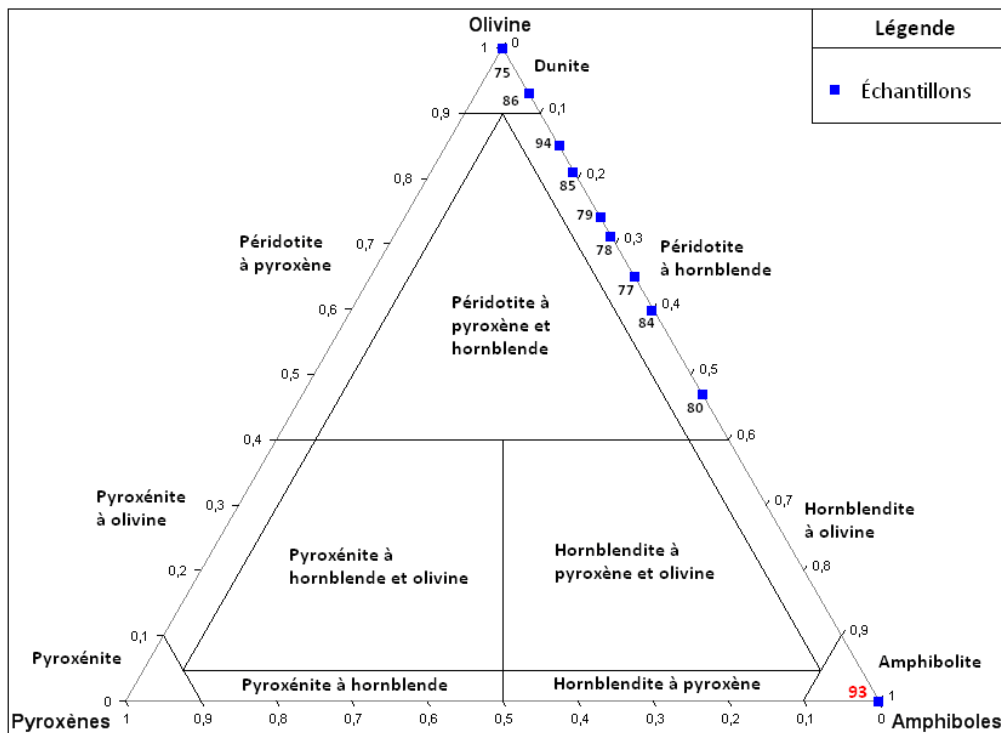


Figure 3.14 -Classification des échantillons à l'étude dans le diagramme ternaire pyroxènes-amphibole-olivine. Diagramme ternaire des roches intrusives ultramafiques, basée sur la composition modale des roches. D'après Streckeisen *et al.* (1976).

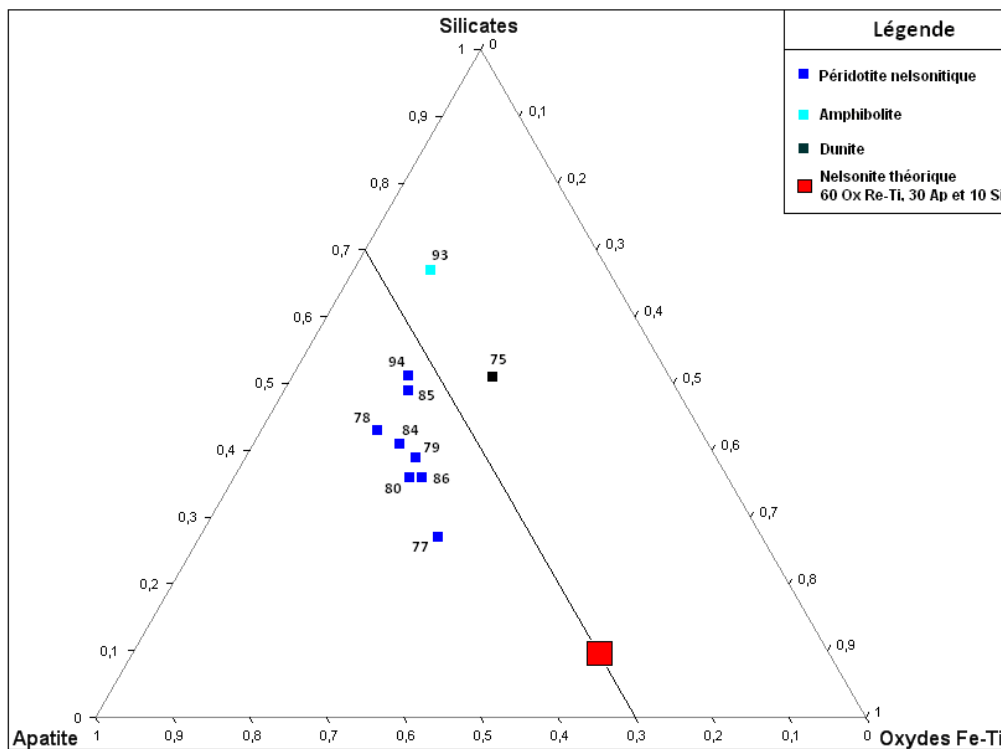


Figure 3.15 -Composition modale des échantillons en termes de silicates, apatite et oxydes de Fe-Ti. Séparation des échantillons provenant d'un faciès nelsonitiques ($\geq 30\%$ apatite) et des autres échantillons ($< 30\%$ apatite) qui sont une amphibolite (9275-93) et une dunite (9275-75).

3.2.2 – Discussion de la cartographie des éléments majeurs de l'échantillon 9275-80 à la microfluorescence-X

La cartographie des éléments majeurs suivants ont été obtenus par microfluorescence-X : phosphore, silice, calcium, titane et fer. Toutes les cartographies de chacune des lames minces polies se retrouvent à l'annexe électronique 2. Cette annexe électronique contient plusieurs cartographies d'éléments majeurs non discutés dans cette étude. Ces cartographies dressent donc une carte des minéraux d'après les concentrations relatives en ces éléments. Elles permettent de vérifier la zonation des éléments, cependant puisque le phosphore et le calcium sont des éléments majeurs dans les apatites, on s'attend à très peu de variation. De plus, dans l'apatite il est possible qu'il y ait une concentration en phosphore supérieure au centre des grains par rapport à la bordure des grains. En faisant une comparaison de la figure 3.16 avec la figure 3.17, on voit la disposition, la distribution et la granulométrie d'après les concentrations en phosphore dans les grains d'apatites. De la même façon, on arrive à caractériser les phases minéralogiques dominantes d'après les cartographies des autres éléments majeurs. La figure 3.16 permet d'affirmer qu'avec la cartographie des éléments majeurs, le spectre du phosphore ne montre aucune variation visible. Cependant, le phosphore et le calcium, à eux seuls, ne permettent pas d'affirmer qu'il n'y a qu'un type d'apatite puisque la microfluorescence-X ne doit pas être assez sensible pour détecter les très faibles variations d'un élément majeur d'un échantillon.

Tout d'abord, il y a plusieurs phénocristaux de plagioclases et d'olivines observables sur la figure 3.16. Pour ce qui est des relations chimiques entre les éléments et la minéralogie, le phosphore et le calcium ont une cartographie similaire. La géochimie des apatites est contrôlée par le phosphore, tandis que celle des plagioclases est fortement contrôlée par le calcium qui cristallise avant les apatites. L'apatite est la dernière ou une des dernières phases minérales à cristalliser. La cartographie du calcium permet de visualiser les plagioclases et les amphiboles. Quant à la distribution du titane (figure 3.18), elle correspond partiellement à celle du fer. Les zones les plus brillantes correspondent à des grains d'ilménites, puis les autres zones moins brillantes reflètent plutôt les titanomagnétites ou magnétites à exsolutions d'ilménite. La cartographie du fer semble aussi aller dans le sens où les zones foncées correspondent aux magnétites et celles pâles à des grains d'ilménites contenant un peu de fer. De plus, le fer est associé aux olivines sur la figure 3.18. Finalement, la silice correspond aux olivines, amphiboles, et aux plagioclases.



Figure 3.16 -Photo de la lame 9275-80. On y observe des phénocristaux de plagioclase et d'olivines. Les minéraux interstitiels noirs sont les oxydes. Les figures 3.17 et 3.18 sont des cartographies des éléments majeurs provenant toutes de cette lame mince analysée à la microfluorescence-X.

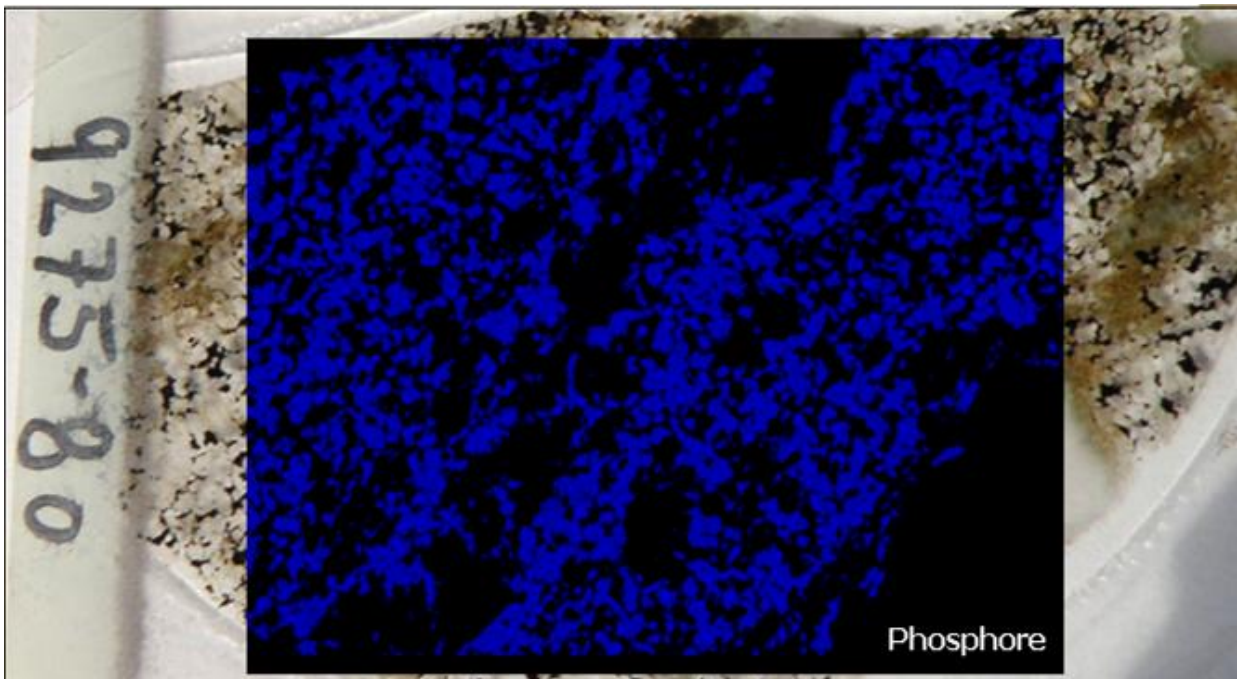


Figure 3.17 -Spectre du phosphore obtenu à la microfluorescence-X superposé sur une photo de lame 9275-80. En bleu, on observe la distribution de la concentration du phosphore contenu dans les grains d'apatite. En noir, les zones où il n'y a pas de phosphore correspondent aux silicates et aux oxydes.

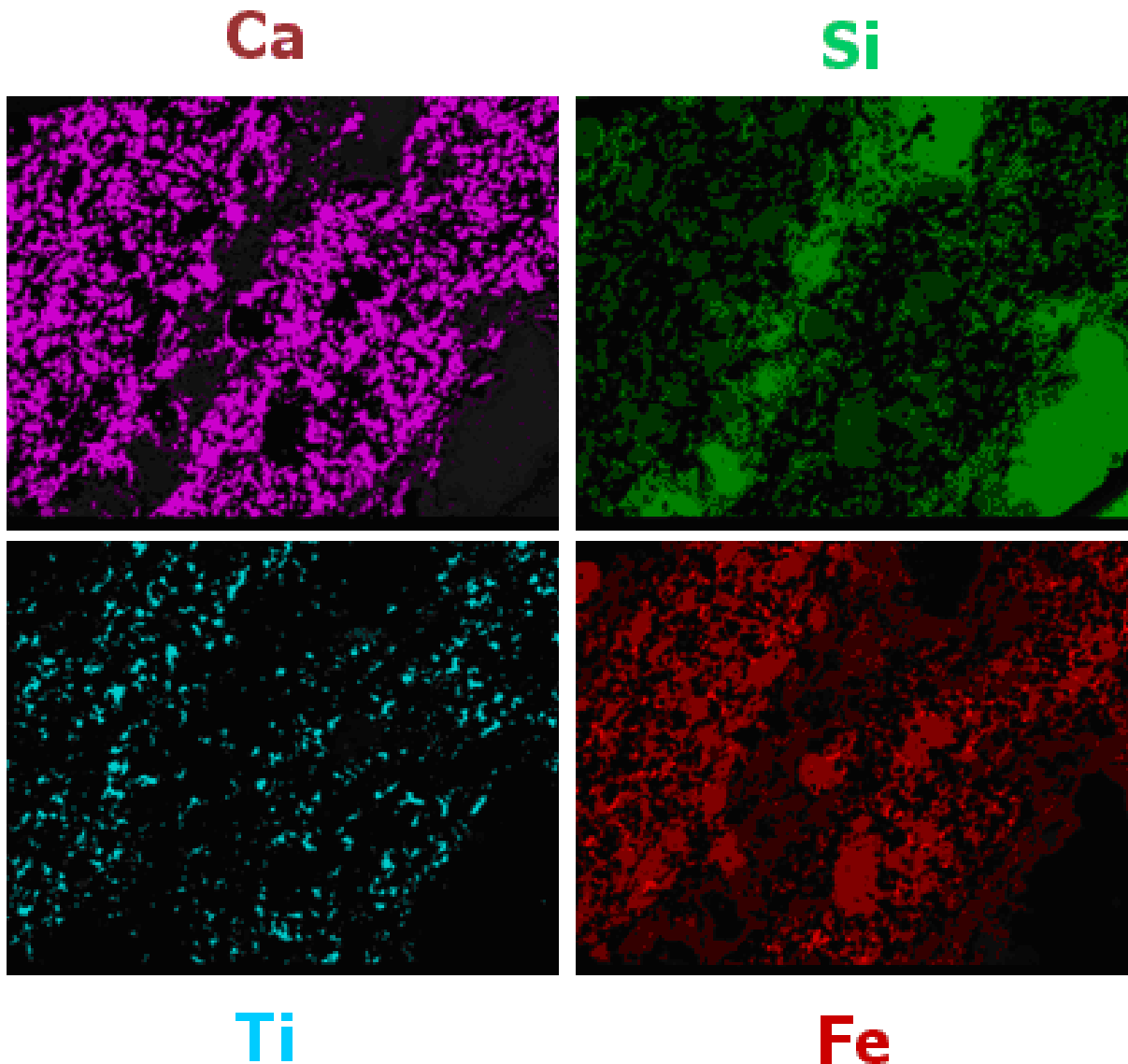


Figure 3.18 –

Figure comparative des quatre (4) spectres de la lame 9275-80 obtenus par microfluorescence-X : Le calcium en mauve, le titane et bleu clair, le fer en rouge et la silice en vert. La cartographie du calcium est très similaire à celle du phosphore, tandis que la silice permet d'identifier tous les minéraux silicatés et en particulier les grains de plagioclase. Quant à la distribution du titane, elle correspond partiellement à celle du fer. Les zones les plus brillantes correspondent à des grains d'ilménites, puis les autres zones moins brillantes reflètent plutôt les titanomagnétites ou magnétites à exsolutions d'ilménite. La cartographie du fer semble aussi aller dans le sens où les zones foncées correspondent aux magnétites et celles pâles à des grains d'ilménites contenant un peu de fer.

3.2.3 – Discussion des résultats d'analyses des apatites par ablation au laser et ICP-MS

Premièrement, pour vérifier s'il existe différents types d'apatite géochimique, une base de données contenant les 572 analyses de grains et de «sous-grains» d'apatites obtenues par l'ablation des trois cents (300) apatites sélectionnée a été construite (annexe électronique 3). Trente (30) données aberrantes ont été éliminées de la base de données. Les graphiques présentés contiennent assez de données d'analyses pour être considéré comme représentatif de la diversité des apatites.

Pour analyser visuellement les relations entre les différents éléments traces analysés, il a fallu créer des matrices de graphiques à l'aide du logiciel JMP. Ces matrices permettent d'observer rapidement s'il y a une ou plusieurs corrélations (ou regroupements) entre les divers éléments chimiques. La figure 3.19 constitue un exemple d'une telle matrice de graphiques. Les graphiques contenus dans la matrice sont tous binaires et représentent les éléments chimiques qu'ils recourent suivant le prolongement de l'axe vertical et horizontal. La figure 3.19 montre une portion de la matrice créée comprenant tous les résultats d'analyses des apatites sauf celles de l'échantillon 9275-93 qui sont jugées non-représentatifs, cette roche est une amphibolite plutôt qu'une péridotite nelsonitique ou une dunite dans le cas de l'échantillon 9275-75. Il est à noter que tous les résultats concernant les REE sont normalisés sur les chondrites (nc). Les éléments présentés dans la matrice de graphiques binaires sont les suivants : Sr, Ba, REE_{nc}, U, Th, et les ratios sont les suivants : (La/Sm)_{nc} et (La/Yb)_{nc}. Le fluor n'a pas été analysé puisque cet élément est très volatil. Il y a dans l'annexe électronique 6, quatre (4) matrices de corrélation binaire produite avec JMP, soit une première matrice contenant l'ensemble des analyses, une seconde matrice avec que les analyses des apatites associées aux oxydes de fer et titane, une troisième matrice avec uniquement les analyses des apatites associées aux silicates et quatrième une dernière matrice avec les analyses des apatites associées aux hercynites. De plus, le logiciel JMP produit également une matrice de coefficients de corrélation correspondant à la matrice de graphique. Toutes les matrices de corrélation de l'annexe électronique 6 possèdent également une matrice de coefficients de corrélation. Cet outil de géostatistique quantifie la corrélation de chaque paire d'éléments formant les graphiques.

Toutes ces matrices ont un point en commun, elles ne montrent qu'un seul type d'apatite. Visuellement ce type correspond à une seule droite de régression linéaire ou encore, à un seul amas contenant la grande majorité des analyses. Si, par contre, les graphiques binaires avaient montré deux (2) corrélations ou deux (2) amas de points ou plus encore, alors l'hypothèse des différents types d'apatite aurait été considérée.

Toutefois, il y a deux (2) échantillons où la géochimie des apatites est légèrement différente. C'est le cas de l'échantillon 9275-93 qui est une amphibolite à oxydes de Fe-Ti et à apatite. Le graphique $(LREE \text{ vs } HREE)_{nc}$ (figure 3.20) montre l'effet de l'appauvrissement du Yb_{nc} par rapport au La_{nc} des apatites de la lame 9275-93. Les apatites appauvries en Yb_{nc} par rapport au La_{nc} forment un groupe de quinze (15) analyses, soit la moitié des apatites analysées de l'échantillon. Le graphique $((LREE/MREE) \text{ vs } (LREE/HREE))_{nc}$ à la figure 3.21 montre également l'effet de l'appauvrissement des $HREE_{nc}$ des apatites de l'amphibolite.

Le second échantillon ayant des apatites de géochimie légèrement différente est le 9275-77. Cette mélatroctolite nelsonitique contient des apatites montrant un léger enrichissement en thorium par rapport aux résultats d'analyses des apatites des autres échantillons. Cette différence est visible sur le graphique U vs Th (figure 3.22). Cet échantillon est elle aussi légèrement différente des autres échantillons puisqu'elle contient une veinule de sulfures. Il est possible qu'au cours de la mise en place de la veinule, la chimie des apatites ait été modifiée légèrement.

Finalement, le graphique multi-éléments des profils normalisés des REE à la figure 3.23 permet de voir les variations géochimiques des apatites de l'échantillon 9275-78. Les analyses ont été regroupés par association minéralogiques, c'est-à-dire qu'il y a trois (3) courbes : une (1) courbe pour les apatites associées aux oxydes de fer et titane, une (1) deuxième courbe pour les apatites associées aux hercynites et une (1) dernière courbe pour les apatites associées aux silicates. On peut voir que les patrons des REE_{nc} des apatites associées aux oxydes de Fe-Ti et des apatites associées aux hercynites se superposent. Cependant, il y a un appauvrissement des $MREE_{nc}$ (Moyen Rare Earth Elements) et des $HREE_{nc}$ (Heavy Rare Earth Elements) des apatites associées aux silicates par rapport aux apatites associées aux oxydes de Fe-Ti et des apatites associées aux hercynites. De plus, le graphique permet de comparer les valeurs en REE_{nc} des trois assemblages minéralogiques à la composition des apatites provenant des péridotites nelsonitiques de Julie Fredette (2006) provenant des zones Paul et Manouane dans le secteur du Lac à Paul. Bien que les analyses de Julie Fredette soient fait avec une autre méthode, c'est-à-dire par activation neutronique (INAA) sur des concentrées de grains d'apatites triés à la main, la tendance de ses résultats est la même que ceux de cette étude.

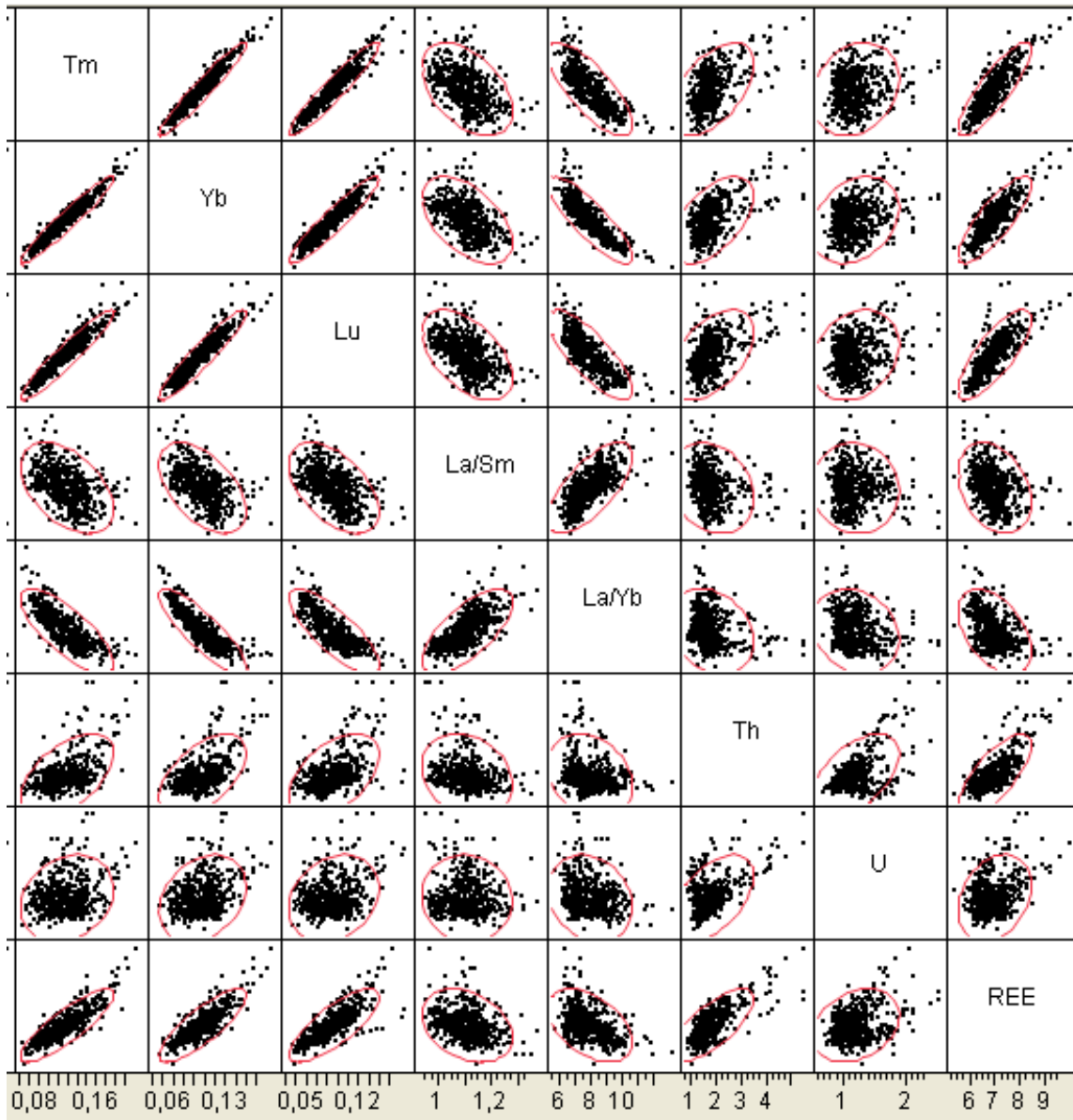


Figure 3.19 – Exemple de matrice de graphiques de nuages de points regroupant toutes les analyses sauf les apatites de l'échantillon 9275-93 qui ne sont pas représentatives des apatites de cette étude. Les éléments chimiques utilisés dans la matrice les REE sont les suivants : Sr, Ba, REE_{nc}, U, Th, et les ratios sont les suivants : (La/Sm)_{nc} et (La/Yb)_{nc}. Les graphiques contenus dans la matrice sont tous binaires et permettent de vérifier les corrélations de tous les éléments par rapport à tous les éléments.

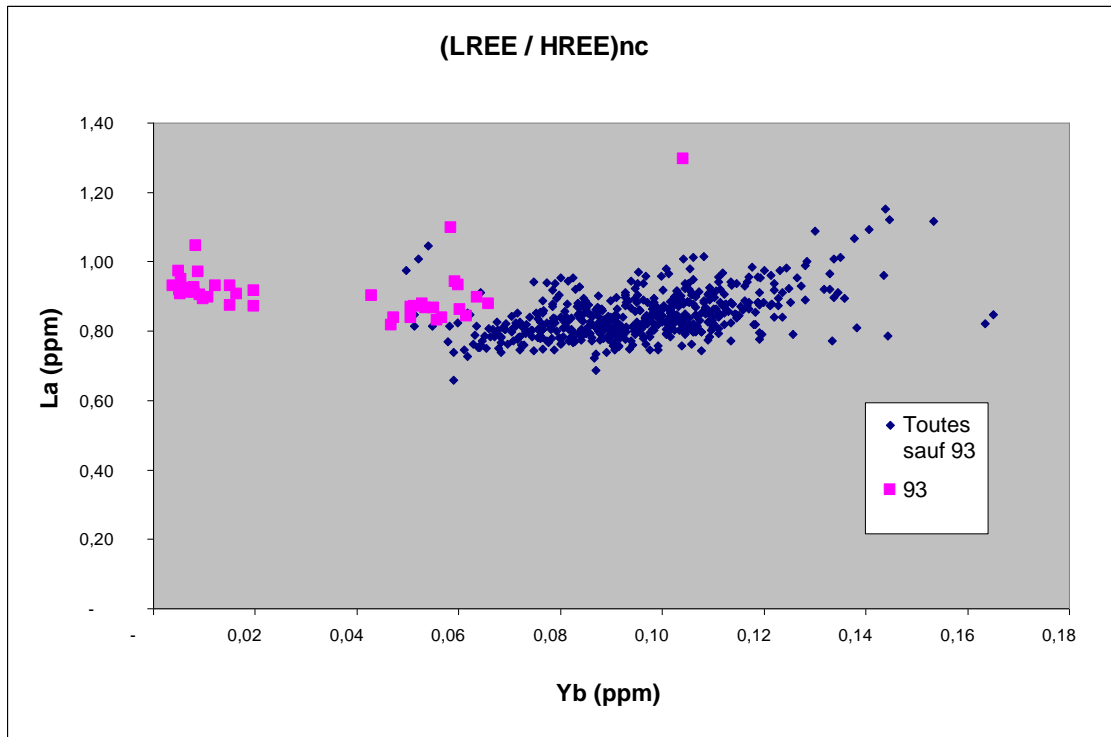


Figure 3.20 – Graphique $LREE_{nc}$ (La) vs. $HREE_{nc}$ (Yb) montrant l'effet de l'appauvrissement du Yb_{nc} par rapport au La_{nc} des apatites de la lame 9275-93. Les apatites appauvries en Yb_{nc} par rapport au La_{nc} forment un groupe de quinze (15) analyses (représentés par les carrés mauves dans la partie gauche du graphique), soit la moitié des apatites analysées de l'échantillon. Le graphique $((LREE/MREE) vs (LREE/HREE))_{nc}$ à la figure 3.21 ci-dessous montre également l'effet de l'appauvrissement des $HREE_{nc}$ des apatites de l'amphibolite.

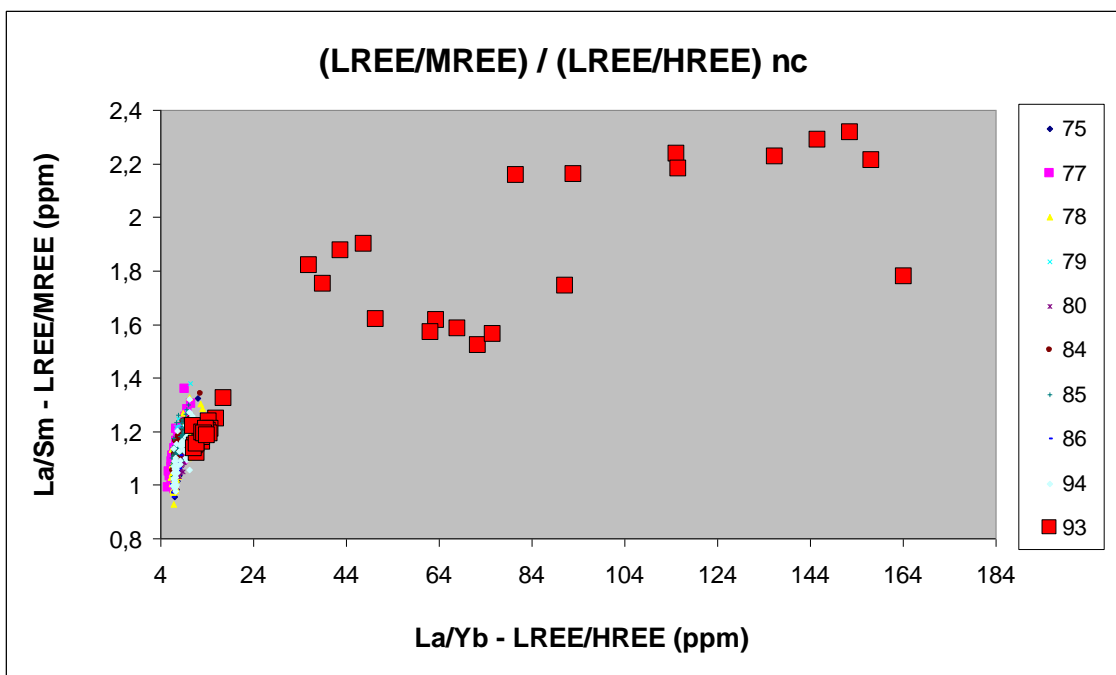


Figure 3.21 – Le graphique $(LREE/MREE)_{nc}$ vs. $(LREE/HREE)_{nc}$ montre que les apatites de l'échantillon 9275-93 (carrés rouges) ont de plus faibles teneurs en Yb ($HREE_{nc}$).

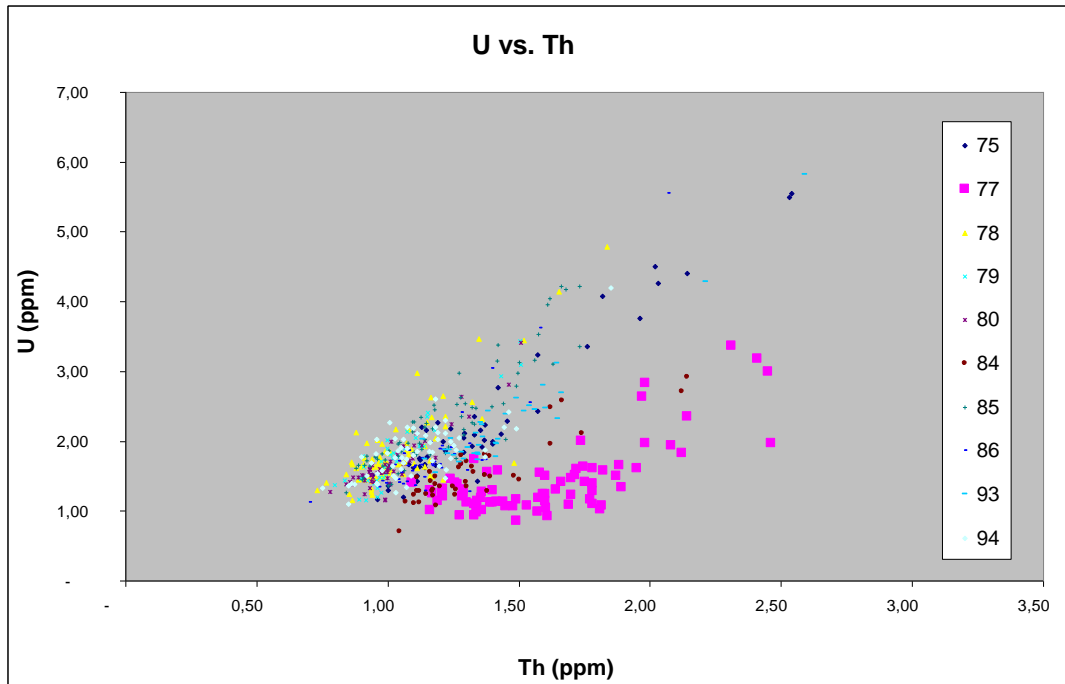


Figure 3.22 – Les apatites de l'échantillon 9275-77 montre, à des concentrations données en U, un léger enrichissement en Th par rapport aux résultats d'analyses des apatites des autres échantillons. Cette s'explique probablement par le fait que c'est le seul échantillon qui est parcouru par une veinule de pyrrhotite.

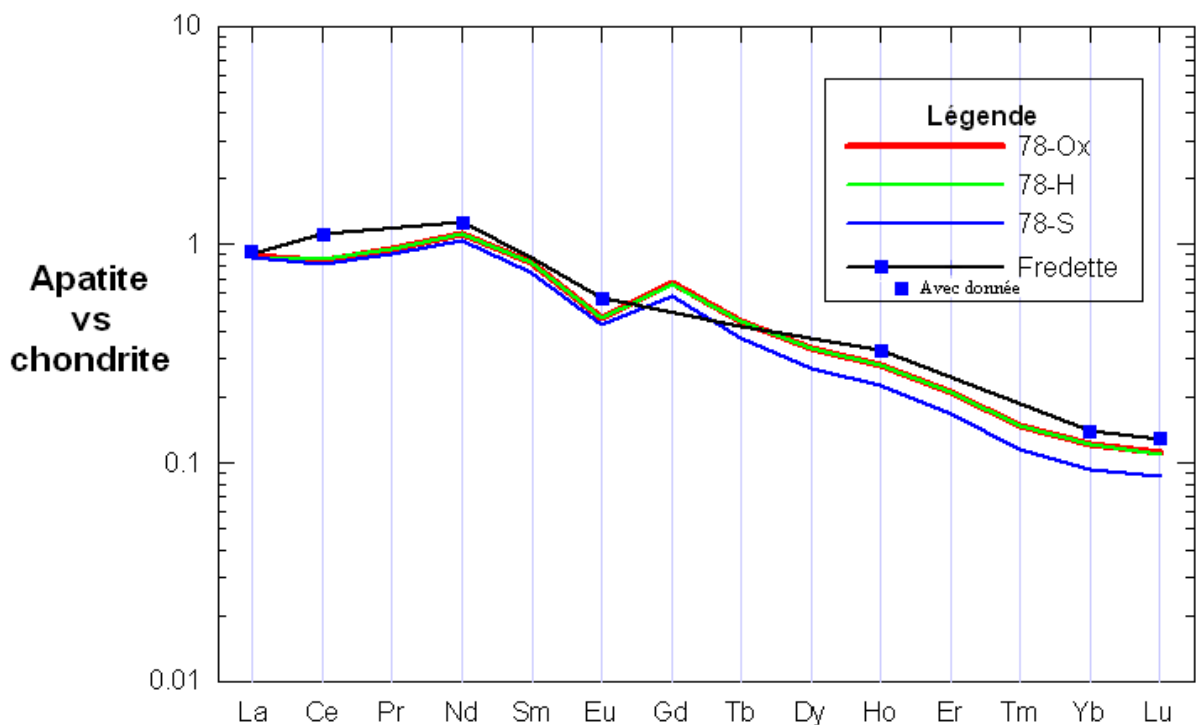


Figure 3.23 – Graphique multi-éléments des profils normalisés des REE permettant de voir les variations géochimiques des apatites de l'échantillon 9275-78 associées aux oxydes de fer et titane (Ox), aux hercynites (H) et aux silicates (S).

CHAPITRE 4 : CONCLUSIONS

Tout d'abord, ce Projet de Fin d'Études (PFE) avait pour but de vérifier la présence de différents types d'apatite dans les faciès nelsonitiques montrant les plus fortes concentrations en phosphore sur roche totale ($P_2O_5 \geq 12,75$ % poids) du gisement de P-Ti dans le secteur du Lac à Paul de la compagnie Les Ressources d'Arianne Inc (LRA). Comme le suggèrent les images spectrales (figure 1.1A) réalisées par le Core Mapper de la compagnie Photonic Knowledge. Pour tester l'hypothèse de divers types d'apatites, dix (10) lames minces polies ont été réalisées à partir de dix (10) échantillons provenant du forage PAU-08-07 de la compagnie LRA. Ces échantillons ont été sélectionnés de la façon suivante : huit (8) échantillons proviennent des faciès les plus enrichis en P_2O_5 (des concentrations atteignant 16,5 % poids de la roche totale), et deux (2) échantillons provenant des faciès montrant des concentrations typiques en P_2O_5 (6 à 9 % poids de la roche totale). L'étude a comporté plusieurs étapes : Descriptions pétrographiques, classification et nomenclature des échantillons, sélection des apatites et associations minéralogiques, caractérisation de la géochimie des apatites avec l'analyse des éléments majeurs et des éléments traces. Chacune de ces étapes sera synthétisée afin d'en souligner les contributions scientifiques du travail fait. De cette manière, la compréhension du gisement de P-Ti du secteur du Lac à Paul sera bonifiée.

4.1 - Description microscopique

Les échantillons ont été sélectionnés de la façon suivante : huit (8) échantillons (9275-77, 9275-78, 9275-79, 9275-80, 9275-84, 9275-85, 9275-86 et 9275-94) proviennent des faciès les plus enrichis en P_2O_5 , et deux (2) échantillons (9275-75 et 9275-93) proviennent des faciès montrant des concentrations typiques en P_2O_5 (6 à 9 % poids de la roche totale). Les faciès nelsonitiques contiennent les plus fortes concentrations en phosphore sur roche totale où le pourcentage poids en P_2O_5 est plus grand ou égal à 12,75 et atteint des valeurs jusqu'à 16,5 pour les analyses poids sur roche totale sur 1,5 mètre.

4.1.1 - Les tableaux

Les lames minces polies provenant des échantillons ont fait l'objet d'une étude pétrographique. De nombreuses descriptions microscopiques ont été faites (tableaux 3.5, 3.6 et 3.7), voici les caractéristiques générales :

Similitudes générales : Les textures coronitiques, les phénocristaux de plagioclases et d'olivines, la présence d'apatite peu à moyennement déformé, la granulométrie (diamètre moyen) des apatites à environ 0,6 mm.

Différences générales : La distribution hétérogène de la minéralogie et les zones à sous-grains de plusieurs échantillons. Les deux (2) à trois (3) différentes classes granulométriques souvent présentes dans le même échantillon.

Les particularités : La distribution granulométrique très homogène de la dunite (9275-75), ainsi que son absence de texture coronitique. La présence d'une veinule de sulfures dans l'échantillon 9275-77.

Pour tous les grains d'apatite, leur observation au microscope optique permet d'affirmer que tous les grains se ressemblent et qu'il n'est pas possible de dissocier différents types d'apatite.

4.1.2 - Les proportions modales et les classifications

De plus, l'élaboration d'un tableau minéralogique avec les concentrations de chacune des phases minéralogiques estimées visuellement (tableau 3.4) a permis de classer les roches dans le diagramme ternaire des roches intrusives mafiques avec les pôles pyroxène-olivine-plagioclase (figure 3.13), un diagramme ternaire des roches intrusives ultramafiques avec les pôles pyroxène-amphibole-olivine (figure 3.14) et finalement un diagramme ternaire spécialement approprié à l'étude ayant les pôles apatite-oxydes de fer et titane-silicates (figure 3.15). Voici quelques proportions modales et classifications générales :

Similitudes générales : Les huit (8) péridotites nelsonitiques sont toutes très riches en apatite par rapport aux oxydes de Fe-Ti (figure 3.15), mais elles sont plus riches en silicates.

Différences générales : Aucune différence générale visible sur les classifications.
Les particularités : La troctolite (9275-80) est particulièrement moins riche en olivine par rapport aux autres silicates. De plus, cet échantillon contient une proportion modale plus grande en plagioclase/olivine par rapport aux autres échantillons. La figure 3.14 montre que les lames 75 et 86 contiennent beaucoup d'olivine par rapport aux amphiboles et se nomment dunite au lieu de péridotite à hornblende. L'amphibolite (9275-93) est de loin la plus différente minéralogiquement et obtient son classement par son pourcentage élevé en amphibole (53%).

4.2 - La sélection des apatites et les associations minéralogiques

D'abord, trente (30) grains d'apatites par lames ont été sélectionnés sur dix (10) lames pour un total de 300 analyses géochimiques linéaires par LA-ICP-MS. Afin de sélectionner des grains ayant une susceptible variation géochimique, les apatites doivent être en contacts avec certains minéraux qui forment trois (3) groupes d'associations minéralogiques. Ces trois (3) groupes d'associations minéralogiques sont : les apatites associées aux oxydes de Fe-Ti, les apatites associées aux hercynites et les apatites associées aux silicates.

4.3 - La caractérisation géochimique des apatites

Ces lames minces polies ont fait l'objet d'une étude géochimique approfondie. Elles ont été soumises à une cartographie des éléments majeurs à la microfluorescence-X. Puis, il y a l'étude géochimique des éléments traces.

4.3.1 - Les éléments majeurs analysés à la microfluorescence-X

La cartographie du phosphore superposée à l'image d'une lame mince polie (figure 3.17) permet d'obtenir la distribution des apatites de cet échantillon. De plus, il n'y a pas de variation d'intensité de la couleur représentant le signal du phosphore, donc on peut supposer que la concentration en phosphore dans les apatites ne varie pas avec cette méthode. Toutefois, la microfluorescence-X ne doit pas être assez sensible pour détecter les faibles variations d'un élément majeur d'un échantillon.

4.3.2 - Les éléments traces analysés au LA-ICP-MS

Trente (30) éléments traces ont été analysés dans les 300 apatites (à raison de trente (30) apatites par lames) sélectionnées au cours de l'étude pétrographique. Ces analyses ont été obtenues suite à l'ablation au laser couplée à la spectrométrie de masse à émission de plasma (LA-ICP-MS). Ces données sur la géochimie des éléments traces ont servi à comparer la composition des apatites à l'aide de graphiques binaires par un logiciel (JMP) permettant de visualiser graphiquement et simultanément toutes les combinaisons possibles d'éléments chimiques (figure 3.19 et annexe électronique 6). Cela a permis de produire une matrice de graphiques binaires dans lesquels toutes nos analyses sont projetées.

Ces graphiques montrent clairement qu'il n'y a qu'un seul type d'apatite dans les roches à fortes concentrations de P_2O_5 ainsi que dans les roches montrant des concentrations en P_2O_5 plus typiques. Par contre, ces travaux ont également permis de montrer la présence d'apatites de compositions légèrement différentes pour certaines roches montrant des particularités. En effet, la partie silicatée de l'amphibolite à oxydes de Fe-Ti et à apatite (9275-93) est dominée par de

l'amphibole et quinze (15) apatites montrent un appauvrissement relatif en Terres Rares Lourdes par rapport au Terres Rares Légères (figure 3.20). L'autre échantillon montrant des apatites légèrement différentes est une mélatroctolite nelsonitique (9275-77) qui contient une veinule de sulfure. Cet échantillon contient des apatites montrant un léger enrichissement en thorium par rapport aux résultats d'analyses des apatites des autres échantillons (figure 3.22).

Le graphique multi-éléments des profils normalisés des REE indique que les apatites associées aux oxydes de Fe-Ti et que les apatites associées les hercynites ont la même composition géochimique, donc une même étape dans la phase de cristallisation. Le profil des apatites associées aux silicates suggèrent une géochimie légèrement différente. En effet, ces apatites ont un appauvrissement des MREE_{nc} (Moyen Rare Earth Elements) et des HREE_{nc} (Heavy Rare Earth Elements) par rapport aux apatites associées aux oxydes de Fe-Ti et des apatites associées aux hercynites (figure 3.23).

De plus, le graphique permet de comparer les valeurs en REE_{nc} des trois assemblages minéralogiques à la composition des apatites provenant des péridotites nelsonitiques de Julie Fredette (2006) provenant des zones Paul et Manouane dans le secteur du Lac à Paul. Bien que les analyses de Julie Fredette soit fait avec une autre méthode, c'est-à-dire par activation neutronique (INAA) sur des concentrées de grains d'apatites triés à la main, l'allure générale du profil est similaire à ceux de cette étude.

4.4 - Atteinte des objectifs de départ

En conclusion, cette étude a permis de constater qu'il n'y a qu'un seul type d'apatite dans l'échantillon typique (9275-75), dans l'amphibolite (9275-93), ainsi que dans les péridotites nelsonitiques du gisement de la compagnie LRA. De plus, selon les résultats d'éléments traces obtenus, les variations géochimiques entre les apatites des échantillons typiques du gisement et les apatites des roches provenant des faciès nelsonitiques ne montrent aucune différence majeure.

Cependant, des phénomènes observés localement au sein du gisement comme l'amphibolitisation (échantillon 9275-93), ou la concentration anormalement élevée en sulfure (échantillon 9275-77) semblent avoir eu une influence sur les concentrations de certains éléments chimiques contenus à l'état de trace dans les apatites de ces échantillons.

CHAPITRE 5 : RECOMMANDATIONS

Après avoir mené à terme ce projet, s'il était à recommencer, l'échantillonnage serait fait différemment. Voici les quelques modifications qu'il serait souhaitable d'apporter :

1) Il serait beaucoup plus facile et précis de vérifier des grains contenus dans des sections de carottes de forage préalablement passés au Core Mapper, puis analysés au LA-ICP-MS. Pour cela il faudrait faire une tranche de quelques millimètres d'épaisseur au centre d'une carotte de forage, puis de produire une image spectrale au Core Mapper. Suite à cette imagerie spectrale, des lames minces polies seraient sélectionnées et faites à partir de la tranche. De cette façon, les différents types d'apatites vus par le Core Mapper auraient pu être analysés facilement et très rapidement. Cette méthodologie provient d'un consensus au bureau de LRA, elle permettrait de vérifier plus efficacement l'hypothèse des divers types d'apatite plutôt que d'analyser un nombre considérable de grain et de chercher des anomalies dans une très grande base de données. Par contre, il a été bénéfique de posséder autant d'analyse d'apatite, elles ont apporté beaucoup de fiabilité aux résultats obtenus.

2) La quantité trop importante de données n'a pas permis de les exploiter pleinement. Les données des éléments traces dans les apatites auraient pu permettre d'émettre des hypothèses ou d'apporter des précisions sur celles déjà existantes sur la nature du magma parent, d'après les travaux de Julie Fredette (2006) et de Nadège Tollari (2007).

3) Finalement, je recommanderais de faire d'autres analyses d'éléments traces d'échantillons provenant de plusieurs autres emplacements sur le gisement de P-Ti dans le secteur du Lac à Paul dans le but de comparer les résultats obtenus et de traiter les données de manière à savoir s'il y a divers types d'apatites dans d'autres lithologies.

ANNEXES

Les annexes électroniques sont disponibles sur le disque compact situé à la page de garde au début du rapport.

Tables des matières des Annexes Électroniques

- Annexe 1 - Résultats d'analyses des carottes du forage Pau-08-07 pour les éléments P et Ti
- Annexe 2 - Cartographie des éléments majeurs à la microfluorescence-X
- Annexe 3 - Fichier Excel des résultats d'analyses des apatites à la LA-ICP-MS
- Annexe 4 - Travail préalable à la LA-ICP-MS
- Annexe 5 - Apatite numérotée correspondant aux résultats d'analyses de la LA-ICP-MS
- Annexe 6 - Matrice de corrélation binaire produite avec JMP

Il n'y a pas de manuel d'utilisation des Annexes Électroniques. Les images sont sous les formats «bitmap» et «Jpeg». Le fichier Excel des résultats d'analyses des apatites à la LA-ICP-MS contient pour chaque élément chimique la concentration (en ppm), la variabilité de l'analyse terminant par «Int2SE» (en ppm) située dans la colonne suivante et finalement, l'erreur relative terminant par «LOD» (en ppm) située dans les colonnes de la fin à l'extrême droite (CO à ED). Les annexes suivent le même format que le Projet de Fin d'Études.

RÉFÉRENCES

Simon et Hébert 1998. Modèle préliminaire sur l'origine, la mise en place et le potentiel économique des séquences différenciées associées à l'anorthosite du Lac-Saint-Jean. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, PRO-98-06.

Dymek et Owens 2001. Petrogenesis of apatite-rich rocks (nelsonites and oxide-apatite gabbroanorthosites) associated with massif anorthosites. *Economic Geology*, 96: 797-815.

Fredette 2006. Pétrographie, géochimie et potentiel économique en Fe-Ti-P du secteur du Lac à Paul, partie nord de la Suite Anorthositique du Lac-Saint-Jean, Province du Grenville, Québec, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 294 pp.

Hébert et Beaumier 1999. Géologie de la région de Chûtes-des-Passes (22E/14). Ministère des Ressources naturelles du Québec, carte annotée SI-22E14-C3G-99K, Québec.

Kolker 1982. Mineralogy and geochemistry of Fe-Ti oxide and apatite (nelsonite) deposits and evaluation of the liquid immiscibility hypothesis. *Economic Geology*, 77: 1146-1158.

Nabil 2003. Génèse des dépôts de Fe-Ti-P associés aux intrusions litées (exemples: l'intrusion mafique de Sept-Iles, au Québec; complexe de Duluth aux États-Unis). Thèse de Ph.D., Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, 441 pages.

Philpotts 1967. Origin of certain iron-titanium oxide and apatite rocks. *Economic Geology*, 62(3): 303-315.

Tollari 2007. Saturation des minéraux phosphates dans les magmas silicatés. Implications sur la genèse des roches riches en Fe-Ti-P. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, 236 pages.

Turcotte 2001. Mise en place de la portion nord-est de la Suite anorthositique du Lac-Saint-Jean durant un chevauchement grenvillien. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 204 pages.

Watson 1907. Mineral resources of Virginia. Virginia Jamestown Exposition Commission, J.P. Bell, Lynchburg, Virginie, 618 pages.

