



## **Chimie minérale d'échantillons des sous-provinces d'Opinaca et de La Grande (33G06, 33H08, 33H01)**

Antoine Rhéaume Ouellet et Carl Guilmette

MB 2016-15

**Avertissement**

Ce document est une copie fidèle du manuscrit soumis par l'auteur, sauf pour une vérification sommaire destinée à assurer une qualité convenable de diffusion.

# Chimie minérale d'échantillons des sous-provinces d'Opinaca et de La Grande (33G06, 33H08, 33H01)

Rapport préliminaire dans le cadre d'une étude tectono-métamorphique du contact entre les deux sous-provinces

Antoine Rhéaume Ouellet, B. Eng.  
Carl Guilmette, ing. jr., Ph. D.  
Université Laval

En collaboration avec le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

12 avril 2016

## Résumé

Une série d'analyses à la microsonde électronique a été effectuée sur 6 échantillons-clés du terrain d'étude situé au contact nord entre les sous-provinces d'Opinaca et La Grande dans la région d'Eeyou Istchee-Baie James. Deux échantillons de roches métasédimentaires de la Sous-province de La Grande et quatre de la Sous-province d'Opinaca sont concernés. D'autres roches métasédimentaires sont traitées plus brièvement, de même que quelques roches métavolcaniques. Les proportions molaires par unité de formule de minéral sont recalculées à partir des analyses en proportions massiques. Les feldspaths s'avèrent homogènes à l'intérieur de chaque échantillon. Les biotites sont classifiées et différentes populations sont parfois observables selon leur relation texturale. Celles-ci sont interprétées avoir cristallisées à différentes températures. Des cartographies élémentales (Ca, Mg, Fe, Mn) de même que des transects en oxydes majeurs ont également été réalisés sur deux grenats de chaque échantillon-clé. Les profils peu développés et les faibles zonations témoignent d'une équilibration à haute température et de faibles échanges rétrogrades subsolidus. Les amphiboles et pyroxènes ont également été analysés et classifiés selon leur formule minéralogique. Ils se sont avérés relativement homogènes et exempts de zonations. Ces données serviront dans le futur à procéder à des calculs thermobarométriques par *average PT*, à la reconstruction de la chimie de la lame mince par bilan de masse à l'aide des proportions modales, à la construction de pseudosections et à la qualification de l'évolution des conditions de pression et température à l'aide de ces pseudosections.

## Liste des abréviations et symboles

% : pourcent  
µm : micromètre = 10<sup>-6</sup> mètre  
Adr : andradite  
Alm : almandin  
An : anorthite  
a.p.f.u. : atome par unité de formule (*atom per formula unit*)  
BO : biotite  
CD : cordiérite  
FK : feldspath potassique  
Ga : milliard d'années  
GR : grenat  
Grs : grossulaire  
M4 : paragneiss  
M20 : métatexite  
M21 : diatexite  
M22 : migmatite  
MERN : ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles  
Mg# : nombre magnésium (*Mg number*) =  $100 * Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$   
MLA : *mineral liberation analyser*  
MV : muscovite  
*n* : nombre d'analyses  
NAD83 : système de référence géodésique nord-américain (*North American Datum 1983*)  
OX : orthopyroxène  
P : pression  
PG : plagioclase  
Prp : pyrope  
QZ : quartz  
*s* : écart-type de l'échantillon  
S3 : wacke  
SEM : microscope électronique à balayage (*scanning electron microscope*)  
SM : sillimanite  
SNERC : système national de référence cartographique  
Sps : spessartine  
T : température  
UTM : projection transverse universelle de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)  
Uvt : uvarovite  
X : proportion

# Table des matières

|  |     |
|--|-----|
| Résumé .....   | ii  |
| Liste des abréviations et symboles .....               | iii |
| Table des matières .....                               | iv  |
| Liste des figures .....                                | v   |
| Liste des tableaux .....                               | v   |
| Introduction .....                                     | 1   |
| Localisation de la zone d'étude et accessibilité ..... | 1   |
| Problématique et méthodologie .....                    | 2   |
| Travaux réalisés .....                                 | 2   |
| Géologie régionale .....                               | 3   |
| Chimie minérale .....                                  | 4   |
| Feldspaths .....                                       | 4   |
| Échantillons-clés .....                                | 4   |
| Autres roches métasédimentaires .....                  | 4   |
| Métavolcanites .....                                   | 5   |
| Biotites .....   | 5   |
| Échantillons-clés .....                                | 5   |
| Autres roches métasédimentaires .....                  | 6   |
| Métavolcanites .....                                   | 6   |
| Grenats .....  | 7   |
| Échantillons-clés .....                                | 7   |
| Métavolcanites .....                                   | 8   |
| Autres minéraux .....                                  | 9   |
| Amphiboles .....                                       | 9   |
| Pyroxènes .....  | 9   |
| Cordiérite .....                                       | 10  |
| Interprétations .....                                  | 10  |
| Travaux futurs .....                                   | 11  |
| Conclusions .....                                      | 12  |
| Références .....                                       | 13  |
| Annexes : Figures et tableaux .....                    | 14  |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Carte des sous-provinces du Supérieur de la région d'Eeyou Istchee Baie-James.....   | 14 |
| Figure 2 : Carte de localisation des échantillons-clés .....  | 14 |
| Figure 3 : Analyses de feldspaths des échantillons-clés sur diagrammes ternaires .....  | 16 |
| Figure 4 : Analyses de feldspaths d'autres échantillons sur diagrammes ternaires .....  | 17 |
| Figure 5 : Biotites des échantillons-clés; Al en fonction de $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ .....  | 18 |
| Figure 6 : Biotites des échantillons-clés; Ti en fonction de $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ .....  | 19 |
| Figure 7 : Biotites de roches métasédimentaires; Al et Ti en fonction de $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ .....                              | 20 |
| Figure 8 : Biotites de roches métavolcaniques; Al et Ti en fonction de $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ .....                                | 20 |
| Figure 9 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 12-AK-4046-A2.....  | 21 |
| Figure 10 : Transects en éléments majeurs des grenats de 12-AK-4046-A2 .....  | 21 |
| Figure 11 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 14-AR-4077-A1 .....  | 22 |
| Figure 12 : Transects en éléments majeurs des grenats 14-AR-4077-A1 .....   | 22 |
| Figure 13 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 12-JG-2060-A1 .....  | 23 |
| Figure 14 : Transects en éléments majeurs des grenats 14-JG-2060-A1. ....   | 23 |
| Figure 15 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 00-MC-5003-A1 .....  | 24 |
| Figure 16 : Transects en éléments majeurs des grenats 00-MC-5003-A1. ....   | 24 |
| Figure 17 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 15-AR-4080-A1 .....  | 25 |
| Figure 18 : Transects en éléments majeurs des grenats 15-AR-4080-A1 .....   | 25 |
| Figure 19 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats de 15-HH-2100-A1 .....  | 26 |
| Figure 20 : Transects en éléments majeurs des grenats 15-HH-2100-A1 .....   | 26 |
| Figure 21 : Diagramme de nomenclature des amphiboles calciques (a) 13-JG-1365-B, n = 11; (b) 14-AR-4123-A.....                          | 27 |
| Figure 22 : Diagramme de nomenclature des amphiboles (a) calciques de 14-JG-2072-A1; (b) Mg-Fe-Mn de 13-JG-1365-B et 14-AR-4123-A ..... | 28 |
| Figure 23 : Analyses des pyroxènes sur diagrammes ternaires wollastonite-enstatite-ferrosilite..  | 29 |
| Figure 24 : Pyroxènes de 15-HH-2100-A; Al en fonction de $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ .....  | 29 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Localisation et présentation sommaire des lithologies des échantillons-clés ..... | 2  |
| Tableau 2 : Composition moyenne des plagioclases des échantillons-clés .....                  | 4  |
| Tableau 3 : Composition au cœur des grenats des échantillons-clés .....                       | 7  |
| Tableau 4 : Composition au cœur des grenats des métavolcanites .....                          | 8  |
| Tableau 5 : Proportions modales des minéraux des échantillons-clés par SEM-MLA.....           | 30 |
| Tableau 6 : Analyses de plagioclases des échantillons-clés.....                               | 31 |
| Tableau 7 : Analyses de feldspaths potassiques des échantillons-clés.....                     | 31 |
| Tableau 8 : Analyses de biotites des échantillons-clés .....                                  | 31 |
| Tableau 9 : Analyses de cœurs de grenats des échantillons-clés .....                          | 32 |
| Tableau 10 : Analyses des différents types d'amphiboles .....                                 | 32 |
| Tableau 11 : Analyses des cordiérites de 00-MC-5003-A .....                                   | 32 |

## **Introduction**

Dans le cadre d'un projet de maîtrise concernant le contexte métamorphique et tectonique dans les sous-provinces d'Opinaca et La Grande, une étude sur la chimie minérale d'une variété d'échantillons du terrain d'étude a été effectuée au printemps et à l'automne 2015. Cette étude avait pour objectif principal de quantifier la composition des phases minérales au sein d'un échantillon, d'en étudier la variation au sein d'une même lame et d'un échantillon à l'autre. Ces données serviront lors de l'interprétation de processus métamorphiques et de calculs et modélisations en thermobarométrie.

Le présent rapport couvre plus en détails la chimie minérale de six échantillons de protolithes sédimentaires (psammitiques à pélitiques) dont les résultats serviront pour les calculs thermobarométriques. Les résultats présentés couvrent les plagioclases, biotites, grenats et autres minéraux alumineux (cordiérite et staurotide) et mafiques (pyroxènes et amphiboles) lorsque présents. Une variété d'échantillons de protolithes similaires ont également été analysés et sont plus sommairement présentés. Quelques échantillons de protolithes volcaniques montrant un certain intérêt, soit par leur localisation ou assemblage minéralogique, sont également présentés.

## **Localisation de la zone d'étude et accessibilité**

La région à l'étude est localisée au sud de la Grande Rivière, dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James, dans le Moyen-Nord québécois, entre les 53<sup>e</sup> et 54<sup>e</sup> parallèles Nord (figures 1 et 2). Les travaux se concentrent de part et d'autre de la portion nord du contact entre les sous-provinces d'Opinaca et de La Grande.

Deux régions principales ont été étudiées. La première région, celle du poste Le Moyne, est localisée dans le feuillet SNRC 33G06, au sud du réservoir La Grande 3. La majorité des affleurements visités sont facilement accessibles via la route Transtaïga et le chemin du poste Le Moyne, accessible depuis la Transtaïga au kilomètre 186. La seconde région, celle des lacs Joubert et Dalmas, est localisée dans les feuillets 33H01, 33H08 et 33H09, au sud-est du réservoir La Grande 4. Les affleurements étudiés dans cette région se situent sur le territoire couvert par les travaux de cartographie du MERN des étés 2014 et 2015. La région n'est desservie par aucune route et a conséquemment été accédée par hélicoptère depuis la pourvoirie Mirage, située au kilomètre 358 de la route Transtaïga et depuis la Camp 594 situé au kilomètre 594 de la route 167.



## Problématique et méthodologie

La problématique du projet de maîtrise motivant l'étude minéralogique ici présentée est la qualification des processus métamorphiques et les calculs et modélisations thermobarométriques. Pour ce faire, il s'agit donc d'identifier précisément la composition des phases minérales, d'en vérifier l'homogénéité au sein d'un échantillon, d'en identifier différentes population et d'investiguer les zonations au sein de certains minéraux.

Pour ce faire, des séries d'analyses ont été réalisées à la microsonde électronique, modèle CAMECA SX-100, par Marc Choquette dans les laboratoires du département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.

## Travaux réalisés

Les échantillons-clés (12-AK-4046-A, 14-AR-4077-A, 14-JG-2060-A, 00-MC-5003-A, 15-AR-4080-A et 15-HH-2100-A) sont localisés à la figure 2 et présentés sommairement au tableau 1. Les proportions modales des minéraux telles qu'évaluées par SEM-MLA à *Memorial University* à Saint-John's (Terre-Neuve) sont présentées en annexe au tableau 5. Pour chacun de ces échantillons, les feldspaths, biotites et grenats de même que les cordiérites, amphiboles et pyroxènes lorsque présents, ont été analysés ponctuellement pour leur composition en éléments majeurs. Les différentes occurrences texturales (matrice, inclusion, couronne d'un autre minéral, etc.) et les zonations ont été analysées. Pour chacun de ces échantillons, deux grenats ont reçu un traitement plus extensif, soit une cartographie relative en différents éléments (Fe, Mn, Ca et Mg) ainsi que des transects de trente points passant par le cœur.

Tableau 1 : Localisation et présentation sommaire des lithologies des échantillons-clés (minéraux + PG, QZ, BO, GR).

|                      | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Estant*</b>       | 616 671      | 697 628      | 499 377      | 499 064      | 697 841      | 686 091      |
| <b>Nordant*</b>      | 5 958 701    | 5 906 421    | 5 906 616    | 5 918 396    | 5 885 272    | 5 882 376    |
| <b>Sous-province</b> | La Grande    | La Grande    | Opinaca      | Opinaca      | Opinaca      | Opinaca      |
| <b>Région</b>        | -            | Dalmas       | Le Moyne     | Le Moyne     | Le Moyne     | Le Moyne     |
| <b>Lithologie</b>    | M4 (S3)      | M4 (S3)      | M20 (M4)     | M20 (M4)     | M21 (M4)     | M4 (M22)     |
| <b>Minéraux</b>      | MV, SM       | -            | -            | MV, CD       | -            | OX, FK       |

\*UTM, NAD83

Pour les autres échantillons, un nombre représentatif de chacune des phases minérales citées précédemment a été analysé, mais aucune cartographie ou transect extensif n'a été effectué.

## Géologie régionale

La Sous-province de La Grande est un ensemble volcano-plutonique archéen de la Province du Supérieur. Elle est formée majoritairement d'un socle tonalitique ancien (3,45 à 2,75 Ga), comprenant le Complexe de Langelier, sur lequel se sont développées, dès 2,88 Ga, des séquences volcano-sédimentaires injectées d'une variété d'intrusions ultramafiques à felsiques (Goutier *et al.*, 2002). Plusieurs séries de dykes mafiques néoarchéens à paléoproterozoïques coupent les séquences archéennes, dont l'essai de dykes de Mistassini. La région est caractérisée par un grain structural E-O à NE-SO et un agencement en dômes et bassins composé de grands plis serrés. Les conditions métamorphiques du La Grande varient du faciès des schistes verts à l'ouest à celui des granulites à l'est, mais le faciès des amphibolites est relativement généralisé.

La Sous-province d'Opinaca représente un grand bassin sédimentaire clastique néoarchéen déposé en marge du La Grande postérieurement à 2,67 Ga (Goutier *et al.*, 2002). Elle est dominée par les méta-wackes et quelques bandes mineures de composition pélitique coupés par diverses intrusions tonalitiques, granitiques, monzonitiques et ultramafiques syn- à tarditectoniques. Cette sous-province, dans son ensemble, est distinctement plus jeune que la Sous-province de La Grande, et cette dernière pourrait en représenter le socle (Goutier *et al.*, 2002). Le style structural de l'Opinaca est composé de dômes et bassins ovoïdes (Bandyayera *et al.*, 2010) et de séries de synformes et d'antiformes plongeant vers l'est (Goutier *et al.*, en préparation). Le gradient métamorphique radial varie du faciès des amphibolites inférieures en bordure dans l'est de la sous-province jusqu'aux granulites au cœur du bassin. L'atteinte des conditions d'anatexie est généralisée. Le degré élevé du métamorphisme régional dans cette sous-province y implique une forte recristallisation et l'oblitération complète très fréquente des textures et structures primaires.

Le contact entre les deux sous-provinces est majoritairement de nature tectonique et associé à un couloir de déformation intense fréquemment injecté et recoupé d'intrusions felsiques à intermédiaires syn- à tarditectoniques. La nature des mouvements tectoniques et la chronologie des événements ne sont pas complètement contraintes par l'état actuel des connaissances. Les conditions métamorphiques augmentent du nord vers le sud, ce qui semble *a priori* difficilement compatible avec la position lithostratigraphique supérieure de l'Opinaca.

# Chimie minérale

## *Feldspaths*

### Échantillons-clés

Entre 5 et 16 feldspaths par échantillon ont été analysés. Les résultats sont reportés dans un diagramme ternaire orthose( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )-albite( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )-anorthite( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) à la figure 3. Les valeurs moyennes des plagioclases sont présentées au tableau 2 et se trouvent dans la région entre oligoclase et andésine. Une analyse représentative de plagioclase et de feldspath potassique par échantillon est présentée en annexe aux tableaux 6 et 7.

Tableau 2 : Composition moyenne des plagioclases des échantillons-clés et étalement de la distribution.

|                  | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\overline{XAn}$ | 25,33        | 30,23        | 28,64        | 28,00        | 32,43        | 28,81        |
| $s$              | 0,42         | 1,03         | 0,46         | 0,80         | 0,39         | 0,41         |
| $n$              | 8            | 5            | 16           | 9            | 8            | 16           |

$\overline{XAn}$  : moyenne de la composante anorthite des feldspaths

$s$  : écart-type de l'échantillon

$n$  : nombre d'analyses de plagioclases

Les populations au sein d'un même échantillon sont homogènes autour d'une seule population, sauf dans les cas où du feldspath potassique est présent (14-JG-2060-A et 15-HH-2100-A), où les populations sont bimodales. La localisation de l'analyse n'a pas d'influence mesurable sur la composition des feldspaths : aucune zonation n'est mesurée, ni variabilité au sein d'une lame. La grande majorité des individus se trouve à l'intérieur d'un écart-type de la moyenne. Même d'un échantillon à l'autre, la variété en composition des plagioclases est faible. La composition en anorthite varie de 25,33 % pour 12-AK-4046-A à 32,43 % pour 15-AR-4080-A. Les feldspaths potassiques quant à eux ont une composition moyenne de 91,77 % et 91,95 % orthose pour 14-JG-2060-A et 15-HH-2100-A respectivement.

### Autres roches métasédimentaires

Les feldspaths de l'ensemble des roches métasédimentaires analysées sont présentés dans un diagramme ternaire orthose-albite-anorthite à la figure 4a. Les plagioclases ont tous une composition relativement sodique pour une valeur  $\overline{XAn}$  variant de 15,6 à 39,0 %. Les plagioclases de l'Opinaca ont une composition homogène oscillant autour d' $An_{30}$  (frontière oligoclase-andésine) dans les deux régions à l'étude. Aucun autre feldspath potassique autre que dans les échantillons-clés n'a été rencontré dans des échantillons de l'Opinaca récoltés dans le cadre de cette étude. Ceci ne signifie pas pour autant qu'il est complètement absent puisque son occurrence

peut être faible (< 1 %) et que ces échantillons ont été investigués moins systématiquement. Les plagioclases des échantillons du La Grande couvrent une plus grande plage compositionnelle (15,6 à 39,0 %), mais avec une moyenne comparable à ceux du La Grande, avec une valeur moyenne d'environ An<sub>30</sub>. Des feldspaths alcalins sont analysés dans un échantillon du La Grande, 14-PB-1276-A.

### **Métavolcanites**

Les feldspaths de l'ensemble des métavolcanites analysées sont présentés dans un diagramme ternaire orthose-albite-anorthite en annexe à la figure 4b. Les plagioclases étudiés ont une composition relativement sodique. Les feldspaths de 14-AR-4153-A (métavolcanite felsique) ont une composition d'andésine. Les analyses sur 14-JG-2072-B (métavolcanite mafique) donnent des résultats semblables mais un seul des neuf feldspaths analysés s'éloigne de la population principale avec une composition d'oligoclase. Aucune caractéristique texturale particulière ne le distingue des autres. Les feldspaths de la matrice de 13-JG-1365-B (métavolcanite mafique) sont de l'albite. Leur population est très homogène avec une composition moyenne de 7 % anorthite. Une seconde population, en inclusion dans les amphiboles calciques, a une composition d'anorthoclase (25 % orthose).

### *Biotites*

### **Échantillons-clés**

Une analyse représentative de biotite par échantillon-clé est présentée en annexe au tableau 8. L'ensemble des analyses est reporté dans un diagramme d'Al en fonction de  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  à des fins de nomenclature à la figure 5. Les valeurs d'Al, Mg et Fe en atomes par unité de formule (*atom per formula unit*, a.p.f.u.) de la biotite sont calculées sur 22 atomes d'oxygène avec le LiO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O calculés selon Tindle et Webb (1990). Les biotites de 12-AK-4046-A forment une population homogène dans le champ de la sidérophyllite (37,8 < Mg# < 41,2). Celles de 14-AR-4077-A forment une population homogène dans le champ de l'eastonite, à frontière avec la sidérophyllite (51,1 < Mg# < 53,8), autant en couronne que dans la matrice. Les biotites de 14-JG-2060-A montrent trois populations distinctes progressivement plus magnésiennes pour la matrice (58,9 < Mg# < 61,5), la couronne (60,8 < Mg# < 64,4) et les inclusions (71,3 < Mg# < 72,2). Toutes se trouvent dans le champ de l'eastonite. Les biotites de 00-MC-5003-A, de l'eastonite, montrent une population principale regroupant matrice et couronne (Mg# = 50), ainsi que des biotites en inclusion dans les grenats dont le contenu en magnésium varie jusqu'à Mg# = 76,3. Les analyses

de 15-AR-4080-A montrent également une seule population de biotites dont seulement quelques unes en inclusion s'éloignent de la moyenne. Les biotites de 15-HH-2100-A ne forment qu'une population, mais plus étendue que les autres échantillons, sans association avec leur relation texturale (en couronne d'un autre minéral ou dans la matrice). Il s'agit de phlogopite ( $56,6 < \text{Mg\#} < 61,5$ ).

Des diagrammes de Ti en fonction du Mg# sont présentés à la figure 6 afin d'illustrer la substitution du H<sub>2</sub>O par le TiO<sub>2</sub> à haute température. Aucune population n'est discernable entre les biotites de matrice et celles en couronne de grenat au sein des échantillons 12-AK-4046-A et 14-AR-4077-A. L'échantillon 14-JG-2060-A montre encore une fois trois populations distinctes, liées à l'expression texturale des biotites. Les biotites en matrice, en couronne de grenat et en inclusion dans le grenat sont progressivement plus riches en Mg et moins riches en Ti. Pour les échantillons 00-MC-5003-A et 15-AR-4080-A, les données de matrice et de couronne ne sont pas distinguables, alors que celles en inclusion s'éloignent sensiblement du mode principal et montrent un plus grand étalement en Ti. Finalement 15-HH-2100-A montre un certain étalement dans les analyses, avec les données de biotite en couronne généralement plus faibles en Ti.

### **Autres roches métasédimentaires**

Les mêmes diagrammes d'Al et Ti en fonction du Mg# pour l'ensemble des roches métasédimentaires analysées sont présentés aux figures 7a et b. Bien que l'étalement des données soit considérable, les analyses dans l'Opinaca et le La Grande délimitent deux champs distincts dans chacun des diagrammes. Les biotites de l'Opinaca tendent à être plus magnésiennes, mais surtout moins riches en Al et plus riches en Ti que celles du La Grande.

### **Métavolcanites**

Trois échantillons métavolcaniques échantillonnés possédaient de la biotite, soit 13-JG-1365-B (1 à 2 %), 14-AR-4153-A (jusqu'à 5%) et 14-JG-2034-B (20%). Les diagrammes d'Al et Ti en fonction du Mg# sont à la figure 8. Les biotites de 13-JG-1365-B ont une composition d'annite à la frontière avec la sidérophyllite, pour un Mg# moyen de 40,2, les biotites de 14-AR-4153-A ont une composition d'eastonite, pour un Mg# moyen de 58,1 et les biotites de 14-JG-2034-B ont une composition de sidérophyllite pour un Mg# moyen de 34,1. 13-JG-1365-B possède les biotites les plus riches en Ti, suivi de 14-JG-2034-B et finalement 14-AR-4153-A. Les biotites de protolithes intermédiaires à mafiques (13-JG-1365-B et 14-JG-2034-B) ont des compositions sensiblement

plus ferrifères que ceux de protolithes métasédimentaires et des contenus en Ti plus élevés que la plupart des autres échantillons du La Grande. Celles de protolithe felsique (14-AR-4153-A) se confondent assez bien en tous points à celles des roches métasédimentaires du La Grande.

## *Grenats*

### **Échantillons-clés**

Deux grenats par échantillon-clé ont été analysés en profondeur. Leur composition en termes de proportion des principaux pôles est présentée au tableau 3. Les formules et les proportions des pôles sont recalculés sur 12 O et le rapport  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  est calculé en supposant l'occupation totale des sites. Les analyses brutes des cœurs de grenats sont présentées en annexe au tableau 9.

Tableau 3 : Composition au cœur des grenats des échantillons-clés en termes de principaux pôles compositionnels.

|            | 12-AK-<br>4046-A-<br>1 | 12-AK-<br>4046-A-<br>2 | 14-AR-<br>4077-A-<br>1 | 14-AR-<br>4077-A-<br>2 | 14-JG-<br>2060-A-<br>1 | 14-JG-<br>2060-A-<br>2 | 00-MC-<br>5003-A-<br>1 | 00-MC-<br>5003-A-<br>2 | 15-AR-<br>4080-A-<br>1 | 15-AR-<br>4080-A-<br>2 | 15-HH-<br>2100-A-<br>1 | 15-HH-<br>2100-A-<br>2 |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Alm</b> | 77,07                  | 78,02                  | 69,01                  | 68,68                  | 68,00                  | 68,45                  | 65,29                  | 65,28                  | 71,82                  | 71,67                  | 66,52                  | 65,35                  |
| <b>Prp</b> | 12,55                  | 11,09                  | 14,33                  | 14,21                  | 25,97                  | 25,73                  | 28,31                  | 28,26                  | 15,13                  | 14,76                  | 27,01                  | 28,06                  |
| <b>Grs</b> | 3,25                   | 3,18                   | 5,16                   | 5,30                   | 3,12                   | 3,04                   | 3,90                   | 3,65                   | 6,99                   | 7,78                   | 3,43                   | 3,42                   |
| <b>Sps</b> | 7,01                   | 7,69                   | 11,43                  | 11,76                  | 2,89                   | 2,75                   | 2,46                   | 2,77                   | 6,01                   | 5,74                   | 3,02                   | 3,12                   |
| <b>Uvt</b> | 0,01                   | 0,01                   | 0,01                   | 0,01                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   | 0,00                   |
| <b>Adr</b> | 0,10                   | 0,01                   | 0,05                   | 0,03                   | 0,02                   | 0,02                   | 0,04                   | 0,04                   | 0,04                   | 0,04                   | 0,01                   | 0,04                   |

Alm (almandin) =  $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ ; Prp (pyrope) =  $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ ; Grs (grossulaire) =  $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ ; Sps (spessartine) =  $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ ; Uvt (uvarovite) =  $Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$ ; Adr (andradite) =  $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ .

Les grenats sont tous à dominance almandine (65,28 à 78,02 %). Les proportions en uvarovite et andradite sont négligeables. Deux groupes se démarquent, soit les grenats à forte composante magnésienne (pyrope 25,73 à 28,31 %) auxquels correspondent également de faibles proportions en grossulaire (3,04 à 3,90 %) et spessartine (2,46 à 3,12 %) et ceux à faible composante magnésienne (pyrope 11,09 à 15,13 %), correspondant à de plus fortes proportions en grossulaire (3,18 à 7,78 %) et spessartine (5,74 à 11,76 %). Aucune association avec le degré de métamorphisme ou la localisation géographique n'est observée.

Les cartographies relatives en éléments majeurs (Fe, Mn, Ca, Mg) sur ces mêmes grenats sont présentées aux figures 9, 11, 13, 15, 17 et 19. Les échelles relatives au sein de l'image ont été optimisées pour faire ressortir les zonations des grenats. Ces figures montrent également la localisation des transects A-A' des figures 10, 12, 14, 16, 18 et 20. Pour chacun des grenats, les zonations sont peu marquées et simples. Les deux échantillons de la Sous-province de La Grande possèdent des patrons plats en calcium et montrant de légers enrichissement en Fe par rapport au Mg et en Mn à proximité des bordures. L'échantillon 14-JG-2060-A montre des patrons similaires

à l'exception que les profils de Mn (XSpessartine) sont plats. Les grenats de 00-MC-5003-A ont un profil en calcium en cloche, avec une valeur maximale au cœur diminuant vers les bordures. Les bordures montrent un enrichissement en Fe par rapport au Mg dont le rayon d'influence est un peu plus important que pour les autres grenats. L'échantillon 15-AR-4080-A montre des profils peu zonés par rapport à la taille des grains. Les bordures y sont légèrement enrichies en Ca, Fe et Mn. Les cartographies des grenats de 15-HH-2100-A montrent des grenats très homogènes. Les profils aplatis permettent toutefois d'identifier une légère zonation en cuvette pour le Ca.

L'ensemble des grenats montre un enrichissement en Fe/Mg en bordure. Ceux-ci sont particulièrement marqués lorsque le grenat est en contact avec la biotite, tels qu'observable sur les cartes en Mg. Les profils montrent une légère concentration du Mn en bordure et un plateau à l'intérieur des grains pour la quasi-totalité des échantillons. Les grenats de 15-HH-2100-A sont les seuls à encore exhiber des faces cristallines et cette zonation en manganèse est absente, les profils étant entièrement plats.

### **Métavolcanites**

Quatre échantillons de protolithes volcaniques contenant des grenats ont été analysés. Il s'agit de 13-JG-1365-B (mafique), 14-AR-4153-A (felsique), 14-JG-2034-B (intermédiaire) et 14-JG-2072-B (mafique). La composition du cœur des grenats analysés est présentée au tableau 4 en fonction des principaux pôles compositionnels.

Tableau 4 : Composition au cœur des grenats des métavolcanites en termes de principaux pôles compositionnels.

|            | 13-JG-1365-<br>B-1 | 13-JG-1365-<br>B-2 | 14-AR-4153-<br>A-1 | 14-AR-4153-<br>A-2 | 14-JG-2034-<br>B-1 | 14-JG-2034-<br>B-2 | 14-JG-2072-<br>B-1 |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Alm</b> | 66,56              | 66,10              | 67,33              | 67,38              | 75,39              | 71,77              | 72,32              |
| <b>Prp</b> | 13,33              | 14,56              | 17,91              | 18,06              | 8,16               | 7,52               | 11,01              |
| <b>Grs</b> | 13,77              | 14,11              | 5,70               | 5,75               | 9,60               | 14,46              | 10,27              |
| <b>Sps</b> | 6,20               | 5,07               | 8,85               | 8,78               | 6,83               | 6,09               | 6,27               |
| <b>Uvt</b> | 0,01               | 0,04               | 0,00               | 0,00               | 0,00               | 0,01               | 0,00               |
| <b>Adr</b> | 0,10               | 0,13               | 0,20               | 0,03               | 0,00               | 0,11               | 0,13               |

Alm (almandin) =  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ; Prp (pyrope) =  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ; Grs (grossulaire) =  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ; Sps (spessartine) =  $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ; Uvt (uvarovite) =  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ; Adr (andradite) =  $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ .

Les grenats sont almandins (66,10 à 75,39 %) et possèdent une composante spessartine non-négligeable (> 5 %). Les compositions en uvarovite et andradite sont presque nulles.

### **Amphiboles**

Trois échantillons sélectionnés montrent des assemblages à amphiboles. Il s'agit de 13-JG-1365-B, une métavolcanite mafique à deux types d'amphiboles répartis dans la matrice, de 14-AR-4123-A, une migmatite à porphyroblastes composés d'une couronne d'amphiboles vertes (groupe 4123-I) et d'un cœur d'amphiboles incolores (groupe 4123-II) et, et de 14-JG-2072-B, une métavolcanite mafique à hornblende. Une analyse représentative de chaque type d'amphibole est présentée en annexe au tableau 10. Les proportions molaires des atomes par formule ont été calculées sur 23 O avec une estimation du  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  en assumant une somme de 13 cations sauf pour le cas des amphiboles Fe-Mg-Mn où 15 cations sont considérés. La distinction entre ortho- et clino-amphiboles est basée sur des considérations optiques. La classification finale provient de Leake *et al.* (1997).

Les amphiboles calciques vertes formant l'essentiel de la matrice de 13-JG-1365-B (groupe 1365-I) et la couronne des minéraux péritectiques de 14-AR-4123-A sont de la magnésio-hornblende (voir figure 21 en annexe). En ce qui a trait à celles formant l'essentiel de 14-JG-2072-B (figure 22a), les valeurs sont plus étendues, variant des hornblendes aux tschermakites, à frontière entre les préfixes magnésio et ferro ( $Mg\# = 50$ ). L'essentiel des cristaux de matrice fait partie des hornblendes tschermakitiques.

Les amphiboles incolores formant la moindre partie de la matrice de 13-JG-1365-B (groupe 1365-II) et le cœur des porphyroblastes péritectiques de 14-AR-4123-A sont des amphiboles ferro-magnésiennes (figure 22b). Les amphiboles de 13-JG-1365-B sont des ortho-amphiboles de composition égale en Fe et Mg, soit à la frontière entre la cummingtonite et la grunérite. Celles de 14-AR-4123-A forment un mélange d'amphiboles orthorhombiques et monocliniques, soit de l'anthophyllite et de la cummingtonite.

### **Pyroxènes**

Deux échantillons ont été analysés pour les pyroxènes, soit 15-HH-2100-A et 14-JG-2059-D, deux roches métasédimentaires montrant des évidences de fusion partielle et possédant des orthopyroxènes dans leur matrice. Les analyses ont été classées à l'aide d'un diagramme ternaire wollastonite ( $CaSiO_3$ ) - enstatite ( $MgSiO_3$ ) - ferrosilite ( $FeSiO_3$ ) présenté à la figure 23. Les orthopyroxènes de 14-JG-2059-D sont à la frontière entre l'enstatite et la ferrosilite ( $Mg\# = 50$ ) et



ceux de 15-HH-2100-A sont légèrement plus près du pôle magnésien ( $Mg\# = 55$ ). Les populations forment une population homogène.

Un diagramme d'Al en fonction du rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  pour 15-HH-2100-A (figure 24) permet non seulement de voir plus en détail la faible variabilité d'une analyse à l'autre mais aussi l'absence de variation au sein d'un même cristal. En effet, les analyses de cœur et de bordure d'orthopyroxène ne montrent pas deux populations distinctes.

### **Cordiérite**

Un seul échantillon choisi possédait de la cordiérite, la migmatite 00-MC-5003-A. Des valeurs représentatives d'analyse sont présentées en annexe au tableau 11. À noter que les analyses ne bouclent pas puisque l'eau structurale n'a pas été mesurée. Les cordiérites sont magnésiennes, la valeur moyenne du rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  étant de 77,2 %.

### **Interprétations**

Les analyses de biotites de 12-AK-4046-A et 14-AR-4077-A ne montrent qu'une seule population. Ceci pointe vers l'absence d'un événement rétrograde important qui aurait favorisé les échanges Fe-Mg entre la biotite et le grenat. L'échantillon 14-JG-2060-A possède trois populations distinctes (matrice, couronne et inclusions), progressivement plus ferrifères et moins riches en Ti. Ceci pointe vers trois événements de cristallisation/rééquilibrage des biotites. Puisque le  $TiO_2$  se substitue à l' $H_2O$  de manière plus efficace et que la biotite favorise le Fe par rapport au Mg dans ses échanges avec le grenat (Ferry et Spear, 1978), il est conclu que les biotites en inclusion sont des biotites de bas grade encapsulées dans le grenat lors de sa croissance prograde, que les biotites de la matrice sont celles ayant enregistré la plus haute température et que celles en couronne ont des compositions intermédiaires liées aux échanges subsolidus rétrogrades plus tardifs entre la biotite et le grenat. Par ailleurs, de nombreuses biotites en inclusion ont des comportements s'éloignant des tendances. Il s'agit de celles qui sont en contact direct avec le grenat; elles ont donc évolué en système fermé et ne peuvent être comparées aux autres. En ce qui a trait aux biotites de 15-HH-2100-A, leur plus grande variabilité ainsi que la présence d'une seule population pointe vers une cristallisation rapide d'une grande quantité de biotite.

Pour chacun des grenats, les zonations sont peu marquées et simples, suggérant que les profils de croissance primaires ont été homogénéisés à haute température et pour des périodes de temps

considérables (Caddick *et al.*, 2010). Les grenats de 00-MC-5003-A ont un profil en Ca en cloche aplatie, avec une valeur maximale au cœur diminuant vers les bordures. Il s'agit d'un profil de croissance prograde normal peu marqué, suggérant que l'homogénéisation à haute température n'a pas été complète. Une légère zonation en cuvette en Ca pour les échantillons 15-HH-2100-A et 15-AR-4080-A est également observable, soit l'inverse d'un profil de croissance prograde normal. Pour l'ensemble des grenats, de faibles enrichissements en  $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$  sont observables. Ceux-ci sont interprétés comme des échanges rétrogrades avec la biotite, les échanges grenats-biotites favorisant la partition du Fe dans le grenat avec la décroissance de la température (Ferry et Spear, 1978). Un enrichissement en Mn en bordure de grain est également commun. Le manganèse étant fortement fractionné dans le grenat lors du début de sa cristallisation, ces observations sont compatibles avec une homogénéisation à haute température et une résorption partielle des bordures lors du parcours rétrograde.

L'ensemble de ces observations porte à croire que les grenats ont été homogénéisés à haute température puis légèrement rétrogradés; les échanges rétrogrades en Mn, Mg et Fe signifient que le cœur des grains est plus représentatif des conditions maximales que les bordures, affectées par des processus de plus basses températures. L'aplatissement des profils typiquement en cloche pour le calcium signifie également que cette valeur doit être considérée comme une valeur minimale atteinte au cœur.

## **Travaux futurs**

Les analyses ont fourni des valeurs moyennes de composition pour chacune des solutions solides en jeu ainsi que des études de variabilité qui permettront de progresser dans l'étude thermobarométrique. Les valeurs obtenues jumelées aux modes de chacun de minéraux permettront de procéder à des calculs de bilan de masse, afin de reconstruire le plus précisément possible la chimie de la lame mince, qui servira ensuite de point de départ dans les modélisations de diagrammes d'équilibre de phases (pseudosections). Les différentes valeurs associées à des occurrences texturales particulières vont également aider à contraindre l'évolution des conditions métamorphiques. Finalement, l'étude chimique des grenats servira lors de l'interprétation des âges Lu-Hf sur ces mêmes grenats, étude pétrochronologique présentement en cours.

## **Conclusions**

Les travaux de chimie minérale ont consisté principalement en l'analyse en éléments majeurs à la microsonde de diverses phases minérales, de la reconversion de ces valeurs massiques en valeurs molaires calculées sur les formules de ces minéraux à des fins de classification et d'étude de variabilité. La plupart des minéraux (feldspaths, amphiboles, pyroxènes et cordiérites) se sont montrés peu variables d'un grain à l'autre et exhibent peu ou pas de zonations. Même les grenats qui conservent typiquement des zonations de croissance ne montrent que de faibles zonations rétrogrades à petit rayon d'influence. Ceci nous fait conclure à une forte équilibration, sans doute suite à de hautes températures soutenues sur une période de temps importante. Seules les biotites, typiquement faciles à rééquilibrer, conservent différentes populations liées à leur relation texturale. Ceci est d'autant plus vrai pour les échantillons ayant subi de la fusion partielle.

Ces données permettront de procéder aux calculs thermobarométriques et surtout de mieux contraindre les parcours pression-température à l'aide des pseudosections.

## Références

- BANDYAYERA, D. – RHÉAUME, P. – MAURICE, C. – BÉDARD, É. – MORFIN, S. – SAWYER, E. W., 2010. Synthèse géologique du secteur du réservoir Opinaca, Baie-James. Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG 2010-02, 46 pages.
- CADDICK, M. J. – KONOPASEK, J. – THOMPSON, A. B., 2010. Preservation of garnet growth zoning and the duration of prograde metamorphism. *Journal of Petrology*; 51, pages 2327-2347.
- FERRY, J. M. – SPEAR, F. S., 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*; 66, pages 113-118.
- GOUTIER, J. – DION, C. – OUELLET, M.-C. – DAVIS, D. W. – DAVID, J. – PARENT, M., 2002. Géologie de la région du lac Guyer (33G/05, 33G/06 et 33G/11). Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG 2001-15, 55 pages.
- LEAKE, B. E. – WOOLLEY, A. R. – ARPS, C. E. S. – BIRCH, W. D., 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*; 25, pages 219-246.
- TINDLE, A.G. – WEBB, P.C., 1990. Estimation of lithium contents in trioctahedral micas using microprobe data: application to micas from granitic rocks. *European Journal of Mineralogy*; 2, pages 595-610.

## Annexes : Figures et tableaux

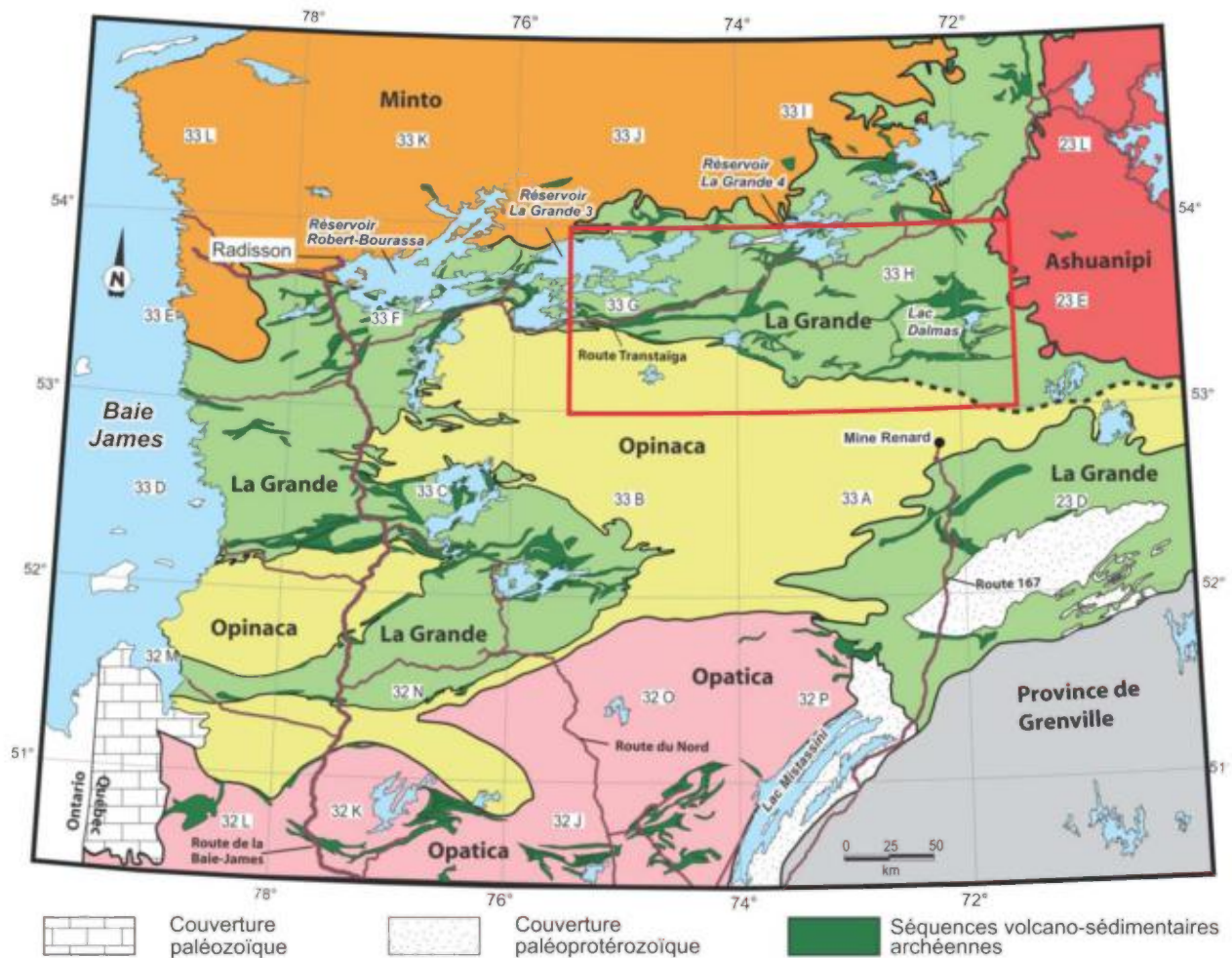


Figure 1 : Carte des sous-provinces du Supérieur dans la région d'Eeyou Istchee Baie-James (Minto, La Grande, Ashuanipi, Opinata et Opatica) et localisation de la partie nord du contact Opinata-La Grande à l'étude. Le carré rouge délimite la carte présentée à la figure 2 (modifié de Goutier, inédit, 2014).

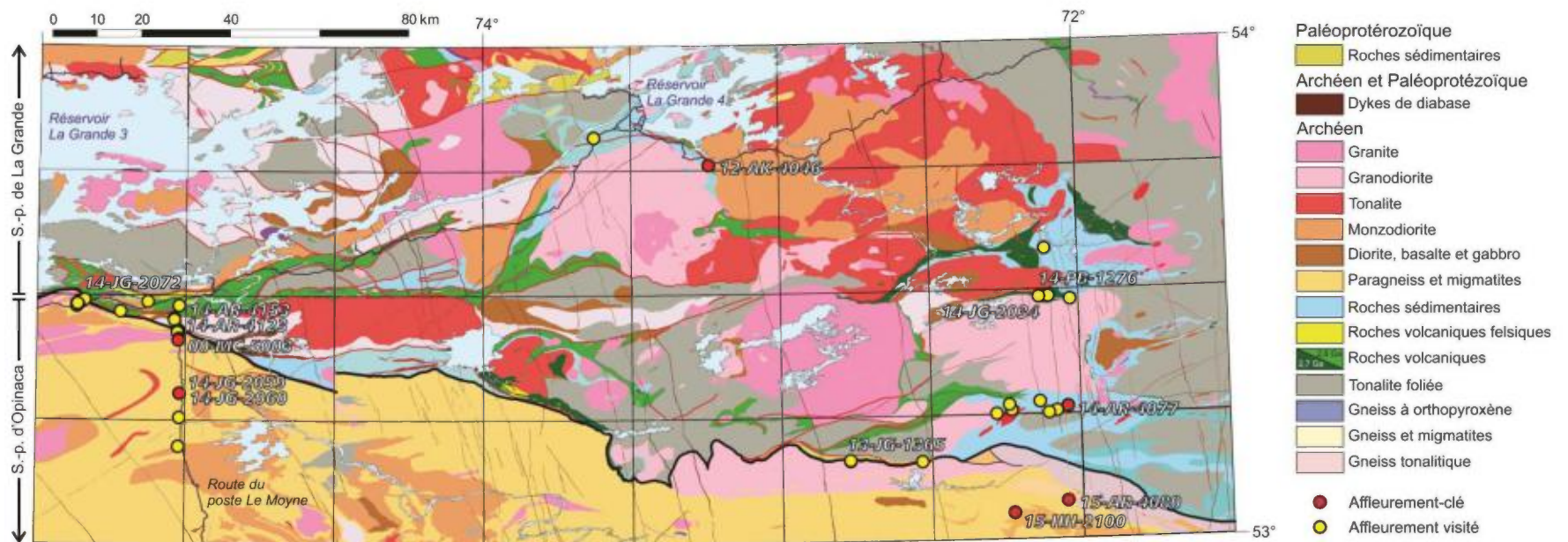


Figure 2 : Carte de localisation des affleurements visités (points jaunes) et des échantillons-clés (points rouges) superposés à la géologie d'une partie des feuillets SNRC 33G, 33H et 23E. La région du poste Le Moyne fait référence aux affleurements situés à l'ouest, pour la plupart dans 33G06, et la région du lac Dalmas fait référence aux affleurements de l'est, soit principalement dans 33H08 et 33H09 (modifié de la carte interactive du SIGÉOM par Goutier et Burniaux, 2015).

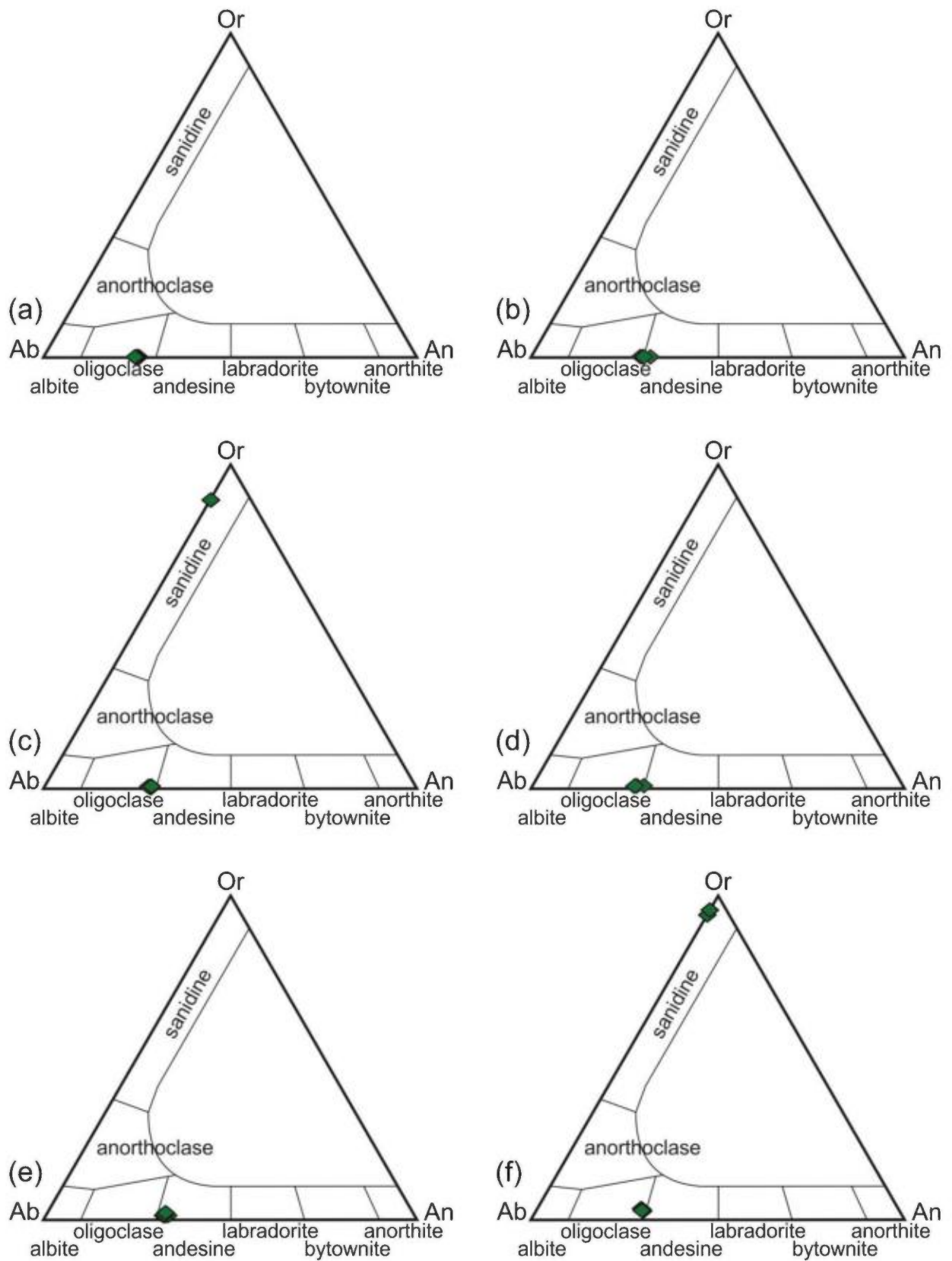


Figure 3 : Analyses de feldspaths sur diagrammes ternaires orthose-albite-anorthite. (a) 12-AK-4046, n = 8; (b) 14-AR-4077, n = 5; (c) 14-JG-2060, n = 22; (d) 00-MC-5003, n = 9; (e) 15-AR-4080, n = 9; (f) 15-HH-2100, n = 21.

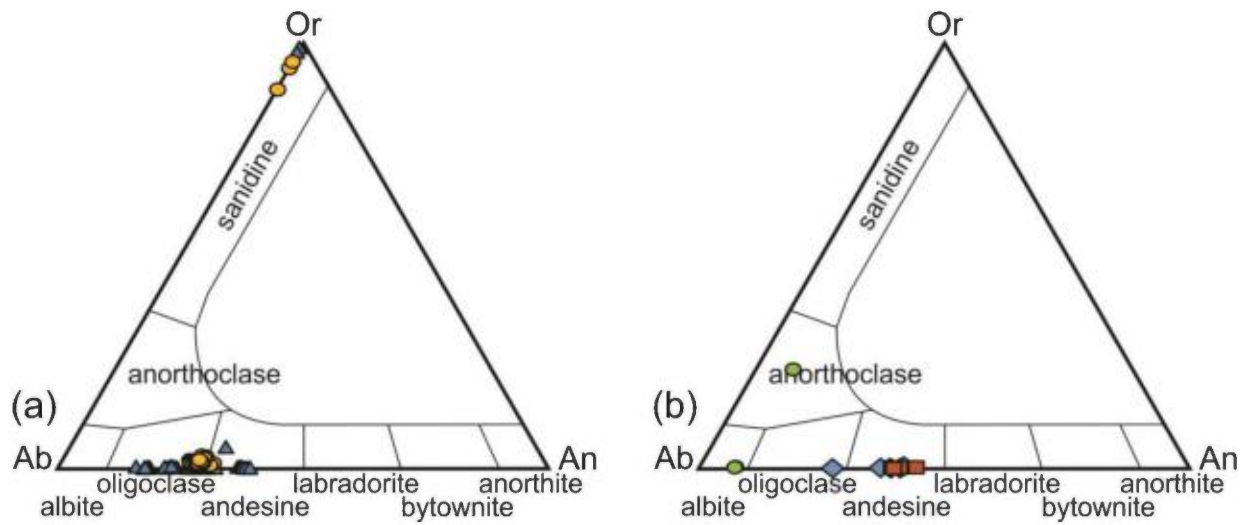


Figure 4 : Analyses de feldspaths sur diagrammes ternaires orthose-albite-anorthite. (a) Roches métasédimentaires (cercles jaunes : Opinaca, triangles bleus : La Grande); (b) Roches métavolcaniques (cercles verts : 13-JG-1365-B, losanges bleus : 14-JG-2072-B et carrés oranges : 14-AR-4153-A).



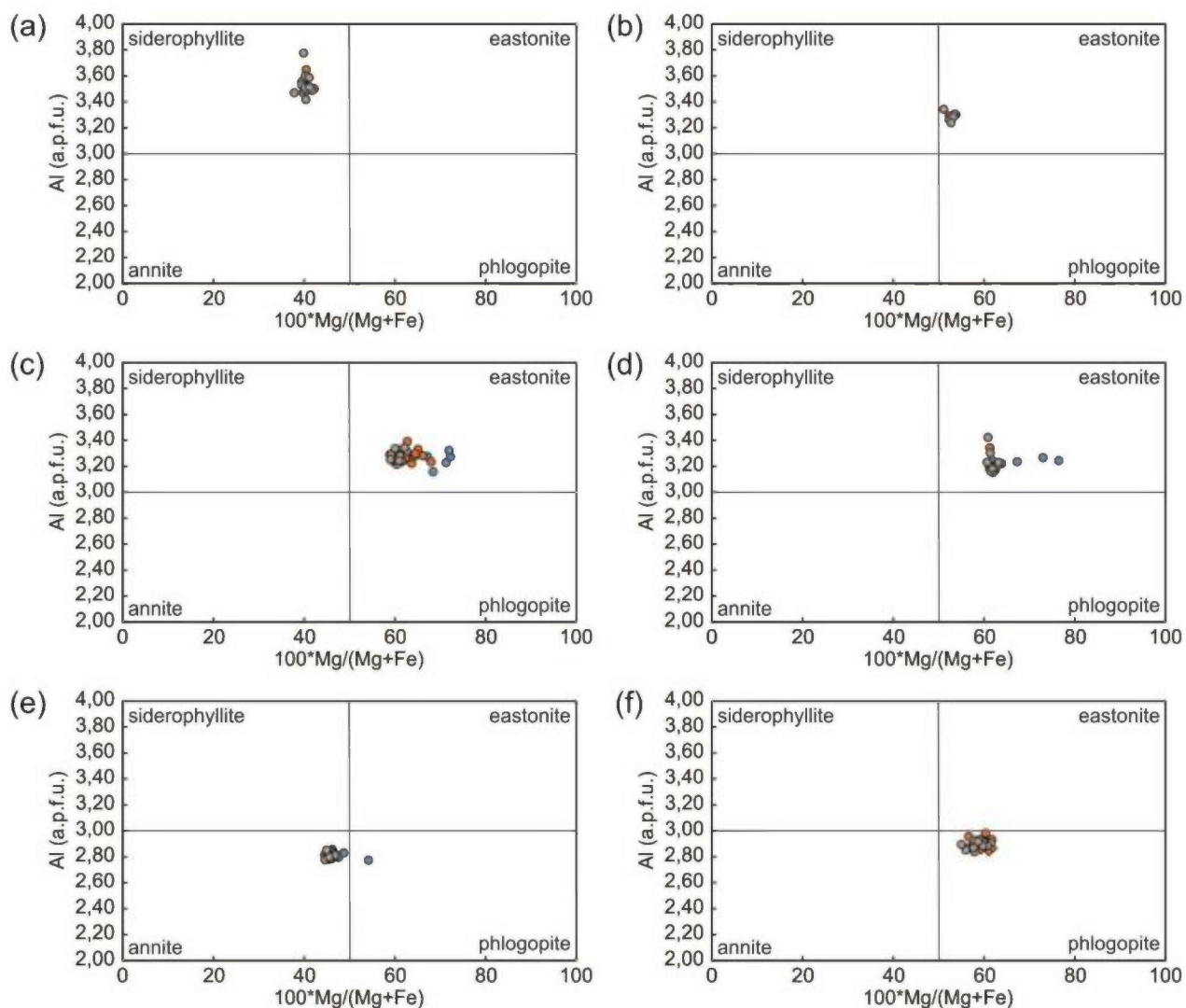


Figure 5 : Analyses de biotites reportées sur graphique d'Al sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  molaire structural (calculé sur 22 O). Cercles gris : matrice, cercles oranges : en couronne rétrograde et cercles bleus : en inclusion. (a) 12-AK-4046-A, n = 18; (b) 14-AR-4077-A, n = 7; (c) 14-JG-2060-A, n = 41; (d) 00-MC-5003-A, n = 21; (e) 15-AR-4080-A, n = 25; (f) 15-HH-2100-A, n = 28.

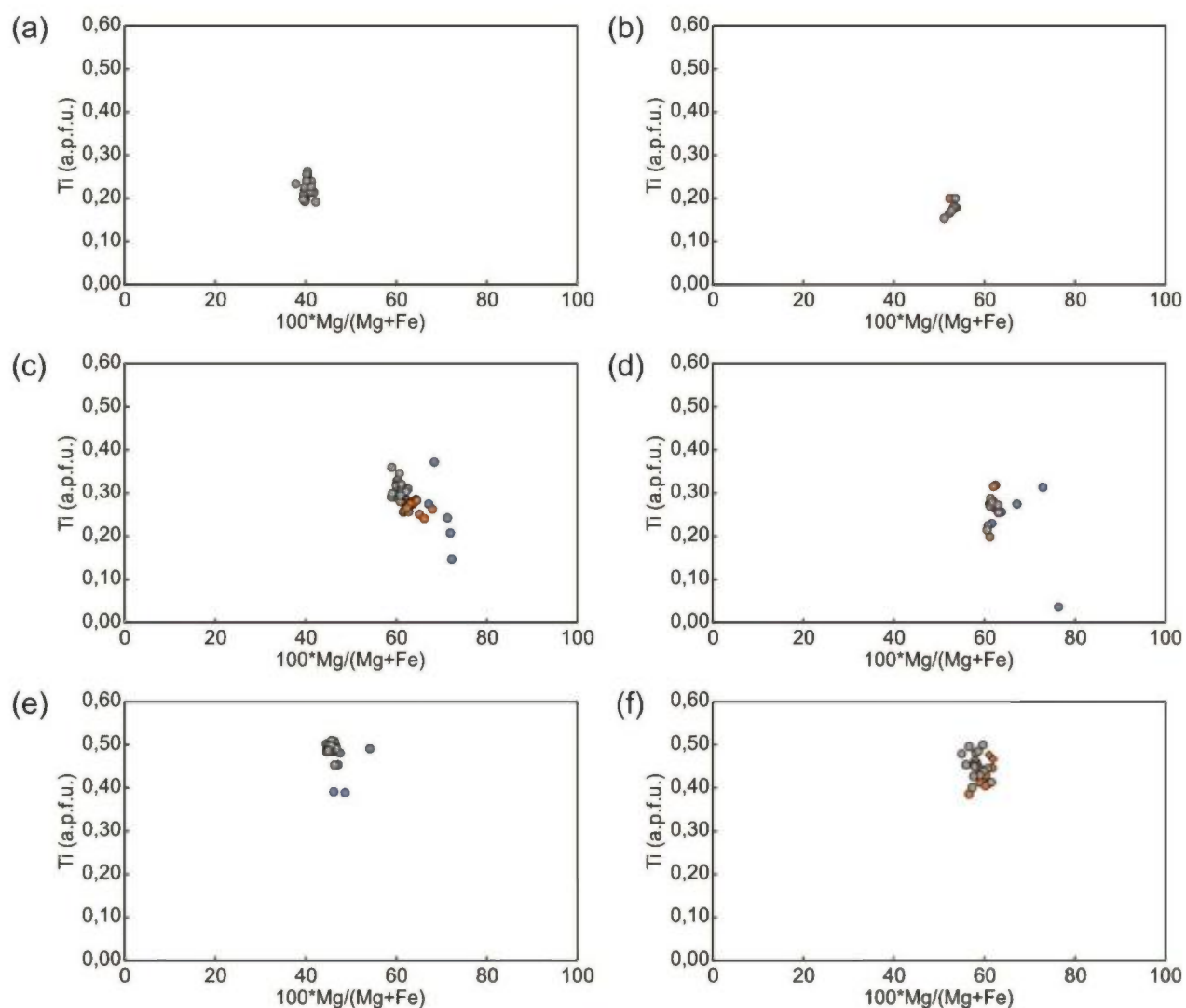


Figure 6 : Analyses de biotites reportées sur graphique de Ti sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  molaire structural (calculé sur 22 O). Cercles gris : matrice, cercles oranges : en couronne rétrograde et cercles bleus : en inclusion. (a) 12-AK-4046-A, n = 18; (b) 14-AR-4077-A, n = 7; (c) 14-JG-2060-A, n = 41; (d) 00-MC-5003-A, n = 21; (e) 15-AR-4080-A, n = 25; (f) 15-HH-2100-A, n = 28.

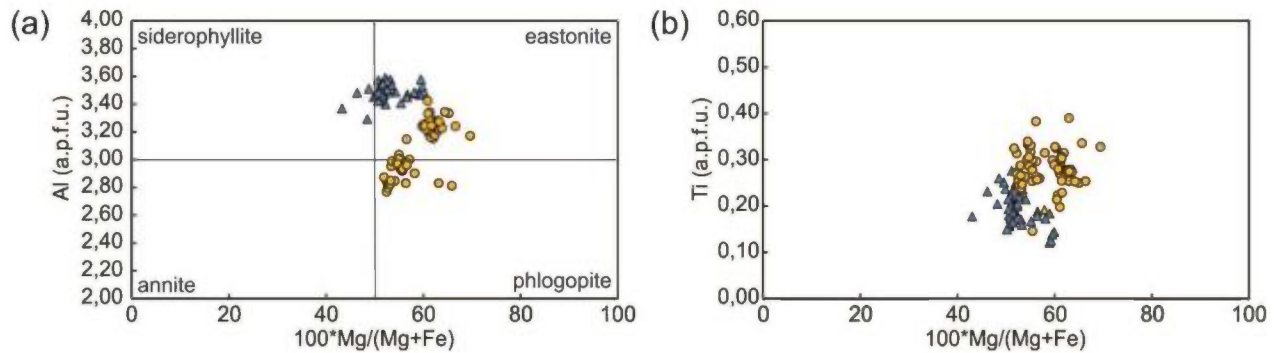


Figure 7 : Analyses de biotites de roches métasédimentaires reportées sur graphique de (a) Al sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  molaire structural (calculé sur 22 O) et; (b) Ti sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ . Cercles jaunes : Sous-province d'Opinaca (n = 65) et triangles bleus : Sous-province de La Grande (n = 53).

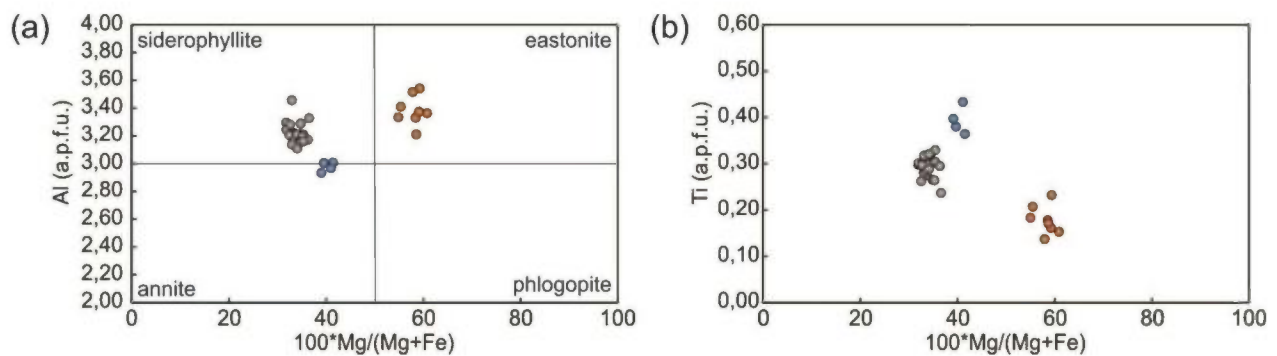


Figure 8 : Analyses de biotites de roches métavolcaniques reportées sur graphique de; (a) Al sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$  molaire structural (calculé sur 22 O) et; (b) Ti sur le rapport  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$ . Cercles bleus : 13-JG-1365-B (n = 4), cercles oranges : 14-AR-4153-A (n = 8) et cercles gris : 14-JG-2034-B (n = 20).

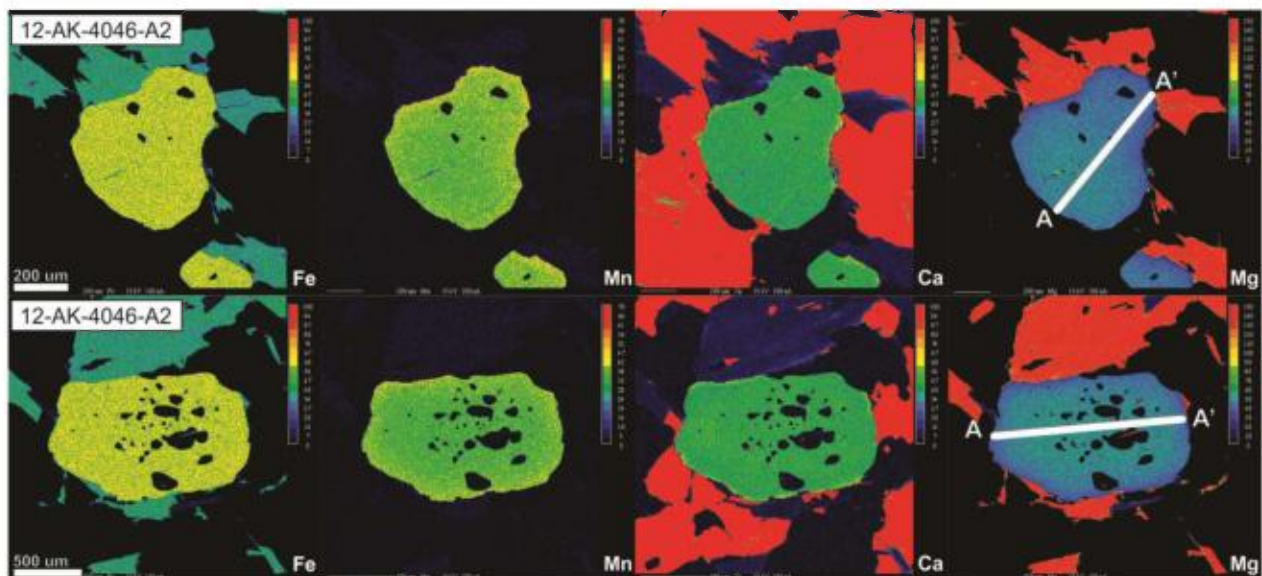


Figure 9 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 12-AK-4046-A2. Les lignes A-A' (1 = 777 μm, 2 = 1387 μm) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 10.

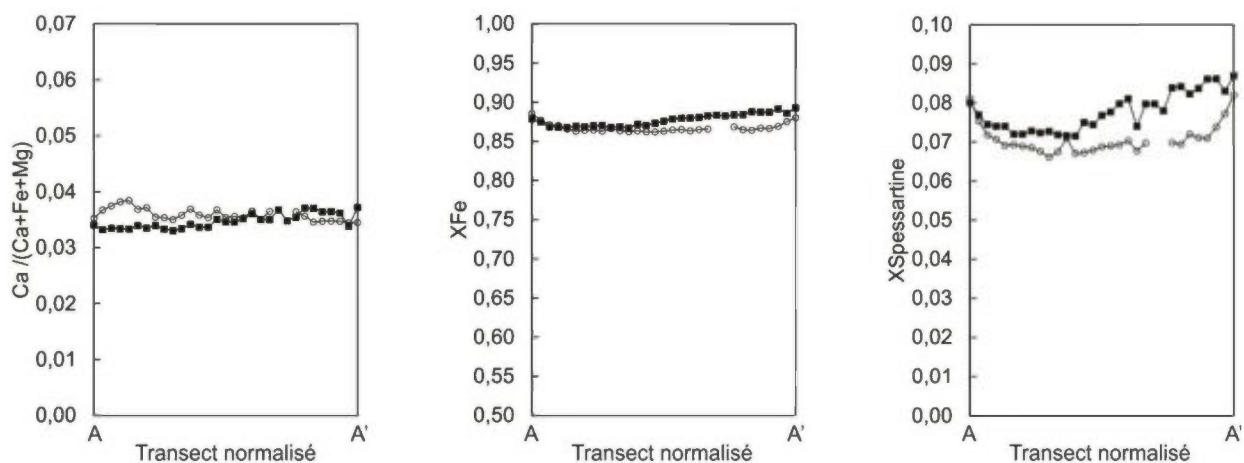


Figure 10 : Transects A-A' (voir figure 9) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 12-AK-4046-A2 ( $X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$  et  $X_{Spessartine} = Mn/(Ca+Fe+Mg+Mn)$ ). Cercles blancs : grenat 4046-1 et carrés noirs : grenat 4046-2.

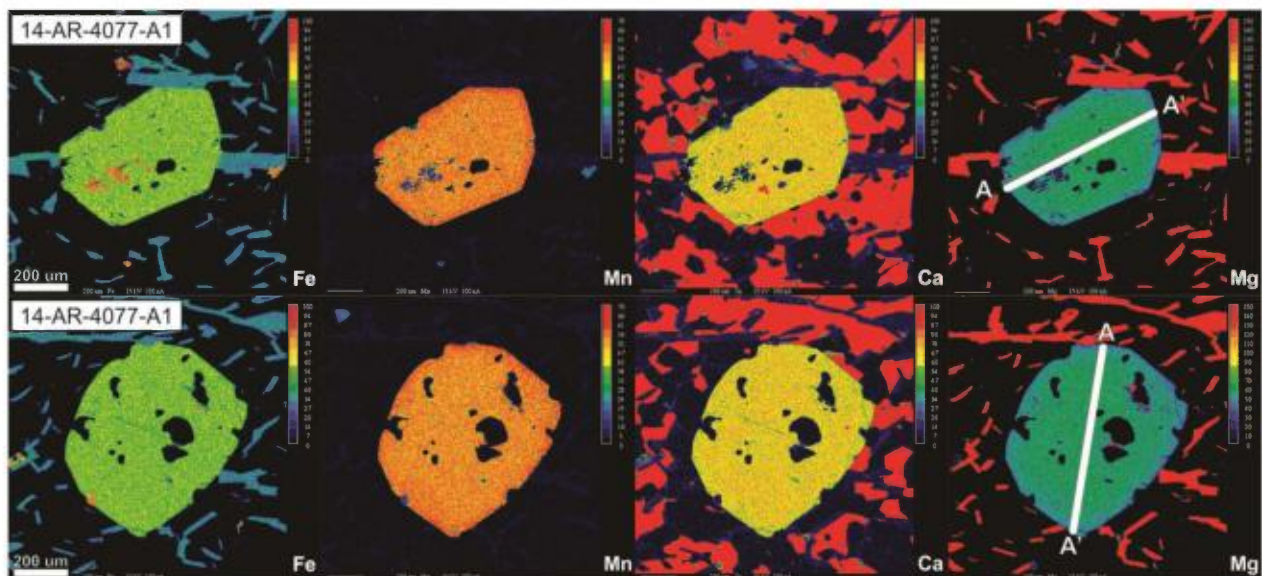


Figure 11 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 14-AR-4077-A1. Les lignes A-A' (1 = 870  $\mu\text{m}$ , 2 = 966  $\mu\text{m}$ ) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 12.

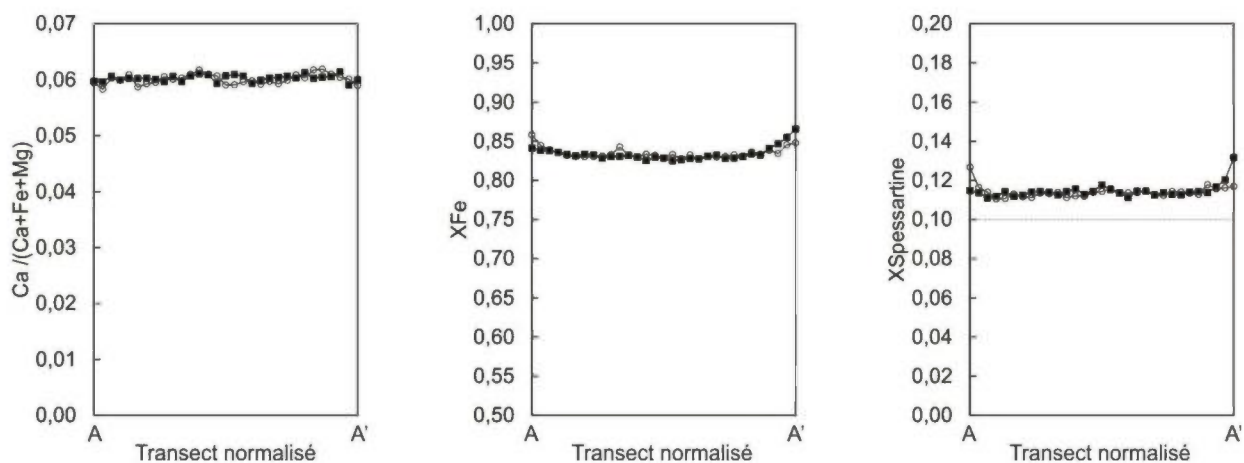


Figure 12 : Transects A-A' (voir figure 11) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 14-AR-4077-A1 ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  et  $X_{\text{Spessartine}} = \text{Mn}/(\text{Ca}+\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Mn})$ ). Cercles blancs : grenat 4077-1 et carrés noirs : grenat 4077-2. La ligne pointillée montre où termine l'échelle pour les autres échantillons.

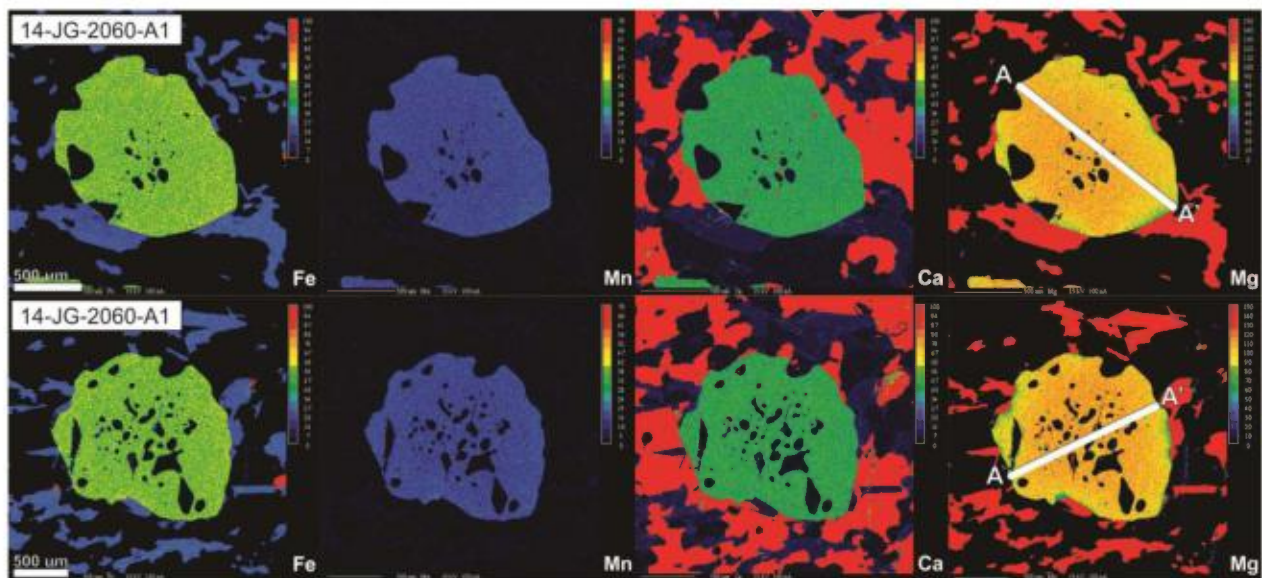


Figure 13 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 14-JG-2060-A1. Les lignes A-A' (1 = 1386  $\mu\text{m}$ , 2 = 1440  $\mu\text{m}$ ) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 14.

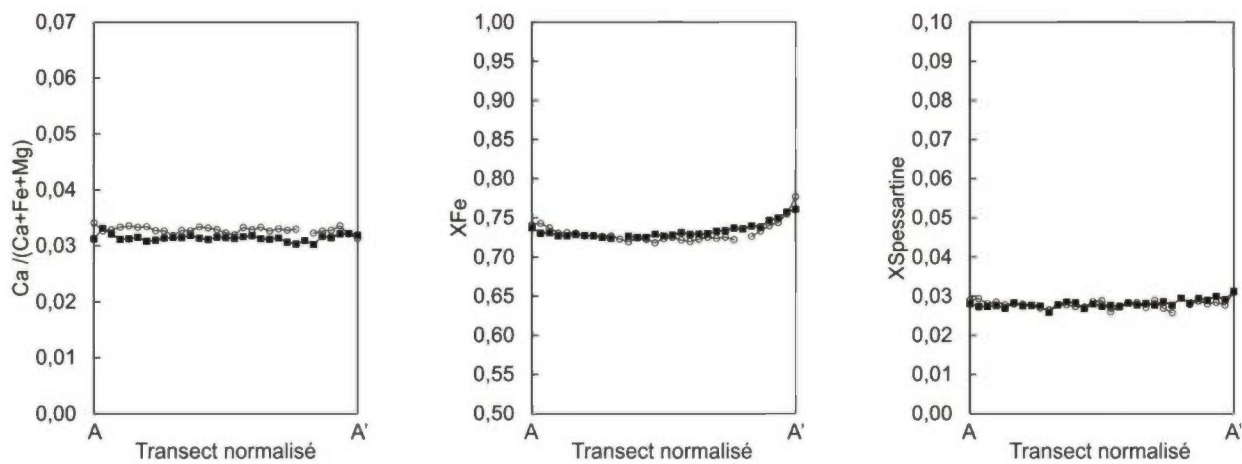


Figure 14 : Transects A-A' (voir figure 13) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 14-JG-2060-A1 ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  et  $X_{\text{Spessartine}} = \text{Mn}/(\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ ). Cercles blancs : grenat 2060-1 et carrés noirs : grenat 2060-2.

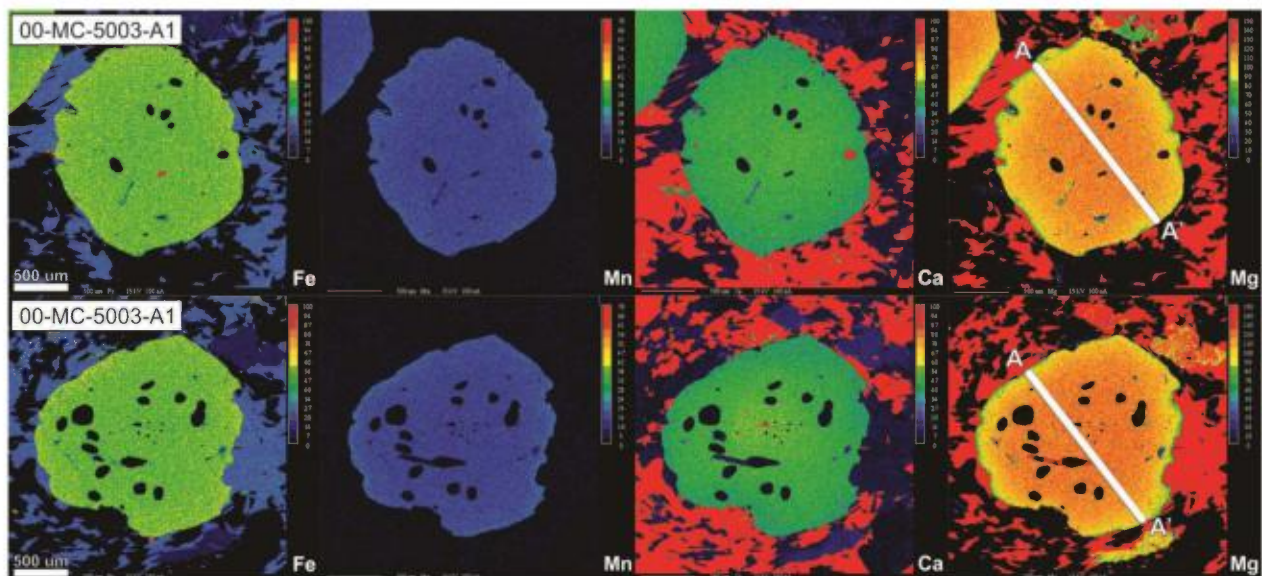


Figure 15 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 00-MC-5003-A1. Les lignes A-A' (1 = 1807  $\mu\text{m}$ , 2 = 1731  $\mu\text{m}$ ) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 16.

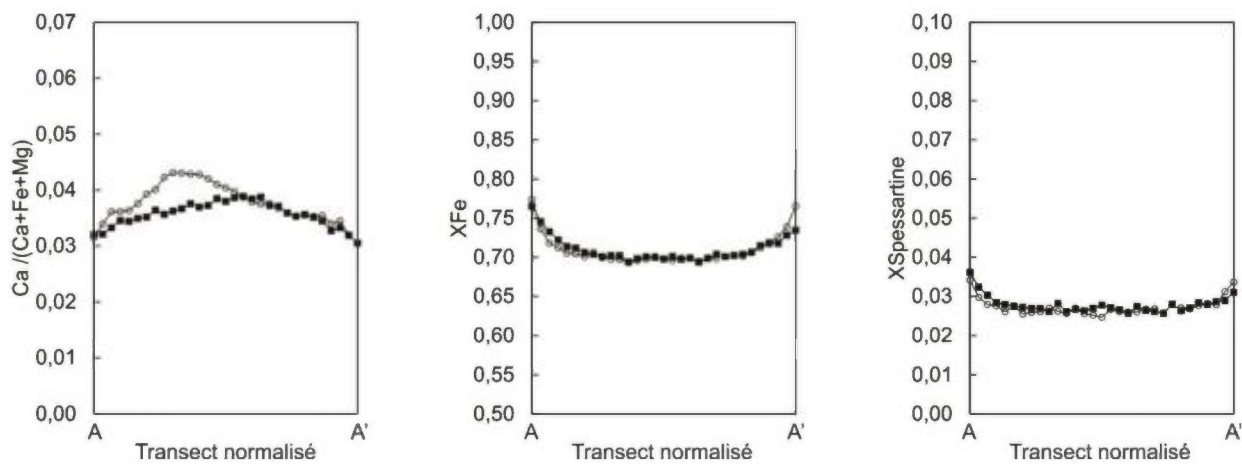


Figure 16 : Transects A-A' (voir figure 15) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 00-MC-5003-A1 ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$  et  $X_{\text{Spessartine}} = \text{Mn}/(\text{Ca}+\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Mn})$ ). Cercles blancs : grenat 5003-1 et carrés noirs : grenat 5003-2.

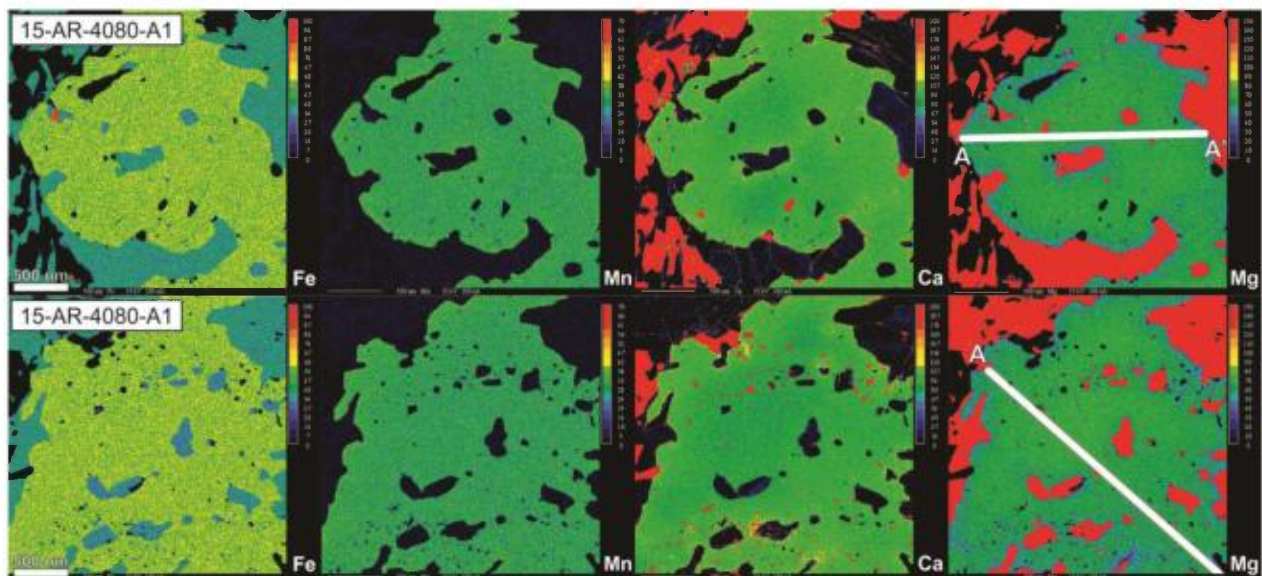


Figure 17 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 15-AR-4080-A1. Les lignes A-A' (1 = 2049  $\mu\text{m}$ , 2 = 3478  $\mu\text{m}$ ) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 18.

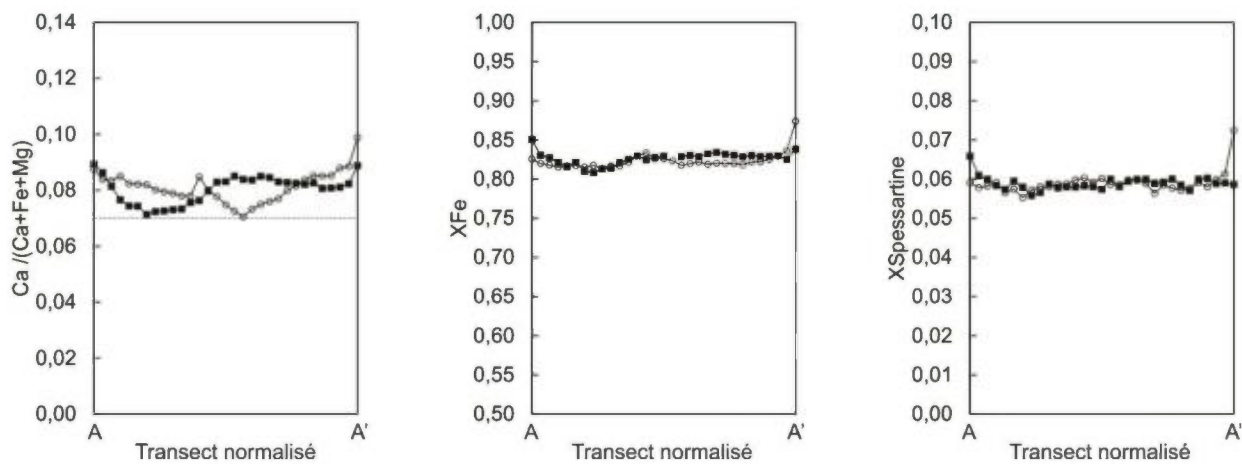


Figure 18 : Transects A-A' (voir figure 17) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 15-AR-4080-A1 ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  et  $X_{\text{Spessartine}} = \text{Mn}/(\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ ). Cercles blancs : grenat 4080-1 et carrés noirs : grenat 4080-2. La ligne pointillée montre où termine l'échelle pour les autres échantillons.



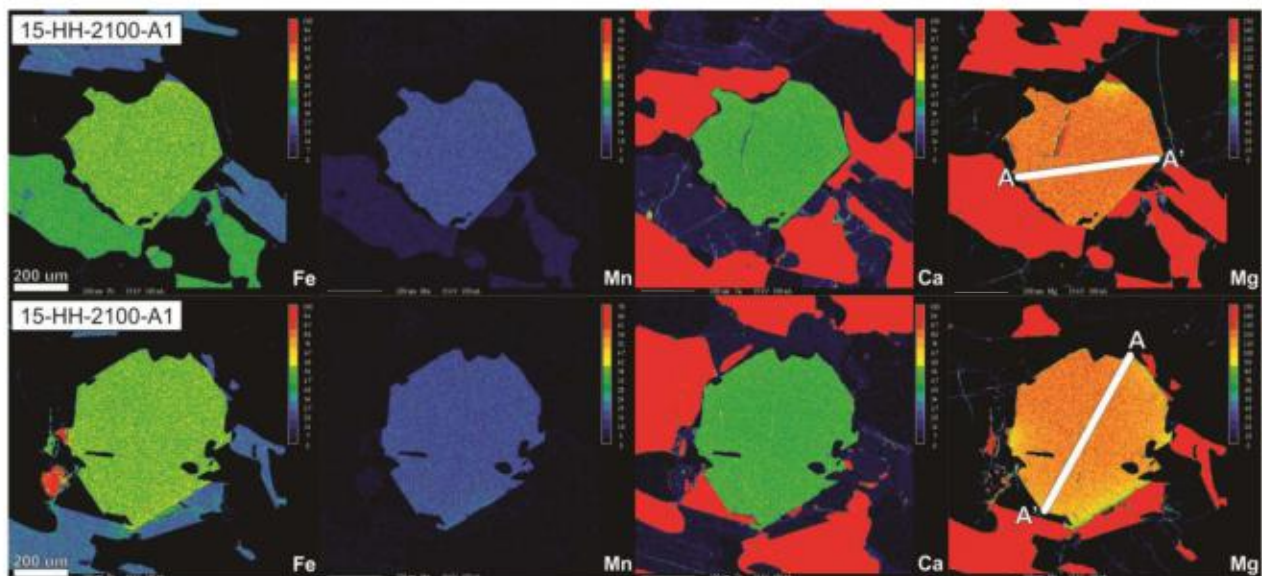


Figure 19 : Cartographie élémentaire (Fe, Mn, Ca et Mg) des grenats (1) et (2) de l'échantillon 15-HH-2100-A1. Les lignes A-A' (1 = 507  $\mu\text{m}$ , 2 = 533  $\mu\text{m}$ ) représentent les transects effectués pour les éléments majeurs de la figure 20.

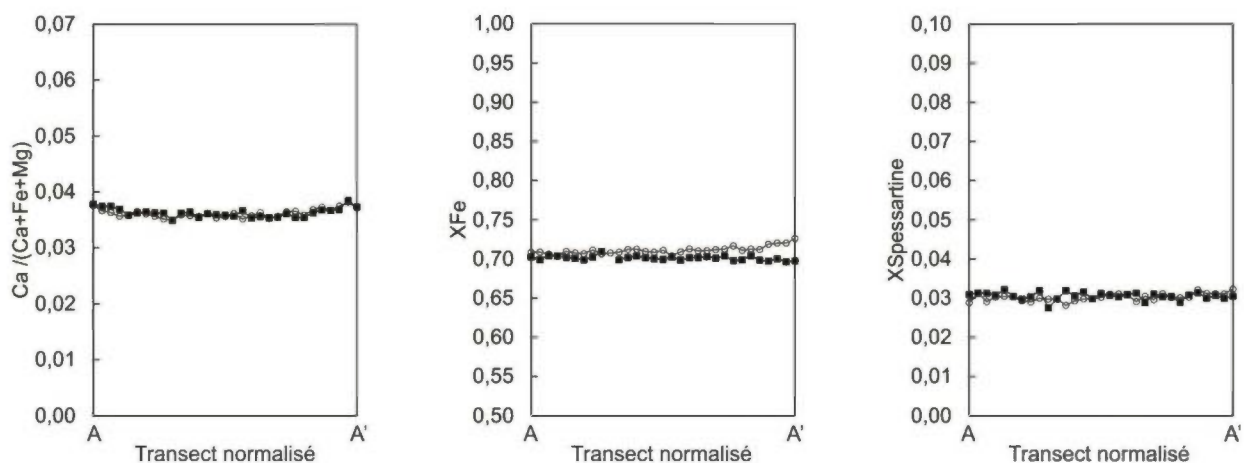


Figure 20 : Transects A-A' (voir figure 19) en éléments majeurs des grenats de l'échantillon 15-HH-2100-A1 ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  et  $X_{\text{Spessartine}} = \text{Mn}/(\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn})$ ). Cercles blancs : grenat 2100-1 et carrés noirs : grenat 2100-2.

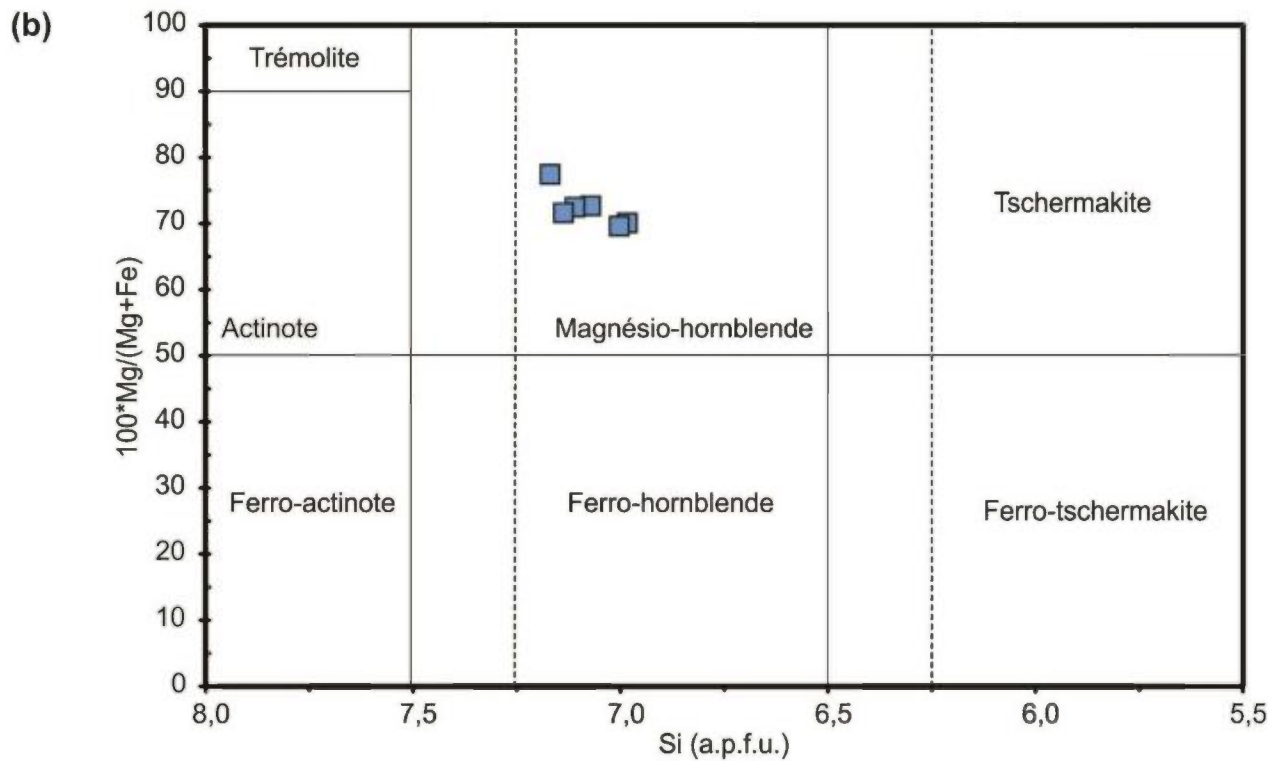
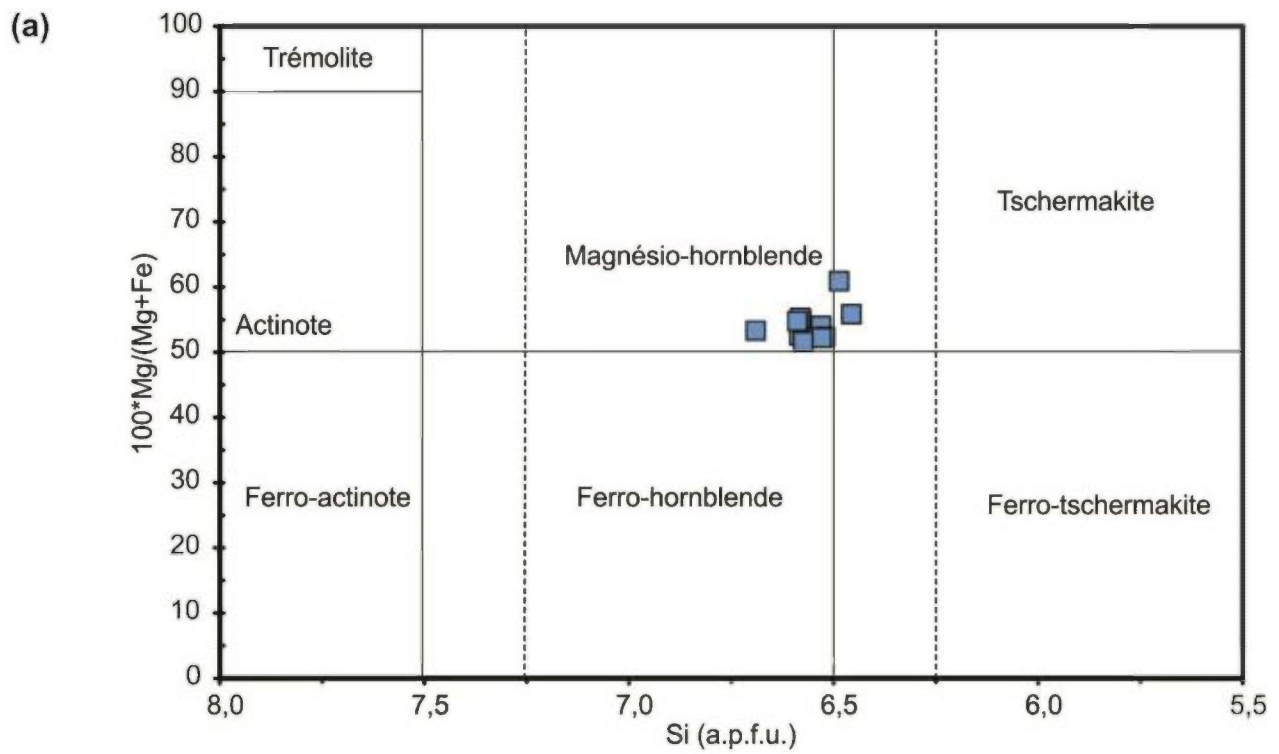


Figure 21 : Diagramme de nomenclature des amphiboles calciques ( $\text{Ca}_B > 1,5$  et  $(\text{Na} + \text{K})_A < 0,5$ ),  $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$  en fonction de Si. (a) 13-JG-1365-B,  $n = 11$ ; (b) 14-AR-4123-A,  $n = 6$ .

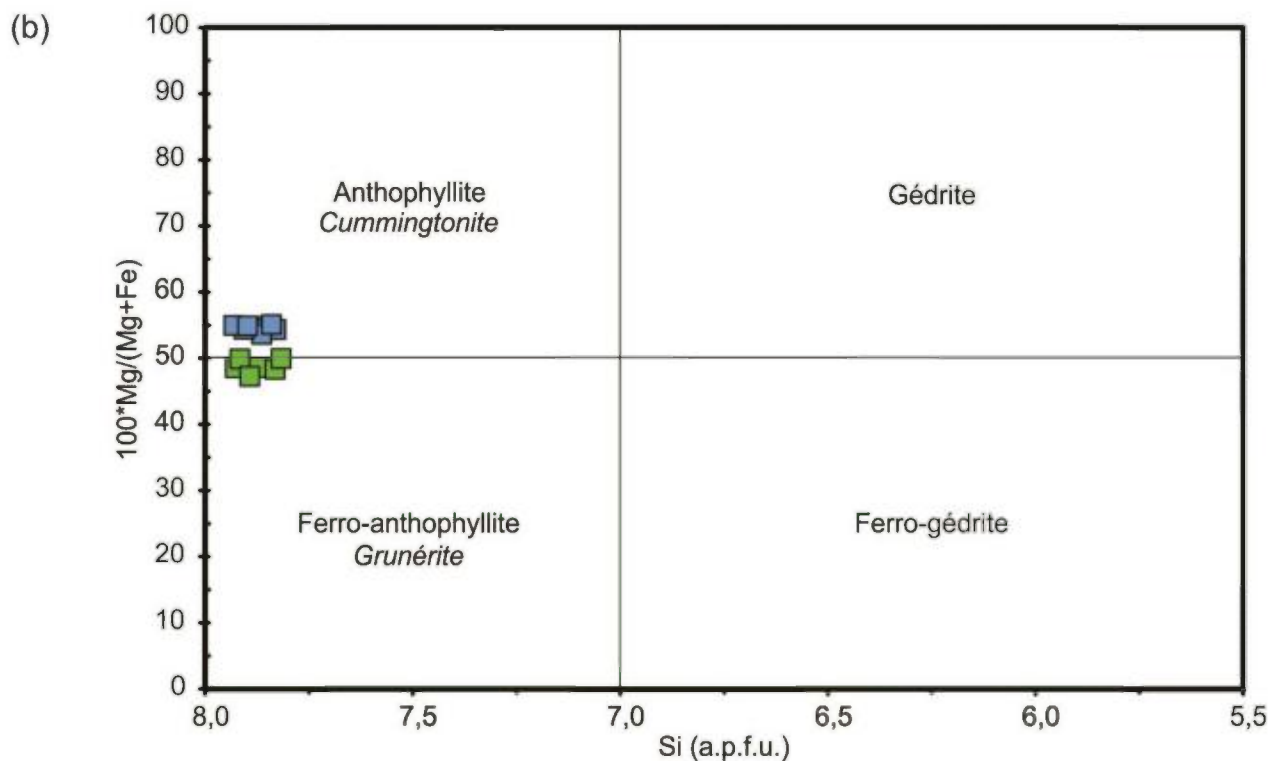
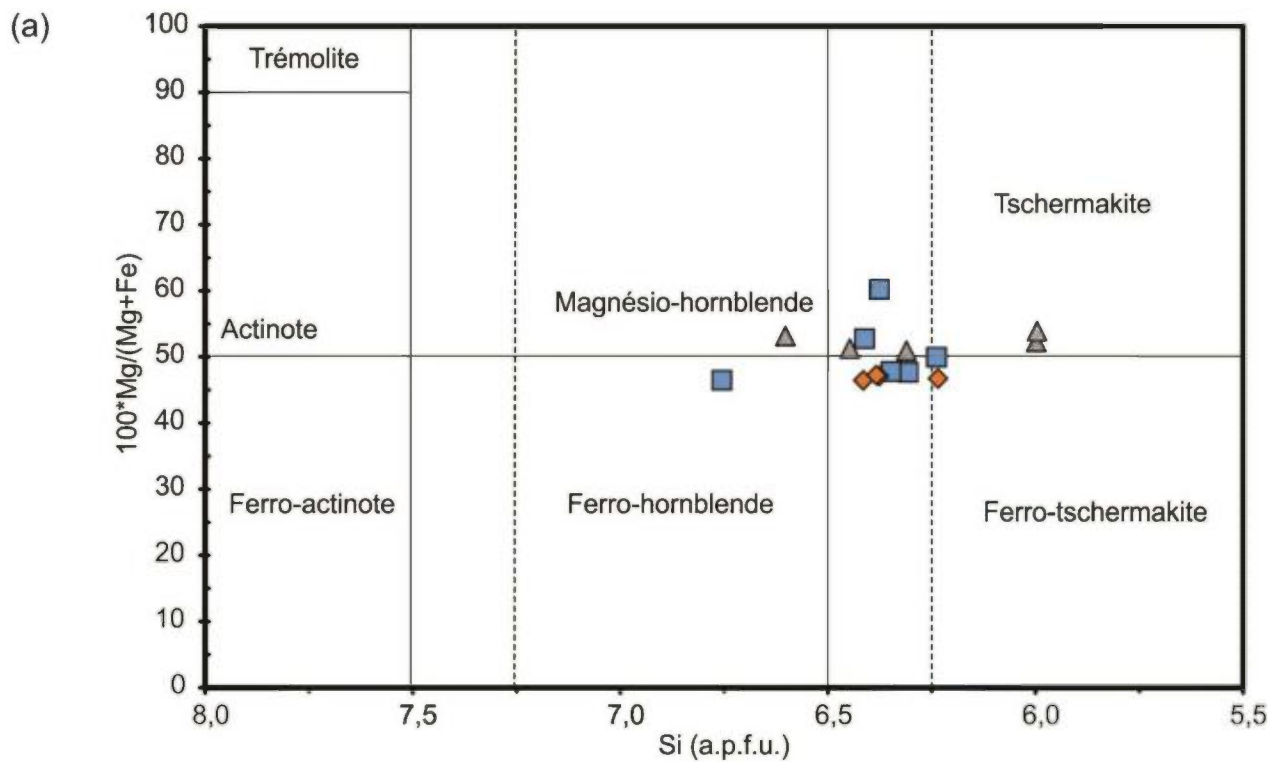


Figure 22 : (a) Diagramme de nomenclature des amphiboles calciques ( $Ca_B > 1,5$  et  $(Na + K)_A < 0,5$ ),  $Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+})$  en fonction de Si, 14-JG-2072-B,  $n = 15$ , carrés bleus : matrice, losanges oranges : en couronne de grenat et triangles gris : en inclusion; (b) Diagramme de nomenclature des amphiboles Mg-Fe-Mn ( $(Mg, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Li)_B > 1,50$ ,  $Li_B < 1,00$ ,  $Li_C < 0,50$ ). Les noms en italique représentent l'équivalent monoclinique. Carrés verts : 13-JG-1365-B,  $n = 6$ ; et carrés bleus : 14-AR-4123-A,  $n = 8$ .

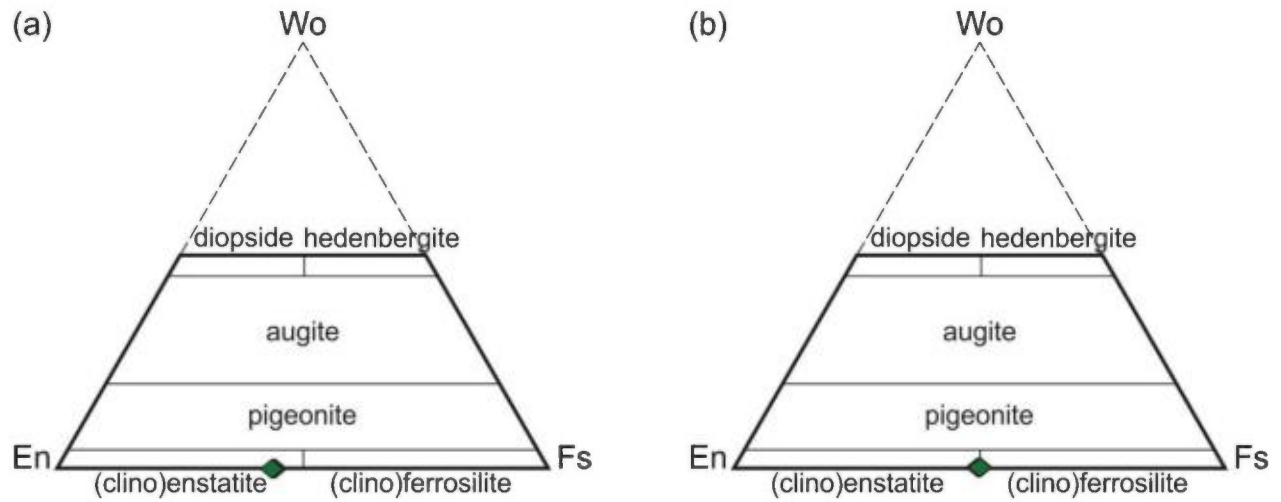


Figure 23 : Analyses de pyroxènes sur diagrammes ternaires wollastonite-enstatite-ferrosilite. Wo (wollastonite) =  $\text{CaSiO}_3$ , En (enstatite) =  $\text{MgSiO}_3$ , Fs (ferrosilite) =  $\text{FeSiO}_3$ . (a) 15-HH-2100-A, n = 6; (b) 14-JG-2059-D, n = 6.

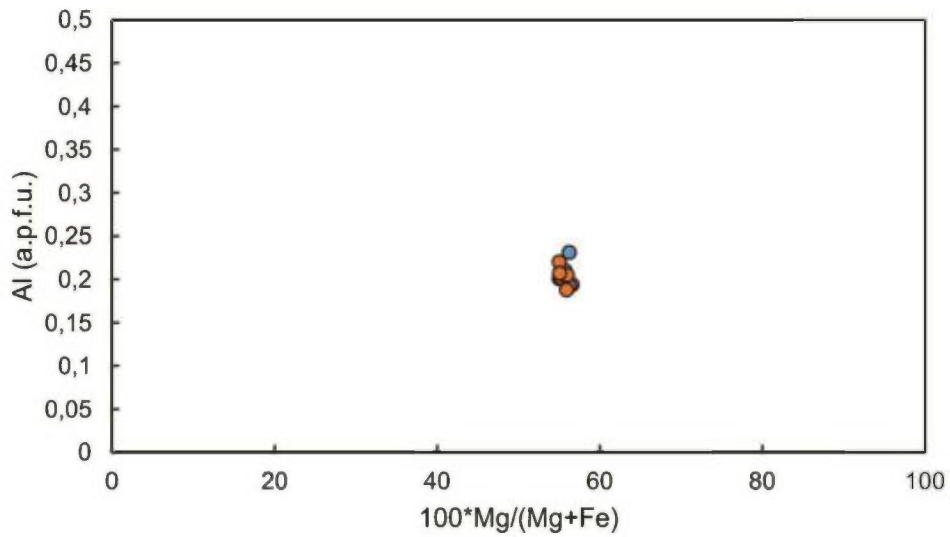


Figure 24 : Analyses de pyroxènes de 15-HH-2100-A reportées sur graphique de Al sur le rapport  $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+}+\text{Fe}^{2+})$  molaire structural (calculé sur 22 O). Cercles oranges : analyses prises au cœur du pyroxène (n = 7) et cercles bleus : analyses prises en bordure du pyroxène (n = 6).

Tableau 5 : Proportions modales (%) calculées par identification de phases par SEM-MLA. Les valeurs supérieures à 1% sont soulignées et celles supérieures à 0,15% sont en italique.

|                        | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Plagioclase</b>     | <u>39,97</u> | <u>39,98</u> | <u>46,60</u> | <u>44,41</u> | <u>39,21</u> | <u>47,87</u> |
| <b>Quartz</b>          | <u>34,94</u> | <u>39,09</u> | <u>26,50</u> | <u>18,98</u> | <u>17,49</u> | <u>26,71</u> |
| <b>Biotite</b>         | <u>21,63</u> | <u>17,79</u> | <u>19,38</u> | <u>25,86</u> | <u>30,79</u> | <u>11,61</u> |
| <b>Grenat</b>          | <u>0,88</u>  | <u>1,24</u>  | <u>3,10</u>  | <u>4,29</u>  | <u>10,69</u> | <u>2,09</u>  |
| <b>Orthoclase</b>      | 0,10         | <i>0,59</i>  | <u>3,73</u>  | 0,04         | <i>0,78</i>  | <u>5,31</u>  |
| <b>Orthopyroxène</b>   | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,00         | 0,02         | <u>5,64</u>  |
| <b>Cordiérite</b>      | 0,00         | 0,02         | 0,00         | <u>2,91</u>  | 0,01         | 0,01         |
| <b>Muscovite</b>       | <u>1,95</u>  | <i>0,41</i>  | 0,11         | <u>1,77</u>  | <i>0,17</i>  | 0,09         |
| <b>Aluminosilicate</b> | <i>0,23</i>  | 0,06         | 0,01         | 0,06         | 0,01         | 0,01         |
| <b>Pyrite</b>          | 0,05         | 0,00         | 0,06         | 0,07         | 0,07         | <i>0,17</i>  |
| <b>Pyrrhotite</b>      | 0,01         | 0,03         | <i>0,19</i>  | 0,03         | 0,01         | 0,08         |
| <b>Magnétite</b>       | 0,00         | 0,05         | 0,01         | 0,02         | 0,01         | 0,05         |
| <b>Ilménite</b>        | 0,00         | <i>0,19</i>  | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| <b>Staurotide</b>      | 0,07         | 0,04         | 0,00         | <i>0,22</i>  | 0,01         | 0,01         |
| <b>Hornblende</b>      | 0,03         | 0,08         | 0,02         | 0,02         | <i>0,19</i>  | 0,09         |
| <b>Chlorite</b>        | 0,00         | 0,02         | 0,01         | 0,02         | 0,02         | 0,08         |
| <b>Apatite</b>         | 0,07         | 0,06         | 0,02         | <i>0,19</i>  | <i>0,20</i>  | 0,06         |
| <b>Zircon</b>          | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,04         | 0,01         |
| <b>Monazite</b>        | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,03         | 0,01         |
| <b>Non-identifié</b>   | 0,03         | <i>0,29</i>  | <i>0,24</i>  | <u>*1,07</u> | <i>0,24</i>  | 0,08         |
| <b>Total</b>           | 99,99        | 99,97        | 99,99        | 99,99        | 99,99        | 99,99        |

\* La proportion importante de minéraux non-identifiés est due à une section endommagée de la lame mince.

Tableau 6 : Analyses représentatives de plagioclases pour chaque échantillon-clé. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 60,88        | 60,89        | 61,42        | 61,19        | 59,66        | 60,54        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,00         | 0,01         | 0,03         | 0,04         | 0,00         | 0,00         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 24,00        | 24,70        | 24,60        | 24,34        | 25,00        | 24,34        |
| <b>MgO</b>                         | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,02         | 0,01         |
| <b>CaO</b>                         | 5,38         | 6,27         | 5,83         | 5,74         | 6,66         | 5,99         |
| <b>MnO</b>                         | 0,02         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,10         | 0,00         |
| <b>FeO</b>                         | 0,01         | 0,06         | 0,03         | 0,06         | 0,02         | 0,04         |
| <b>SrO</b>                         | 0,00         | 0,00         | 0,08         | 0,10         | 0,00         | 0,00         |
| <b>BaO</b>                         | 0,02         | 0,02         | 0,01         | 0,09         | 0,03         | 0,02         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 8,56         | 8,17         | 8,37         | 8,30         | 7,68         | 7,89         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,07         | 0,04         | 0,31         | 0,13         | 0,40         | 0,49         |
| <b>Total</b>                       | 98,94        | 100,17       | 100,70       | 99,98        | 99,57        | 99,32        |

Tableau 7 : Analyses représentatives de feldspaths potassiques pour chaque échantillon-clé. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | -            | -            | 63,72        | -            | -            | 63,59        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | -            | -            | 0,06         | -            | -            | 0,03         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | -            | -            | 19,00        | -            | -            | 18,64        |
| <b>MgO</b>                         | -            | -            | 0,01         | -            | -            | 0,01         |
| <b>CaO</b>                         | -            | -            | 0,04         | -            | -            | 0,06         |
| <b>MnO</b>                         | -            | -            | 0,02         | -            | -            | 0,06         |
| <b>FeO</b>                         | -            | -            | 0,01         | -            | -            | 0,09         |
| <b>SrO</b>                         | -            | -            | 0,00         | -            | -            | 0,00         |
| <b>BaO</b>                         | -            | -            | 0,62         | -            | -            | 0,46         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | -            | -            | 0,94         | -            | -            | 0,63         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | -            | -            | 14,96        | -            | -            | 15,30        |
| <b>Total</b>                       | -            | -            | 99,37        | -            | -            | 98,87        |

Tableau 8 : Analyses représentatives de biotites de matrice pour chaque échantillon-clé. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 12-AK-4046-A | 14-AR-4077-A | 14-JG-2060-A | 00-MC-5003-A | 15-AR-4080-A | 15-HH-2100-A |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 34,63        | 36,36        | 36,66        | 36,45        | 35,28        | 36,17        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 2,08         | 1,59         | 2,62         | 2,57         | 4,29         | 4,00         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 19,33        | 18,49        | 18,72        | 18,00        | 15,41        | 16,04        |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,17         | 0,18         | 0,06         | 0,07         | 0,06         | 0,21         |
| <b>MgO</b>                         | 8,04         | 11,43        | 13,14        | 13,61        | 9,56         | 12,28        |
| <b>CaO</b>                         | 0,00         | 0,01         | 0,00         | 0,01         | 0,03         | 0,03         |
| <b>MnO</b>                         | 0,07         | 0,07         | 0,00         | 0,02         | 0,07         | 0,06         |
| <b>FeO</b>                         | 21,39        | 17,93        | 15,62        | 15,28        | 20,76        | 17,25        |
| <b>NiO</b>                         | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| <b>BaO</b>                         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,26         | 0,46         | 0,09         | 0,16         | 0,07         | 0,08         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 9,19         | 8,62         | 9,62         | 9,09         | 9,32         | 9,65         |
| <b>Rb<sub>2</sub>O</b>             | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,03         | 0,05         | 0,03         |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              | 3,87         | 3,94         | 3,86         | 3,93         | 3,75         | 3,76         |
| <b>F</b>                           | 0,04         | 0,09         | 0,44         | 0,20         | 0,25         | 0,46         |
| <b>Cl</b>                          | 0,01         | 0,01         | 0,01         | 0,00         | 0,03         | 0,01         |
| <b>Total</b>                       | 99,09        | 99,17        | 100,84       | 99,42        | 98,91        | 100,02       |

Tableau 9 : Analyses représentatives de cœurs de grenats pour chaque échantillon-clé. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 12-AK-4046-A-1 | 14-AR-4077-A-1 | 14-JG-2060-A-1 | 00-MC-5003-A-1 | 15-AR-4080-A-1 | 15-HH-2100-A-1 |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 36,68          | 37,18          | 38,37          | 38,08          | 37,50          | 38,14          |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,05           | 0,04           | 0,00           | 0,07           | 0,02           | 0,05           |
| <b>ZrO<sub>2</sub></b>             | 0,00           | 0,02           | 0,02           | 0,00           | 0,00           | 0,00           |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 21,02          | 20,77          | 21,57          | 21,46          | 21,10          | 21,64          |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,08           | 0,05           | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,01           |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,00           | 0,31           | 0,23           | 0,31           | 0,20           | 0,14           |
| <b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | 0,03           | 0,16           | 0,00           | 0,07           | 0,03           | 0,04           |
| <b>MgO</b>                         | 3,09           | 3,55           | 6,68           | 7,32           | 3,81           | 7,02           |
| <b>CaO</b>                         | 1,15           | 1,80           | 1,12           | 1,42           | 2,47           | 1,25           |
| <b>MnO</b>                         | 3,04           | 4,99           | 1,31           | 1,12           | 2,66           | 1,38           |
| <b>FeO</b>                         | 34,72          | 30,50          | 31,17          | 30,08          | 32,25          | 30,84          |
| <b>ZnO</b>                         | 0,03           | 0,08           | 0,10           | 0,04           | 0,02           | 0,00           |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,01           | 0,02           | 0,00           | 0,02           | 0,00           | 0,01           |
| <b>Total</b>                       | 99,90          | 99,47          | 100,56         | 99,98          | 100,05         | 100,53         |

Tableau 10 : Analyses représentatives des différentes amphiboles analysées. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 13-JG-1365-B-I | 13-JG-1365-B-II | 14-AR-4123-A-I | 14-AR-4123-A-II | 14-JG-2072-B |
|------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 43,81          | 52,86           | 48,03          | 53,22           | 43,13        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 1,08           | 0,01            | 0,37           | 0,05            | 0,62         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 12,30          | 0,88            | 7,66           | 1,04            | 13,96        |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,12           | 0,06            | 0,08           | 0,00            | 0,04         |
| <b>MgO</b>                         | 8,88           | 14,55           | 12,53          | 15,91           | 7,28         |
| <b>CaO</b>                         | 11,53          | 0,79            | 11,59          | 1,67            | 11,18        |
| <b>MnO</b>                         | 0,18           | 0,57            | 0,48           | 1,22            | 0,27         |
| <b>FeO</b>                         | 18,85          | 27,37           | 15,44          | 24,49           | 20,04        |
| <b>CoO</b>                         | 0,00           | -               | 0,00           | 0,00            | 0,00         |
| <b>NiO</b>                         | 0,09           | 0,03            | 0,01           | 0,00            | 0,01         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 1,35           | 0,06            | 0,83           | 0,09            | 1,42         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,50           | -               | 0,36           | 0,03            | 0,31         |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              | 2,01           | -               | 2,03           | 2,01            | 1,96         |
| <b>F</b>                           | 0,00           | -               | 0,00           | 0,03            | 0,09         |
| <b>Cl</b>                          | 0,00           | -               | 0,00           | 0,00            | 0,00         |
| <b>Total</b>                       | 100,69         | 97,18           | 99,41          | 99,76           | 100,30       |

Tableau 11 : Analyses représentatives de cordiérites analysées pour 00-MC-5003-A. Valeurs de microsonde exprimées en pourcentage massique d'oxydes.

|                                    | 00-MC-5003-A-1 | 00-MC-5003-A-2 |
|------------------------------------|----------------|----------------|
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 48,60          | 48,81          |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,00           | 0,09           |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 32,22          | 32,62          |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,02           | 0,00           |
| <b>MgO</b>                         | 10,28          | 10,40          |
| <b>CaO</b>                         | 0,01           | 0,00           |
| <b>MnO</b>                         | 0,06           | 0,08           |
| <b>FeO</b>                         | 5,51           | 5,55           |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,15           | 0,17           |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,00           | 0,00           |
| <b>Total</b>                       | 96,85          | 97,72          |