

RAPPORT DE STAGE

Traçage des fluides minéralisateurs dans les gisements d'or orogénique paléoprotérozoïques par l'analyse cristallochimique et isotopique des tourmalines

LEFEBVRE Marie
Année 2014-2015

Encadrants :

Anne-Sylvie ANDRE-MAYER
Antonin RICHARD

Résumé

Les gisements d'or de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré (Burkina Faso) et de Juomasuo (Finlande) présentent différentes populations de tourmalines. Les analyses cristallographiques effectuées sur ces tourmalines montrent qu'il s'agit de dravites, hormis pour une population de Fété Kolé où les tourmalines sont des schorls.

Des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ ont été obtenues sur les différentes populations de tourmalines. Pour Kiaka, la population I présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -11 et -5 ‰ et la population II, des valeurs entre -16 et -12 ‰. La source du fluide ayant amené à la formation des tourmalines pour la population I serait un fluide issu du métamorphisme prograde. Pour la population II, la source serait un fluide issu du fractionnement solide-fluide lors de l'intrusion de granites à proximité du gisement. Pour Fété Kolé, la population I présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -7 et -2 ‰, entre -6 et +2 ‰ pour la population II et entre -5 et +5 ‰ pour la population III. Pour les trois populations, les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ sont concordantes avec un fluide issu du métamorphisme prograde. Pour les tourmalines de Guibaré, les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ sont comprises entre +5 et +12 ‰. Cela correspond également à un fluide formé lors de métamorphisme prograde. Pour le gisement de Juomasuo, la population I présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre +6 et +17 ‰ et la population II entre -7 et +16 ‰. Ces résultats correspondent à une source évaporitique du fluide.

Les comparaisons entre les gisements de l'étude et d'autres gisements archéens et protérozoïques montrent que c'est le fluide qui a une influence primordiale sur la composition chimique et isotopique des tourmalines. Le rôle de l'encaissant le plus proche semble nul, mais les différentes roches rencontrées par le fluide lors de sa circulation peuvent influencer sur la composition de celui-ci.

Abstract

Kiaka, Fété Kolé, Guibaré and Juomasuo deposits are associated with many populations of tourmalines. Chemical analysis have been made on these tourmalines and it shows that most of them are dravites. The only exception is at Fété Kolé where one population is made of schorls.

Boron isotopic analysis have been made on the different populations of tourmalines. For Kiaka deposit, the results for the population I are between -11 and -5 ‰ and for the population II between -16 and -12 ‰. The fluid source for tourmalines of the population I could be a fluid related to the prograde metamorphism. For the population II, the source could be a fluid related to the melt-fluid fractionation when granites took place near to the deposit. For Fété Kolé deposit, the results for the population I are between -7 and -2 ‰, for the population II between -6 and +2 ‰ and for the population III between -5 and +5 ‰. These results show that, for the three populations, the fluid is related the prograde metamorphism. For Guibaré deposit, the results are between +5 and +12 ‰. It also corresponds to a fluid related to the prograde metamorphism. For Juomasuo deposit, the results for the population I are between +6 and +17 ‰ and for the population II between -7 and +16 ‰. These results show that the fluid has an evaporitic source.

Comparisons between deposits of the study and other Archean and Proterozoic gold deposits have been made. It shows that the fluid has the most important role on the chemistry and the isotopy of tourmalines. The role of the closer host rock is quite null, but the different rocks which were traversed by the fluid all along its flow could influence the fluid's composition.

Remerciements

Je tiens à remercier Anne-Sylvie André-Mayer et Antonin Richard pour m'avoir proposé ce sujet. J'ai beaucoup apprécié travailler avec eux, car une bonne ambiance de travail, c'est primordial. Ce travail m'a aussi permis de me rendre compte de ce qu'était la recherche en métallogénie. J'ai tellement aimé que je souhaite faire ça toute ma vie dans mon travail ! Et pour ça je remercie encore mes tuteurs de stage. Je remercie aussi Aurélien Eglinger pour ses conseils avisés et sa bonne humeur, ainsi que Didier Béziat pour son aide à propos des gisements de Guibaré et Fété Kolé. Merci aussi à Ferenc Molnár pour les échantillons de Juomasuo.

J'ai passé de longues journées (même le samedi !) au CRPG et pour ça je voudrais dire un grand merci à Johan Villeneuve, parce que même le samedi c'est cool ! (surtout quand Antonin amène les croissants) J'aimerais aussi remercier Andrey Gurenko pour son aide et pour m'avoir laissé piloter la SIMS (!!!!!).

Merci aussi à Lise Salsi et à Olivier Rouer pour leur aide et leur disponibilité.

Merci à Hilaire, mon stagiaire préféré. Ta maitresse est fière de toi !

L'ambiance de bureau était géniale, alors pour ça je remercie mes collègues des bureaux 617 et 613, et plus particulièrement Ulgulu et Bolox pour les soirées qu'on a passées ensemble avec notre MJ préféré.

Je remercie mon Louis pour son soutien sans faille et aussi parce que, sans lui, mes journées auraient été tristes et ma motivation se serait envolée.

A mes parents qui sont toujours là pour moi et à qui je dois tout.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	2
Remerciements	3
Présentation du laboratoire	8
Introduction	8
1. Contexte géologique	9
1.1. Les gisements d'Afrique de l'Ouest	9
1.1.1. Le craton Ouest Africain	9
1.1.2. La ceinture de roches vertes de Tenkodogo	10
1.1.3. La ceinture de roches vertes de Goren.....	11
1.1.4. La ceinture de roches vertes de Bouroum	11
1.1.5. L'or orogénique dans le craton Ouest Africain	11
1.1.6. Le gisement de Kiaka	12
1.1.7. Les gisements de Guibaré et Fété Kolé	13
1.2. Les gisements de Finlande.....	14
1.2.1. Le bouclier Fennoscandien.....	14
1.2.2. La ceinture de roches vertes de Kuusamo	15
1.2.3. Le gisement de Juomasuo.....	15
2. Méthodologie.....	17
3. Résultats.....	19
3.1. Pétrographie.....	19
3.2. Cristallochimie des tourmalines	32
3.3. Isotopie du B sur les tourmalines	37
3.4. Mise en relation de la cristallochimie et de l'isotopie	41
4. Discussion.....	43
4.1. Comparaison avec les données existantes	43
4.1.1. Chimie	43
4.1.2. Isotopie	44
4.2. Implication sur l'origine du bore et des fluides.....	46
4.2.1. Chimie	46
4.2.2. Isotopie	46
Conclusion.....	49
Perspectives	49
Bibliographie	50
Annexes.....	53

Table des figures

Figure 1 : Géologie de l'Afrique de l'Ouest (modifié d'après Béziat, et al., 2008 ; Fontaine, 2012)	9
Figure 2 : Phases tectoniques pour l'Ouest du Burkina Faso pendant l'orogénèse éburnéenne (modifié d'après Baratoux, et al., 2011) (ME = magmatic event)	10
Figure 3 : Géologie de Burkina Faso et de l'exploration aurifère (Volta Ressources)	11
Figure 4 : Schéma de la carte géologique du Burkina Faso montrant les minéralisations étudiées (Béziat, et al., 1999)	13
Figure 5 : Les trois domaines géologiques principaux de la Finlande ; la distribution des mines d'or et d'autres dépôts majeurs (modifié d'après Eilu, et al., 2003)	14
Figure 6 : Carte géologique de la zone des schistes de Kuusamo (modifié d'après Geological Survey of Finland, s.d.) Le gisement de Juomasuo est entouré en jaune.	16
Figure 7 : Echelle de temps des différentes altérations et des minéralisations du gisement de Juomasuo (Vanhanen, 2001)	17
Figure 8 : Conditions analytiques de la microsonde électronique pour l'analyse des tourmalines	18
Figure 9 : Séquence paragenétique de l'échantillon 04061481	19
Figure 10 : Tourmalines de l'échantillon 04061481 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Py = Pyrite, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure ; (D) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points SIMS	20
Figure 11 : Séquence paragenétique de l'échantillon 05061485	21
Figure 12 : Tourmalines de l'échantillon 05061485 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure	21
Figure 13 : Séquence paragenétique de l'échantillon 04061441	22
Figure 14 : Tourmalines de l'échantillon 04061441 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure	23
Figure 15 : Séquence paragenétique de l'échantillon 04061480	24
Figure 16 : Tourmalines de l'échantillon 04061480 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Py = Pyrite, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure	24
Figure 17 : Séquence paragenétique de l'échantillon Gui4b	25
Figure 18 : Tourmalines de l'échantillon Gui4b (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Qz = Quartz, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS	25

Figure 19 : Séquence paragenétique de l'échantillon FK1	25
Figure 20 : Tourmalines de l'échantillon FK1 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS.....	26
Figure 21 : Séquence paragenétique de l'échantillon FK4	26
Figure 22 : Tourmalines de l'échantillon FK4 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) & (C) Photographies MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS.....	27
Figure 23 : Séquence paragenétique de l'échantillon FETb	27
Figure 24 : Tourmalines de l'échantillon FETb (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Qz = Quartz, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS.....	28
Figure 25 : Séquence paragenétique de l'échantillon KDH291.562-2	28
Figure 26 : Tourmalines de l'échantillon KDH291.562-2 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS	29
Figure 27 : Séquence paragenétique de l'échantillon KDH29 311.8.....	30
Figure 28 : Tourmalines de l'échantillon KDH29 311.8 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Bt = Biotite ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS	31
Figure 29 : Formules structurales des tourmalines analysées lors cette étude	32
Figure 30 : A gauche : Diagrammes ternaires du groupe des tourmalines primaires basé sur l'occupation du site X pour les gisements de Juomasuo (A), Kiaka (C), Guibaré (E) et de Fété Kolé (G) ; A droite : Sous-systèmes Dravite-Schorl-Elbaïte basé sur l'occupation du site Y pour les gisements de Juomasuo (B), Kiaka (D), Guibaré (F) et Fété Kolé (H) (d'après Henry et al., 2011).....	33
Figure 31 : Diagramme Al-Fe-Mg avec les domaines de tourmaline de différents types de roche pour les gisements de Juomasuo (A), Kiaka (B), Guibaré (C) et Fété Kolé (D).....	35
Figure 32 : Occupation du site X en fonction de l'occupation du site Y pour les gisements de Juomasuo, Kiaka, Guibaré et Fété Kolé	36
Figure 33 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Kiaka	37
Figure 34 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Fété Kolé	38
Figure 35 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Guibaré	38
Figure 36 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Juomasuo	39
Figure 37 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides des gisements, de haut en bas, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo	40
Figure 38 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides en fonction de l'occupation du site X des tourmalines, pour les gisements, de haut en bas et de droite à gauche, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo.....	42
Figure 39 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides en fonction de l'occupation du site Y des tourmalines, pour les gisements, de haut en bas et de droite à gauche, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo.....	43

Figure 40 : Compositions isotopiques en fonction des roches encaissantes et de l'origine des fluides (A), comparées aux valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de gisements d'or archéens et protérozoïques (B) (Beaudoin, et al., 2013, Garda, et al., 2009, Jiang, et al., 2002, Krienitz, et al., 2008, Talikka & Vuori, 2010) et aux valeurs des gisements étudiés (C) (modifié d'après Marschall & Jiang, 2011)

..... 45

Table des annexes

Annexe 1 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061481 (Juomasuo).....	53
Annexe 2 : Planches pétrographiques de l'échantillon 05061485 (Juomasuo).....	55
Annexe 3 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061441 (Juomasuo).....	57
Annexe 4 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061480 (Juomasuo).....	59
Annexe 5 : Planches pétrographiques de l'échantillon Gui4b (Guibaré).....	61
Annexe 6 : Planches pétrographiques de l'échantillon FETb (Fété Kolé).....	62
Annexe 7 : Planches pétrographiques de l'échantillon FK1 (Fété Kolé).....	63
Annexe 8 : Planches pétrographiques de l'échantillon FK4 (Fété Kolé).....	64
Annexe 9 : Planches pétrographiques de l'échantillon KDH291.562-2 (Kiaka).....	65
Annexe 10 : Planches pétrographiques de l'échantillon KDH29 311.8 (Kiaka).....	67
Annexe 11 : Résultats microsonde et formule structurales des tourmalines.....	68
Annexe 12 : Profils microsonde des tourmalines.....	73
Annexe 13 : Tableau récapitulatif des encaissants des gisements de l'étude et des gisements d'or comparatifs.....	78

Présentation du laboratoire

Ce stage de Master 2 s'est effectué au sein du laboratoire GéoRessources sous l'encadrement d'Anne-Sylvie André-Mayer et d'Antonin Richard.

GéoRessources est un laboratoire de recherche fondamentale en Sciences de la Terre et de l'Environnement. Les principaux domaines d'étude du laboratoire sont les ressources minérales et énergétiques, le stockage du CO₂ et les polluants organiques et métalliques en subsurface.

Introduction

Les gisements d'or orogénique sont localisés dans les ceintures de roches vertes, dans des encaissants constitués de métasédiments et de roches méta-volcaniques métamorphisées dans le facies Schiste Vert à Amphibolite. Les gisements sont distribués dans ces ceintures le long de failles crustales. La majorité des gisements d'or sont archéens, paléoprotérozoïques ou phanérozoïques. Ceux étudiés ici sont paléoprotérozoïques. Les deux sources possibles de l'or sont (1) les roches métamorphiques desquelles sont générés des fluides lors de l'augmentation de la température et (2) les magmas felsiques intermédiaires qui libèrent des fluides lorsqu'ils cristallisent (Tomkins, 2014). Les sources de fluide possibles sont les roches mafiques hydratées et le métamorphisme de roches sédimentaires carbonatées à pyrites (Tomkins, 2014). La présence de bore est systématiquement relevée avec la minéralisation en or.

Le bore est un élément largement distribué dans les roches et les fluides aqueux. Les deux isotopes naturels et stables du bore sont le ¹⁰B et le ¹¹B, avec une abondance respective de 19.9% et 80.1% (de Groot, 2009). Le bore est un élément incompatible et très soluble dans les fluides aqueux. Il y a aussi une balance de masse importante entre les isotopes. Ces caractéristiques font du bore un bon traceur des fluides profonds et des processus de recyclage des roches. Les compositions isotopiques des eaux naturelles (eau de mer, fluides hydrothermaux,...) sont différentes pour chaque réservoir. De ce fait, il est possible d'utiliser ces compositions isotopiques pour tracer la ou les sources des fluides dans les différents processus hydrologiques ou lors des interactions eau/roche.

Les tourmalines sont des cyclosilicates de bore de formule $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$, où X peut être du Na, Ca, K ou un site vacant, Y, du Fe^{II}, Mg, Mn^{II}, Al, Li, Fe^{III} ou Cr^{III}, et Z, du Al, Fe^{III}, Mg ou Cr^{III}. Le site T peut être occupé par du Si ou de l'Al, le site V, par du OH⁻ ou du O²⁻ et le site W par du OH⁻, F⁻ ou de l'O²⁻. Les différentes substitutions possibles dans la structure du minéral conduisent à une importante variété de tourmalines, avec une série continue entre elles (Henry, et al., 2011). Les tourmalines étant ubiquistes dans les gisements d'or orogéniques, l'étude de leur cristallogénèse et des isotopes du bore est possible pour tous les gisements.

Des analyses cristallogénétiques et isotopiques (isotopes du B) seront effectuées lors de cette étude sur quatre gisements d'or. Trois de ces gisements se trouvent au Burkina Faso (Kiaka, Fété Kolé, Guibaré) et le quatrième se situe en Finlande (Juomasuo). Tout d'abord, le contexte géologique de chaque gisement sera décrit, puis la méthodologie utilisée pour l'étude sera détaillée. Cela sera suivi par la présentation des résultats obtenus et enfin, une discussion de ces résultats sera proposée.

1. Contexte géologique

Le développement de l'exploration des gisements d'or orogénique paléoprotérozoïques a permis depuis quelques années d'avoir accès aux données sur ces gisements. C'est le cas notamment pour le craton Ouest Africain et le craton Fennoscandien.

1.1. Les gisements d'Afrique de l'Ouest

1.1.1. Le craton Ouest Africain

Le craton Ouest Africain peut être divisé en deux domaines, la dorsale de Réguibat au Nord et la dorsale de Man au Sud (Figure 1). Cette dernière est composée de deux parties, le domaine Kenema Man à l'Ouest et le domaine Baoulé-Mossi à l'Est. Le premier domaine est constitué de terrains Archéens et le second, de terrains Paléoprotérozoïques. Les gisements africains étudiés lors de ce stage se trouvent dans le domaine Baoulé-Mossi.

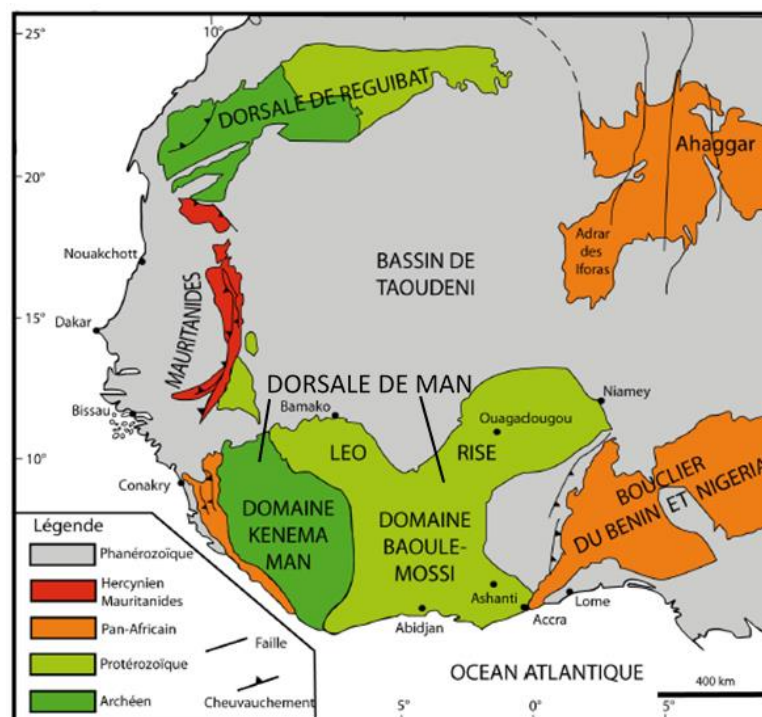


Figure 1 : Géologie de l'Afrique de l'Ouest (modifié d'après Béziat, et al., 2008 ; Fontaine, 2012)

Les terrains du domaine Baoulé-Mossi, du Sénégal au Ghana, sont des terrains d'âge Birimien, compris entre 2.12 et 1.95 Ga. Ils sont divisés en deux ensembles : (1) le Birimien inférieur B1, entre 2.12 et 2.09 Ga, constitué de flyschs provenant de l'érosion de granites plus anciens, et (2) le Birimien supérieur, entre 2.09 et 1.95 Ga, constitué de roches volcaniques et volcanosédimentaires.

L'orogène subie par ces terrains est l'orogène éburnéenne. Ce cycle orogénique s'étend de 2.4 à 1.6 Ga (Yacé, 1984). Il peut être décomposé en trois phases tectono-métamorphiques qui affectent les terrains Birimiens. La phase D1 (de 2.16 à 2.11 Ga) correspond à la collision entre le craton du Congo et le craton de Man et aurait stoppé le dépôt du B1 et mis en place des granodiorites formant une structure en dômes (granodiorites) et bassins (volcano-sédiments), les phases D2 et D3 (de 2.11 à 1.98 Ga) sont le siège de la mise en place de granitoïdes mantelliques au sein de la croûte et de décrochements crustaux (Baratoux, et al., 2011) (Figure 2).

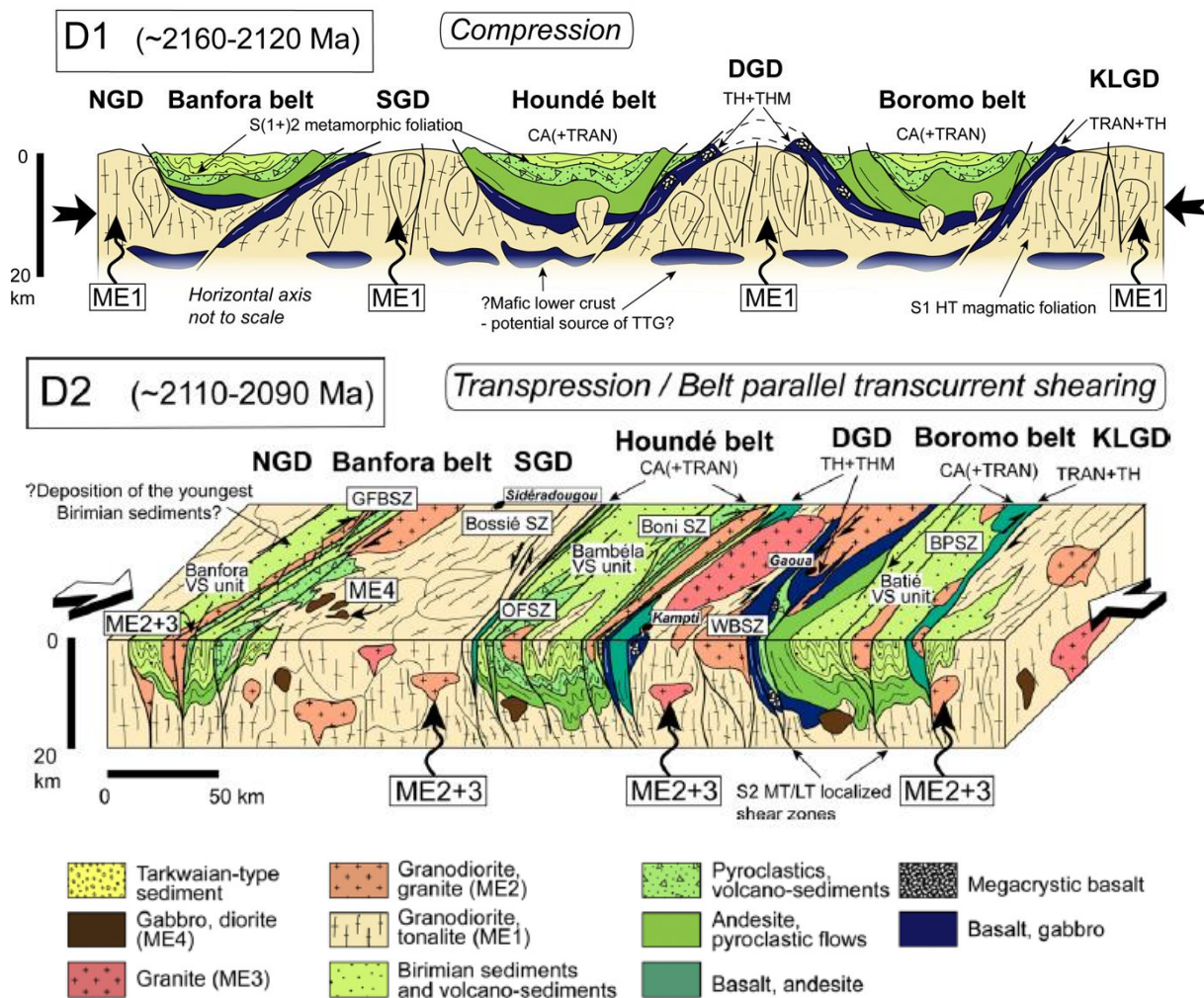


Figure 2 : Phases tectoniques pour l'Ouest du Burkina Faso pendant l'orogénèse éburnéenne (modifié d'après Baratoux, et al., 2011) (ME = magmatic event)

1.1.2. La ceinture de roches vertes de Tenkodogo

La ceinture de roches vertes de Tenkodogo se trouve à l'Est du Burkina Faso et est orientée NE-SW (Figure 3). A la base, une puissante série de basaltes en coussins métamorphisée a été retrouvée intercalée avec des métasédiments. Cette série est suivie par une série métasédimentaire intercalée avec des bancs de marbre associés à des volcanites calco-alcalines. Le métamorphisme enregistré dans la ceinture est du faciès Schistes Verts, pouvant aller localement jusqu'au faciès Amphibolite à cause de l'intrusion de plutons basiques (gabbros) dans les metabasaltes et les métavolcanites (Naba, 1999). Les roches plutoniques de cette zone ont été distinguées en fonction de leur pétrologie et de leur âge (Castaing, et al., 2003). Le premier groupe est constitué de formations de TTG calco-alcalins lités et semble correspondre à l'épisode ME1 (Figure 2). Ces TTG ont été daté à 2.17 Ga (Castaing, et al., 2003). Ils ont ensuite été intrudés par des granites potassiques à biotites qui constituent le second groupe et ont été datés entre 2.13 et 2.11 Ga (Castaing, et al., 2003). Ce groupe semble correspondre aux épisodes magmatiques ME2 et ME3 (Figure 2).

1.1.3. La ceinture de roches vertes de Goren

La ceinture de roches vertes de Goren se situe au Nord du Burkina Faso et est orientée WNW-ESE (Figure 3). Deux formations Birimiennes ont été décrites dans cette ceinture : (1) des roches volcano-sédimentaires, intercalées avec des métasédiments fluvio-deltaïques (Birimien inférieur), qui ont été recouvertes de manière discordante par (2) une série volcanoclastique (Birimien supérieur). Ces formations Birimiennes ont été déformées pendant l'orogénèse éburnéenne vers 2.1 Ga, et intrudées par une série de granitoïdes syn à post-tectonique (Hein, et al., 2004).

Dans le détail, la ceinture est constituée (1) d'une unité inférieure composée de greywacke, de tuff et de dômes rhyolitiques et est recouverte de manière discordante par (2) une succession de basaltes tholeitiques massifs intercalés avec des brèches hyaloclastiques, et enfin (3) la dernière unité est une succession calco-alcaline de dacites (tuff et coulées) intercalées avec des andésites (tuff) (Hein, et al., 2004).

1.1.4. La ceinture de roches vertes de Bouroum

La ceinture de roches vertes de Bouroum se trouve à environ 200 km au NE de Ouagadougou et est orientée NW-SE (Figure 3). La lithologie de cette ceinture est la suivante : (1) des métagranites, métagabbro-diorites et des métaquartzites à la base, recouverts par (2) des coulées de lave mafique et des pillow-lavas, présentant des affinités avec les tholéiites de plancher océanique, associés à des pyroclastites, des roches volcaniques et des sédiments immatures (quartzite, greywackes, siltstones, pélites) en base de série et des andésites calco-alcalines, des dacites et des lamprophyres en montant dans la série. Enfin, (3) des plutons basiques à intermédiaires ont intrudé les séries décrite ci-dessus (Bourges, et al., 1998).

1.1.5. L'or orogénique dans le craton Ouest Africain

Les gisements d'or se trouvent en bordure de cratons, dans les ceintures de roches vertes Birimiennes (entre 2.12 et 1.95 Ga) (Figure 3).

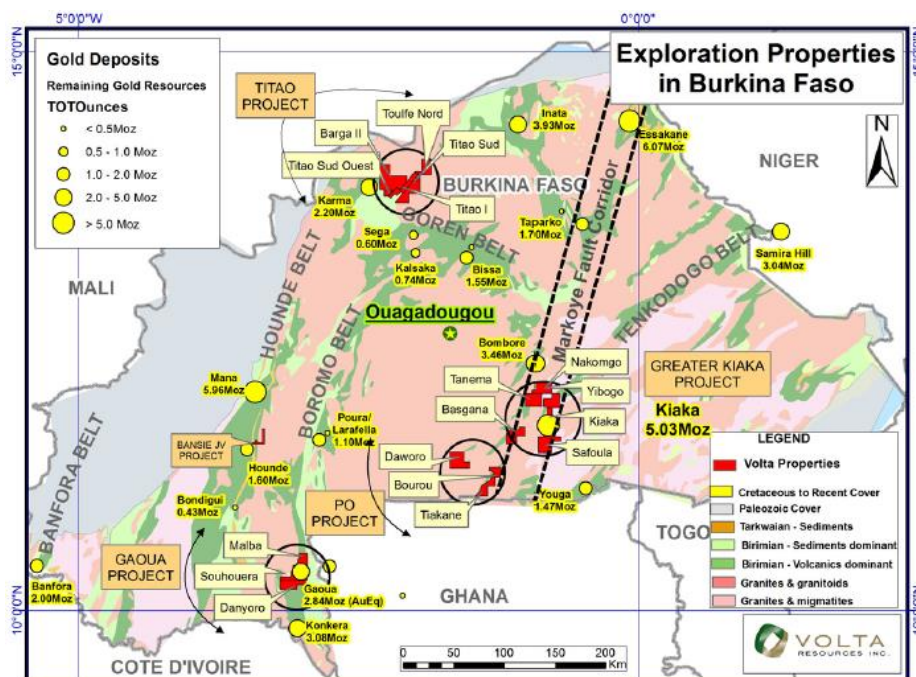


Figure 3 : Géologie de Burkina Faso et de l'exploration aurifère (Volta Ressources)

Milési, et al., 1992 ont classé les différents types de minéralisation en 3 catégories en fonction des différents événements tectoniques. Le type (1) est constitué de dépôts stratiformes d'Au, Fe et Mn, pré-datant les déformations et le métamorphisme et se trouvant dans des zones témoins d'un contexte géodynamique d'extension, c'est-à-dire, avant la collision D1. Le type (2) représente des dépôts syn-orogéniques (post-D1 à syn-D2). Ces minéralisations sont composées d'or et de sulfures disséminés dans des paléoplacers tarkwaïens à conglomérats. Enfin, le type (3) correspond à des minéralisations d'or dans des veines tardi à post-orogéniques.

Une autre classification a été réalisée par Béziat, et al. (2008). Celle-ci est basée sur la géométrie et le style de la minéralisation, et elle présente 2 types de minéralisations aurifères. Le type (1) correspond à de l'or associé à des veines de quartz, pouvant être accompagnées de tourmalines ou de sulfures. Ce type est retrouvé dans des zones de cisaillement ou dans des fentes de tension. Le type (2) représente des minéralisations disséminées dans les zones d'altération (chlorite, albite et carbonates). Ces deux types de minéralisation peuvent être présents au sein d'un même gisement. Le type (1) se trouve principalement dans des séries tholéitiques et dans des unités felsiques à affinité calco-alcaline du Birimien supérieur. Quant aux minéralisations disséminées, elles sont principalement retrouvées dans des roches felsiques à affinité calco-alcaline et dans des métasédiments. Les gisements de Fété Kolé et Guibaré peuvent être classés dans le type (1) et les gisements de Kiaka et Juomasuo dans le type (2).

D'après Groves (1993), une grande partie des gisements filoniens se mettrait en place selon le modèle continu. Celui-ci explique que les minéralisations en or dans les ceintures de roches vertes ne se sont mises en place qu'au moment du pic de température du métamorphisme, et cela dans un intervalle de pression/température assez grand (entre 180 et 700°C et entre 1 et 5 kbars). Un modèle alternatif à celui-ci existe néanmoins. Il s'agit du modèle métamorphique, expliqué par Tomkins (2010). Celui-ci a calculé que la température nécessaire pour qu'un fluide métamorphique puisse transporter des sulfures associés à l'or, devait correspondre à la température de dernière déshydratation de la chlorite (entre 500 et 550°C). Avec ce modèle, la formation de l'or aurait lieu lors du trajet prograde en provoquant des réactions de dévolatilisation (Phillips & Powell, 2009), dans les faciès allant de Schiste Vert à Amphibolite, avec des changements de la paragenèse primaire lors du trajet rétrograde.

1.1.6. Le gisement de Kiaka

Le gisement d'or de Kiaka se situe au Burkina Faso, à une centaine de kilomètres au SW de Ouagadougou (Figure 3). Il est encaissé dans des terrains Paléoprotérozoïques du Birimien, à l'intersection entre la ceinture de roches vertes de Tenkodogo et l'accident cisailant de Markoye (orientée NNE) (B2GOLD CORP, 2014).

Le gisement est encaissé dans des séries volcanosédimentaires constituées de metabasites et de métasédiments. Ces derniers sont composés de métapélites, de métagrauwackes et de micaschistes. Les roches mafiques métamorphisées atteignent le faciès Amphibolite.

Les teneurs en or maximales sont retrouvées aux contacts entre les métasédiments et les metabasites. Les intrusions granitiques et les pegmatites ne présentent pas de minéralisation. Ces observations permettent de dire qu'il y a un contrôle lithologique de la minéralisation (Fontaine, 2012).

A Kiaka, l'or est associé à des altérations à silice, biotite, chlorite et tourmaline. Les sulfures présents sont principalement des pyrrhotites, de la pyrite fine et de l'arsénopyrite disséminées ou incluses dans les structures témoins des déformations régionales (foliation, veines). L'or, sous forme d'électrum, se trouve dans des zones présentant de la chlorite néoformée, ainsi que de la calcite, biotite et clinozoïsite qui se sont formées lors d'évènements hydrothermaux. L'or est également présent dans les veines de quartz, entre les grains de quartz ou à l'intérieur des cristaux de biotite.

1.1.7. Les gisements de Guibaré et Fété Kolé

Ces gisements seront présentés ensemble car ils ont beaucoup de similarités. Les gisements de Guibaré et Fété Kolé se situent au Burkina Faso. Le premier est localisé à 75 km au Nord de Ouagadougou et le second se trouve au Nord du Burkina Faso, à la frontière avec le Mali (Béziat, et al., 1999) (Figure 4). Ils sont encaissés dans des roches Birimiennes dans la ceinture de roches vertes de Goren (Guibaré) et de Bouroum (Fété Kolé).

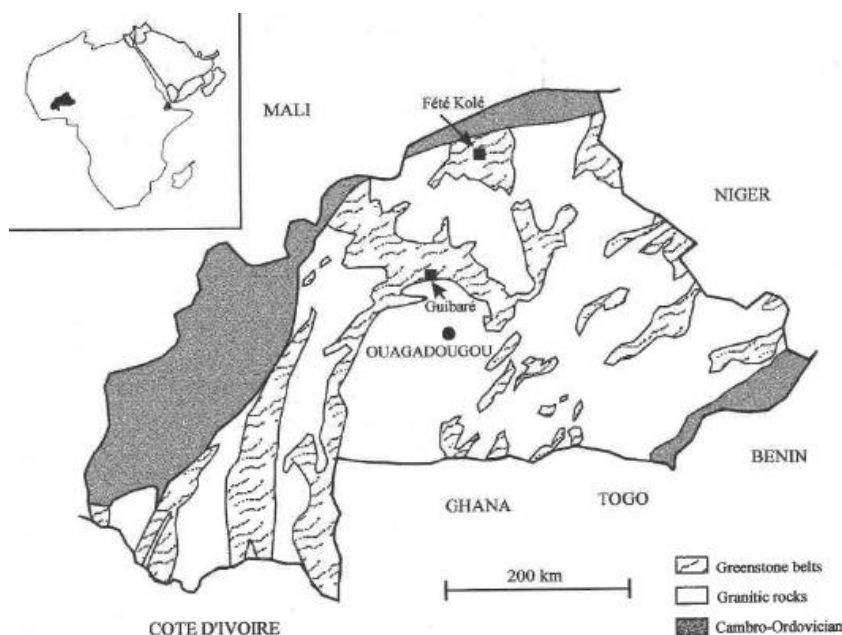


Figure 4 : Schéma de la carte géologique du Burkina Faso montrant les minéralisations étudiées (Béziat, et al., 1999)

Les minéralisations en or sont retrouvées dans des veines à quartz et tourmalines pouvant faire entre 1 cm et 2 m de large et entre quelques dm et 50 m de long (Béziat, et al., 1999).

A Guibaré, les roches encaissantes vont d'ultrabasiques à basiques. Elles contiennent de la chlorite, de la dolomite ferrique et des reliques de chromite. Ces roches sont riches en Mg (12 wt% MgO), en Cr (1700 ppm) et en Ni (330 ppm). A Fété Kolé, les roches encaissantes sont : (1) des métasédiments (métapélites) contenant de la phengite et peu de quartz, et (2) des roches métavolcaniques contenant de la chlorite, de l'ilménite, de quartz, de la clinozoïsite et de la calcite avec des contenus en Mg, Cr et Ni plus faibles qu'à Guibaré (respectivement 3 wt%, 80 ppm et 70 ppm) (Béziat, et al., 1999).

Dans ces gisements, l'or n'est pas associé aux sulfures, mais il est concentré dans des poches ou géodes de cristaux de tourmaline en formant des grains « en plaquette » (< 2 mm) aux extrémités des cristaux de tourmaline. Il se présente aussi sous la forme de petits grains (< 100

µm) en remplissage des fractures des tourmalines. Plus rarement, l'or est retrouvé entre les grains de quartz, à proximité des tourmalines (Béziat, et al., 1999).

1.2. Les gisements de Finlande

1.2.1. Le bouclier Fennoscandien

En Finlande, le bouclier Fennoscandien peut être divisé en trois domaines ayant une histoire commune depuis 1.8 Ga. Ces unités crustales comportent un cœur Archéen, le Karelian craton, qui est entouré par deux domaines Paléoprotérozoïques, le domaine de Lapland au Nord et le domaine Svecofennien au Sud (Eilu, et al., 2003). Le gisement finlandais étudié ici se trouve dans le domaine Lapland (Figure 5).

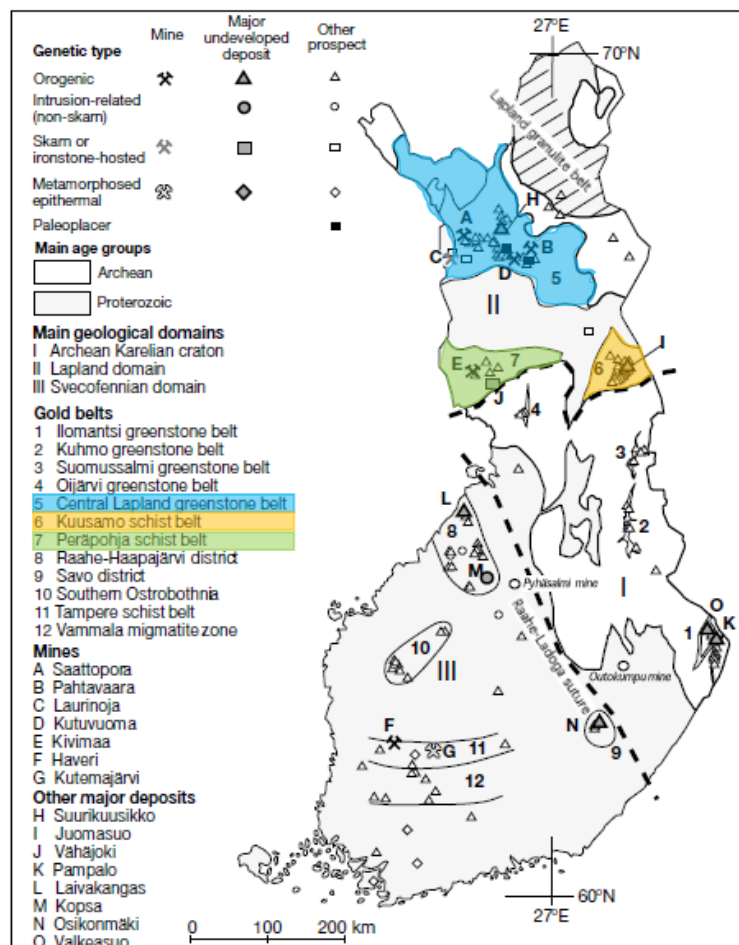


Figure 5 : Les trois domaines géologiques principaux de la Finlande ; la distribution des mines d'or et d'autres dépôts majeurs (modifié d'après Eilu, et al., 2003)

Le domaine Lapland présente trois ceintures de roches vertes : la Central Lapland Green Belt au Nord, la ceinture de Peräpohja au Sud-Ouest du domaine et la ceinture de Kuusamo au Sud-Est du domaine. Ce domaine a enregistré une évolution des dépôts Paléoproterozoïques pendant 600 Ma, commençant à environ 2450 Ma avec des laves komatiitiques à rhyolitiques, issues d'un plume mantellique, sur le craton Archéen. Cette phase magmatique comprend aussi la mise en place d'importantes intrusions mafiques litées. Pendant les 300 à 400 Ma suivantes, un dépôt épais et transgressif de quartzite-dolomite-basalte-pélite a eu lieu et a été suivi par un volcanisme komatiitique à picritique. Les magmas mafiques ont formé des intrusions litées sous forme de sills dans les sédiments vers 2220 et 2050 Ma. Ces formations étant dues à un régime d'extension, leur dépôt s'arrête lorsque commence la phase de collision, qui provoque le déplacement du slab de l'ancienne lithosphère (le groupe Kittilä) sur le craton. Ceci s'est produit vers 1920 Ma, d'après les dikes felsiques et les plutons granodioritiques datés de cet âge dans le groupe Kittilä. A peu près en même temps, un complexe calco-alcalin juvénile s'est formé plus au Nord et a été presque immédiatement suivi par le soulèvement de la ceinture de granulite du Lapland. La séquence des roches du Lapland a ensuite été complétée par le dépôt de molasses, de sédiments grossiers dans un bassin d'avant-arc peu après le plutonisme felsique daté à 1880 Ma et accompagné d'un volcanisme mineur (Hanski & Huhma, 2005).

1.2.2. La ceinture de roches vertes de Kuusamo

La ceinture de roches vertes de Kuusamo (Figure 6) est composée en majorité de quartzite et de métapélite, et comprend des roches appartenant à une couverture sédimentaire et volcanique, datée entre 2.5 et 2.1 Ga, qui s'est déposée en discordance sur le socle Archéen (3.0 à 2.6 Ga). Les roches couverture sont les formations « Kareliennes ». Elles se sont mises en place lors de la phase d'extension qui a débuté dans le craton Fennoscandien vers 2.50-2.44 Ga et a continué jusqu'à 2.0 Ga. Les formations Kareliennes ont subi des plissements polyphasés ainsi que du métamorphisme durant l'orogénèse Svecofénienne (entre 1.9 et 1.8 Ga) (Strand & Laajoki, 1999).

1.2.3. Le gisement de Juomasuo

C'est une campagne d'exploration électromagnétique et magnétique aéroportée qui a permis de découvrir le gisement de Juomasuo en 1985. Il s'agit du gisement le plus important de toute la ceinture de roches vertes de Kuusamo. Il est localisé à 45 km au Nord de la ville de Kuusamo et est contrôlé par un cisaillement orienté NW-SE (Figure 6).

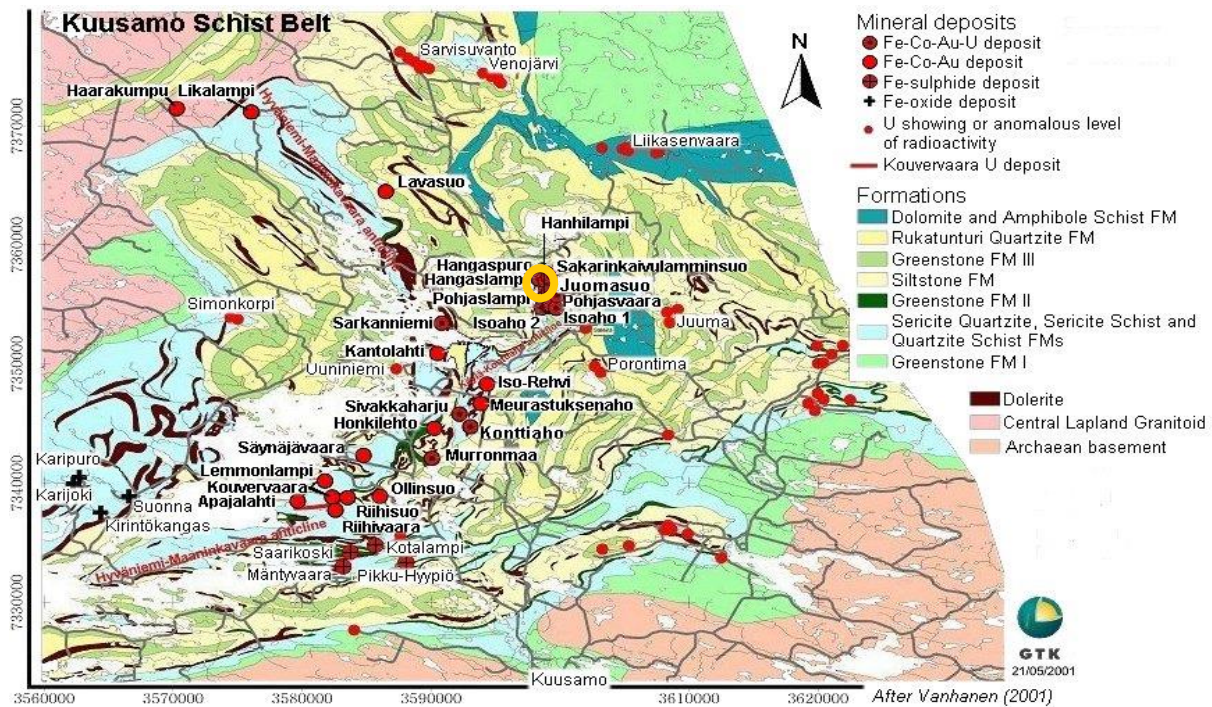


Figure 6 : Carte géologique de la zone des schistes de Kuusamo (modifié d'après Geological Survey of Finland, s.d.) Le gisement de Juomasuo est entouré en jaune.

La principale zone minéralisée a été estimée avec 1.8 Mt, avec une teneur en Co de 0.2 % et en Au de 3 ppm. Si on ne considère que l'or comme seul métal exploitable, les réserves sont estimées à 0.7 Mt pour une teneur en Au de 6 ppm (Pankka & Vanhanen, 1989).

A proximité de la zone minéralisée, les roches sont très albitisées et sont majoritairement d'origine sédimentaire. En effet, elles appartiennent à la formation SQF (Sericite Quartzite Formation) qui s'est mise en place en contexte de transgression. Toutefois, des sills ultramafiques sont retrouvés au contact des roches minéralisées (Vanhanen, 2001).

Le gisement a été divisé en deux parties (Pankka, 1992) : (1) le gisement de cobalt inclus dans des roches contenant du quartz et de la chlorite, et (2) le gisement d'or et cobalt où les roches comprennent du quartz, de la séricite et de la chlorite.

Les albitites à proximité des roches minéralisées sont issues d'une albitisation diagénétique puis épigénétique. Elles ont ensuite été altérées en subissant, dans l'ordre, une carbonatation, un métasomatisme à Fe et Mg et, pour finir, un métasomatisme potassique. Un métasomatisme à bore a également été observé grâce à l'observation des tourmalines et a été estimé vers 2.05 Ga (Vanhanen, 2001) (Figure 7).



Figure 7 : Echelle de temps des différentes altérations et des minéralisations du gisement de Juomasuo (Vanhanen, 2001)

L'or, dans ce gisement, s'est mis en place à la fin du métasomatisme à Mg et Fe et pendant le métasomatisme potassique. Malgré une quantité importante, l'or est peu visible. En effet, il se trouve en inclusions microscopiques dans les cristaux de pyrite, pyrrhotite, cobaltite et molybdénite (Vanhanen, 2001).

2. Méthodologie

Les tourmalines étudiées ont été observées et photographiées à l'aide d'un microscope électronique à balayage Hitachi S-4800 sous une tension d'accélération de 15 kV.

Les compositions chimiques des tourmalines ont été obtenues à l'aide d'une microsonde électronique Cameca SX100 sous un courant d'émission de 12 nA et une tension d'accélération de 15 kV (GeoRessources, Nancy). De l'albite a été utilisée comme standard pour le Na et le Si, de l'olivine pour le Mg, un standard artificiel d' Al_2O_3 pour l'Al, de l'orthose pour le K, de l'andradite pour le Ca, un standard artificiel de MnTiO_3 pour le Ti et le Mn, un standard artificiel de Fe_2O_3 pour le Fe, de la vanadinite pour le Cl et un standard artificiel de Cr_2O_3 pour le Cr. Les conditions analytiques sont résumées dans le tableau suivant (Figure 8) :

Elément	Spéciation	Cristal	Raie	Pic	Temps de comptage (s)
Na	Sp2	TAP	K α	46314	10
Mg	Sp2	TAP	K α	38447	10
Al	Sp4	TAP	K α	32463	10
Si	Sp4	TAP	K α	27737	10
K	Sp5	LPET	K α	42756	60
Ca	Sp1	PET	K α	38369	10
Ti	Sp1	PET	K α	31397	10
Fe	Sp3	LIF	K α	48083	10
Cl	Sp5	LPET	K α	54027	60
Cr	Sp5	LPET	K α	26181	60
Mn	Sp3	LIF	K α	52199	60

Figure 8 : Conditions analytiques de la microsonde électronique pour l'analyse des tourmalines

Les formules structurales des tourmalines étudiées ont été calculées à l'aide du logiciel WinTcac (Yavuz, et al., 2014). Ce logiciel est un programme développé sous Microsoft Visual Basic. Les formules sont calculées en se basant sur la Subcommittee on Tourmaline Nomenclature (STN) de l'International Mineralogical Association's Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (IMACNMCN). Le calcul de la formule structurale se fait sur la base de 31 atomes d'oxygène, 6 atomes de silicium et 15 cations dans les sites T, Z et Y (Yavuz, et al., 2014) à partir des données obtenues à la microsonde électronique.

Ce programme permet de prédire la localisation des cations dans les différents sites (T, Z, Y et X) de la tourmaline à partir d'analyses microsonde électronique notamment. Il est également possible d'estimer le contenu en OH⁻, F⁻, Cl⁻ et O²⁻ (Yavuz, et al., 2014).

Le nom des tourmalines étudiées est aussi donné par le logiciel en se basant sur les diagrammes de classification de l'IMA d'après Henry, et al., 2011 (Yavuz, et al., 2014).

Pour l'analyse isotopique du bore des tourmalines, une microsonde ionique SIMS 1280-HR a été utilisée (CRPG, Nancy).

Les échantillons étudiés ici ont reçu un faisceau primaire d'O⁺ de 10kV d'un diamètre d'environ 20 μ m. Les ions secondaires de ¹⁰B et ¹¹B ont été analysés avec une résolution de masse de 1999. La discrimination des masses est reproductible et stable quand le faisceau primaire est centré sur un champ de 231 μ m, ce qui permet de maximiser le passage des ions dans le spectromètre. 30 cycles ont été effectués pour chaque analyse.

Les isotopes du bore sont reportés relativement au NIST SRM 951 avec une valeur de 4.04558 pour ¹¹B/¹⁰B (Catanzaro, et al., 1970). Pour la calibration des analyses du $\delta^{11}\text{B}$, trois tourmalines de référence ont été utilisées : (1) le standard Spivack qui est une dravite (Spivack, 1986), (2) la dravite #108796 et (3) la schorl #112566 (Dyar, et al., 2001). Les standards ont été utilisés en fonction du type de tourmaline analysé afin d'éviter les effets de matrice. En effet, un standard dravite a été utilisé pour normaliser les dravites et de même pour les schorls. La reproductivité (2 σ) sur les standards est inférieure à 1.5 (30 analyses) pour le standard Spivack et inférieure à 1 (28 analyses pour la dravite et 24 analyses pour la schorl) pour les deux autres standards.

Les $\delta^{11}\text{B}$ obtenus s'expriment comme suit : $\delta^{11}\text{B} = \left[\frac{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{sample}}}{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{SRM 951}}} - 1 \right] \times 10^3$ et s'expriment en ‰ (Nakano & Nakamura, 2001).

3. Résultats

3.1. Pétrographie

L'échantillon 04061481 de Juomasuo présente une texture granoblastique marquée par les albites. Des reliques de zircon sont présentes dans cette matrice (Annexe 1, A & B). L'albite, qui constitue la majorité de la matrice, se retrouve sous la forme de phénocristaux pouvant mesurer jusqu'à 1000 μm , mais aussi sous la forme de cristaux plus petits d'environ 100 μm . En bordure des amas de grandes albites, il est possible de voir que ces cristaux semblent se désagréger pour former les petits cristaux d'albite (Annexe 1, C & D). Il est alors possible de conclure que les phénocristaux d'albite constituent la première génération d'albite et les cristaux les plus petits sont la seconde génération. Ces derniers sont toujours accompagnés de muscovite (Annexe 1, C & D), ce qui permet de conclure que ces minéraux sont contemporains l'un de l'autre. Les cristaux de tourmaline (Figure 10) sont toujours retrouvés en association avec les amas de pyrite (Annexe 1, E & F) et ils présentent des textures d'équilibre avec les cristaux de biotite. Ces trois minéraux se sont donc mis en place dans le même laps de temps. Des veinules de dolomite recoupent toutes les structures décrites précédemment (Annexe 1, G & H), ce qui permet de conclure que la dolomite est le dernier minéral à s'être formé dans cet échantillon.

La séquence paragénétique réalisée à partir des observations faites ci-dessus s'écrit comme suit (Figure 9) :

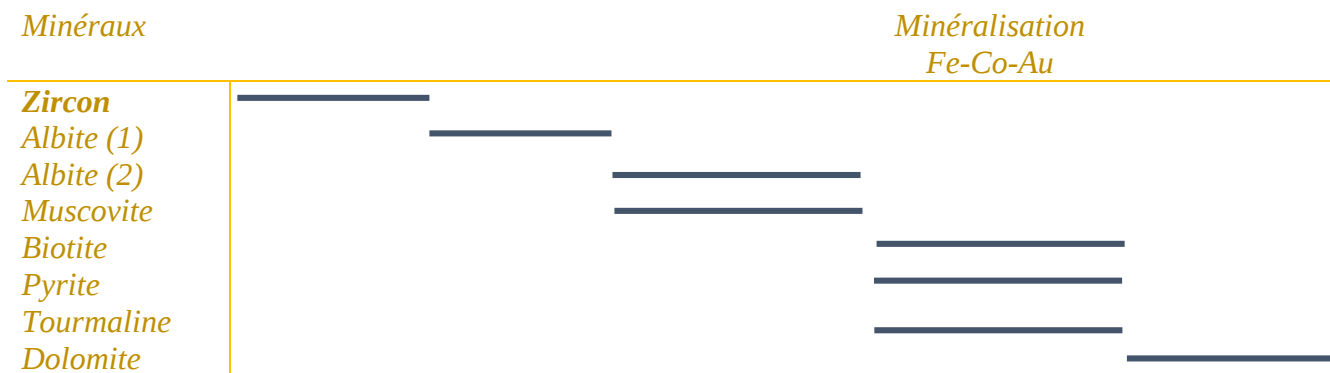


Figure 9 : Séquence paragénétique de l'échantillon 04061481

D'après Vanhanen, 2001, l'assemblage biotite-pyrite-tourmaline, où est représentée l'altération à bore, correspond à la minéralisation à fer, cobalt et or.

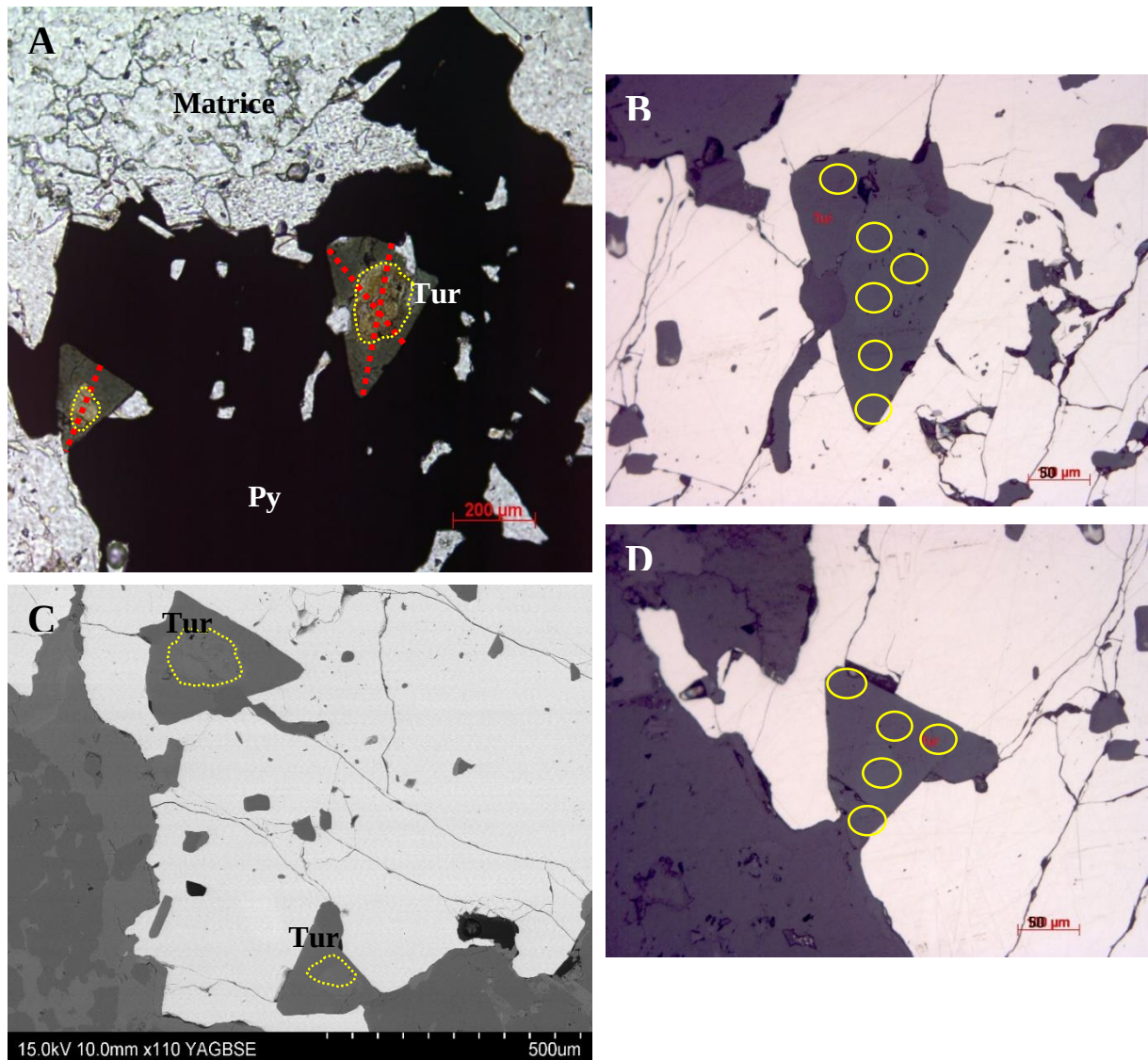


Figure 10 : Tourmalines de l'échantillon 04061481 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Py = Pyrite, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure ; (D) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points SIMS

L'échantillon 05061485 de Juomasuo présente une texture granoblastique marquée par les albites. Les phénocristaux d'albite présentent des textures d'équilibre avec les amas de pyrite (Annexe 2, A & B). Cette observation permet de dire que ces deux minéraux se sont formés en même temps. Les cristaux de tourmaline (Figure 12) sont disséminés dans la matrice d'albite et sont toujours retrouvés accompagnés de biotite (Annexe 2, E & F). Ces même biotites sont présentes sous forme d'amas avec de la séricite (Annexe 2, C & D). Il est alors possible de dire que la tourmaline, la biotite et la séricite sont contemporaines. Des cristaux de talc sont également retrouvés avec les cristaux d'albite les plus petits. Ces albites semblent être issues de la désagrégation des phénocristaux d'albite (Annexe 2, G & H). Certains de ces cristaux d'albite 2 présentent des inclusions de biotite, ils se sont donc formés après la biotite et en même temps que le talc.

Ces observations permettent de réaliser la séquence paragenétique suivante (Figure 11) :

Minéraux	Minéralisation Fe-Co-Au	Minéralisation Fe-Co-Au
Pyrite	=====	
Albite (1)	=====	
Tourmaline	=====	
Biotite	=====	
Séricite	=====	
Albite (2)		=====
Talc		=====

Figure 11 : Séquence paragenétique de l'échantillon 05061485

Les phases d'altération reportées par Vanhanen, 2001, permettent de dire que l'assemblage tourmaline-biotite-séricite correspond à une première minéralisation en fer, cobalt et or ; l'assemblage biotite-séricite-albite(2)-talc correspondrait alors à une deuxième minéralisation en fer, cobalt et or.

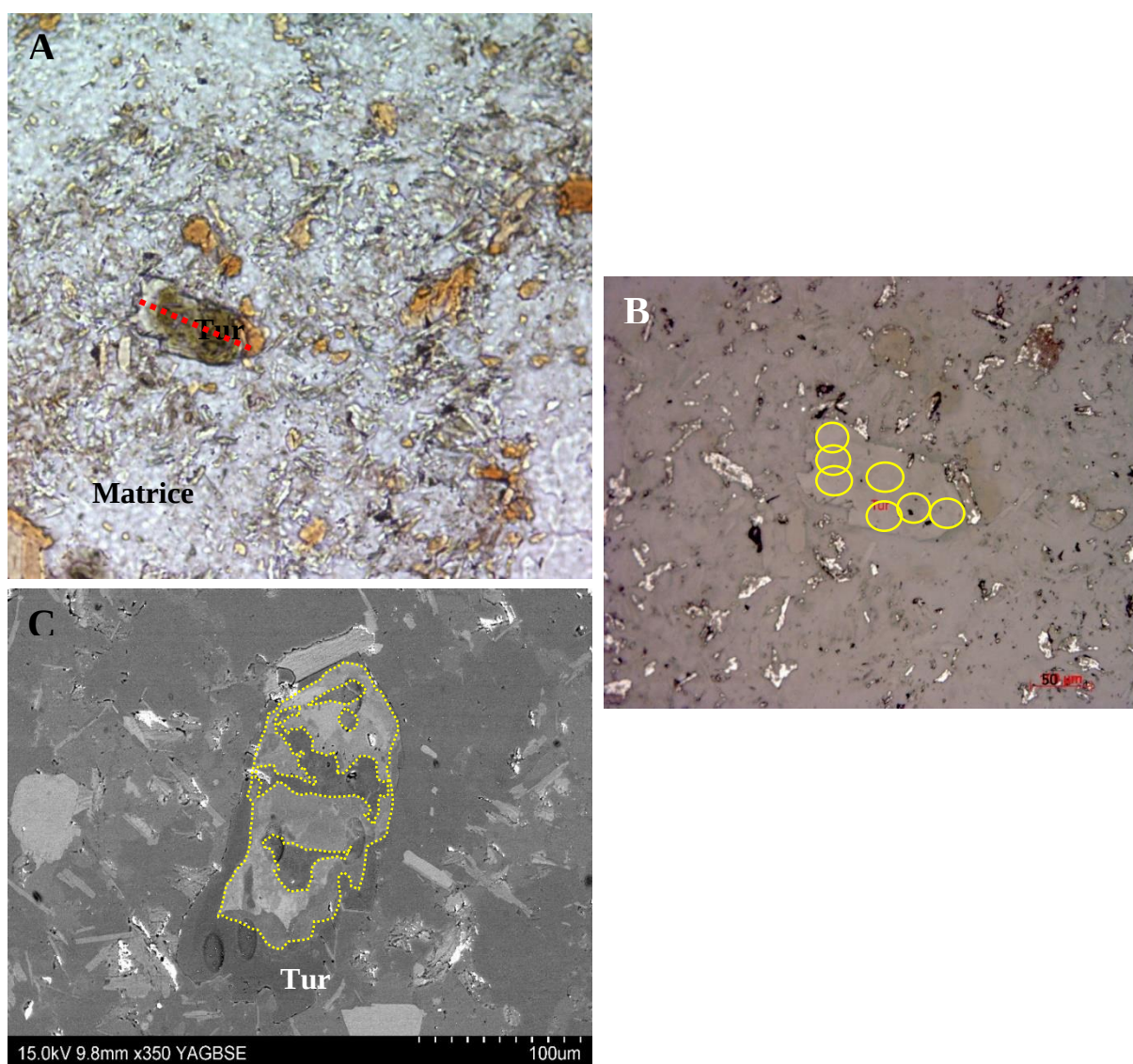


Figure 12 : Tourmalines de l'échantillon 05061485 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure

L'échantillon 04061441 de Juomasuo présente une texture granoblastique avec une matrice majoritairement constituée d'albite. Des reliques de zircon sont présentes dans cet échantillon (Annexe 3, A & B). Des assemblages de phénocristaux d'albite sont conservés (Annexe 3, C & D). Ceux-ci sont traversés par des cristaux de biotites (Annexe 3, C & D) qui leur sont donc postérieurs. Ces biotites accompagnent les tourmalines (Figure 14) présentes dans cet échantillon ainsi que les cristaux de rutile et de dolomite (Annexe 3, E & F). Cet assemblage est alors postérieur aux phénocristaux d'albite décrits au-dessus. Une deuxième génération d'albite est aussi retrouvée et est vraisemblablement issue de la première génération (Annexe 3, I & J). Des inclusions de biotite étant retrouvées dans les cristaux d'albite de deuxième génération, ces albites sont postérieures à ces cristaux de biotite. Enfin, de la séricite est retrouvée dans tout l'échantillon, entre les cristaux (Annexe 3, K & L), mais aussi en remplacement d'autres minéraux (Annexe 3, G & H).

La séquence paragéométrique de cet échantillon est résumée dans le tableau suivant (Figure 13) :

Minéraux	Minéralisation Fe-Co-Au	Minéralisation Fe-Co-Au	Minéralisation Fe-Co-Au-U
Zircon	—		
Albite (1)	—		
Rutile	—		
Biotite	—		
Tourmaline	—		
Dolomite	—		
Albite (2)		—	
Séricite			—

Figure 13 : Séquence paragéométrique de l'échantillon 04061441

D'après Vanhanen, 2001, l'assemblage rutile-biotite-tourmaline-dolomite correspond à une première minéralisation en fer, cobalt et or, la deuxième génération d'albite correspond à une deuxième minéralisation en fer, cobalt et or et, enfin, l'altération amenant au dépôt de la séricite représente une minéralisation en fer, cobalt, or et uranium.

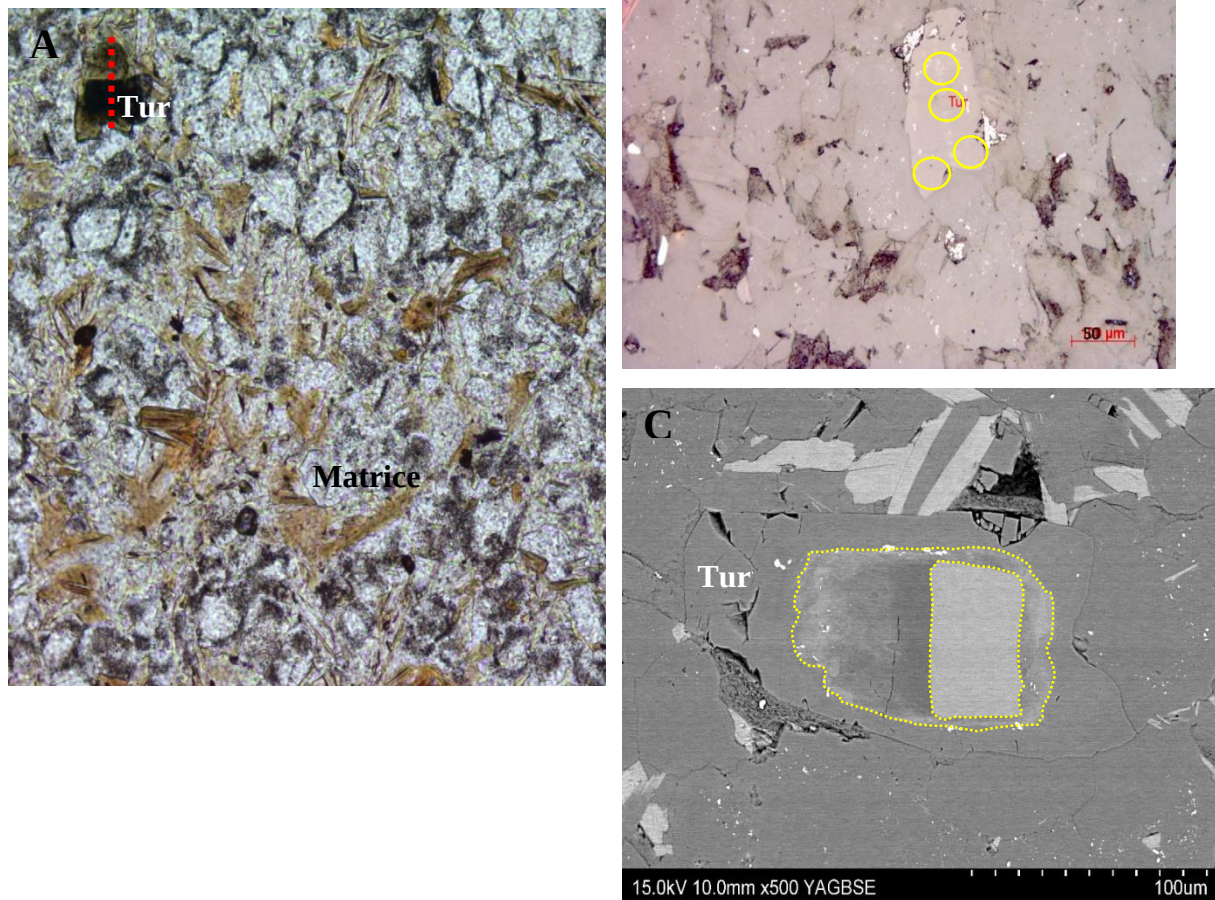


Figure 14 : Tourmalines de l'échantillon 04061441 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure

L'échantillon 04061480 de Juomasuo présente une texture granoblastique avec une matrice composée en majeure partie d'albite et de rutile disséminé (Annexe 4, A & B). Des amas de pyrite sont également observés et sont toujours retrouvés avec des cristaux de tourmaline (Figure 16) et de muscovite qui présentent des textures d'équilibre (Annexe 4, C & D), ces trois minéraux sont donc contemporains les uns des autres. Des inclusions d'albite étant retrouvées dans les amas de pyrite, il est possible de conclure que l'albite qui constitue la matrice est antérieure à la pyrite et aux minéraux qui lui sont contemporains. Des amas de séricite qui recoupent la matrice sont également observés (Annexe 4, E & F). Enfin, de la dolomite présentant des inclusions d'albite (Annexe 4, G & H) et de muscovite a été retrouvée. Ces inclusions ainsi que le fait que la dolomite et la séricite n'aient aucune relation spatiale montrent que la dolomite est le dernier minéral à avoir cristallisé dans cet échantillon.

La séquence paragénétique suivante résume les observations réalisées au-dessus (Figure 15) :

Minéraux	Minéralisation Fe-Co-Au	Minéralisation Fe-Co-Au-U
Albite	=====	
Rutile	=====	
Tourmaline	=====	
Muscovite	=====	
Pyrite	=====	
Séricite		=====
Dolomite		=====

Figure 15 : Séquence paragénétique de l'échantillon 04061480

En se basant sur les observations de Vanhanen, 2001, il est possible de dire que l'assemblage tourmaline-muscovite-pyrite représente une minéralisation en fer, cobalt et or et que l'altération marquée par la séricite représente une minéralisation en fer, cobalt, or et uranium.

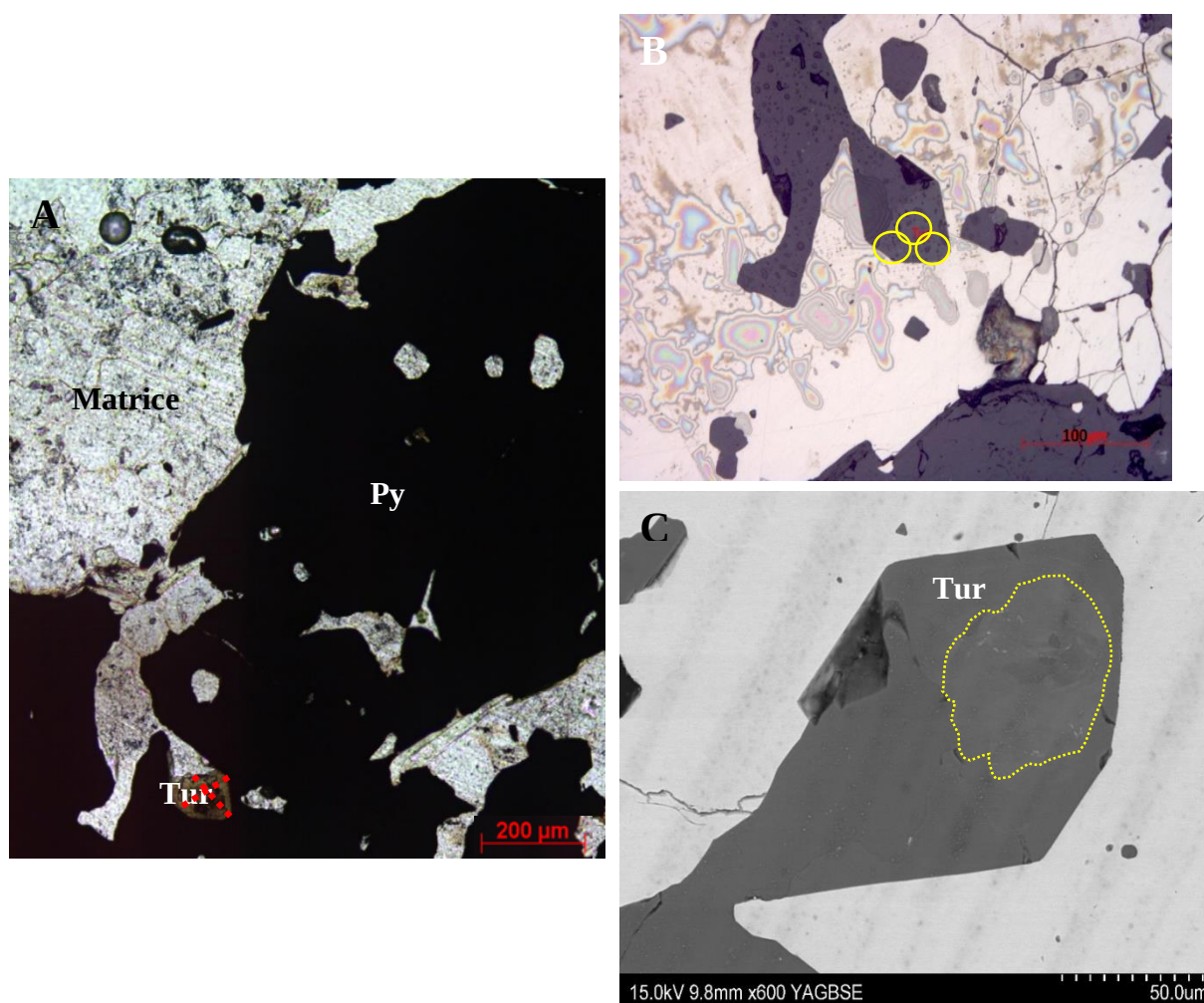


Figure 16 : Tourmalines de l'échantillon 04061480 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Py = Pyrite, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure

L'échantillon Gui4b de Guibaré présente une texture granoblastique avec une matrice de quartz. Cette matrice est recoupée par une veine de tourmaline (Figure 18) qui serpente dans tout l'échantillon. La matrice et la veine ont ensuite été cisailées lors d'une déformation ultérieure (Annexe 5, A & B).

Ces observations ont permis de réaliser la séquence paragenétique suivante (Figure 17) :



Figure 17 : Séquence paragenétique de l'échantillon Gui4b

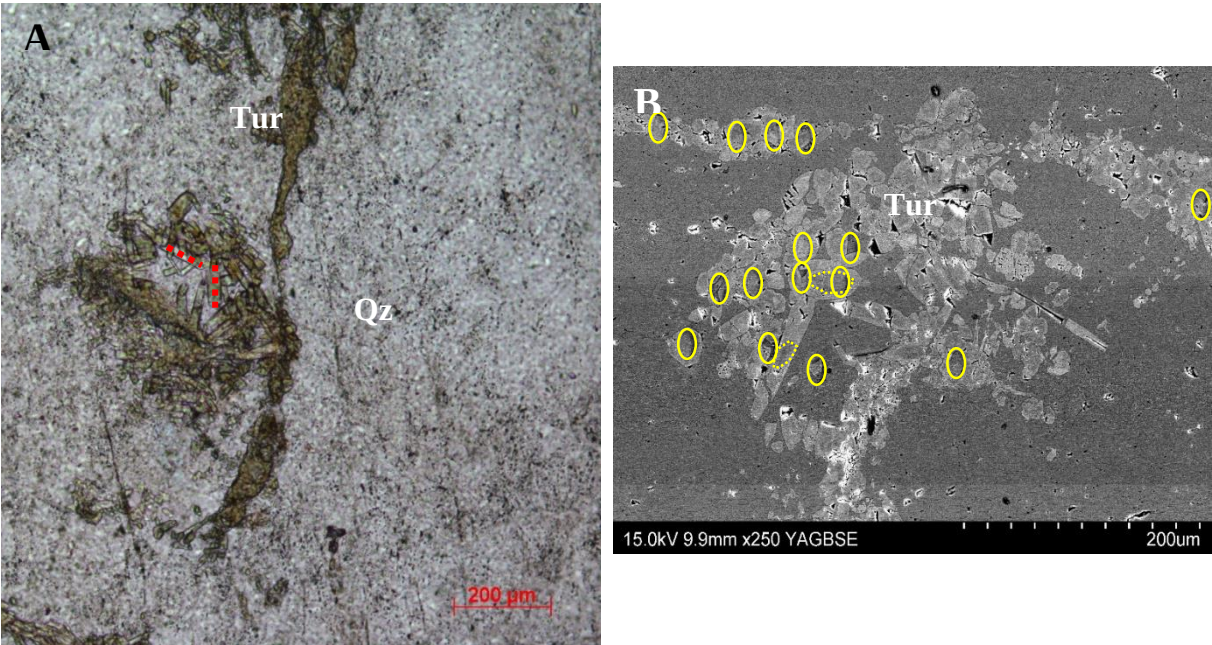


Figure 18 : Tourmalines de l'échantillon Gui4b (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Qz = Quartz, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS

L'échantillon FK1 de Fété Kolé présente une texture porphyroblastique avec des porphyroblastes de tourmaline (Figure 20) et de pyrite (Annexe 7) dans une matrice de quartz et de séricite principalement. Des lentilles de quartz présentant des textures d'équilibre avec de la muscovite ont été retrouvées entourées par de la séricite (Annexe 7, A & B). Les phénocristaux de pyrite et de tourmaline semblent associés dans tout l'échantillon (Annexe 7, E & F) et des inclusions de quartz primaire ont été retrouvées dans la pyrite, ce qui permet de dire que la tourmaline et la pyrite ont cristallisées après le premier quartz et la muscovite. Une deuxième génération de quartz est observable en bordure des cristaux de pyrite et de tourmaline (Annexe 7, C & D). Ce quartz leur est donc postérieur. Une altération séricitique est présente dans tout l'échantillon. Cette altération est donc le dernier stade dans la paragenèse de l'échantillon (Figure 19).



Figure 19 : Séquence paragenétique de l'échantillon FK1

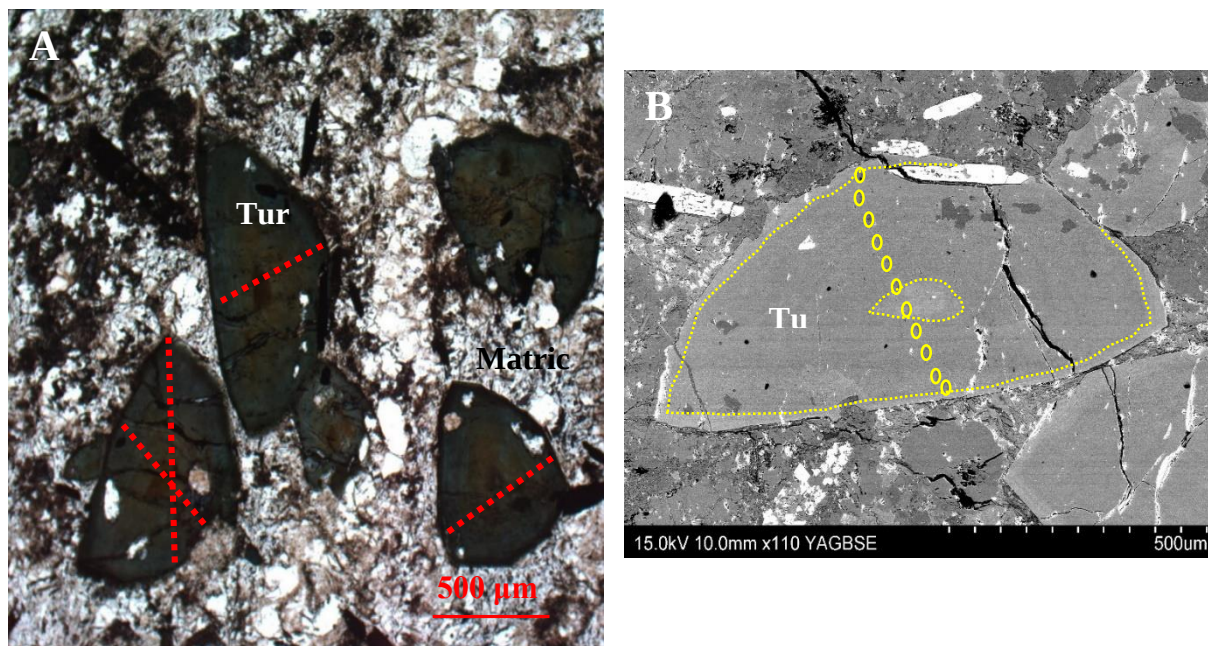


Figure 20 : Tourmalines de l'échantillon FK1 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS

L'échantillon FK4 de Fété Kolé présente une texture lépidoblastique marquée par des cristaux de chlorite et de quartz. Des cristaux de rutile sont observables et sont toujours retrouvés avec la chlorite (Annexe 8, A & B). La tourmaline (Figure 22) se présente sous forme de veinules ou d'amas accompagnés de quartz et recoupe la matrice (Annexe 8, C & D). Elle lui est donc postérieure. Une altération séricitique est visible dans l'ensemble de l'échantillon. Elle vient alors conclure la séquence paragénétique (Figure 21).



Figure 21 : Séquence paragénétique de l'échantillon FK4

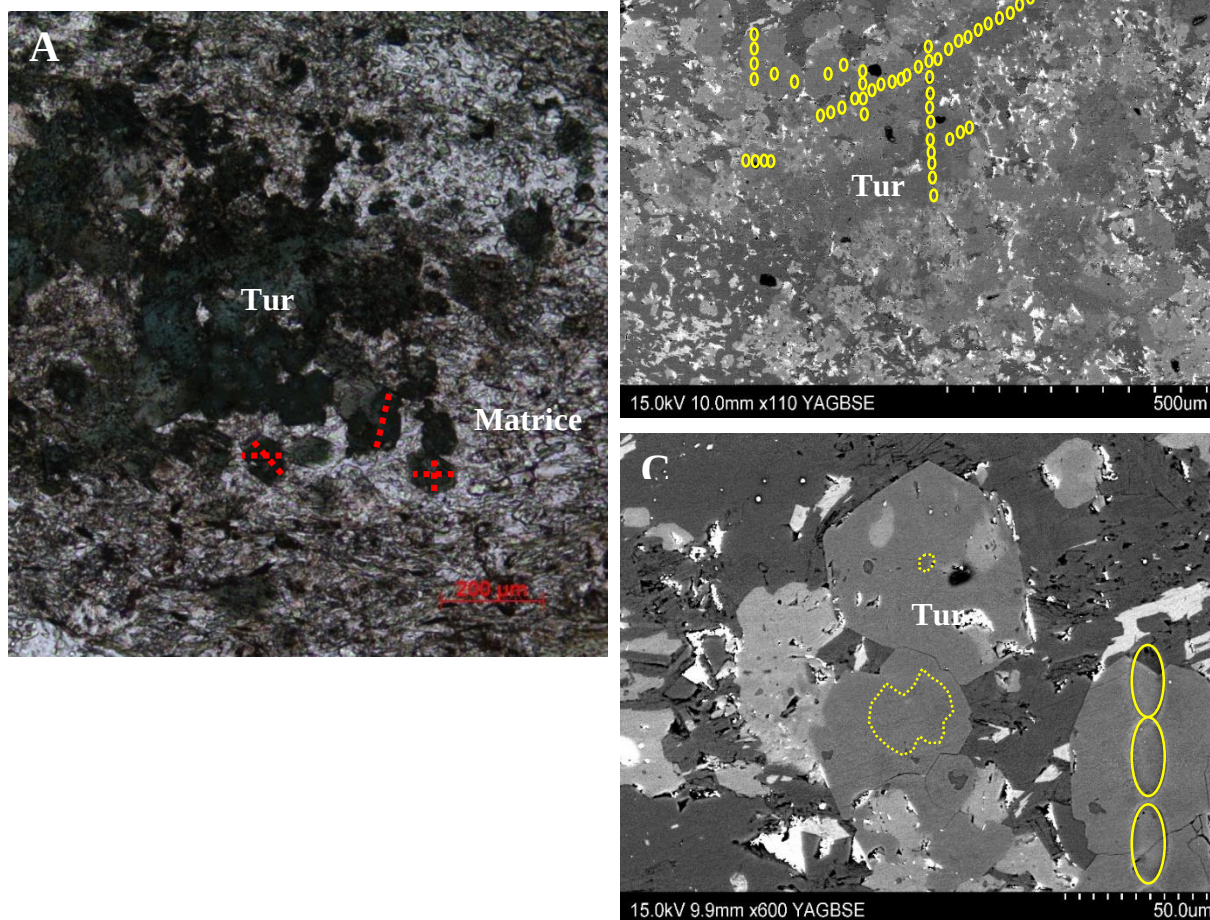


Figure 22 : Tourmalines de l'échantillon FK4 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) & (C) Photographies MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS

L'échantillon FETb de Fété Kolé présente une texture granoblastique avec une matrice composée de quartz et de cristaux de tourmaline (Figure 24) (Annexe 6, A & B). Des lentilles de quartz ont également été observées (Annexe 6, C & D). Dans ces lentilles, les cristaux sont plus importants que dans la matrice et leur texture est typique des quartz de haute température. Des cristaux de tourmaline ont aussi été retrouvés avec ces grains de quartz. A la bordure externe des lentilles, il est possible de voir que la concentration des cristaux de tourmaline est plus importante que dans la matrice. Une circulation d'un fluide siliceux de haute température aurait permis un changement de rhéologie de la roche constituée de quartz et de tourmaline, en apportant quelques cristaux de tourmaline en circulant. Lors de ce changement de rhéologie, le quartz en contact avec le fluide a pu être destabilisé et reprécipiter en formant des lentilles. Les tourmalines au contact des lentilles seraient alors les mêmes que dans le reste de la matrice.

La séquence paragenétique suivante résume les observations faites ci-dessus (Figure 23) :



Figure 23 : Séquence paragenétique de l'échantillon FETb

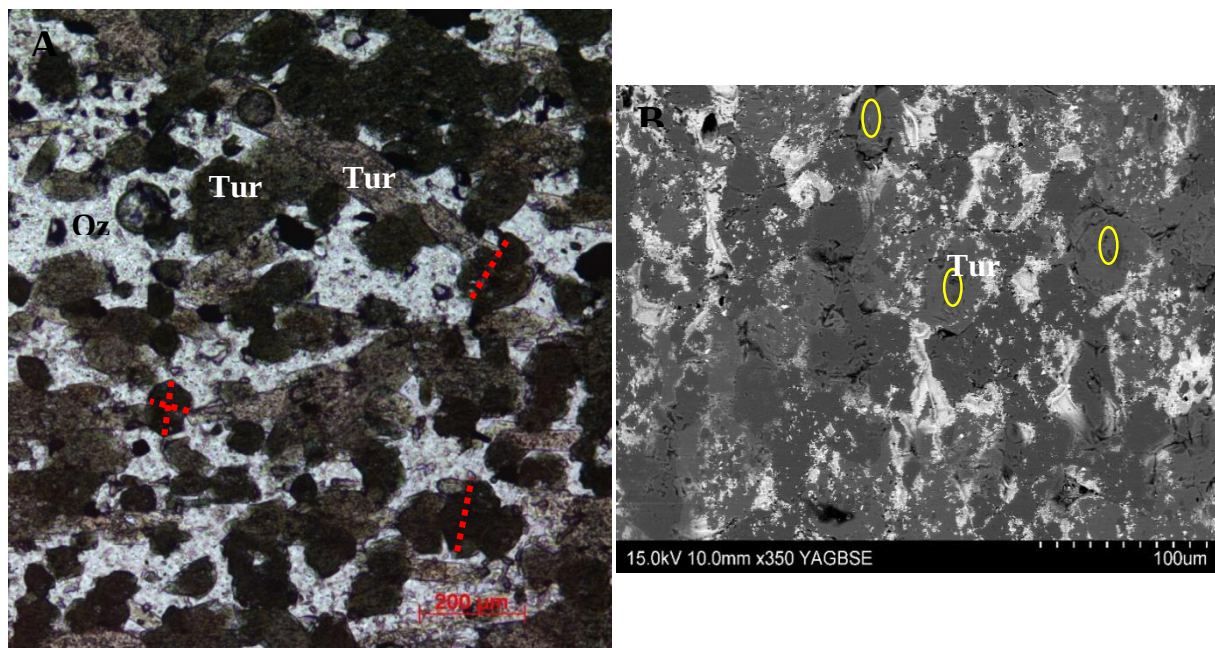


Figure 24 : Tourmalines de l'échantillon FETb (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Qz = Quartz, les points rouges représentent les points microsonde électronique ; (B) Photographie MEB avec EDS le cerclage jaune représente la délimitation entre cœur et bordure, les cercles jaunes représentent les points SIMS

L'échantillon KDH291.562-2 de Kiaka présente une texture porphyroblastique avec des porphyroblastes de tourmaline (Figure 26) pouvant atteindre 1 cm (Annexe 9, A & B). La matrice de cet échantillon est constituée de clinozoïsites, de biotites chloritisées et de chlorites. En plus petite quantité, il est également possible d'observer dans cette matrice du sphène et de la pistachite (Annexe 9, C & D). Quelques cristaux de quartz ont également été observés. Il s'agit probablement de reliques issues du protolithe. De la pyrrhotite est aussi présente dans la matrice. Les minéraux présents dans la matrice sont tous retrouvés en inclusions dans les phénocristaux de tourmaline. Cela implique donc que la tourmaline leur soit postérieure. Ces mêmes phénocristaux sont moulés par une schistosité marquée par des cristaux de clinozoïsite, de chlorite et de biotite chloritisée (Annexe 9, E & F). Comme les inclusions des tourmalines ne possèdent pas de schistosité héritée, la schistosité décrite est alors postérieure à la formation de la tourmaline. Une veine de calcite a également été observée (Annexe 9, G & H). Elle recoupe la matrice et les porphyroblastes et leur est donc postérieure. La séquence paragénétique suivante résume les observations réalisées au-dessus (Figure 25).

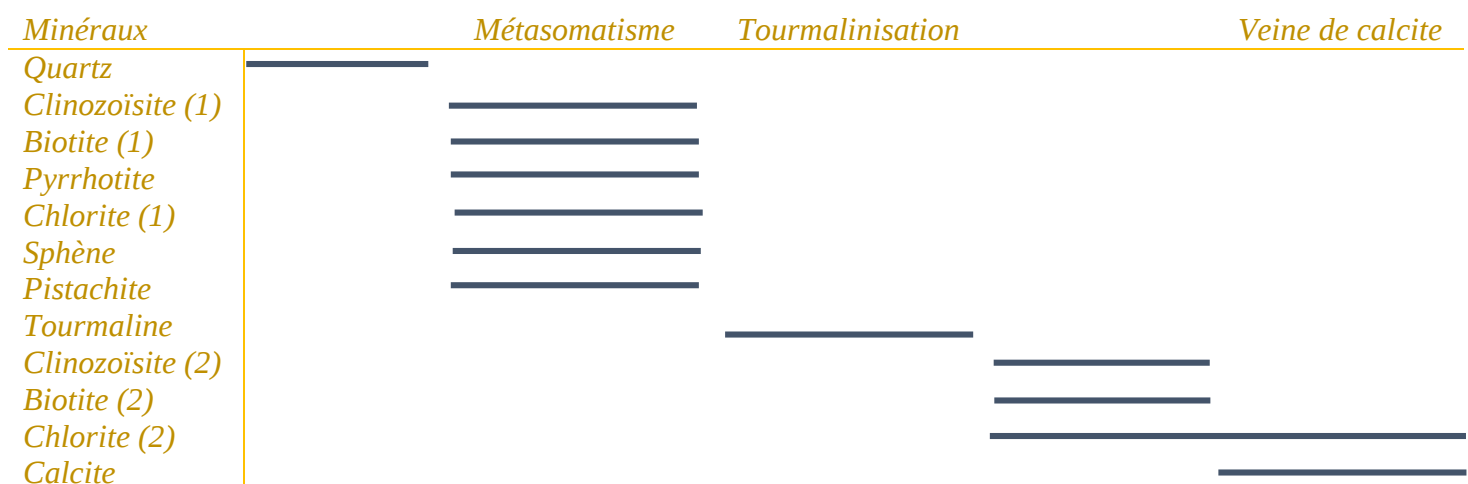


Figure 25 : Séquence paragénétique de l'échantillon KDH291.562-2

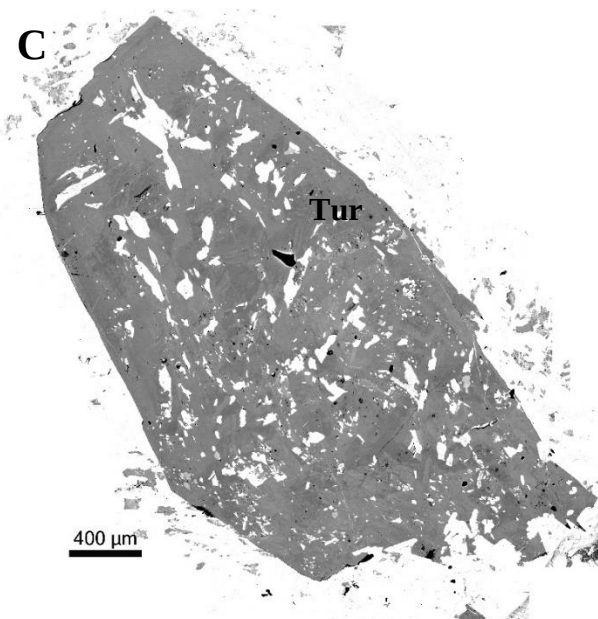
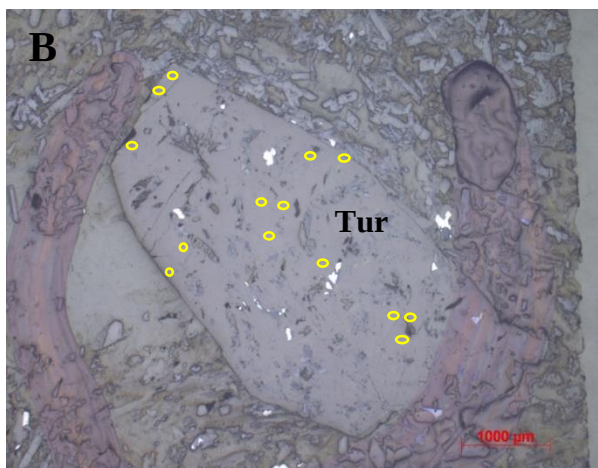
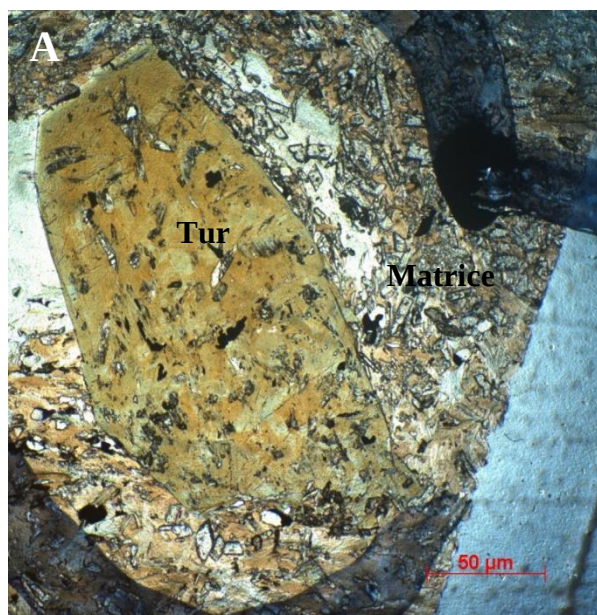


Figure 26 : Tourmalines de l'échantillon KDH291.562-2 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS

L'échantillon KDH29 311.8 de Kiaka présente une texture granoblastique avec des cristaux de quartz ayant une texture d'équilibre, formant des angles à 120°. La matrice comprend également des cristaux de biotite xénomorphes, qui constituent la première génération de biotite, sous forme d'amas et de quelques grains de feldspath plagioclase eux aussi en équilibre avec les grains de quartz (Annexe 10, A & B). Des cristaux de pyrrhotite ont aussi été retrouvés disséminés dans cette matrice. La matrice comprend également des cristaux d'épidote et d'apatite. Les cristaux de tourmaline (Figure 28), quant à eux, sont automorphes et sont en équilibre avec des biotites automorphes (Biotite 2). Ces deux minéraux sont donc synchrones. Elles présentent par endroit des inclusions de quartz, de pyrrhotite et d'apatite. Les tourmalines et les biotites de deuxième génération sont donc postérieures à la matrice, mais aussi à l'épidotisation marquée par l'épidote et l'apatite. La tourmaline peut aussi se retrouver sous forme de veinules (Annexe 10, A & B). Une veine de quartz à texture granoblastique recoupe toutes les formations décrites au-dessus (Annexe 10, C & D). Elle leur est donc postérieure. Des fractures recoupant la matrice et la veine de quartz ont été observées. Des cristaux de calcites sont présents le long de ces fractures et des cristaux de clinozoïsité et des amas de biotite se trouvent également à proximité (Annexe 10, E & F). Les observations faites sur cet échantillon sont résumées dans la séquence paragénétique suivante (Figure 27) :

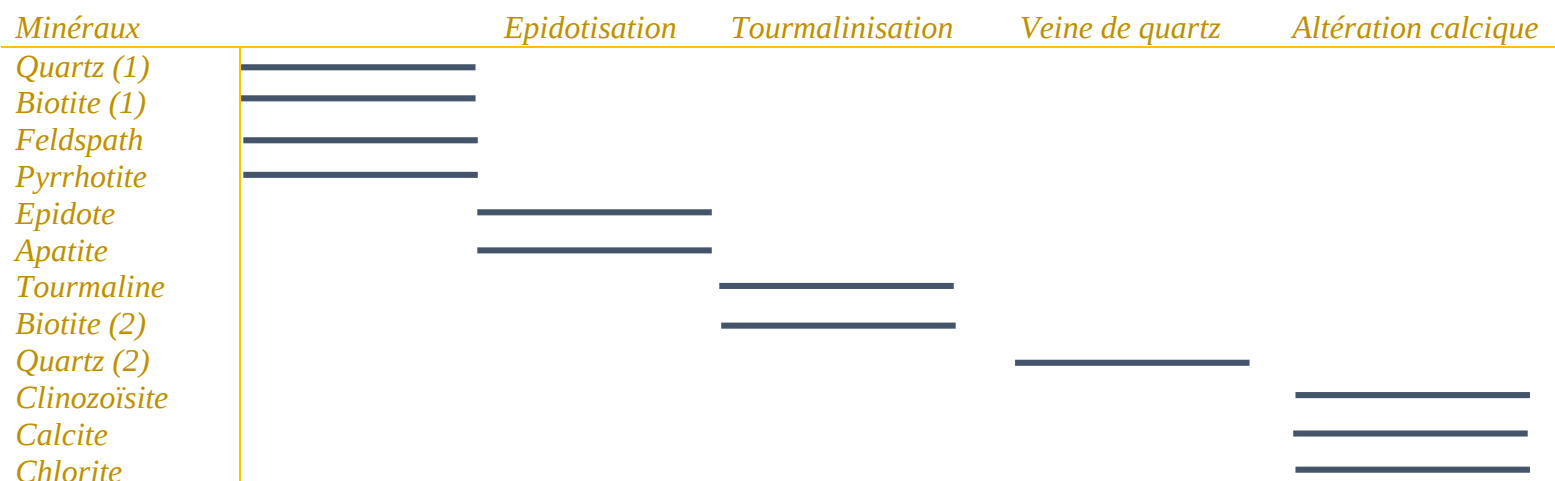


Figure 27 : Séquence paragénétique de l'échantillon KDH29 311.8

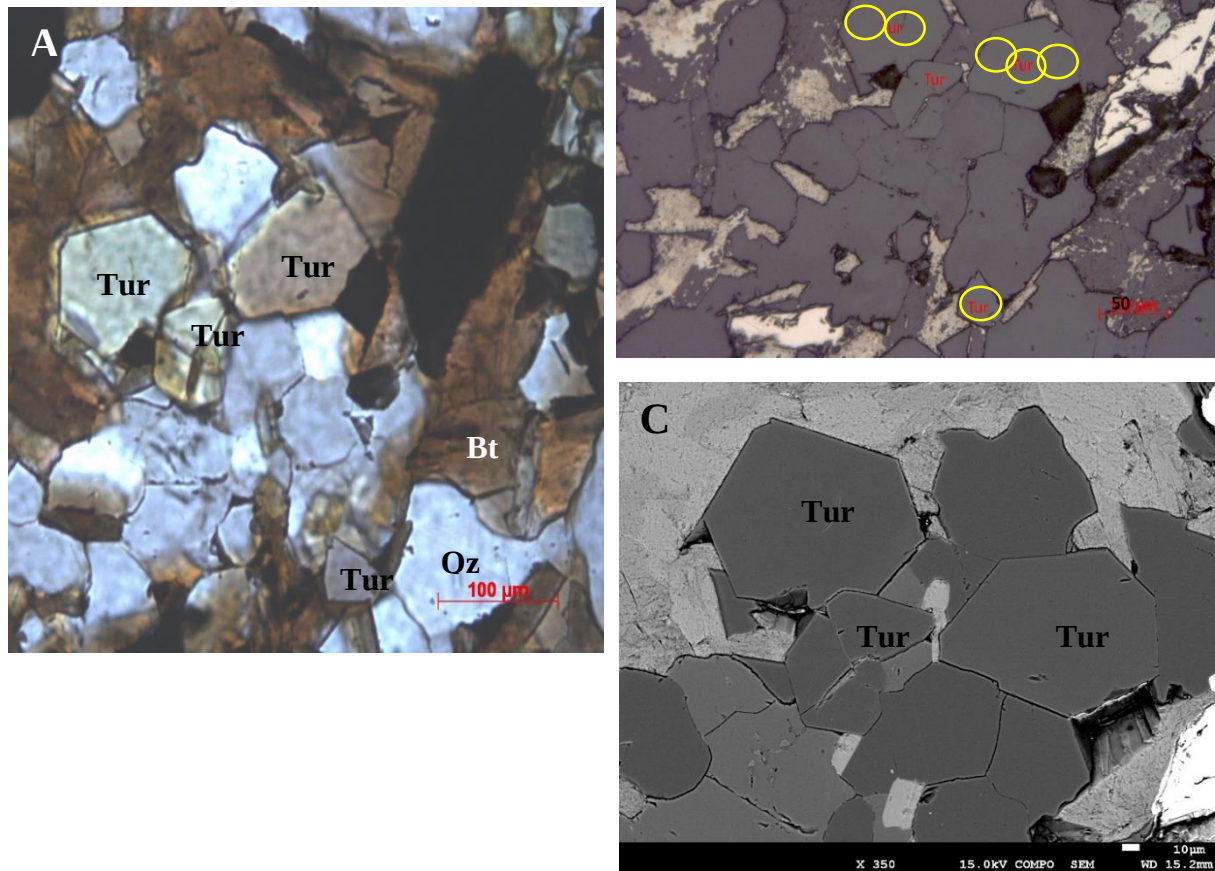


Figure 28 : Tourmalines de l'échantillon KDH29 311.8 (A) Photographie au microscope optique en LPNA Tur = Tourmaline, Bt = Biotite ; (B) Photographie au microscope optique en lumière réfléchie LPNA, les cercles jaunes représentent les points de SIMS ; (C) Photographie MEB avec EDS

Ces observations pétrographiques permettent d'identifier différentes populations de tourmaline au sein des gisements étudiés. Pour le gisement de Juomasuo, deux populations peuvent être identifiées :

- la population I représentant les tourmalines associées aux sulfures
- la population II représentant les tourmalines disséminées.

Pour le gisement de Guibaré, une seule population de tourmaline a été observée, elle sera nommée population I.

Pour le gisement de Fété Kolé, une différenciation arbitraire et uniquement basée sur la pétrographie peut être faite à cette étape de l'étude :

- la population I représente les tourmalines de l'échantillon FK1
- la population II représente les tourmalines de l'échantillon FK4
- la population III représente les tourmalines de l'échantillon FETb.

Pour le gisement de Kiaka, les deux types de tourmaline observés ont également été identifiés par Fontaine, et al. (2015) :

- la population I correspond aux tourmalines primaires (KDH291.562-2)
- la population II correspond aux tourmalines secondaires (KDH29 311.8).

Ces notations seront utilisées dans la suite de cette étude. La cristallographie et l'isotopie des tourmalines pourront peut-être affiner ou réduire les différences entre les populations.

3.2. Cristallographie des tourmalines

Les tourmalines des différents échantillons ont été analysées à l'aide de la microsonde électronique décrite précédemment. Les résultats obtenus (Annexe 11) ont permis de calculer les formules structurales de ces tourmalines (Annexe 11). Les formules structurales recalculées sont synthétisées dans le tableau suivant (Figure 29).

Echantillons	Formules structurales des tourmalines
Kiaka	
Population I (Primaires)	$(\text{Na}_{0.6}\text{Ca}_{0.2}[\]_{0.1})(\text{Mg}_{2.0}\text{Fe}_{0.8}\text{Ti}_{0.1}\text{Li}_{0.1})\text{Al}_{5.8}(\text{Si}_{5.9}\text{Al}_{0.1})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3[\text{OH}_{0.7}\text{O}_{0.2}]$
Population II (Tardives) Cores	$(\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.2}[\]_{0.3})(\text{Mg}_{1.7}\text{Fe}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{Li}_{0.1})\text{Al}_6(\text{Si}_{5.8}\text{Al}_{0.2})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3[\text{OH}_{0.5}\text{O}_{0.4}]$
Population II (Tardives) Rims	$(\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.2}[\]_{0.2})(\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{Li}_{0.1})\text{Al}_6(\text{Si}_{5.9}\text{Al}_{0.1})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3[\text{OH}_{0.6}\text{O}_{0.4}]$
Fété Kolé	
Population I Cores	$(\text{Na}_{0.7}\text{Ca}_{0.1}[\]_{0.2})(\text{Mg}_{1.1}\text{Fe}_{1.5}\text{Li}_{0.1}\text{Ti}_{0.1}\text{Al}_{0.2})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.7}\text{O}_{0.3}]$
Population I Rims	$(\text{Na}_{0.7}\text{Ca}_{0.1}[\]_{0.2})(\text{Mg}_{1.2}\text{Fe}_{1.4}\text{Li}_{0.1}\text{Ti}_{0.1}\text{Al}_{0.2})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.7}\text{O}_{0.3}]$
Population II Cores	$(\text{Na}_{0.7}[\]_{0.3})(\text{Mg}_{1.4}\text{Fe}_{1.3}\text{Li}_{0.1}\text{Al}_{0.2})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.6}\text{O}_{0.4}]$
Population II Rims	$(\text{Na}_{0.7}[\]_{0.3})(\text{Mg}_{1.4}\text{Fe}_{1.3}\text{Li}_{0.1}\text{Al}_{0.2})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.6}\text{O}_{0.4}]$
Population III	$(\text{Na}_{0.7}[\]_{0.3})(\text{Mg}_{1.0}\text{Fe}_{1.6}\text{Li}_{0.1}\text{Ti}_{0.1}\text{Al}_{0.1})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.6}\text{O}_{0.4}]$
Guibaré	
Population I	$(\text{Na}_{0.8}[\]_{0.2})(\text{Mg}_{1.5}\text{Fe}_{1.0}\text{Li}_{0.1}\text{Al}_{0.3})\text{Al}_6\text{Si}_{6.0}\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.7}\text{O}_{0.3}]$
Juomasuo	
Population I (Sulfures) Cores	$(\text{Na}_{1.0})(\text{Mg}_{2.2}\text{Fe}_{0.6}\text{Cr}_{0.1})(\text{Al}_{4.2}\text{Cr}_{1.7})(\text{Si}_{5.6}\text{Al}_{0.4})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.1}\text{O}_{0.9}]$
Population I (Sulfures) Rims	$(\text{Na}_{0.8}\text{Ca}_{0.1})(\text{Mg}_{1.7}\text{Fe}_{1.1}\text{Ti}_{0.1})(\text{Al}_{5.8}\text{Mg}_{0.2})(\text{Si}_{5.8}\text{Al}_{0.2})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.9}\text{O}_{0.1}]$
Population II	$(\text{Na}_{0.9}\text{Ca}_{0.1})(\text{Mg}_{2.0}\text{Fe}_{0.9}\text{Ti}_{0.1})(\text{Al}_{5.6}\text{Mg}_{0.1}\text{Cr}_{0.1})(\text{Si}_{5.8}\text{Al}_{0.2})\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3[(\text{OH})_{0.7}\text{O}_{0.3}]$

Figure 29 : Formules structurales des tourmalines analysées lors cette étude

Les formules structurales des tourmalines ont ensuite permis de replacer celle-ci dans les diagrammes permettant de discriminer les différents types de tourmaline (Henry, et al., 2011) (Figure 30).

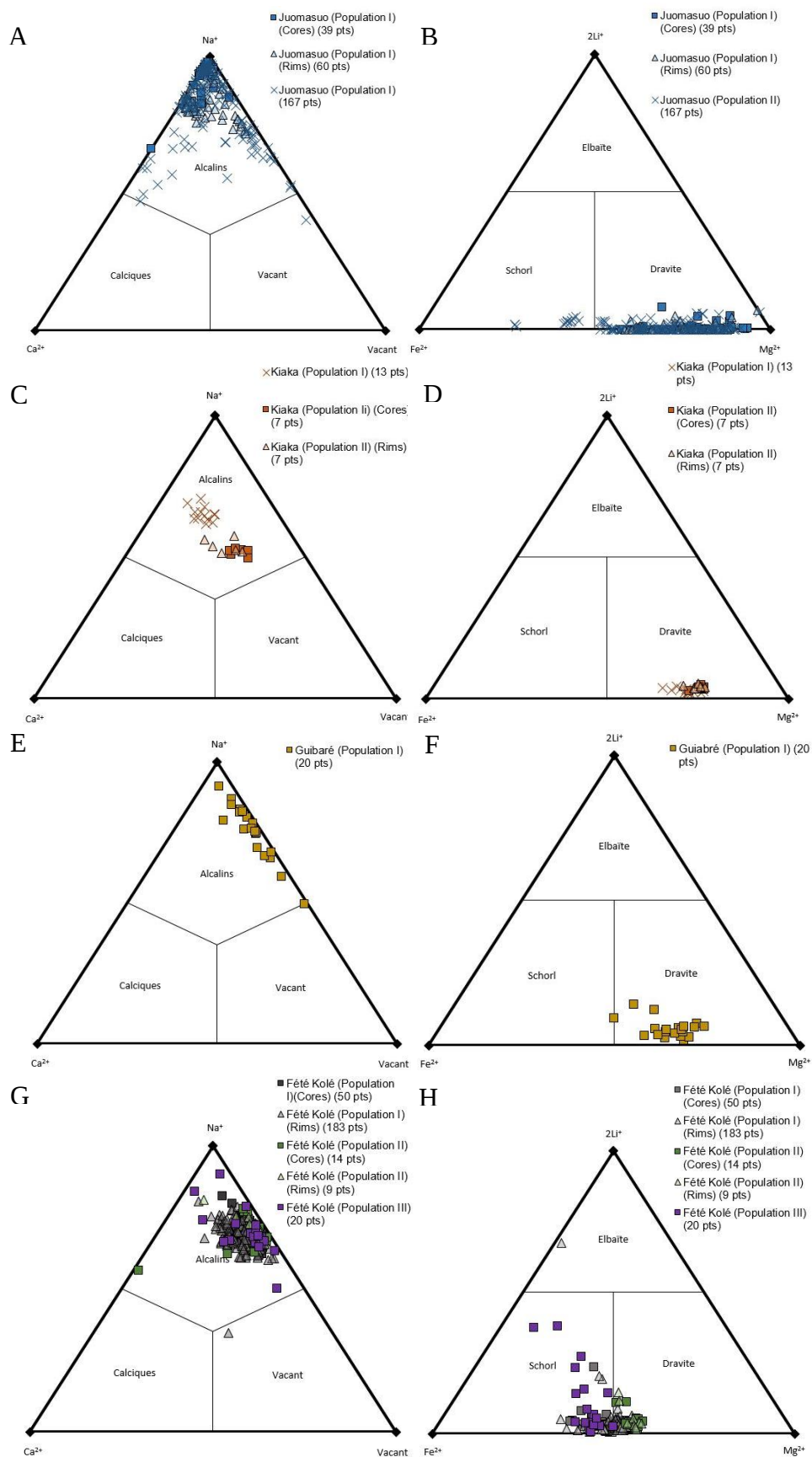


Figure 30 : A gauche : Diagrammes ternaires du groupe des tourmalines primaires bas   sur l'occupation du site X pour les gisements de Juomasuo (A), Kiaka (C), Guibr  (E) et de F  t   Kol  (G) ; A droite : Sous-syst  mes Dravite-Schorl-Elba   bas   sur l'occupation du site Y pour les gisements de Juomasuo (B), Kiaka (D), Guibr  (F) et F  t   Kol  (H) (d'apr  s Henry et al., 2011)

Les diagrammes ternaires ci-dessus montrent que, pour tous les gisements, les tourmalines sont enrichies en Na. Elles sont également toutes enrichies en Mg, ce qui permet de les classer comme des dravites. Ce n'est cependant pas le cas pour la population III de Fété Kolé. En effet, les mesures effectuées montrent que ces tourmalines sont enrichies en Fe, ce qui les classe dans le domaine des schorls. La population I de ce gisement représente un intermédiaire entre schorl et dravite.

Des diagrammes $\text{Al}-\text{Al}_{50}\text{Fe}(\text{tot})_{50}-\text{Al}_{50}\text{Mg}_{50}$ (Henry & Guidotti, 1985) ont été faits afin de déterminer si la composition des tourmalines dépendait de leur encaissant (Figure 31). En effet, ce diagramme a été créé en se basant sur les compositions chimiques des tourmalines de différentes roches encaissantes et dans des contextes différents. Les aires de ce diagramme correspondent à des roches encaissantes. Le domaine (1) correspond à des aplites et des pegmatites-granitoïdes riches en Li, le domaine (2) à des granitoïdes pauvres en Li et leur pegmatites et aplites associées, le domaine (3) à des granites altérés par hydrothermalisme et riches en Fe^{3+} , le domaine (4) à des métapélites et métapsammites coexistant avec une phase saturante en Al, le domaine (5) à des métapélites et métapsammites ne coexistant pas avec une phase saturante en Al, le domaine (6) à des roches à quartz et tourmalines riches en Fe^{3+} , à des roches calco-siliceuses et à des métapélites, le domaine (7) à des roches ultramafiques contenant peu de Ca et à des métasédiments riches en Cr et V, enfin, le domaine (8) correspond à des métacarbonates et à des métapyroxénites. Il faut aussi noter que le domaine (7) recoupe les domaines (4) et (5).

Toutes les tourmalines des gisements étudiés entrent dans le domaine (7) qui recoupe les domaines (4) et (5). Elles correspondent donc à des roches ultramafiques contenant peu de Ca et à des métasédiments riches en Cr et V ou à des métapélites et métapsammites coexistant ou non avec une phase saturante en Al. Pour les tourmalines de la population I de Kiaka, le domaine (7) est cohérent avec le protolithe métabasique de la roche, il en va de même pour les tourmalines de la population II dont le protolithe est métasédimentaire et riche en Cr et V. Les tourmalines de Guibaré correspondent aussi au domaine (7), leur protolithe étant métabasique également. Pour les tourmalines de Fété Kolé, les dravites sont issues d'un protolithe métavolcanique et correspondent au domaine (7), alors que les schorls, d'un protolithe métasédimentaire n'étant pas spécialement enrichi en Cr et V, correspondent plus au domaine (4). Enfin, le protolithe des roches de Juomasuo étant une roche métasédimentaire non-enrichie en Cr et V, les tourmalines de ce gisement correspondent au domaine (5).

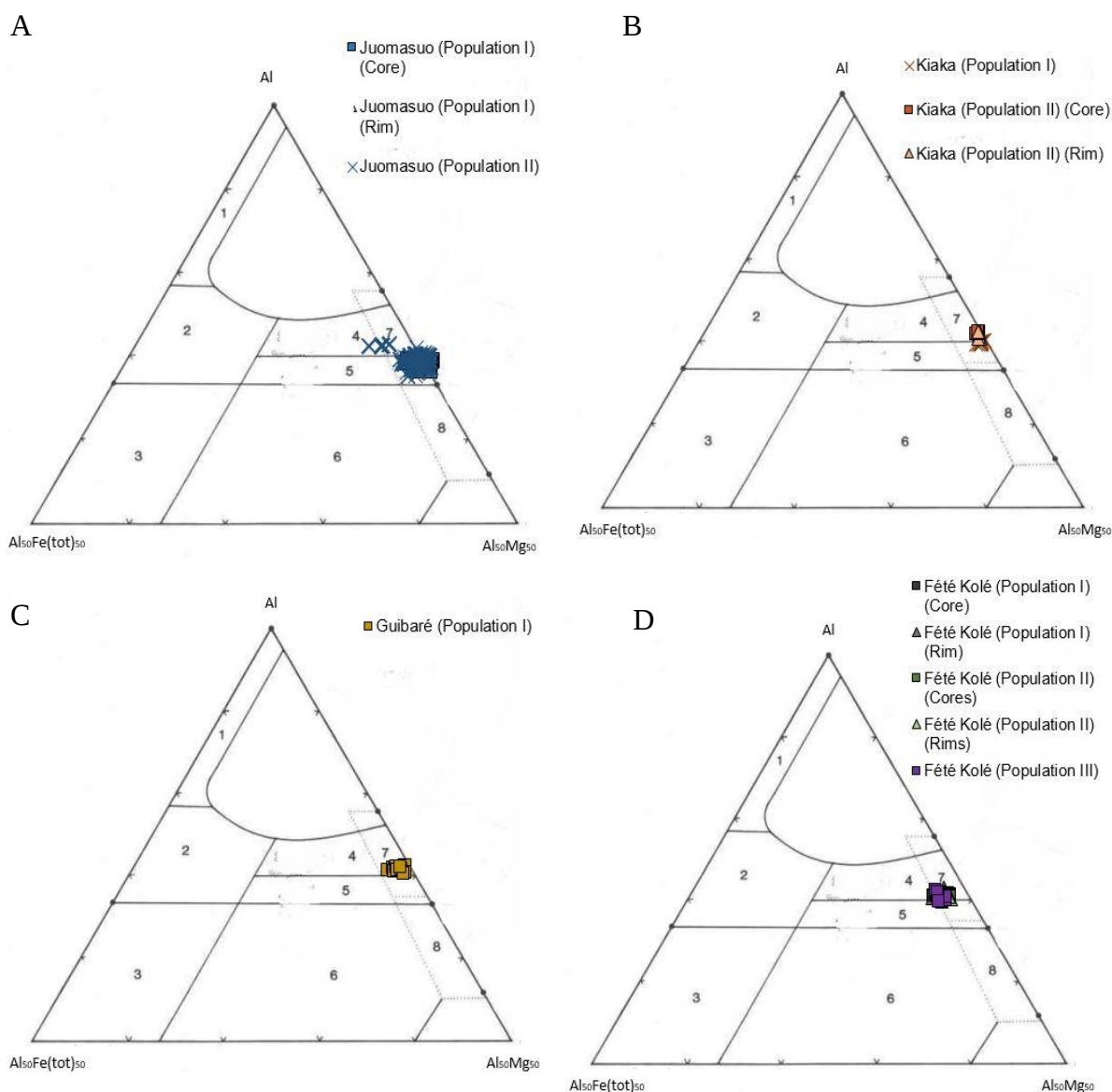


Figure 31 : Diagramme Al-Fe-Mg avec les domaines de tourmaline de différents types de roche pour les gisements de Juomasuo (A), Kiaka (B), Guibaré (C) et Fété Kolé (D)

Des zonations concentriques ou sans organisation particulière ont été observées dans les tourmalines. Les diagrammes précédents montrent que les tourmalines sont assez homogènes dans chaque échantillon et que cette homogénéité existe aussi entre les cœurs et les bordures des minéraux. Les variations chimiques responsables des zonations ne sont alors pas dues aux éléments majeurs utilisés dans les diagrammes. Les profils réalisés à la microsonde électronique permettent de montrer quels éléments sont responsables des variations chimiques entre les cœurs et les bordures (Annexe 12).

Pour les tourmalines de la population I de Juomasuo, la zonation se fait en fonction de l'Al du site T, du Cr, de l'Al et du Mg du site Z, du Fe du site Y, et, pour le site X, selon le fait qu'il y ait du Ca ou qu'il soit vacant. Pour les zonations des tourmalines de la population II de ce gisement, elles se font selon, pour le site Z, le Cr, l'Al et le Mg, pour le site Y, selon le Fe, le Mg, l'Al, le Li et le Mn, et pour le site X, selon s'il est vacant ou s'il contient du Ca ou du Na.

Pour la population I de Fété Kolé, la zonation se fait selon que le site Y soit occupé par du Ti ou du Al. Pour la population II, la zonation dépend des éléments présents dans le site Y, c'est-à-dire l'Al, le Li, le Fe ou le Mg. Pour la population III, le site X, s'il est vacant ou s'il présente du Na, du Ca ou du K, et le site Y, s'il contient de l'Al, du Mg, du Li, du Ti ou du Cr, contrôlent la zonation. Cependant, la différence cœur-bordure n'est pas faite dans les diagrammes réalisés ici, car le cœur étant trop petit, les points d'analyses ont pris en compte le cœur ainsi qu'une partie de la bordure.

La zonation pour le gisement de Guibaré, elle aussi très fine et donc pas représentée sur les diagrammes, est due aux mêmes substitutions d'éléments que pour la population III de Fété Kolé.

Les tourmalines de Kiaka présentant des zonations trop petites ou non-concentriques, les profils de composition n'ont pas été réalisés.

Des diagrammes représentant l'occupation du site X en fonction de l'occupation du site Y (Figure 32) ont été tracés afin de déterminer s'il y a un lien entre ces deux paramètres.

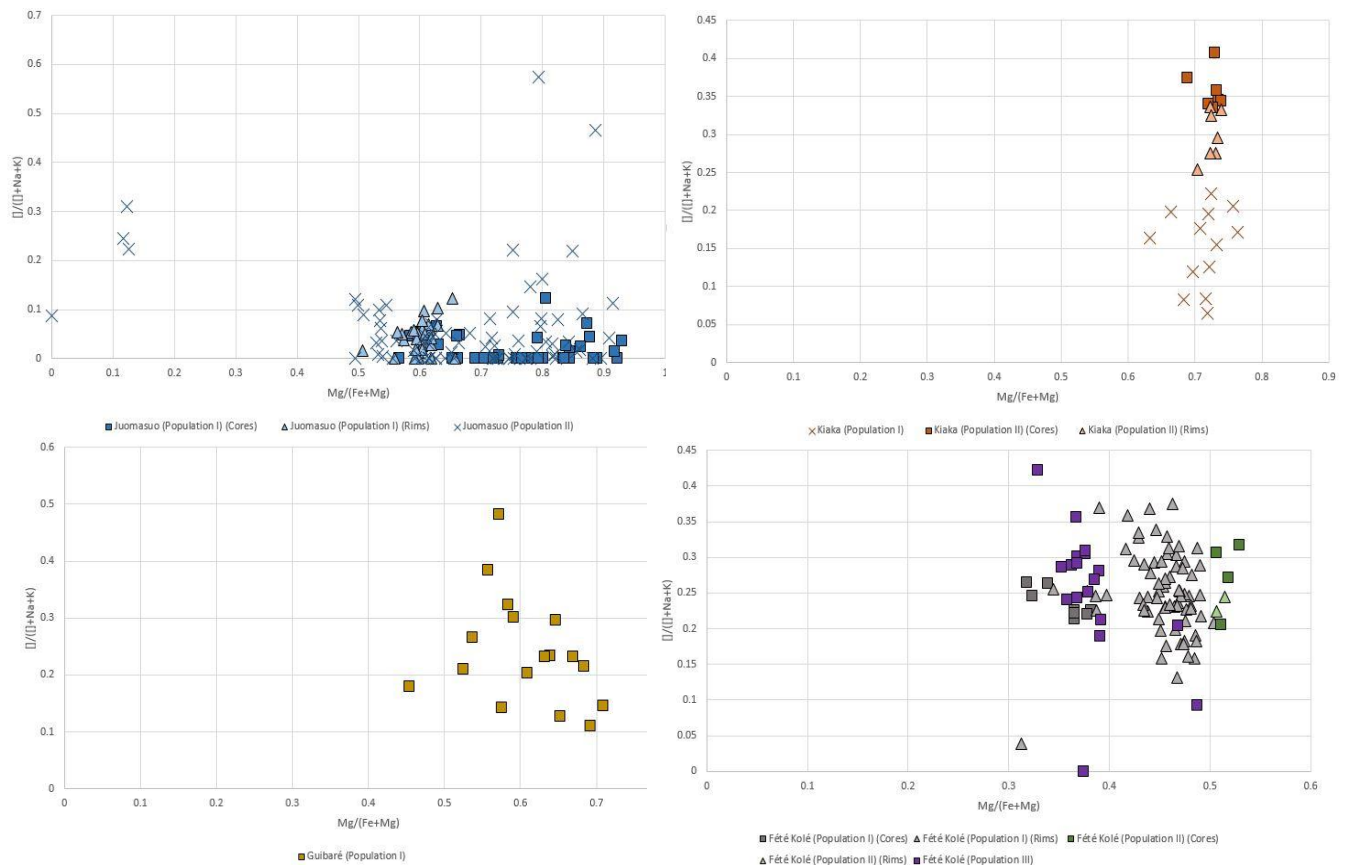


Figure 32 : Occupation du site X en fonction de l'occupation du site Y pour les gisements de Juomasuo, Kiaka, Guibaré et Fété Kolé

Pour le gisement de Juomasuo, il n'est pas possible de voir de variation de l'occupation d'un site en fonction de l'autre. Pour le gisement de Kiaka, il est possible de voir que, lorsque le rapport correspondant à l'occupation du site X augmente, celui du site Y reste relativement constant. La population I, contenue dans des metabasites, présente les rapports de site X les plus faibles et la population II, contenue dans des métapélites, les rapports de site X les plus élevés. Pour le gisement de Guibaré, la population de tourmalines ne peut pas être divisée en sous-groupes en fonction de l'occupation des sites X et Y. Pour le gisement de Fété Kolé, pour des rapports de site Y augmentant, les rapports de site X restent globalement constants.

Les tourmalines des populations I et II, contenues dans des metabasites, ont les rapports de site Y les plus élevés et la population III, contenue dans des métapélites, présente les rapports de site Y les plus faibles.

3.3. Isotopie du B sur les tourmalines

Des mesures isotopiques du bore ont été réalisées à la SIMS sur les cristaux de tourmaline des différents échantillons des gisements étudiés. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines sont reportées dans les diagrammes suivants (Figures 33, 34, 35 & 36).

Pour le gisement de Kiaka, les tourmalines de la population I présentent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -11 et -5 ‰ avec un pic entre -10 et -9 ‰. Les cœurs des tourmalines de la population II sont compris entre -16 et -14 ‰ avec un pic entre -16 et -15 ‰ et les bordures de ces mêmes tourmalines ont des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -16 et -12 ‰ avec un pic entre -16 et -14 ‰ (Figure 33).

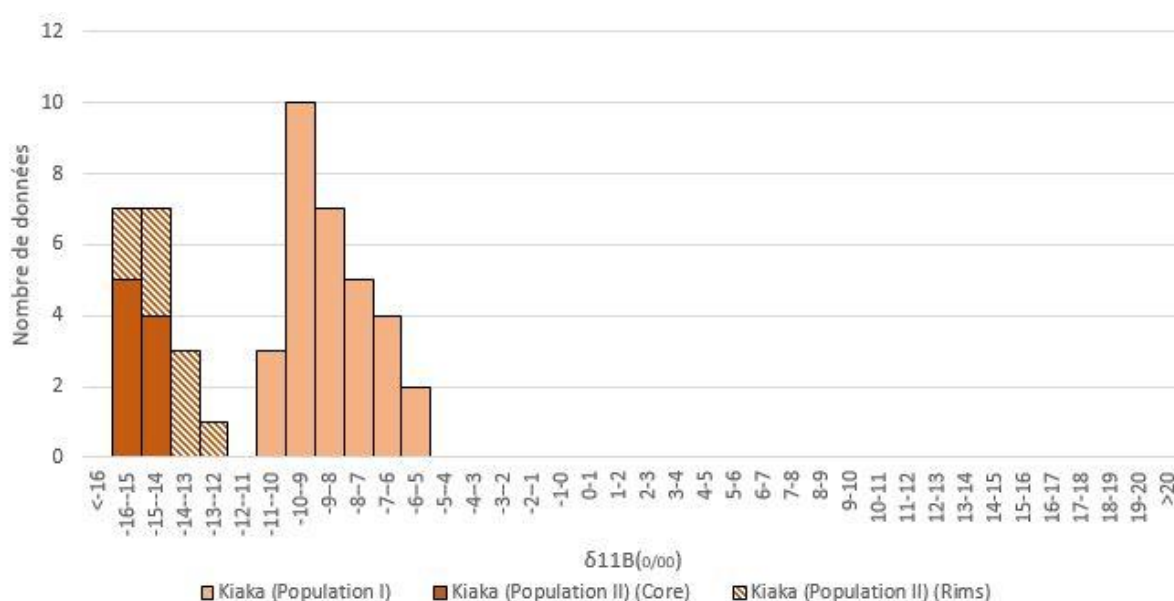


Figure 33 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Kiaka

Les tourmalines de la population I de Fété Kolé ont des cœurs avec des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ entre -5 et -3 ‰ avec un pic entre -4 et -3 ‰. Les bordures de ces tourmalines sont comprises entre -7 et -2 ‰ avec un pic entre -5 et -4 ‰. Les cœurs des tourmalines de la population II sont compris entre -4 et -2 ‰ et les bordures entre -6 et +6 ‰ avec un pic entre 0 et +1 ‰. Pour la population III, les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ sont comprises entre -5 et +5 ‰ avec un pic entre 0 et +2 ‰ (Figure 34).

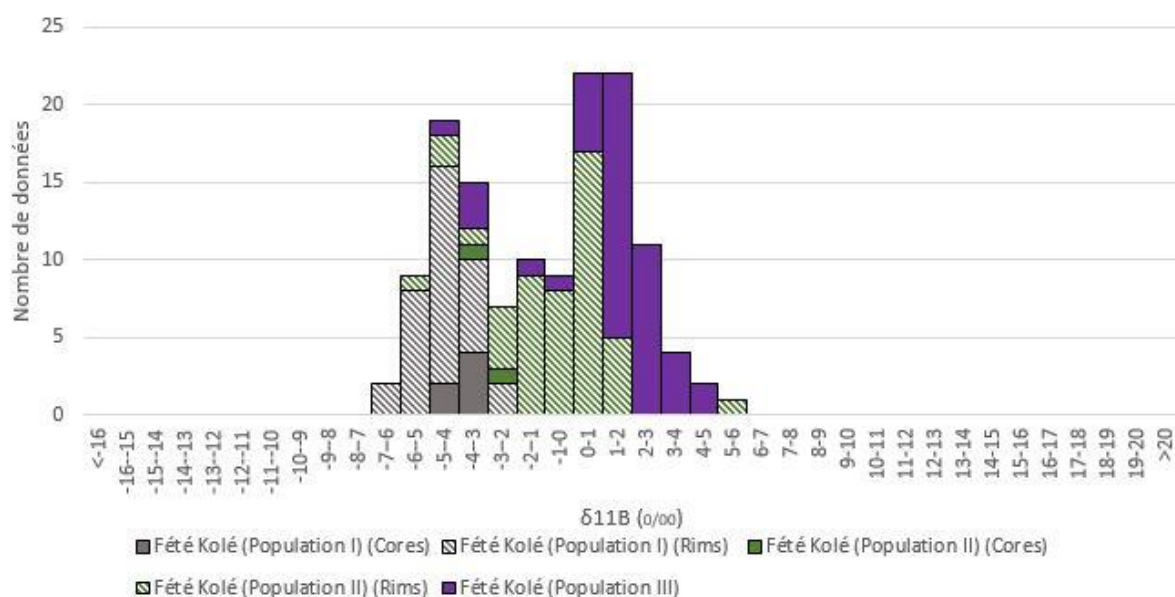


Figure 34 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Fété Kolé

Pour le gisement de Guibaré, les tourmalines présentent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ entre +5 et +12 ‰ avec un pic entre +8 et +9 ‰ (Figure 35).

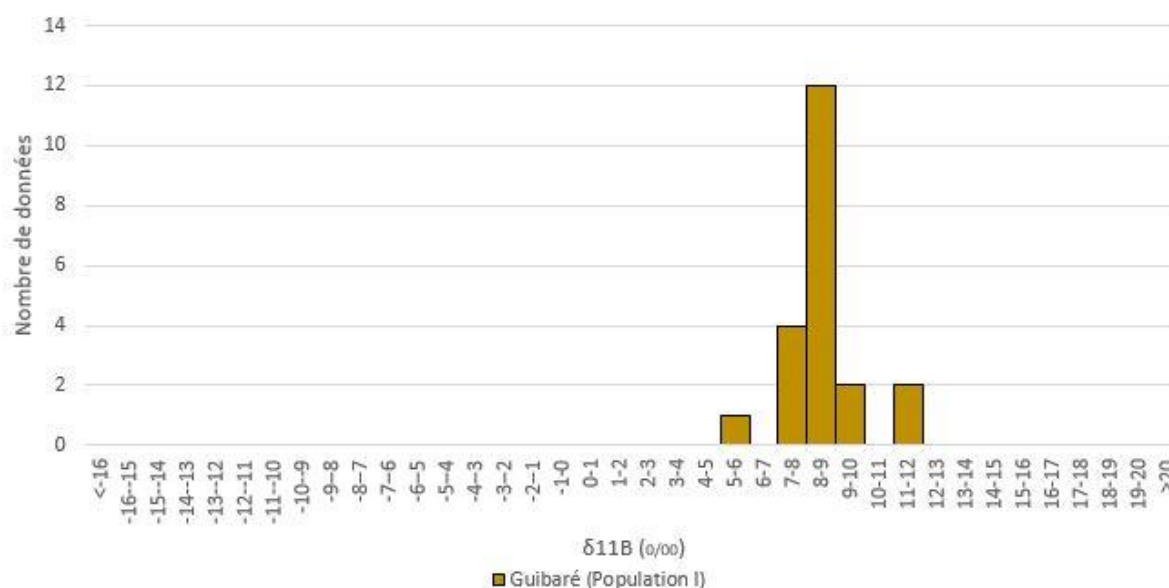


Figure 35 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Guibaré

Les tourmalines de la population I de Juomasuo ont des cœurs présentant des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ entre +6 et +10 ‰ avec un pic entre +7 et +8 ‰ et des bordures comprises entre +7 et +17 ‰. La population II peut être décomposée en deux ensembles : un premier avec des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -7 et 0 ‰ et un second compris entre +6 et +16 ‰ avec un pic entre +11 et +12 ‰ (Figure 36).

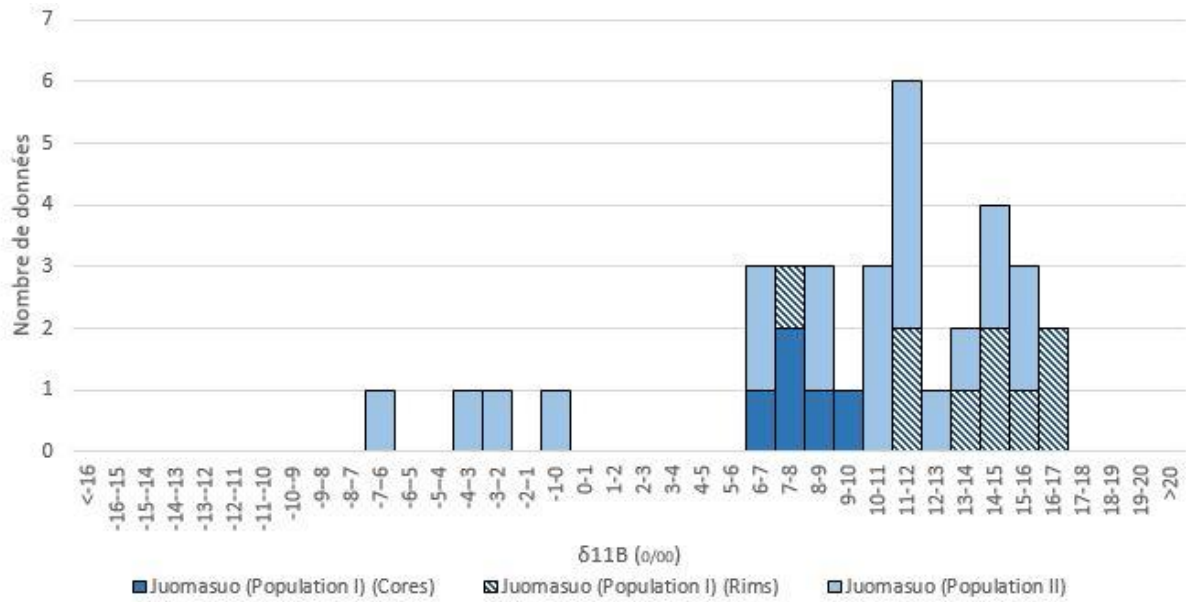


Figure 36 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines de Juomasuo

Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ mesurées sont celles de la tourmaline. Afin de connaître les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides responsables de la formation des cristaux de tourmaline, les températures de ces fluides doivent être connues pour utiliser l'équation suivante : $\Delta^{11}B_{\text{solid-fluid}} = -4.20[1000/T] + 3.52$, avec T en °K (Meyer, et al., 2008). Cette équation n'est valable que pour des fluides dont les températures sont comprises entre 400 et 700°C. Les fluides de Guibaré, Fété Kolé et Juomasuo présentant des températures inférieures à celles nécessaires pour l'application de l'équation, cette dernière a tout de même été appliquée à ces gisements afin d'avoir une approximation du $\delta^{11}\text{B}$ du fluide. Cependant, ces valeurs ne seront pas utilisées pour déterminer l'origine du fluide. Le $\delta^{11}\text{B}_{\text{fluid}}$ est ensuite calculé comme suit : $\delta^{11}B_{\text{fluid}} = \delta^{11}B_{\text{solid}} - \Delta^{11}B_{\text{solid-fluid}}$, avec le $\Delta^{11}B_{\text{solid-fluid}}$ calculé avec la première équation et le $\delta^{11}\text{B}_{\text{solid}}$, celui mesuré à l'aide de la SIMS. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides sont reportées dans le diagramme suivant (Figure 37).

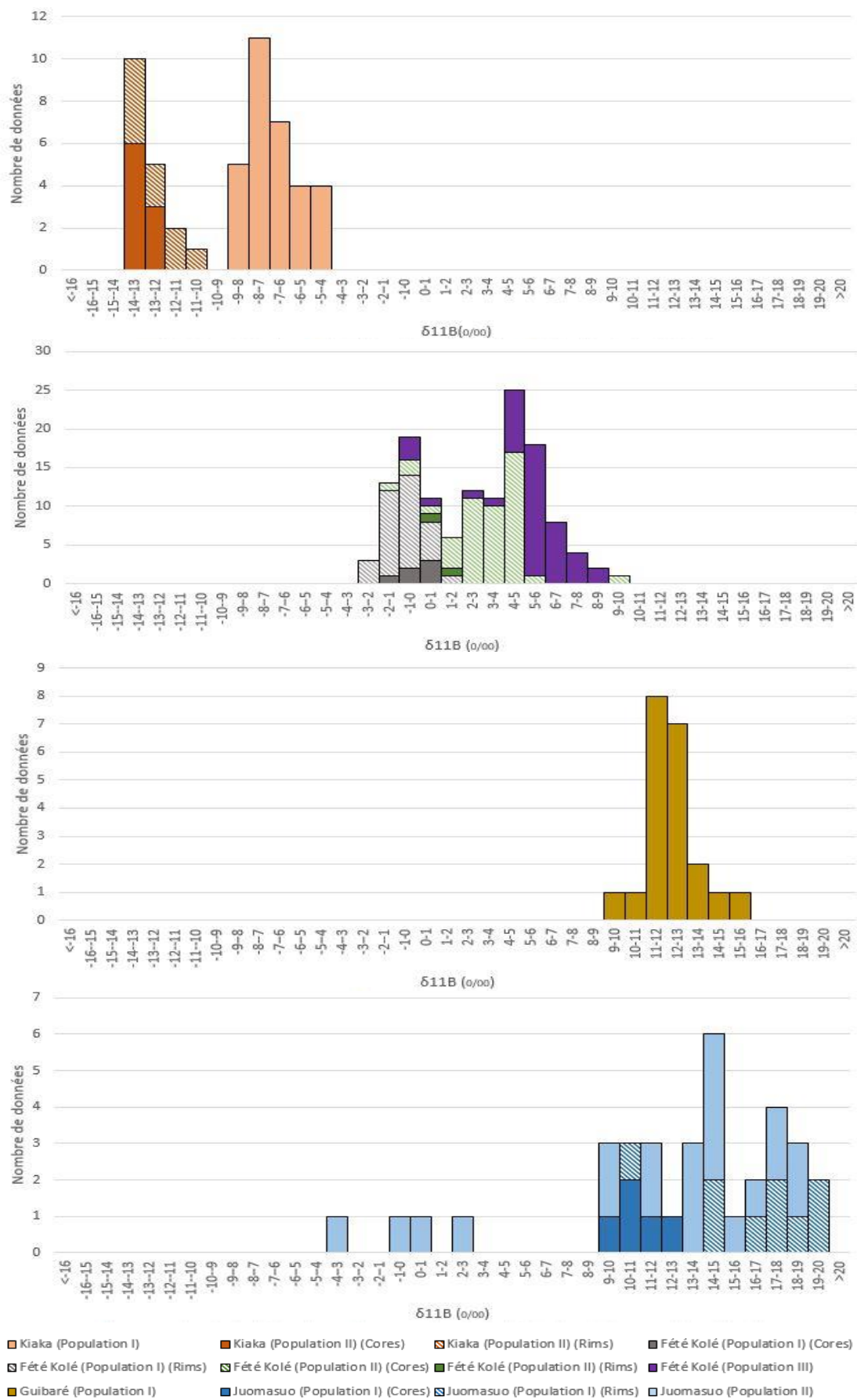


Figure 37 : Valeurs de $\delta^{11}B$ des fluides des gisements, de haut en bas, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo

Pour Kiaka, les tourmalines étant synchrones des biotites, le thermomètre basé sur le contenu en Ti des biotites a été utilisé pour calculer la température du fluide. Pour les tourmalines primaires (Population I), cette température est de 547°C et pour les secondaires (Population II), de 570°C (Fontaine, et al., 2015). Le fluide de la population I montre alors un $\delta^{11}\text{B}$ compris entre -9 et -4 ‰ avec un pic entre -8 et -7 ‰, les cœurs de la population II sont compris entre -14 et -12 ‰ avec un pic entre -14 et -13 ‰ et les bordures de ces mêmes tourmalines sont comprises entre -14 et -10 ‰ avec un pic entre -14 et -13 ‰ (Figure 37).

Pour le gisement de Fété Kolé, la température du fluide, d'où sont issues les tourmalines, a été déterminée à partir des inclusions fluides de $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-(H}_2\text{O)}$ des quartz synchrones des tourmalines. Cette température est d'environ 300 °C (Béziat, et al., 2008). Les $\delta^{11}\text{B}$ recalculés à partir de cette température donnent des valeurs pour les cœurs de la population I entre -2 et +1 ‰ avec un pic entre 0 et +1 ‰, pour la bordure de la population I entre -3 et +2 ‰ avec un pic entre -1 et 0 ‰. Pour la population II, les cœurs ont été calculés entre 0 et +2 ‰ et les bordures entre -2 et +5 ‰ avec un pic entre +4 et +5 ‰. Enfin le $\delta^{11}\text{B}$ de la population III s'étend entre -1 et +9 ‰ avec un pic entre +4 et +5 ‰ (Figure 37).

Pour le gisement de Guibaré, la température a également été obtenue à l'aide des inclusions fluides de $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-(H}_2\text{O)}$ dans les quartz synchrones des tourmalines. La température pour ce gisement est aussi d'environ 300°C (Béziat, et al., 2008). Les $\delta^{11}\text{B}$ recalculés pour Guibaré sont compris entre +9 et +16 ‰ avec un pic entre +11 et +12 ‰ (Figure 37).

Pour le gisement de Juomasuo, la température du fluide a été obtenue à partir des inclusions fluides des albites synchrones des tourmalines. La température a été estimée à environ 370°C (Vasilopoulos, 2014). Les tourmalines synchrones des sulfures présentent des cœurs avec un $\delta^{11}\text{B}$ compris entre +9 et +16 ‰ avec un pic entre +10 et +11 ‰, les bordures sont comprises entre +10 et +20 ‰. Pour les tourmalines disséminées se découpent en 2 populations, une première comprise entre -4 et +3 ‰, et une seconde entre +9 et +20 ‰ avec un pic entre +14 et +15 ‰ (Figure 37).

3.4. Mise en relation de la cristalchimie et de l'isotopie

Afin de déterminer s'il y avait un lien entre la cristalchimie des tourmalines, c'est-à-dire l'occupation des différents sites, et les données isotopiques, les diagrammes suivants ont été réalisés (Figures 38 & 39). Les premiers (Figure 38) mettent en relation les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ mesurées dans chaque tourmaline avec l'occupation du site X de ces mêmes tourmalines. Les deuxièmes (Figure 39) mettent en relation les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'occupation du site Y des tourmalines.

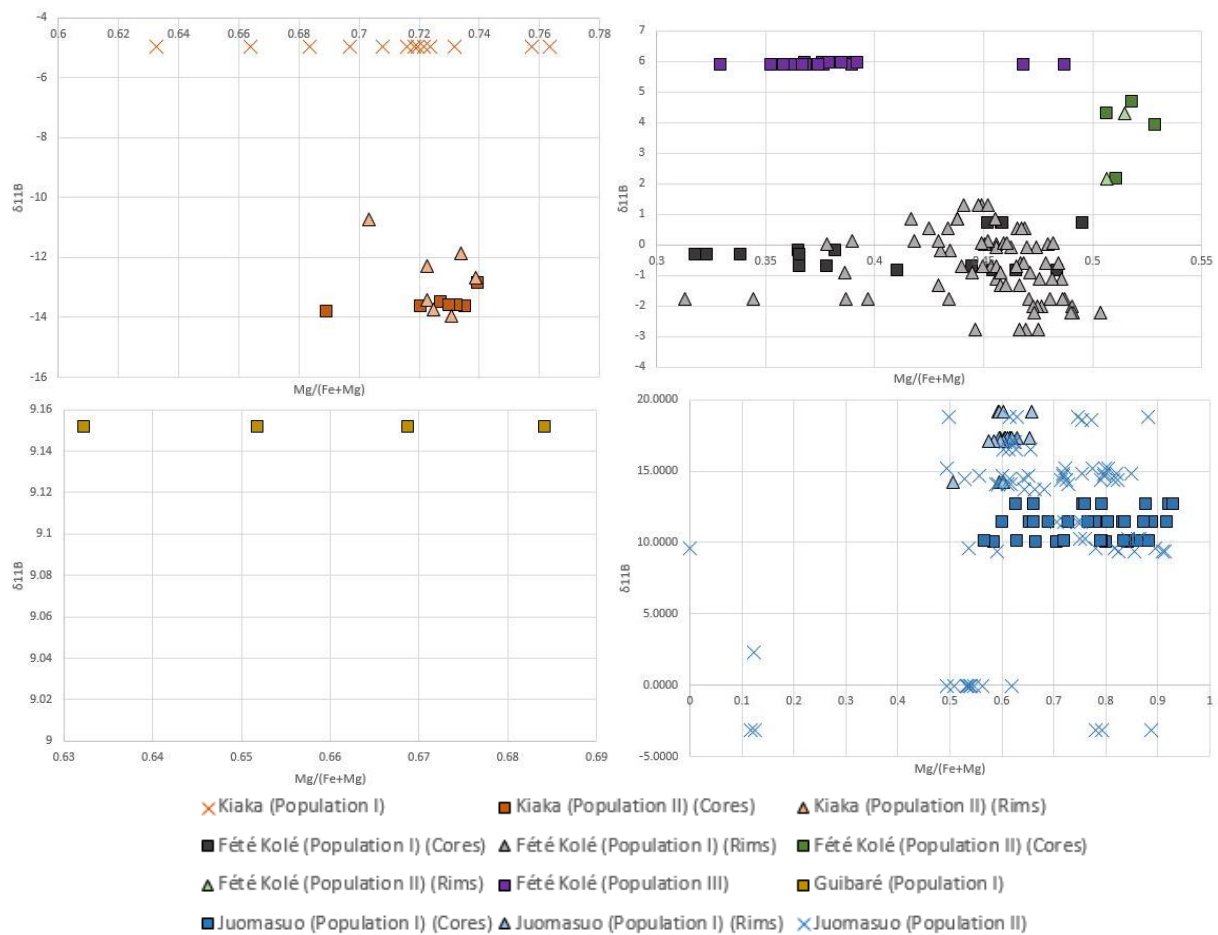


Figure 38 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides en fonction de l'occupation du site X des tourmalines, pour les gisements, de haut en bas et de droite à gauche, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo

Les diagrammes présentés ci-dessus (Figure 38), représentant les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'occupation du site X, montrent que pour différentes valeurs d'occupation du site X, il est possible d'avoir des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ presque identiques et, inversement, que pour des valeurs d'occupation du site X proches, les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ correspondant peuvent être très différentes.

Les diagrammes ci-dessous (Figure 39), présentant les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ en fonction de l'occupation du site Y, montrent qu'il n'y a pas vraiment de corrélation entre les deux paramètres mis en avant, tout comme pour les graphiques précédents (Figure 38).

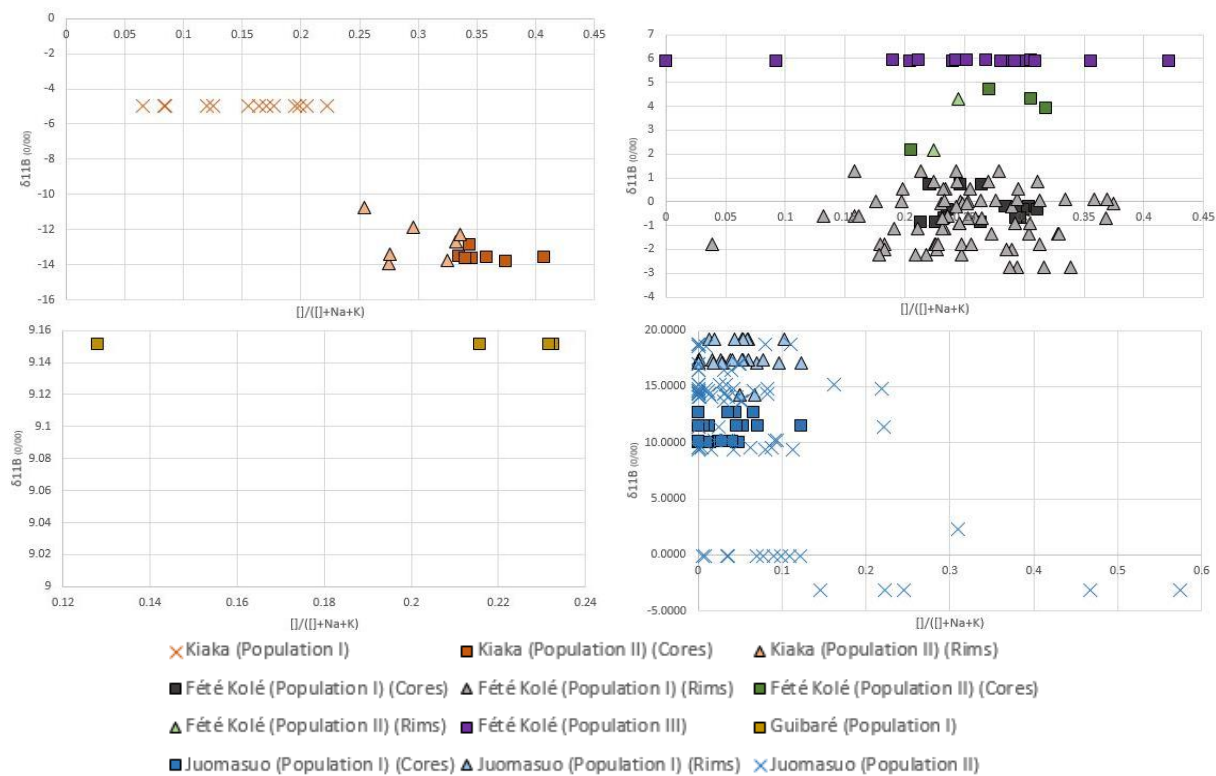


Figure 39 : Valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ des fluides en fonction de l'occupation du site Y des tourmalines, pour les gisements, de haut en bas et de droite à gauche, de Kiaka, Fété Kolé, Guibaré et Juomasuo

4. Discussion

Les résultats obtenus et détaillés au-dessus vont permettre de discuter de l'origine du fluide qui a amené à la formation des tourmalines pour les quatre gisements étudiés. Dans le cas de Kiaka, Fété Kolé et Guibaré, les tourmalines étant synchrones de l'or, la discussion va alors permettre d'émettre des hypothèses quant à l'origine du fluide ayant transporté l'or. Une comparaison de la cristallochimie et de l'isotopie avec celles de différents gisements d'or orogénique archéens et protérozoïques sera faite dans cette discussion afin d'entamer la réflexion sur l'origine du fluide. Enfin, une interprétation des données obtenues sera faite en se basant en partie sur la comparaison qui aura été effectuée.

4.1. Comparaison avec les données existantes

Une comparaison entre des gisements d'or orogénique archéens et protérozoïques et les quatre gisements étudiés lors de cette étude a été faite. Les gisements utilisés pour la comparaison sont Hira Buddini en Inde (Krienitz, et al., 2008), Tapera Grande et Quartzito au Brésil (Garda, et al., 2009), Val-d'Or au Canada (Beaudoin, et al., 2013), Eräjärvi, Kietyönmäki, Kutemajärvi, Riukka, Lepomäki et Ylöjärvi en Finlande (Talikka & Vuori, 2010) et Big Bell et Mt Gibson en Australie (Jiang, et al., 2002). Ils ont été choisis pour cette comparaison car les études menées sur ces gisements sont similaires à celle-ci, c'est-à-dire que la cristallochimie et l'isotopie du bore ont été discutées.

4.1.1. Chimie

Tout d'abord, les encaissants des différents gisements sont très variés. Il est même possible que pour un même gisement, plusieurs encaissants soient présents (Annexe 13). Globalement, les encaissants retrouvés sont des métabasites ou des métasédiments.

Les tourmalines présentes dans ces gisements sont généralement de composition type dravite ou schorl. Les deux types peuvent être retrouvés dans des métasédiments comme dans des metabasites. La Figure 32 montre que pour certains gisements (Guibaré et Juomasuo), l'encaissant ne contrôle pas l'occupation des sites X et Y des tourmalines. Pour Kiaka, des variations se font dans le site X en fonction de l'encaissant alors que, pour le gisement de Fété Kolé, les variations en fonction de l'encaissant se font dans le site Y. La nature de l'encaissant n'a donc peu ou pas d'influence sur le type de tourmaline présent dans le gisement.

Les diagrammes Al-Fe-Mg (Henry & Guidotti, 1985) dans lesquels sont représentées les analyses chimiques de tourmalines des gisements issus de la littérature présentent une grande distribution de la composition des tourmalines dans tous les domaines du diagramme. Cela peut amener à mettre cette observation en relation avec la nature variée des encaissants de ces gisements. Cependant, en regardant les diagrammes Al-Fe-Mg réalisés sur les quatre gisements de cette étude (Figure 31), il est possible de noter que, pour des encaissants différents, les compositions des tourmalines se retrouvent dans le même domaine du diagramme. L'encaissant n'est donc, ici non plus, pas l'influent majeur dans la composition des tourmalines.

Les substitutions des atomes au sein du réseau cristallin des tourmalines ne semblent pas suivre de logique particulière. Ces substitutions seraient donc propres au gisement. Une influence de l'encaissant n'est toutefois pas à écarter définitivement, mais il semblerait que ce soit le fluide qui influe le plus.

4.1.2. Isotopie

Les gammes de valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ obtenues pour les tourmalines des différents gisements étudiés ont été reportées dans la figure suivante (Figure 40). Cette figure représente des gammes de valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ dans différents contextes et avec différentes sources possibles de bore. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus élevées correspondent à une source marine et sont dues à l'incorporation du bore dans les roches via des fluides dérivant d'un panneau plongeant lors d'une subduction ou de séquences carbonatées ou évaporitiques de la croûte, ou encore directement de l'eau de mer circulant dans la roche. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus faibles proviennent d'évaporites non-marines, sont produites par un fractionnement isotopique entre les roches et les fluides lors des réactions métamorphiques de déshydratation ou proviennent de fluides magmatiques (Figure 40 A) (Marschall & Jiang, 2011).

La première chose qu'il est possible de noter avec cette figure est que le domaine correspondant aux gisements d'or archéens et protérozoïques, déterminés par Marschall et al (2011) (Figure 40 A), ne prend pas en compte toutes les données obtenues sur d'autres gisements d'or connus à cette période (Figure 40 B). En effet, ce domaine s'étend de -20 à -12 ‰ et les données publiées dans la littérature et compilées ici s'étendent de -22 à +10 ‰. De plus, les gisements d'or, présentés dans cette étude, d'âge Paléoprotérozoïque (Figure 40 C) présentent des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ allant de -16 à 17 ‰, ce qui dépasse largement le domaine précédemment défini par Marschall et al (2011).

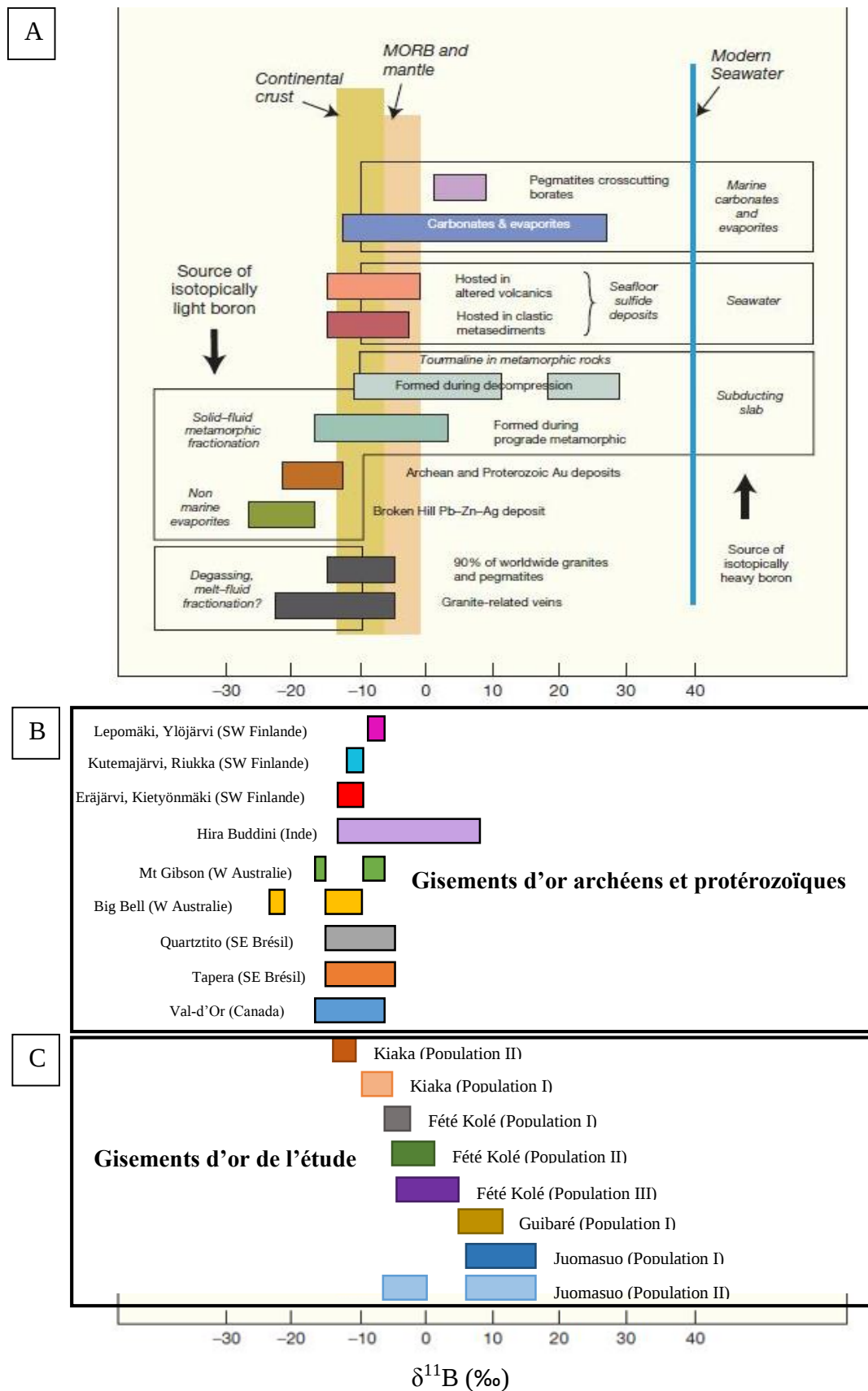


Figure 40 : Compositions isotopiques en fonction des roches encaissantes et de l'origine des fluides (A), comparées aux valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de gisements d'or archéens et protérozoïques (B) (Beaudoin, et al., 2013, Garda, et al., 2009, Jiang, et al., 2002, Krienitz, et al., 2008, Talikka & Vuori, 2010) et aux valeurs des gisements étudiés (C) (modifié d'après Marschall & Jiang, 2011)

Hormis pour le gisement de Hira Buddini, les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ sont tout de même relativement proches de celles du domaine des gisements d'or défini par Marschall & Jiang. Par contre, les quatre gisements étudiés ici montrent une variation des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ en partant des valeurs les plus faibles avec la population II de Kiaka jusqu'aux valeurs les plus élevées avec la population II de Juomasuo. Ces résultats montrent alors une variation de la composition isotopique avec une source profonde (métamorphique ou magmatique) pour les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus légères et une source plus superficielle (carbonates, évaporites) pour les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus lourdes. Les gisements africains appartenant à un craton plus juvénile (2.12 à 1.95 Ga) que le craton fennoscandien (2.45 à 1.85 Ga), où est localisé Juomasuo, une signature de source profonde pour ces gisements et une signature plus superficielle pour le gisement de Finlande semblent cohérentes.

4.2. Implication sur l'origine du bore et des fluides

4.2.1. Chimie

Malgré quelques faibles variations au sein de l'occupation des sites X et Y des tourmalines en fonction de la nature de l'encaissant, les compositions chimiques des tourmalines des gisements étudiés semblent relativement homogènes. Cela est notamment visible sur les diagrammes Al-Fe-Mg (Figure 31) réalisés pour chacun des gisements. Cette homogénéité de la chimie des tourmalines montre une homogénéité de leurs conditions de formation. Cependant, il n'est pas possible de voir une homogénéité des conditions de formation si l'on se base sur les compositions isotopiques de ces mêmes tourmalines.

4.2.2. Isotopie

La discussion pour chaque gisement sera faite en partant des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus faibles, c'est-à-dire celles de la population II de Kiaka, pour finir avec les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus élevées, celles de la population II de Juomasuo.

Les tourmalines de la population II de Kiaka ont des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -16 et -12 ‰. Ces valeurs correspondent aux domaines des VMS (Volcanogenic Massive Sulfides), du métamorphisme prograde du panneau plongeant et au domaine des granites. Comme aucune occurrence de VMS n'a été reportée dans la littérature (Ilboudo, 2010), les domaines correspondant ne seront pas retenus comme source du bore pour ce gisement. La présence d'intrusions granitiques s'étant mises en place vers 2.13 et 2.11 Ga (Fontaine, et al., 2015) pourrait expliquer une signature isotopique entrant dans le domaine des granites. Les tourmalines de cette population étant synchrones du dépôt de l'or dans le gisement, l'origine de l'or est donc la même que celle des tourmalines. En effet, les fluides apportés par la mise en place du granite ont pu percoler dans des roches présentant un enrichissement en or et ainsi le transporter.

Les tourmalines de la population I de Kiaka ont des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -11 et -5 ‰. Ces valeurs correspondent aux mêmes domaines que pour la population II. Il est possible que ces deux populations de tourmalines aient la même source, mais les tourmalines de la population I pré-datant la population II et, de la même manière, les intrusions granitiques qui ont été reliées aux tourmalines de la population II, la source de ces tourmalines n'est pas granitique. Le fractionnement solide-fluide lors du métamorphisme prograde du panneau plongeant semble être alors la seule origine possible des tourmalines de la population I de Kiaka. La présence d'intrusions de composition adakitique s'étant mises en place vers 2.14 ± 0.36 Ga (Fontaine, et al., 2015) pourrait expliquer cette signature isotopique. En effet, ces intrusions sont issues de la fusion d'un coin mantellique hydraté par les fluides formé lors de la subduction du panneau plongeant. Cela expliquerait alors la signature isotopique entrant dans le champ du métamorphisme induit par les réactions de déshydratation du panneau plongeant. De la même manière que pour la population II, l'or est synchrone des tourmalines de la population I. Il y a donc eu au moins deux épisodes de minéralisation d'or, une première lors de la déshydratation du panneau plongeant et une deuxième avec la mise en place des granites.

Les tourmalines de la population I de Fété Kolé ont des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -7 et -2 ‰. Ces valeurs sont compatibles avec des carbonates et évaporites, des VMS, des tourmalines métamorphiques formées pendant la décompression (exhumation des roches métamorphiques) et dans le domaine des tourmalines formées lors du métamorphisme prograde. Etant donné qu'aucune roche d'affinité carbonatée, évaporitique ou encore aucun dépôt de sulfures massifs associés à du volcanisme n'ont été décrits à proximité du gisement de Fété Kolé, ces domaines de valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ sont écartés des sources possibles pour le bore des tourmalines de Fété Kolé. Les tourmalines de la population I étant présentes dans des veines de quartz perpendiculaires à la foliation (Béziat, et al., 2008), une source provenant de l'exhumation du panneau plongeant serait à envisager. En effet, si les tourmalines s'étaient mises en place lors du métamorphisme prograde avec un fractionnement solide-fluide, les tourmalines seraient retrouvées dans l'intégralité de l'encaissant en suivant la foliation et pas uniquement sous forme de veines recoupant cette dernière.

La population II des tourmalines de Fété Kolé présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -6 et +2 ‰. Ces valeurs recoupent les mêmes domaines que la population I du même gisement. De la même manière que pour la population I, les tourmalines se présentent en association avec le quartz en formant des veines. Il est alors possible de faire la même conclusion que pour la population I en disant que le fluide ayant formé les tourmalines est issu de l'exhumation du panneau plongeant.

Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ de la population III de Fété Kolé sont comprises entre -5 et +5 ‰. Ces valeurs correspondent aux mêmes domaines que les deux autres populations du même gisement. Ces tourmalines se présentent sous forme de tourmalinite massive. Cette roche uniquement composée de tourmaline et recoupant la roche encaissante et sa foliation permet de faire une analogie avec les veines des autres populations. La source de ces tourmalines peut alors être la même que pour les autres tourmalines de Fété Kolé, c'est-à-dire l'exhumation du panneau plongeant. Les trois populations de Fété Kolé ayant une même source de bore peuvent être regroupées en une seule population. L'or du gisement étant synchrone de cette population, la source de l'or à Fété Kolé est donc l'exhumation du panneau plongeant.

Les tourmalines de Guibaré ont des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre +5 et +12 ‰. Ces valeurs recoupent les domaines des carbonates et évaporites ainsi que celui des tourmalines formées lors de l'exhumation du panneau plongeant. Aucune occurrence de carbonates ou d'évaporite n'ayant été montrée, c'est le deuxième réservoir qui est retenu comme source de ces tourmalines, c'est-à-dire, l'exhumation du panneau plongeant. Les tourmalines de Guibaré étant synchrones de l'or, il est possible de déduire que le fluide minéralisateur est issu de l'exhumation du panneau plongeant.

La population I de Juomasuo présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre +6 et +17 ‰. Ces valeurs recoupent les domaines des carbonates et évaporites et celui des tourmalines formées par décompression. Des indices de la présence d'évaporites à proximité de Juomasuo (Vanhanen, 2001) permettent de dire qu'il est possible que ces évaporites soient la source du fluide ayant formé les tourmalines.

La population II de Juomasuo présente des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ comprises entre -7 et 0 ‰ et entre +6 et +16 ‰. Ces valeurs correspondent aux mêmes domaines que la population I. La conclusion est alors la même que pour la population I, c'est-à-dire que la source du fluide ayant formé les tourmalines sont les évaporites situées à proximité du gisement. Les deux populations de Juomasuo ayant la même source, il est possible de les regrouper en une seule population.

Les compositions isotopiques des gisements étudiés présentent une large gamme de variations. Ces valeurs peuvent donc témoigner d'une source de fluide différente pour chaque gisement, mais il est aussi possible que ces différences de compositions isotopiques témoignent des différentes roches traversées par le fluide durant son parcours. En effet, il a été montré précédemment que l'encaissant à proximité du gisement ne semblait pas influencer la chimie et l'isotopie des tourmalines. Cependant, si l'on résonne à une échelle plus grande, le fluide ne fait pas que percoler dans cet encaissant proche, mais il traverse un volume de roche beaucoup plus grand. Les compositions isotopiques ne représenteraient alors pas systématiquement la source du fluide, mais plutôt les différents environnements traversés par le fluide. En effet, celui-ci peut très bien traverser des roches sursaturées en bore et en prendrait leur signature isotopique. La source du bore serait alors ces roches, mais ces dernières pourraient également être la source de l'or lorsque le fluide riche en bore correspond au fluide minéralisateur. L'étude de l'environnement global du gisement, c'est-à-dire de la proportion entre les roches mafiques, felsiques et sédimentaires, serait intéressante

Conclusion

La comparaison des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ obtenues lors de cette étude avec celles d'autres réservoirs a permis d'émettre des hypothèses quant à la source du fluide ayant amené à la formation de tourmalines dans les gisements étudiés. Pour la population I de Kiaka, cette source serait un fluide formé lors du fractionnement solide-fluide au moment du métamorphisme prograde. Pour la population II de ce même gisement, l'origine du fluide serait un fluide issu du dégazage des granites ayant intrudé l'encaissant. Les trois populations de tourmaline de Fété Kolé semblent avoir la même origine. Celle-ci serait un fluide issu du fractionnement lors du métamorphisme prograde. Il en va de même pour l'origine du fluide du gisement de Guibaré. Pour le gisement de Juomasuo, les deux populations de tourmaline semblent avoir la même source, qui est des évaporites à proximité du gisement.

Une comparaison entre les quatre gisements de l'étude et d'autres gisements d'or archéens ou protérozoïques a été effectuée. Le but de cette comparaison était de voir s'il pouvait y avoir un lien entre l'encaissant des gisements, la cristallogénèse des tourmalines et les rapports isotopiques relevés dans celles-ci. Le résultat est qu'il n'y a apparemment pas de lien direct entre ces paramètres et que ce serait le fluide qui influencerait majoritairement sur la composition et l'isotopie de tourmalines. La composition du fluide pourrait alors être celle qu'il avait dès sa formation, mais elle peut aussi être due aux roches que le fluide a traversées tout au long de son parcours.

Perspectives

Afin de déterminer si la signature isotopique des tourmalines est la même que l'encaissant, une analyse isotopique du bore sur roche totale de cet encaissant serait utile. Cela pourrait aussi permettre de voir si la signature isotopique des tourmalines n'est vraiment influencée que par le fluide qui a circulé, ou si l'encaissant a une plus grande part dans la signature des tourmalines, et, dans ce cas, il serait possible d'essayer de quantifier la part de l'encaissant en estimant le rapport eau/roche lors de la circulation du fluide et en prenant en compte les températures de mise en place de l'or pour chacun des gisements. Ces analyses pourraient aussi mettre en avant le fait que le fluide ait entièrement contaminé l'encaissant.

Une autre perspective pourrait être l'analyse de terres rares dans les tourmalines à l'aide d'un LA-ICP-MS. Les spectres de REE ainsi obtenus pourraient être comparés avec d'autres spectres de tourmalines d'autres gisements et ainsi, il serait peut être possible de voir s'il y a un lien entre la source du fluide et cette signature en REE. Si ce lien existe et qu'il est systématique, cette méthode serait un bon moyen de tracer l'origine des fluides.

Les métaux, tels que le plomb ou l'or, peuvent entrer dans le réseau cristallin des tourmalines. Des analyses LA-ICP-MS pourraient mettre en évidence la présence de ces métaux. Si de l'or est présent au sein des tourmalines, cela confirmerait la contemporanéité des tourmalines et de la minéralisation en or. Le fluide ayant formé les tourmalines serait alors le fluide minéralisateur et ce serait donc ce fluide minéralisateur qui pourra être tracé directement à l'aide des tourmalines.

Bibliographie

B2GOLD CORP. (2014). *Annual information form of B2GOLD Corp.*

Baratoux, L., Metelka, V., Naba, S., Jessel, M. W., Gregoire, M., & Ganne, J. (2011). Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (2.2-2.0 Ga), western Burkina Faso. *Precambrian Research*, 191, pp. 18-45.

Beaudoin, G., Rollion-Bard, C., & Giuliani, G. (2013). The boron isotope composition of tourmaline from the Val-d'Or orogenic gold deposits, Québec, Canada. *Mineral deposit research for a high-tech world*. 3, pp. 1090-1092. 12th SGA Biennial Meeting.

Béziat, D., Bourges, F., Debat, P., Fuchs, Y., Lompo, M., Martin, F., . . . Tollon, F. (1999). The Guibaré and Fété Kolé gold-bearing tourmaline-quartz veins in the birimian greenstone belts of Burkina Faso. *The Canadian Mineralogist*, 37, pp. 575-591.

Béziat, D., Dubois, M., Debat, P., Nikiéma, S., Salvi, S., & Tollon, F. (2008). Gold metallogeny in the Birimian craton of Burkina Faso (West Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 50, pp. 215-233.

Bourges, F., Debat, P., Tollon, F., Munoz, M., & Ingles, J. (1998). The geology of the Taparko gold deposit, Birimian greenstone belt, Burkina Faso, West Africa. *Mineralium Deposita*, 33, pp. 591-605.

Castaing, C., Bila, M., Milési, J.-P., Thiéblemont, D., Le Metour, J., Egal, E., . . . Zunimo, C. (2003). *Notice explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000* (3ème ed.).

Catanzaro, E., Champion, C., Garner, E., Marinenko, G., Sappenfield, K., & Shields, W. (1970). Boric acid: isotopic and assay standard reference materials. *National Bureau of Standards (US) Special Publications*, 260-17, pp. 1-71.

de Groot, P. A. (2009). *Handbook of Stable Isotope Analytical Techniques* (Vol. II). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Dyar, M., Wiedenbeck, M., Robertson, D., Cross, L., Delaney, J., Ferguson, K., . . . Yates, M. (2001). Reference minerals for microanalysis of light elements. *Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 25, pp. 441-463.

Eilu, P., Sorjonen-Ward, P., Nurmi, P., & Niiranen, T. (2003). A Review of Gold Mineralization Styles in Finland. *Economic Geology*, 98, pp. 1329-1353.

Fontaine, A. (2012). *Gisement d'or et pic métamorphique : l'exemple du gisement de Kiaka (Burkina Faso)*. Master Matières Premières Minérales, Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy.

Fontaine, A., André-Mayer, A.-S., Eglinger, A., Ada, K., Reisberg, L., Le Mignot, E., . . . Poujol, M. (2015). The Kiaka gold deposit (Burkina Faso): A record of Paleoproterozoic (Eburnean) orogeny in West Africa. *Economic Geology*, Submitted.

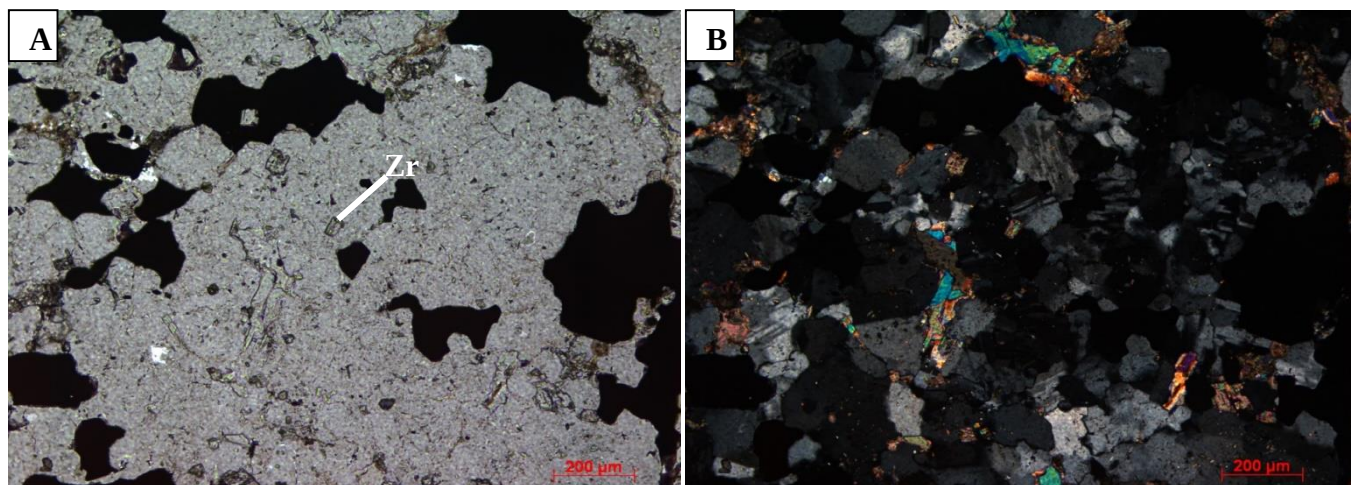
Garda, G., Trumbull, R., Beljavskis, P., & Wiedenbeck, M. (2009). Boron isotope composition of tourmalinite and vein tourmalines associated with gold mineralization, Serra do Itaberaba Group, central Ribeira Belt, SE Brazil. *Chemical Geology*, 264, pp. 207-220.

- Geological Survey of Finland. (n.d.). *Hangaspuro (Juomasuo II)*. Retrieved 01 11, 2015, from http://new.gtk.fi/_system/print.html?from=/informationservices/commodities/Gold/hangaspuro.html
- Groves, D. (1993). The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Ylgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 28, pp. 366-374.
- Hanski, E., & Huhma, H. (2005). Precambrian Geology of Finland - Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. *Central Lapland greenstone belt*, 139-194. (M. Lehtinen, P. Nurmi, & O. Rämö, Eds.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Hein, K. A., Morel, V., Kagoné, O., Kiemde, F., & Mayes, K. (2004). Birimian lithological succession and structural evolution in the Goren segment of the Boromo-Goren Greenstone Belt, Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 39, pp. 1-23.
- Henry, D. J., & Guidotti, C. V. (1985). Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an exemple from the staurolite-grade metapelite of NW Maine. *American Mineralogist*, 70, pp. 1-15.
- Henry, D. J., Novak, M., Hawthorne, F. C., Ertl, A., Dutrow, B. L., Uher, P., & Pezzotta, F. (2011). Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. *American Mineralogist*, 96, pp. 895-913.
- Ilboudo, H. (2010). *Le Gite d'amas sulfuré de Tiébélé (Burkina Faso-Afrique de l'Ouest)*. Thèse, Université de Ouagadougou, Laboratoire de Géologie Minéralogie - Pétrophysique & Tectonique, Ouagadougou.
- Jiang, S.-Y., Palmer, M. R., & Yeats, C. J. (2002). Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Archean Big Bell and Mount Gibson gold deposits, Murchison Province, Ylgarn Craton, Western Australia. *Chemical Geology*, 188, pp. 229-247.
- Krienitz, M.-S., Trumbull, R., Hellmann, A., Kolb, J., Meyer, F., & Wiedenbeck, M. (2008). Hydrothermal gold mineralization at the Hira Buddini gold mine, India: constraints on fluid evolution and fluid sources from boron isotopic compositions of tourmaline. *Mineralium Deposita*, 43, pp. 421-434.
- Marschall, H. R., & Jiang, S.-Y. (2011). Tourmaline Isotopes: No Element Left Behind. *Elements*, 7, pp. 313-319.
- Meyer, C., Wunder, B., Meixner, A., Romer, R. L., & Heinrich, W. (2008). Boron-isotope fractionation between tourmaline and fluid: an experimental re-investigation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156, pp. 259-267.
- Milési, J., Feybesse, J., Ledru, P., & Marcoux, E. (1992). Early Proterozoic ore deposits and tectonics o the Birrimian orogenic belt, West Africa. *Precambrian Research*, 58, pp. 305-344.
- Naba, S. (1999). *Structure et mode de mise en place de plutons granitiques emboîtés : Exemple de l'alignement plutonique paléoprotérozoïque de Tenkodogo-Yamba dans l'Est du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest)*. Thèse, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar.

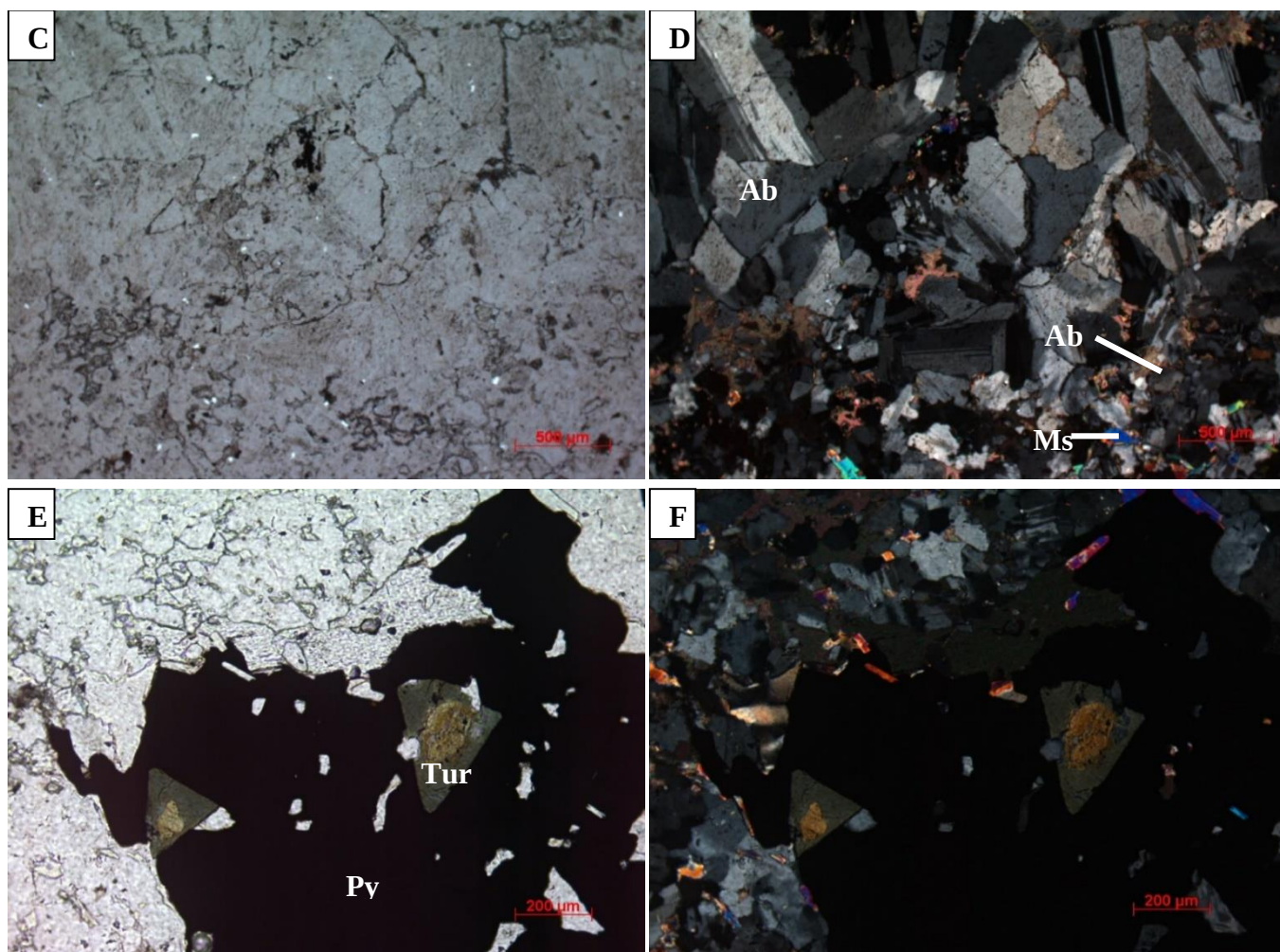
- Nakano, T., & Nakamura, E. (2001). Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127, pp. 233-252.
- Pankka, H. (1992). *Geology and mineralogy of Au-Co-U deposits in the proterozoic Kuusamo volcanic-sedimentary belt, northeastern Finland*. A dissertation, Michigan Technological University, Geology.
- Pankka, H., & Vanhanen, E. (1989). *Aulacogen related epigenetic Au-Co-U deposits in northeastern Finland*. Geological Survey of Finland.
- Phillips, G., & Powell, R. (2009). Formation of gold deposits: Reviews and evaluation of the continuum model. *Earth-Science Reviews*, 94, pp. 1-21.
- Spivack, A. (1986). *Boron isotope geochemistry*. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences.
- Strand, K., & Laajoki, K. (1999). Application of the parasequence concept to the Paleoproterozoic record of the northern Fennoscandian Shield. *Precambrian Research*, 97, pp. 253-267.
- Talikka, M., & Vuori, S. (2010). Geochemical and boron isotopic compositions of tourmalines from selected gold-mineralised and barren rocks in SW Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 82, pp. 113-128.
- Tomkins, A. (2010). Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, pp. 3246-3259.
- Tomkins, A. G. (2014). On the source of orogenic gold. *Geology*, 41, pp. 1255-1256.
- Vanhanen, E. (2001). *Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland*. Bulletin 399, Geological Survey of Finland.
- Vasilopoulos, M. (2014). *Juomasuo drill core observations and first results*. Report for Internship MSc Thesis, Geological Survey of Finland (GTK).
- Yacé, I. (1984). Le précambrien de l'Afrique de l'Ouest et ses corrélations avec le Brésil oriental. *Rapport final PICG CIFEG*, 2, 28.
- Yavuz, F., Karakaya, N., Yildirim, D. K., & Karakaya, M. C. (2014). A Windows program for calculation and classification of tourmaline-supergroup (IMA-2011). *Computers & Geosciences*, 63, pp. 70-87.

Annexes

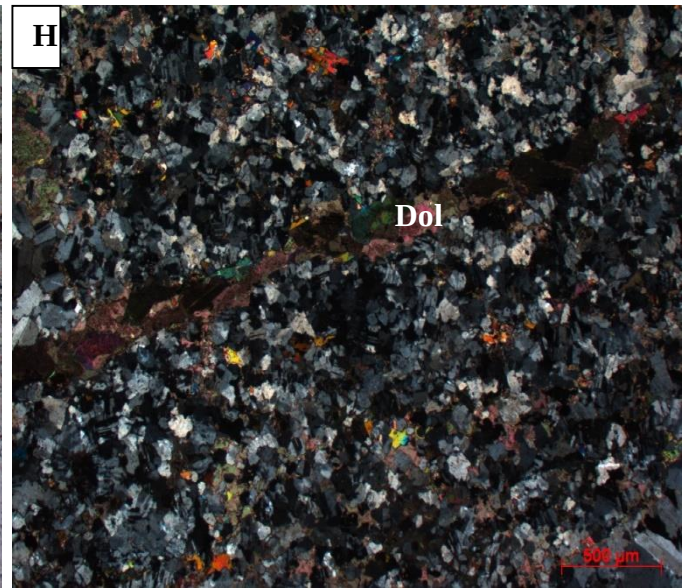
Annexe 1 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061481 (Juomasuo)



Zircon (Zrn) dans la matrice de l'échantillon 04061481, LPNA (A), LPA (B)

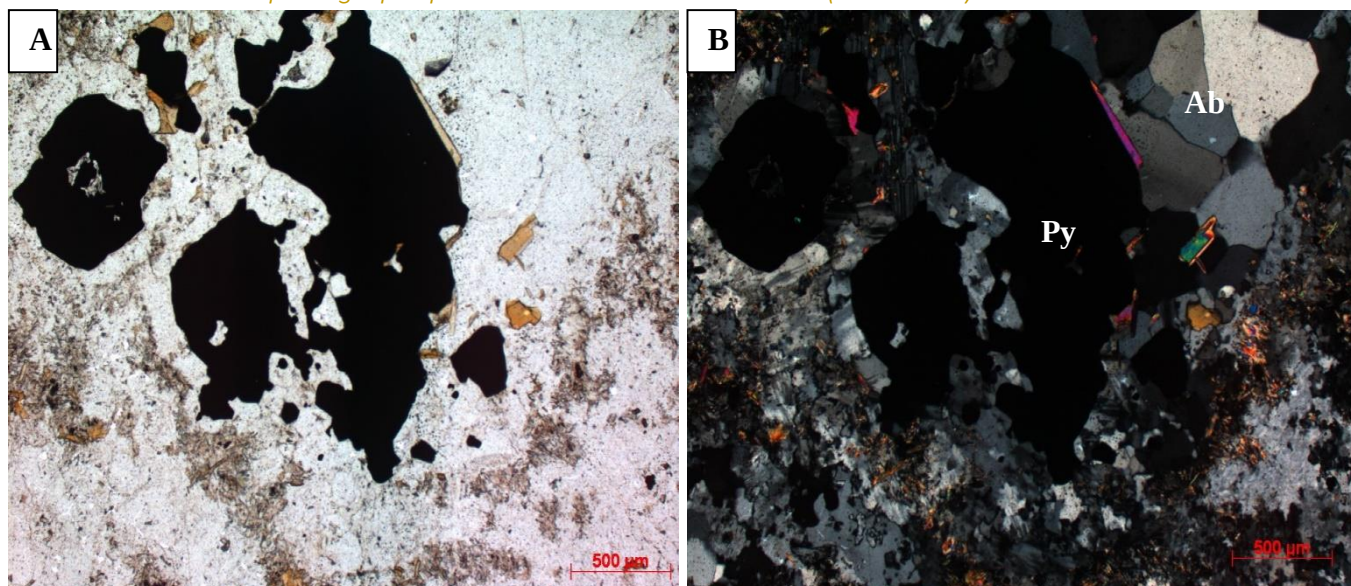


Générations 1 et 2 d'albite (Ab), LPNA (C), LPA (D) ; tourmalines (Tur) en inclusion dans la pyrite (Py), LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon 04061481

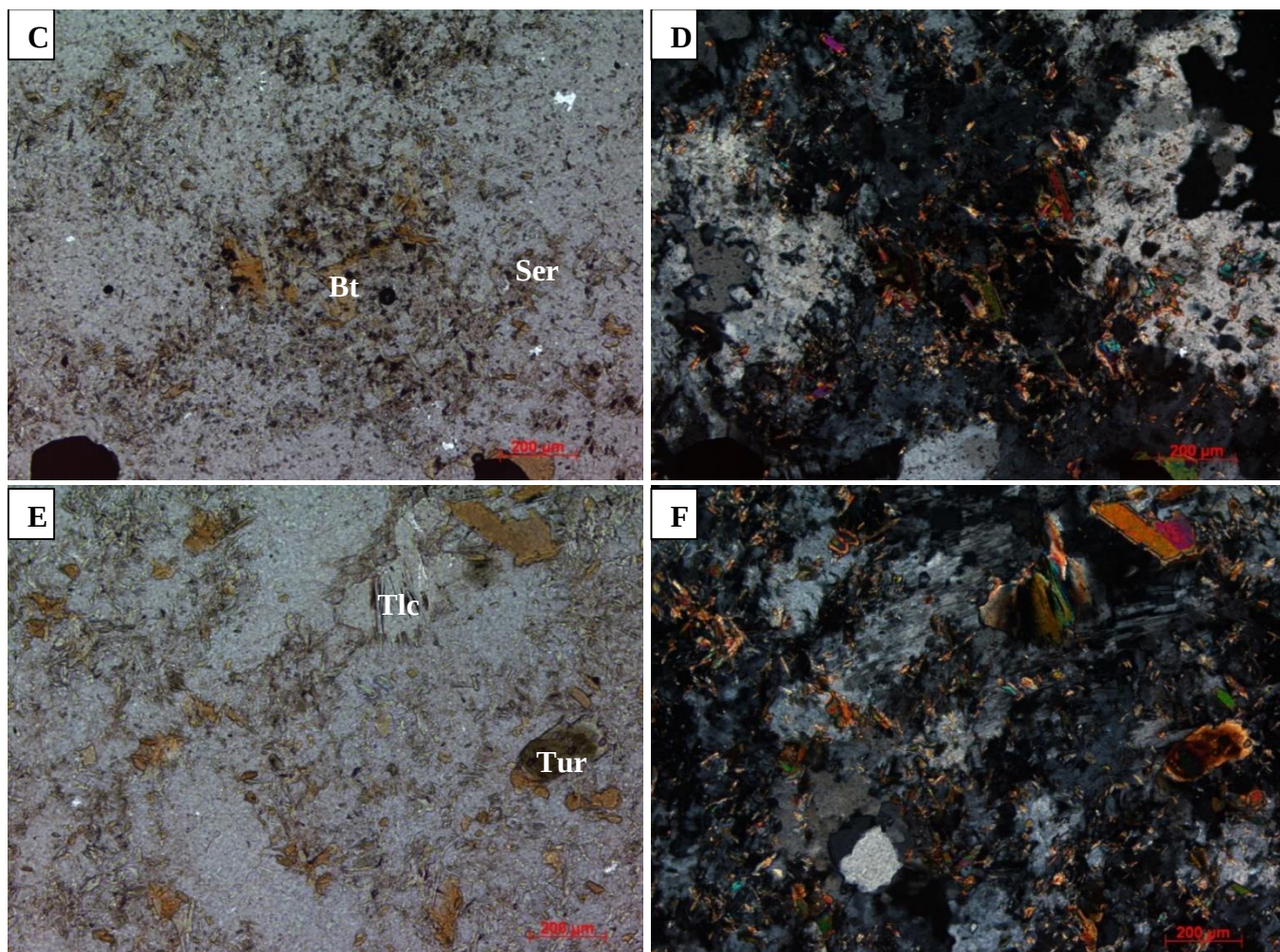


Veine de dolomite (Dol) recoupant la matrice, LPNA (G), LPA (H) de l'échantillon 04061481

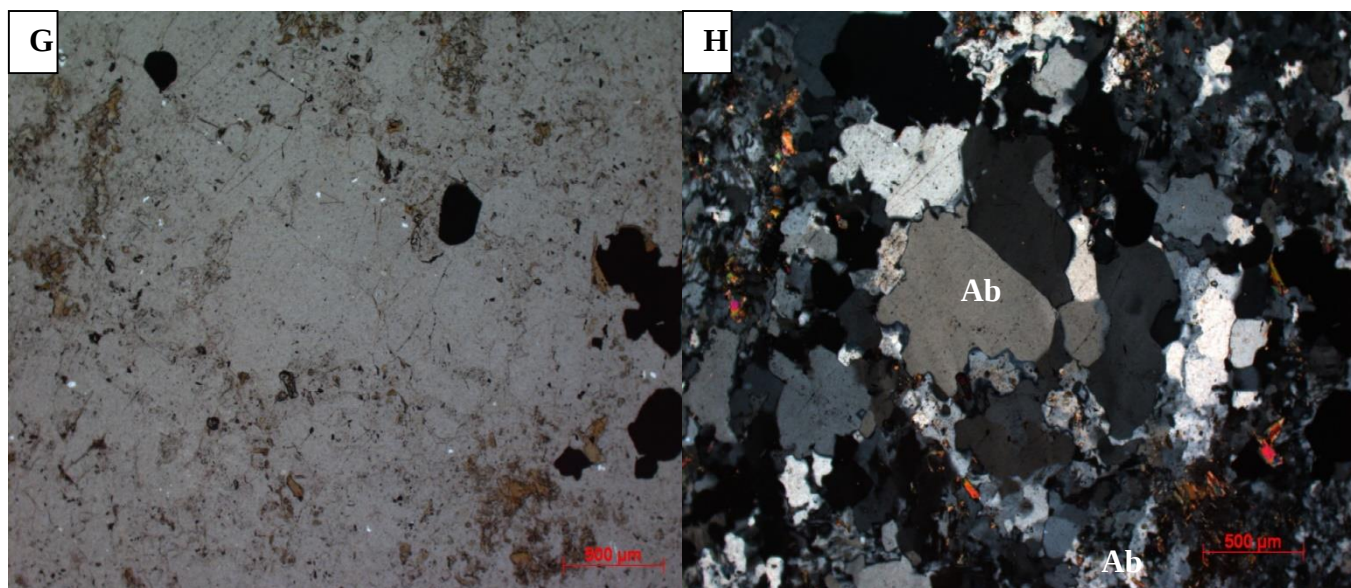
Annexe 2 : Planches pétrographiques de l'échantillon 05061485 (Juomasuo)



Génération 1 d'albite (Ab) à l'équilibre avec la pyrite (Py), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon 05061485

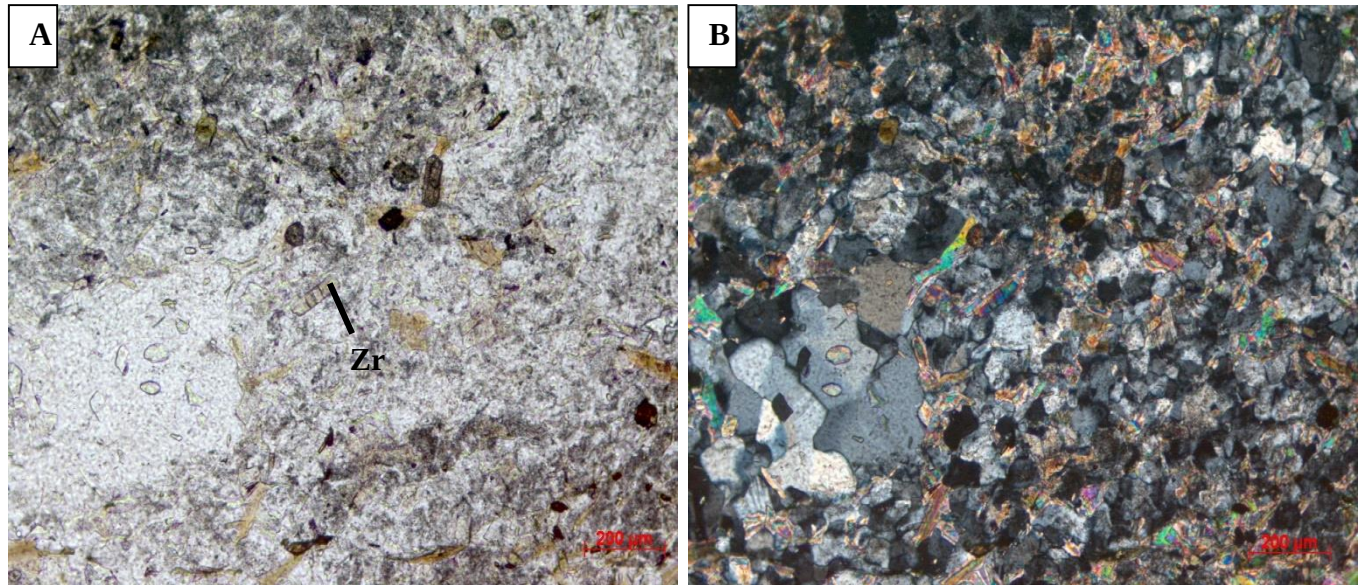


Amas de biotite (Bt) accompagné de séricite (Ser, LPNA (C), LPA (D) ; tourmalines (Tur) et talc (Tlc) disséminés dans la matrice, LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon 05061485

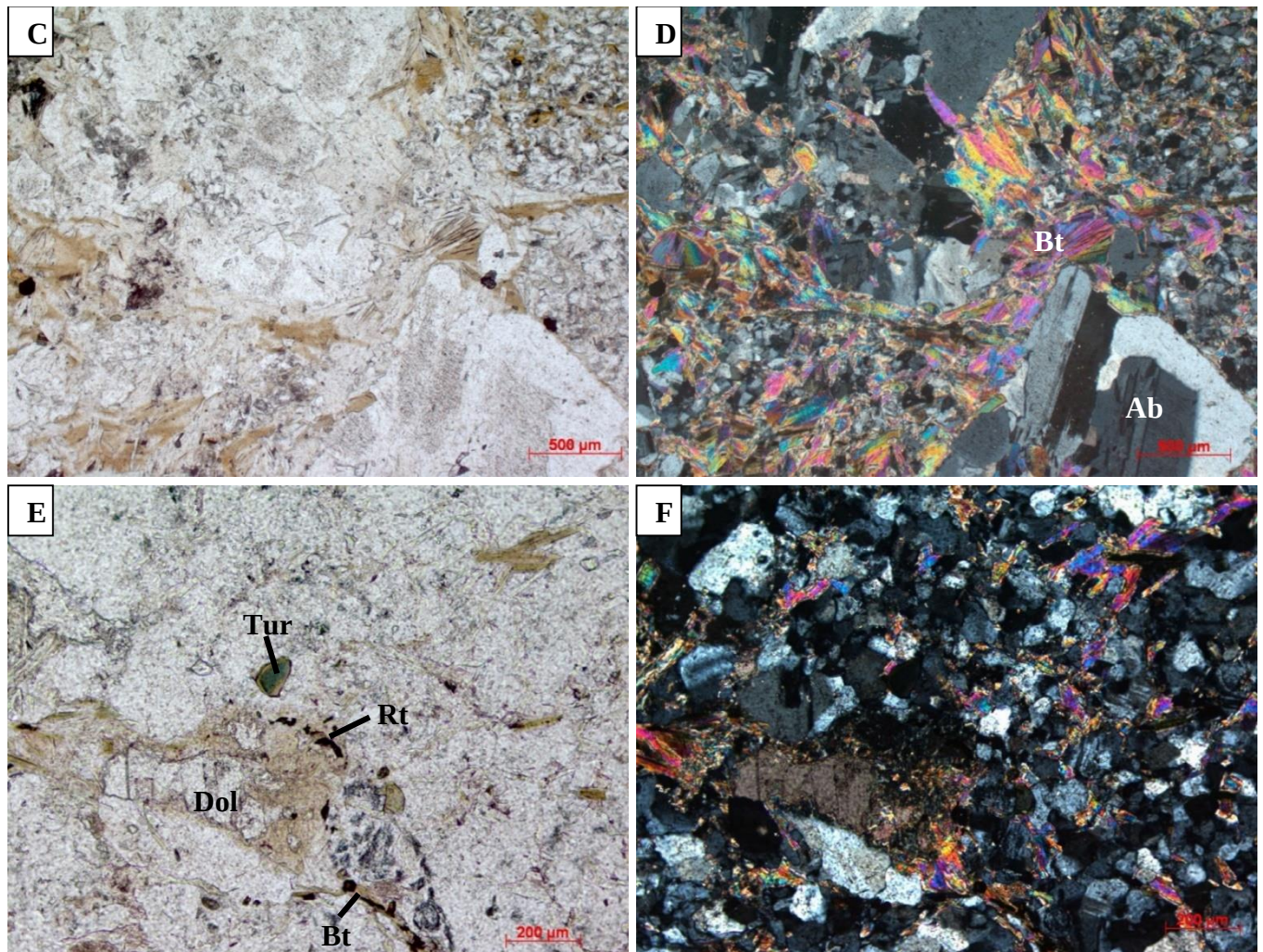


Générations 1 et 2 d'albite (Ab), LPNA (G), LPA (H) de l'échantillon 05061485

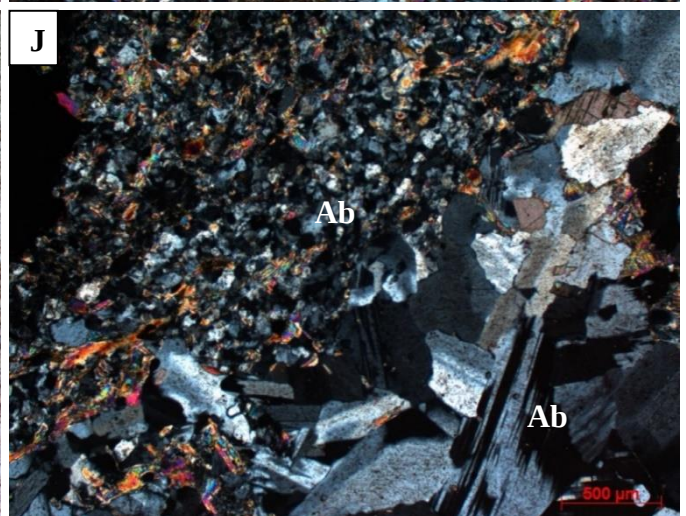
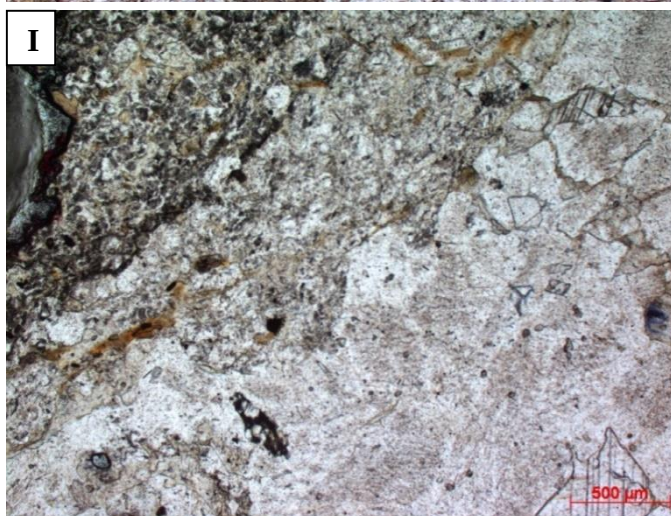
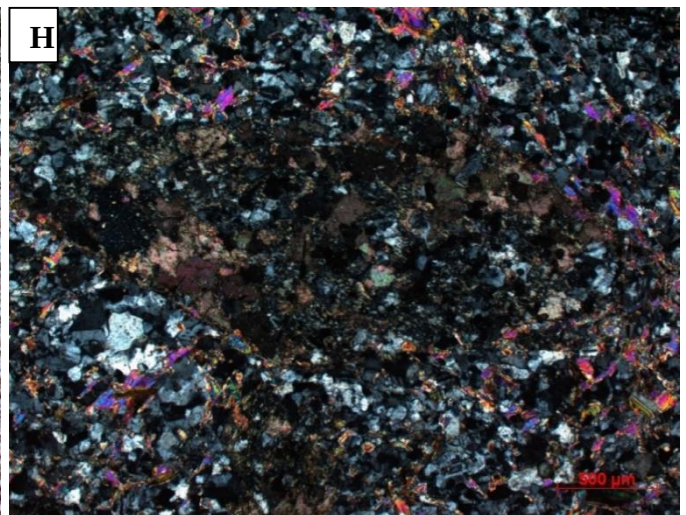
Annexe 3 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061441 (Juomasuo)



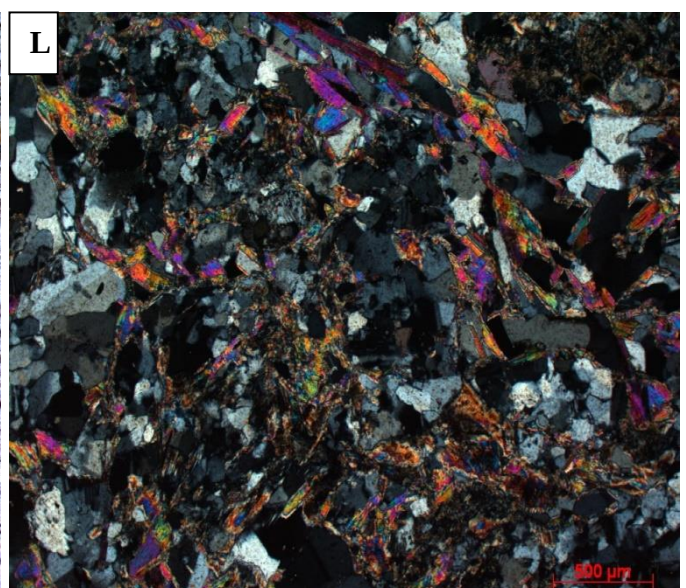
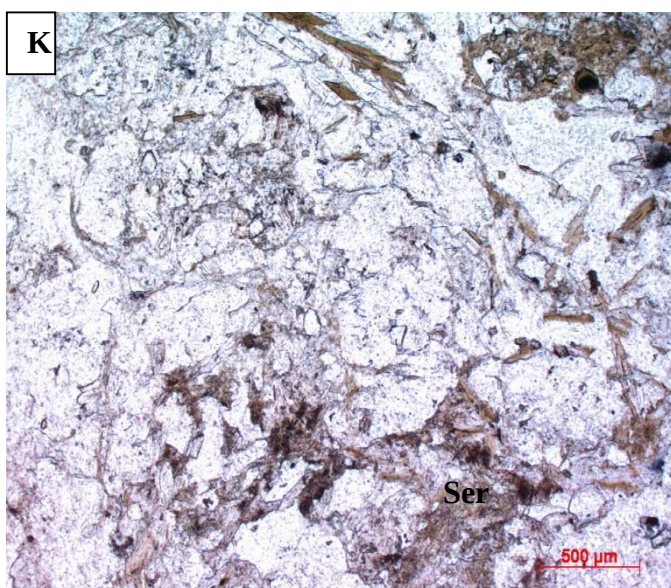
Zircon (Zrn) disséminés dans la matrice, LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon 04061441



Génération 1 d'albite (Ab) traversée par la biotite (Bt, LPNA (C), LPA (D) ; tourmalines (Tur), rutile (Rt), biotite (Bt) et dolomite (Dol) associés dans la matrice, LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon 04061441

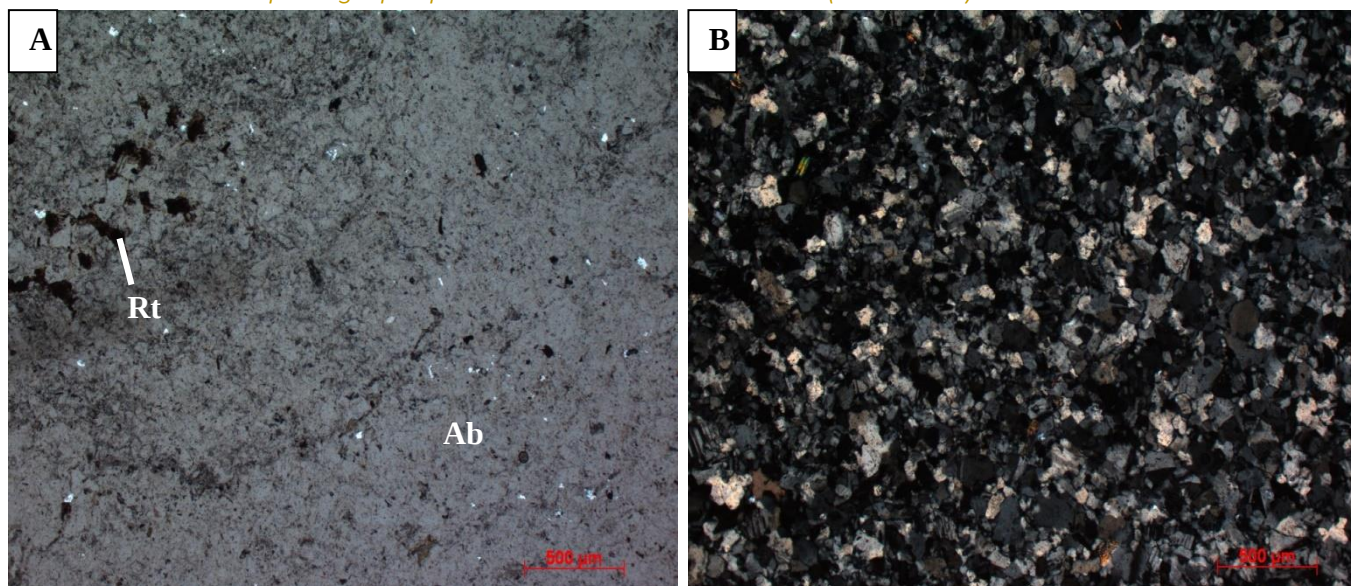


Séricite (Ser) en remplacement d'anciens minéraux, LPNA (G), LPA (H) ; générations 1 et 2 d'albite (Ab), LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon 04061441

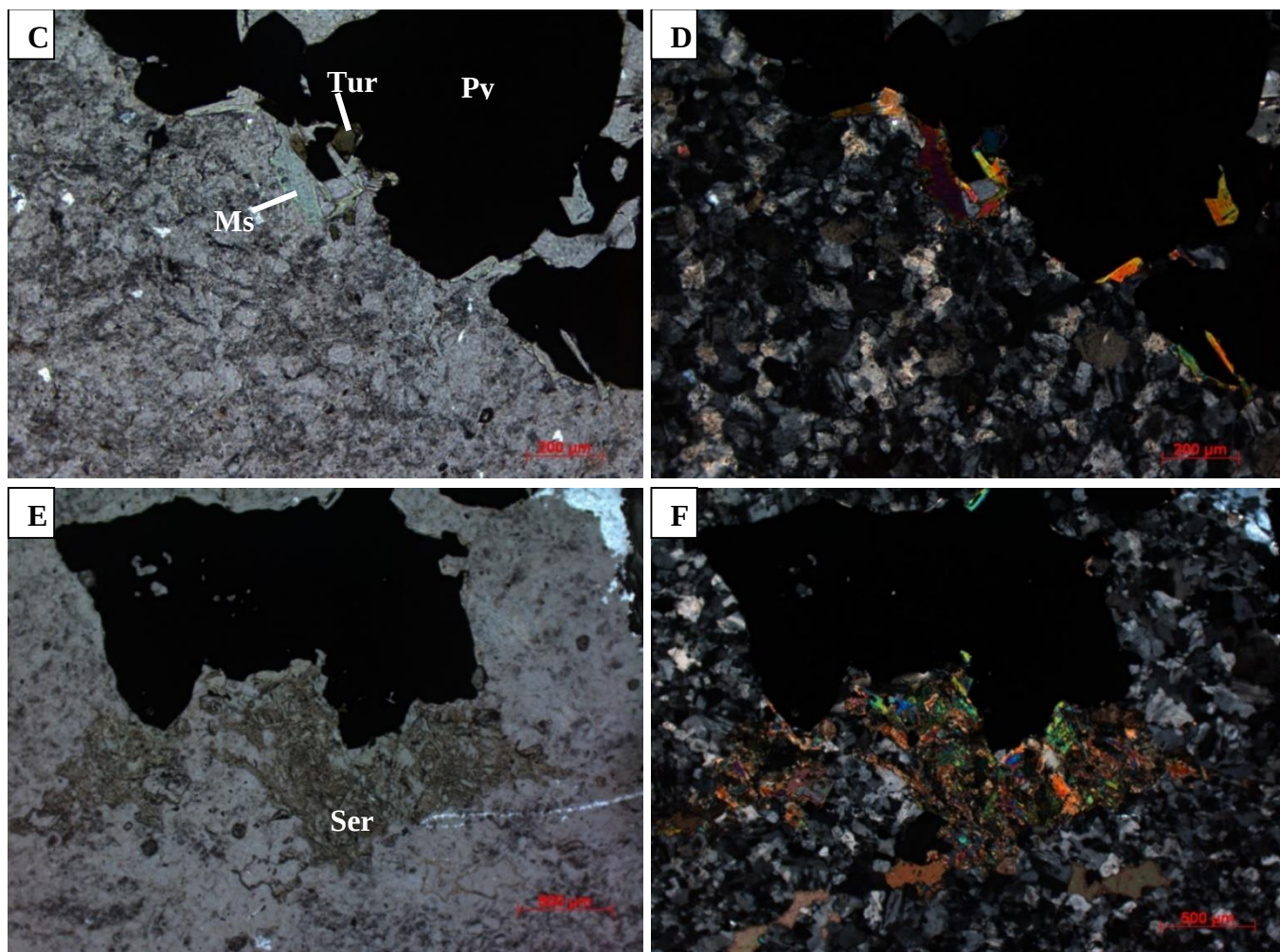


Amas de séricite (Ser) dans la matrice, LPNA (K), LPA (L) de l'échantillon 04061441

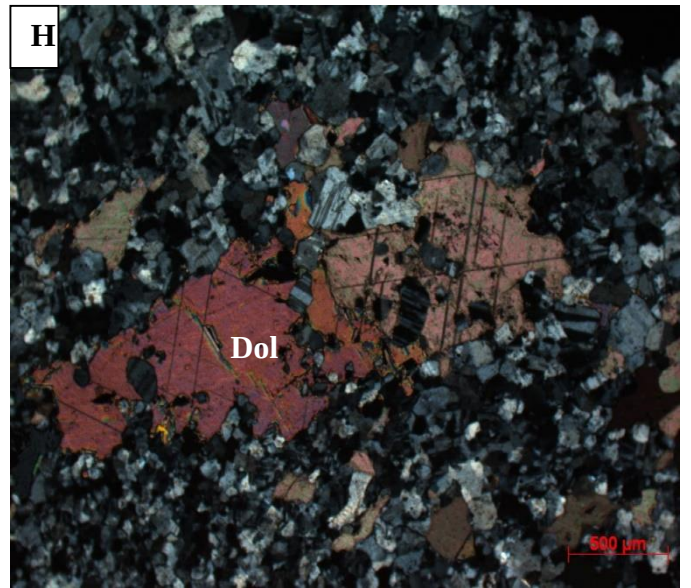
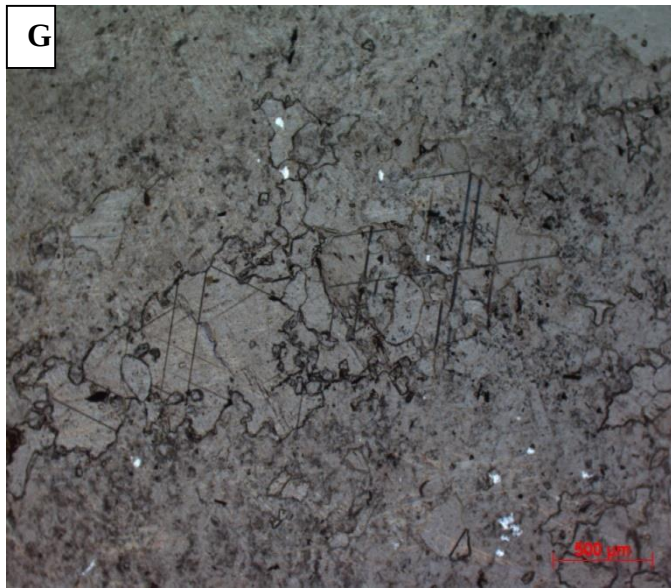
Annexe 4 : Planches pétrographiques de l'échantillon 04061480 (Juomasuo)



Matrice d'albite (Ab) et de rutile (Rt), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon 04061480

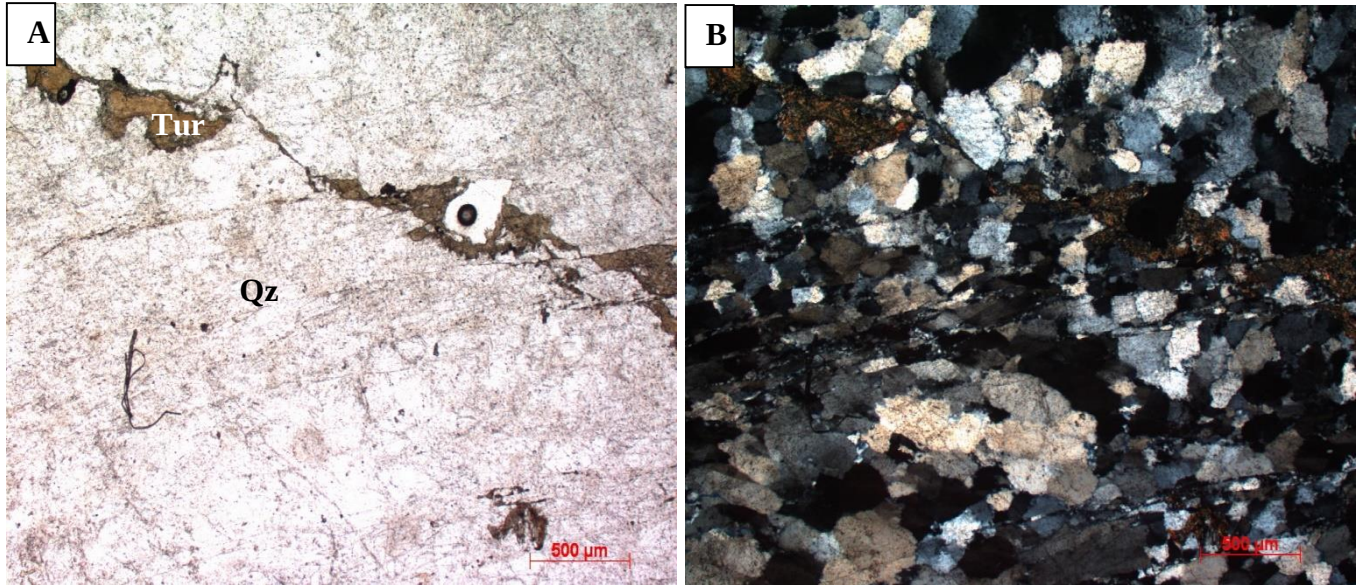


Association de pyrite (Py) tourmaline (Tur) et muscovite (Ms), LPNA (C), LPA (D) ; amas de séricite (Ser) dans la matrice, LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon 04061480



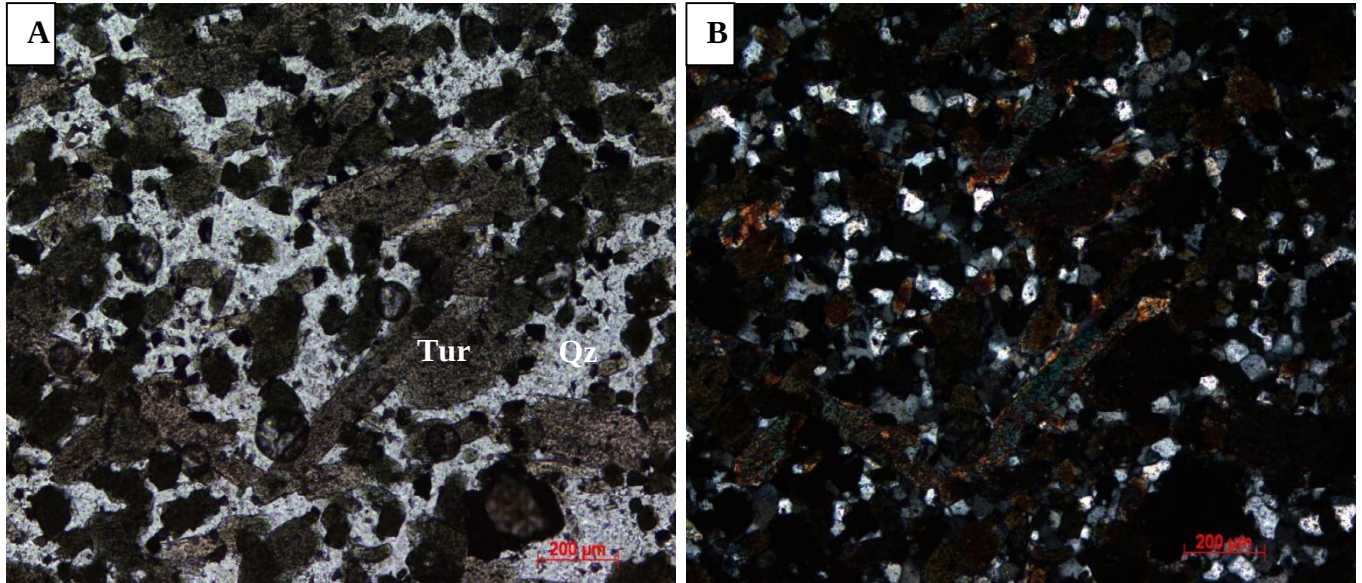
Dolomite (Dol) dans la matrice, LPNA (G), LPA (H) de l'échantillon 04061480

Annexe 5 : Planches pétrographiques de l'échantillon Gui4b (Guibaré)

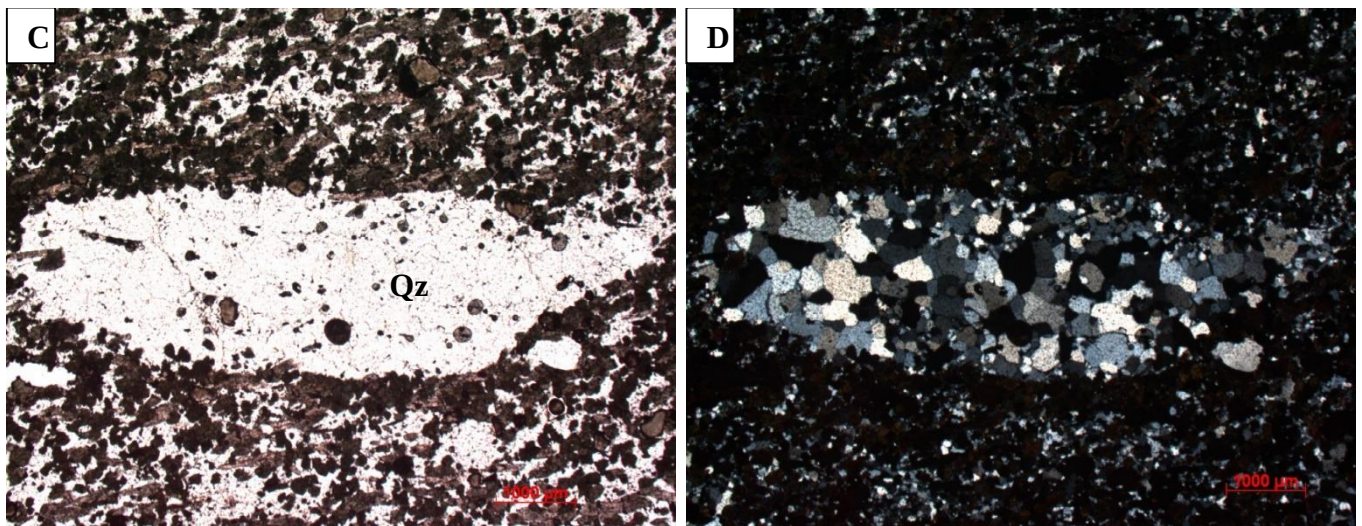


Veine de tourmaline (Tur) recoupant la matrice de quartz (Qz), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon Gui4b

Annexe 6 : Planches pétrographiques de l'échantillon FETb (Fété Kolé)

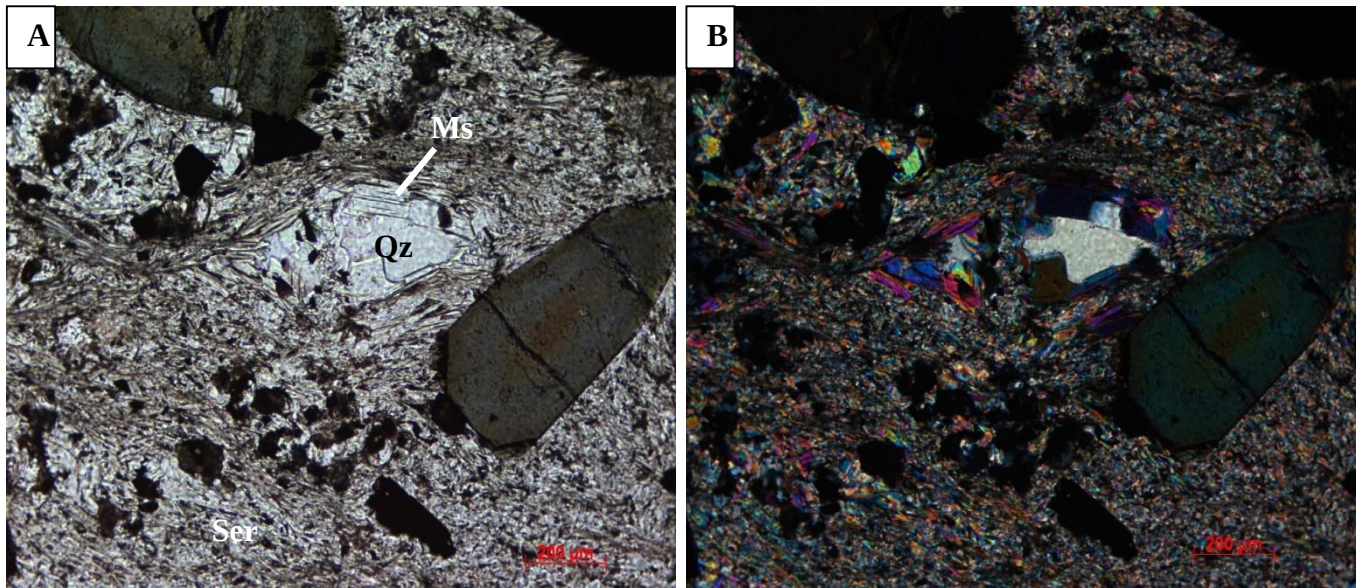


Matrice de tourmaline (Tur) et de quartz 1 (Qz), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon FETb

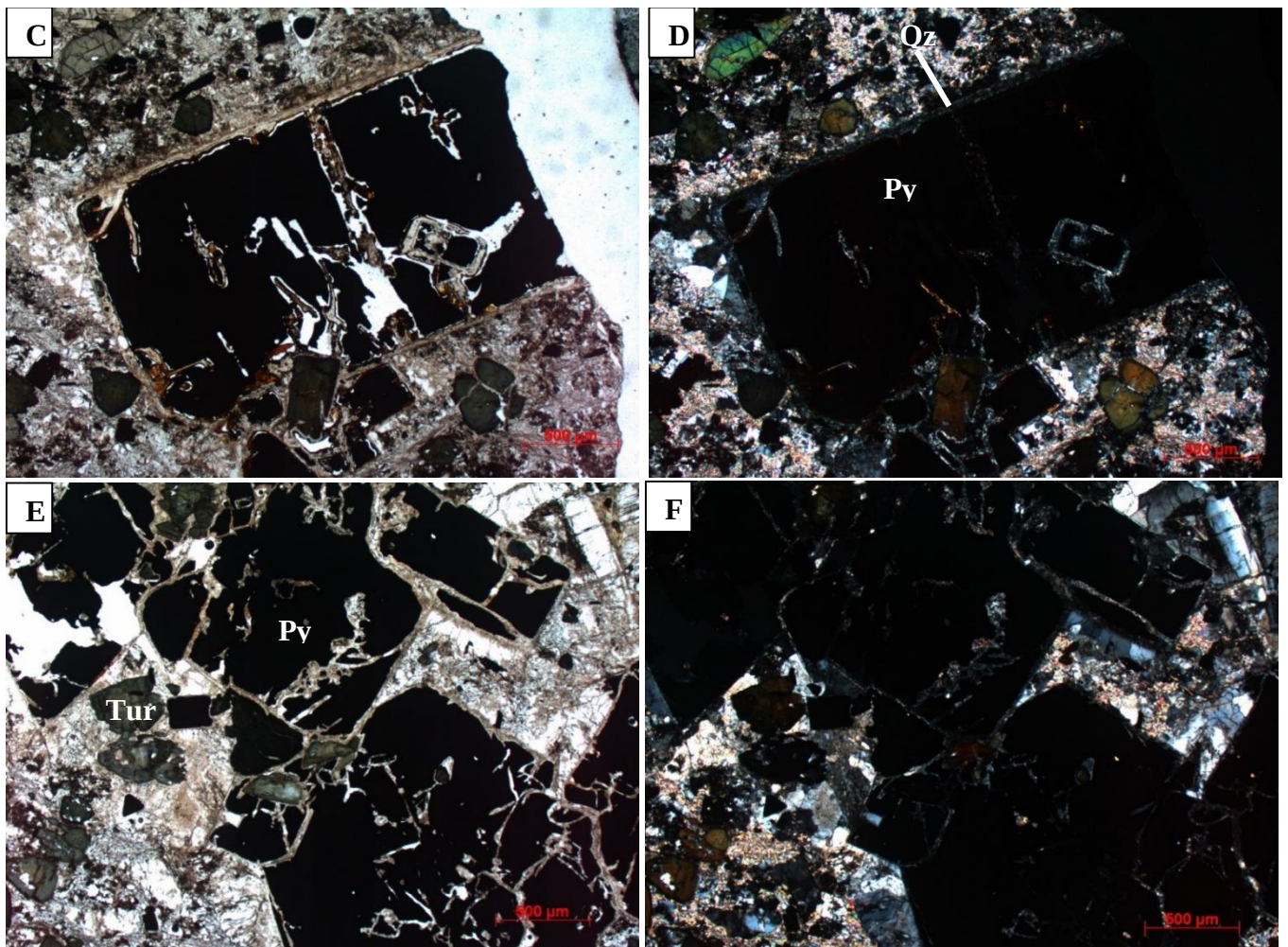


Deuxième génération de quartz (Qz) traversant la matrice, LPNA (C), LPA (D) de l'échantillon FETb

Annexe 7 : Planches pétrographiques de l'échantillon FK1 (Fété Kolé)

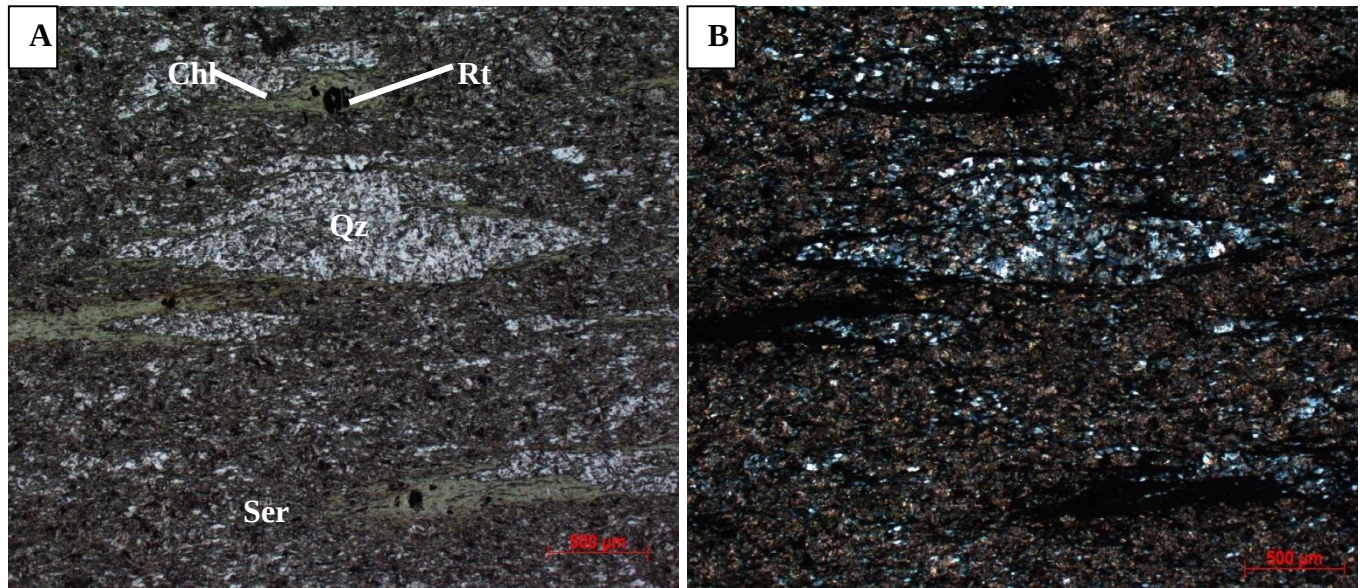


Quartz de première génération (Qz) associé à la muscovite (Ms) dans la matrice de séricite (Ser), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon FK1

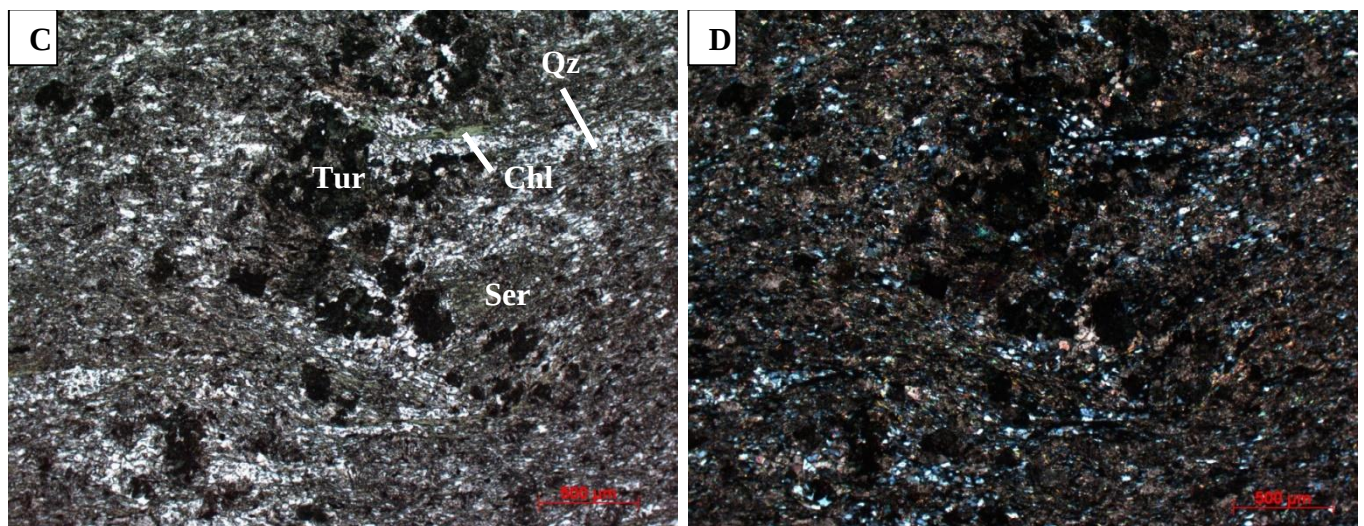


Pyrite (Py) plaquée par du quartz (Qz) de deuxième génération, LPNA (C), LPA (D) ; pyrite (Py) associée à la tourmaline (Tur) de l'échantillon FK1

Annexe 8 : Planches pétrographiques de l'échantillon FK4 (Fété Kolé)

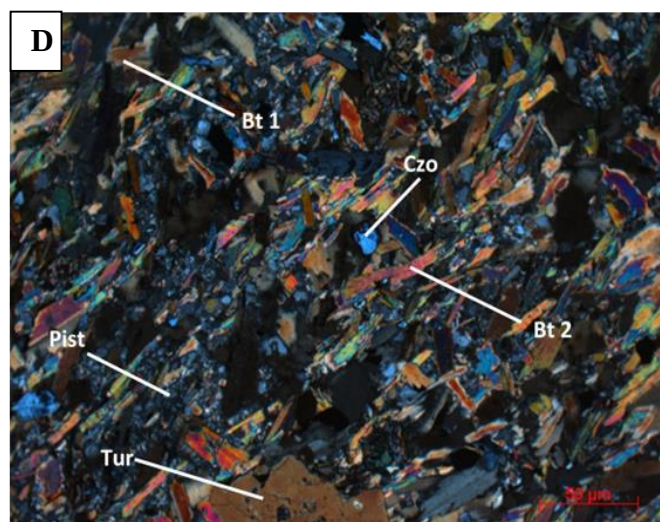
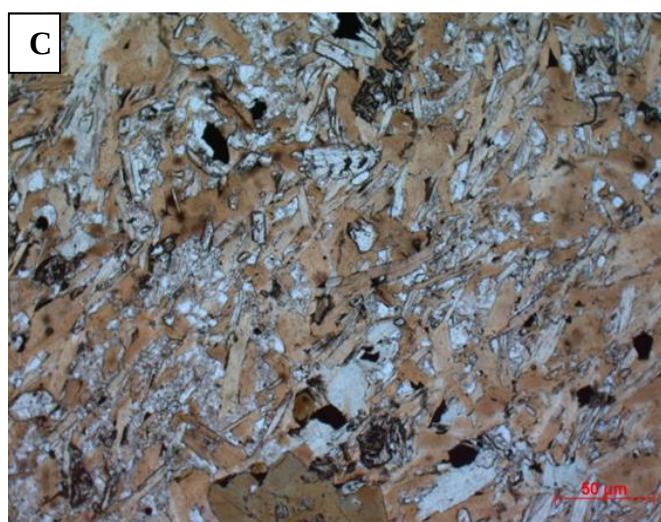
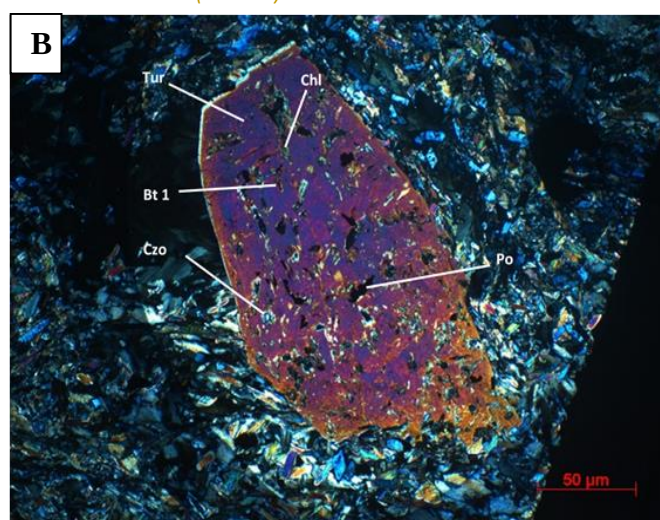


Matrice de quartz (Qz), chlorite (Chl), rutile (Rt) et séricite (Ser), LPNA (A), LPA (B) de l'échantillon FK4

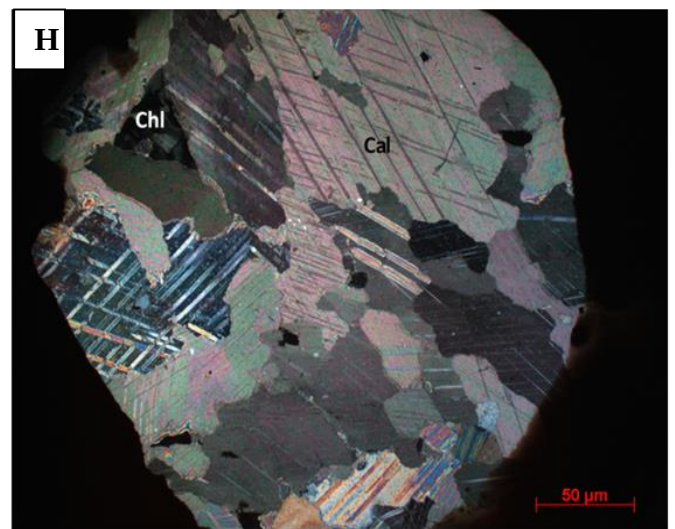
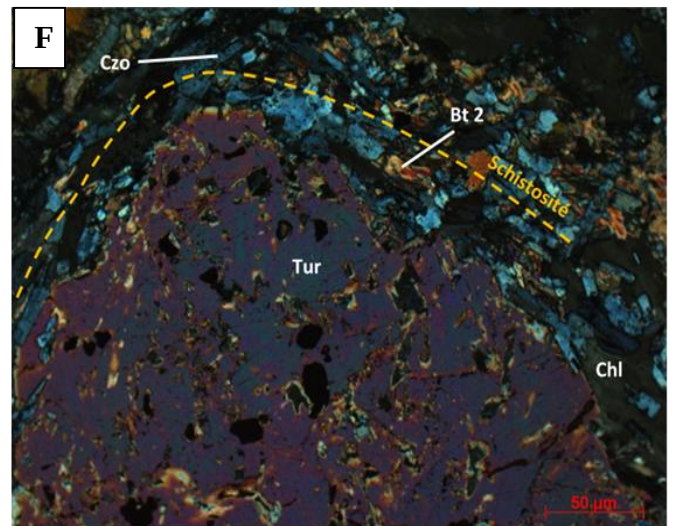
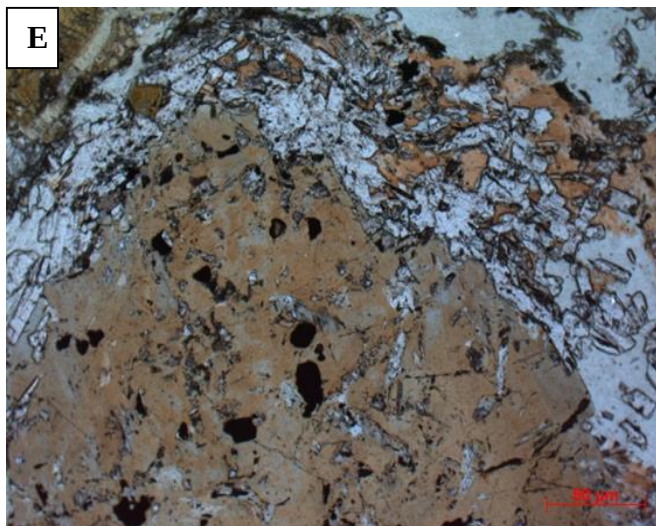


Tourmaline (Tur) recoupant la matrice, LPNA (C), LPA (D) de l'échantillon FK4

Annexe 9 : Planches pétrographiques de l'échantillon KDH291.562-2 (Kiaka)

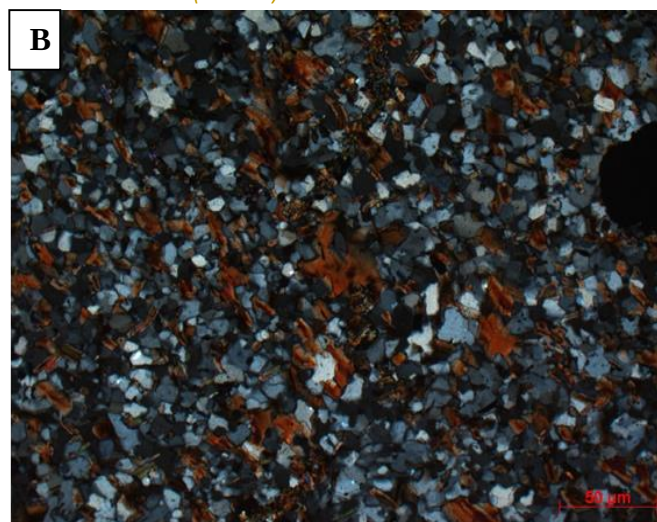
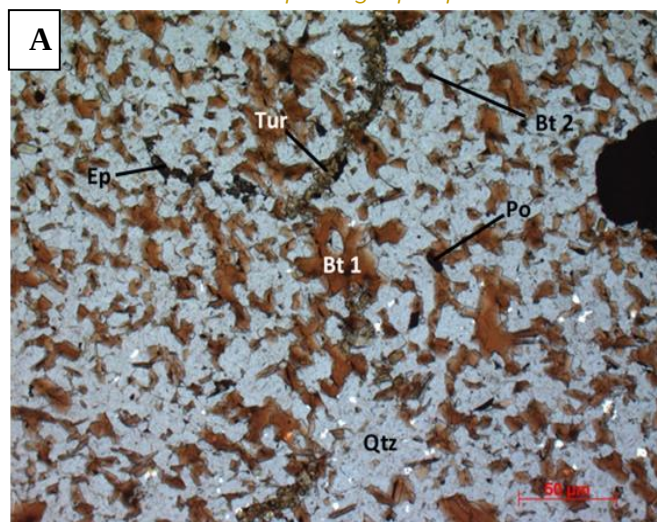


Porphyroblaste de tourmaline (Tur) présentant des inclusions, LPNA (A), LPA (B) ; matrice, LPNA (C), LPA (D) de l'échantillon KDH291.562-2

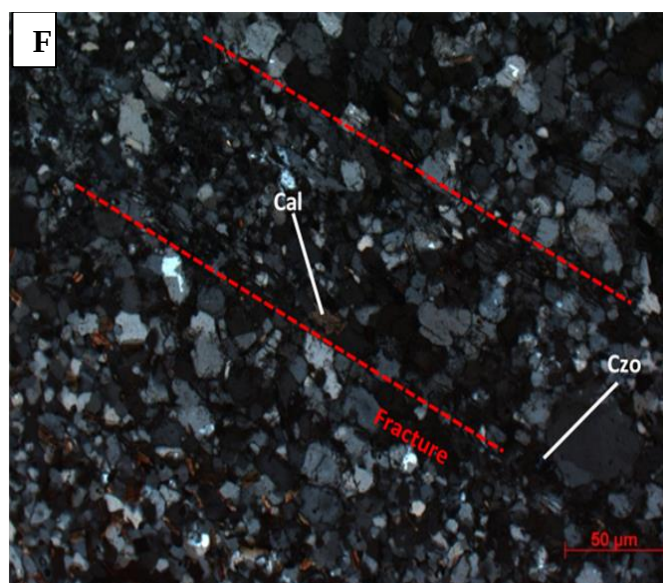
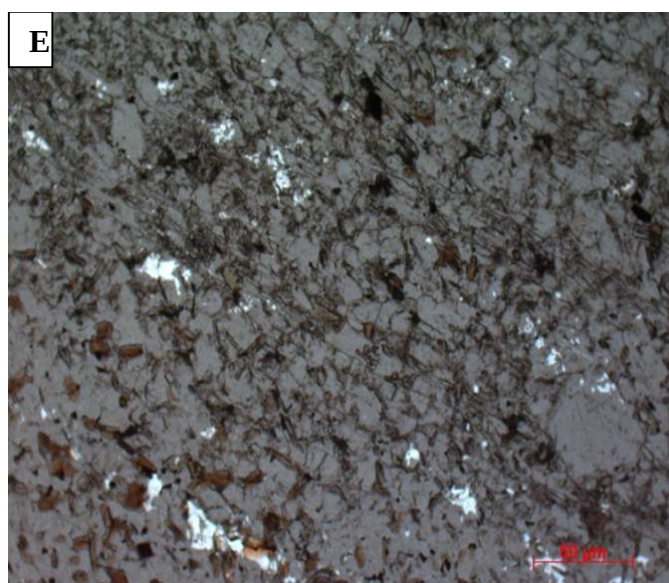


Schistosité contournant un porphyroblaste de tourmaline (Tur), LPNA (E), LPA (F) ; veine de calcite (Cal) avec chlorite (Chl), LPNA (G), LPA (H) de l'échantillon KDH291.562-2

Annexe 10 : Planches pétrographiques de l'échantillon KDH29 311.8 (Kiaka)



Matrice, LPNA (A), LPA (B) ; veine de quartz (Qz), LPNA (C), LPA (D) de l'échantillon KDH29-311.8



Fractures accompagnées de calcite (Cal) et de clinozoïsite (Czo), LPNA (E), LPA (F) de l'échantillon KDH29-311.8

Annexe 11 : Résultats microsonde et formule structurales des tourmalines

Juomasuo						
	Population I (Sulfures)				Population II	
	Core		Rim			
	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type
B_2O_3 wt%	10.67	0.27	10.49	0.09	10.56	0.35
SiO_2	34.61	0.77	35.13	0.43	35.27	0.96
TiO_2	0.57	1.53	0.70	0.86	0.64	2.61
Al_2O_3	24.11	2.80	30.27	0.99	29.94	3.11
FeO	4.23	2.14	8.36	0.39	6.22	2.79
MgO	9.04	0.81	7.96	0.11	9.24	2.20
CaO	0.25	0.43	0.81	0.13	0.28	0.49
K_2O	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.09
Na_2O	3.04	0.21	2.53	0.11	2.76	0.42
Cr_2O_3	13.59	5.25	0.31	1.26	0.78	4.76
Li_2O	inf.L.D.	0.08	inf.L.D.	0.03	inf.L.D.	0.07
Cl	inf.L.D.	0.01	inf.L.D.	0.00	inf.L.D.	0.02
H_2O	2.83	0.42	3.55	0.43	3.44	0.39
Total	104.20		100.26		100.29	
B apfu	3.000	0.000	3.000	0.000	3.000	0.000
Si	5.615	0.148	5.832	0.067	5.821	0.196
Al (T)	0.385	0.148	0.168	0.067	0.179	0.193
Al (Z)	4.231	0.616	5.763	0.191	5.631	0.651
Cr (Z)	1.723	0.624	0.040	0.169	0.095	0.594
Mg (Z)	inf.L.D.	0.179	0.205	0.124	0.108	0.257
Total (Z)	6.000	0.000	6.000	0.000	6.000	0.026
Mg	2.156	0.279	1.753	0.140	1.977	0.535
Fe^{2+}	0.576	0.298	1.150	0.054	0.847	0.406
Ti	0.071	0.178	0.088	0.105	0.078	0.271
Cr	0.074	0.116	inf.L.D.	0.000	inf.L.D.	0.055
Li	inf.L.D.	0.051	inf.L.D.	0.017	inf.L.D.	0.041
Total Y	3.011	0.034	3.022	0.020	3.015	0.042
Na	0.963	0.068	0.812	0.035	0.866	0.131
Ca	0.043	0.077	0.144	0.022	0.050	0.087
$]$	inf.L.D.	0.026	0.042	0.027	0.030	0.108
K	0.006	0.004	0.004	0.005	0.006	0.019
Total X	1.007	0.068	1.000	0.006	1.000	0.020
OH (V)	3.000	0.000	3.000	0.000	3.000	0.000
OH (W)	0.081	0.427	0.897	0.466	0.719	0.401
O (W)	0.920	0.427	0.103	0.466	0.281	0.401
Cl (W)	inf.L.D.	0.003	inf.L.D.	0.000	inf.L.D.	0.006

Fété Kolé

	Population I				Population II				Population III	
	Core		Rim		Core		Rim			
	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type
B_2O_3 wt%	10.50	0.07	10.51	0.13	10.59	0.15	10.56	0.34	10.31	0.33
SiO_2	36.19	0.43	36.03	0.56	36.76	0.63	36.53	1.21	35.92	1.62
TiO_2	0.67	0.43	0.46	0.13	0.285	0.12	0.38	0.08	0.58	0.13
Al_2O_3	31.96	0.81	32.04	0.70	31.84	0.85	31.82	1.62	31.07	1.51
FeO	10.56	0.77	10.24	0.62	9.215	0.31	9.29	0.42	11.26	0.72
MgO	4.63	0.45	4.93	0.41	5.635	0.16	5.50	0.10	3.93	0.54
CaO	0.29	0.07	0.44	0.16	0.16	0.54	0.21	0.23	0.23	0.22
K_2O	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.14	0.05	0.08
Na_2O	2.18	0.12	2.14	0.13	2.215	0.18	2.24	0.38	2.10	0.23
Cr_2O_3	0.01	0.02	0.01	0.03	0.32	0.15	0.28	0.08	0.02	0.03
Li_2O	0.14	0.14	0.12	0.09	0.1585	0.12	0.18	0.18	0.17	0.33
Cl	inf. L.D.	0.05	inf. L.D.	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.15
H_2O	3.31	0.06	3.34	0.07	3.35	0.05	3.33	0.24	3.20	0.09
<i>Total</i>	100.59		100.50		100.81		100.42		98.96	
B apfu	3.000	0.000	3.000	0.00	3.000	0.00	3.000	0.00	3.000	0.00
Si	5.991	0.065	5.963	0.057	6.038	0.05	6.033	0.056	6.021	0.159
Al (T)	0.010	0.023	0.037	0.036	inf. L.D.	0.013	inf. L.D.	0.002	inf. L.D.	0.025
Al (Z)	6.000	0.032	6.000	0.014	6.000	0.04	6.000	0.066	6.000	0.095
Cr (Z)	inf. L.D.	0.001	inf. L.D.	0.00	inf. L.D.	0.00	inf. L.D.	0.011	inf. L.D.	0.001
Mg (Z)	inf. L.D.	0.031	inf. L.D.	0.014	inf. L.D.	0.037	inf. L.D.	0.057	inf. L.D.	0.095
<i>Total</i> (Z)	6.000		6.000		6.000		6.000		6.000	
Al (Y)	0.213	0.110	0.212	0.082	0.187	0.074	0.171	0.091	0.153	0.105
Mg	1.135	0.110	1.213	0.099	1.3685	0.037	1.360	0.034	0.960	0.143
Fe^{2+}	1.462	0.111	1.414	0.093	1.2815	0.042	1.274	0.034	1.592	0.107
Ti	0.084	0.054	0.057	0.016	0.035	0.015	0.047	0.010	0.075	0.016
Cr	0.001	0.003	0.001	0.004	0.0415	0.020	0.023	0.015	0.001	0.004
Li	0.094	0.092	0.076	0.064	0.105	0.079	0.118	0.127	0.124	0.226
<i>Total Y</i>	3.000		3.000		3.000		3.000		3.000	
Na	0.701	0.039	0.686	0.041	0.705	0.050	0.714	0.160	0.681	0.094
Ca	0.051	0.013	0.077	0.029	0.028	0.100	0.037	0.046	0.040	0.041
$]$	0.248	0.041	0.223	0.049	0.259	0.068	0.263	0.086	0.264	0.089
K	0.004	0.003	0.002	0.008	0.004	0.006	0.004	0.032	0.011	0.018
<i>Total X</i>	1.000		1.000		1.000		1.000		1.000	
OH (V)	3.000	0.00	3.000	0.00	3.000	0.00	3.000	0.00	3.000	0.00
OH (W)	0.660	0.052	0.684	0.064	0.671	0.050	0.654	0.171	0.578	0.149
O (W)	0.335	0.049	0.305	0.060	0.3265	0.051	0.346	0.172	0.378	0.148
Cl (W)	inf. L.D.	0.015	inf. L.D.	0.018	0.003	0.00207647	0.003	0.004	0.013	0.045

Guibaré

	Population I	
	Médiane	Ecart type
B_2O_3 wt%	10.74	0.08
SiO_2	37.14	0.60
TiO_2	0.31	0.21
Al_2O_3	33.05	0.70
FeO	7.27	1.19
MgO	6.27	0.79
CaO	0.12	0.10
K_2O	0.03	0.02
Na_2O	2.40	0.30
Cr_2O_3	0.04	0.04
Li_2O	0.22	0.16
Cl	0.01	0.04
H_2O	3.37	0.08
<i>Total</i>	101.29	
<i>B apfu</i>	3.000	0.000
<i>Si</i>	6.020	0.067
<i>Al (T)</i>	inf. L.D.	0.011
<i>Al (Z)</i>	6.000	0.000
<i>Cr (Z)</i>	inf. L.D.	0.000
<i>Mg (Z)</i>	inf. L.D.	0.000
<i>Total (Z)</i>	6.000	
<i>Al (Y)</i>	0.276	0.127
<i>Mg</i>	1.503	0.188
Fe^{2+}	0.989	0.164
<i>Ti</i>	0.037	0.026
<i>Cr</i>	0.005	0.005
<i>Li</i>	0.140	0.100
<i>Total Y</i>	3.000	
<i>Na</i>	0.754	0.091
<i>Ca</i>	0.021	0.018
<i>[]</i>	0.228	0.093
<i>K</i>	0.006	0.005
<i>Total X</i>	1.000	
<i>OH (V)</i>	3.000	0.000
<i>OH (W)</i>	0.648	0.082
<i>O (W)</i>	0.343	0.084
<i>Cl (W)</i>	0.003	0.012

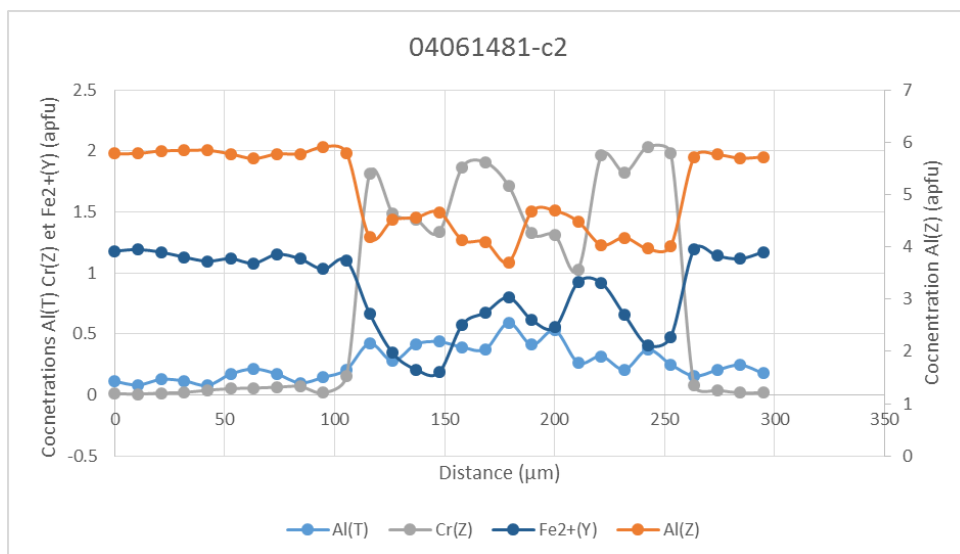
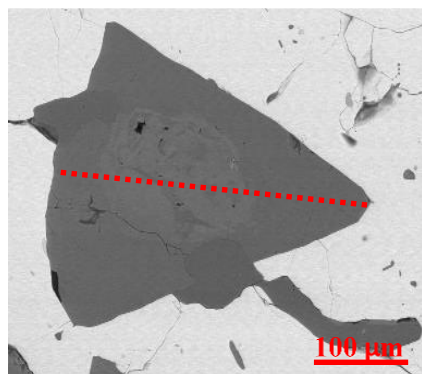
Kiaka

	Population I		Population II			
			Core		Rim	
	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type
B_2O_3 wt%	10.886	0.11	11.014	0.030	11.1	0.112
SiO_2	37.24	0.334	37.06	0.142	37.31	0.461
TiO_2	0.7	0.377	0.28	0.092	0.44	0.255
Al_2O_3	31.91	0.786	35.4	0.201	34.93	1.003
V_2O_3	0.25	0.414	0.05	0.058	0.02	0.074
FeO	6.02	0.583	4.9	0.346	5.09	0.371
MgO	8.74	0.309	7.39	0.161	7.81	0.331
CaO	1.2	0.115	1.05	0.111	1.08	0.223
K_2O	0.02	0.104	0.04	0.018	0.05	0.055
Na_2O	2.11	0.091	1.71	0.036	1.77	0.078
Cr_2O_3	0.07	0.160	inf. L.D.	0.017	0.01	0.012
Li_2O	0.133	0.033	0.189	0.031	0.19	0.028
MnO	0.02	0.016	0.02	0.010	0.01	0.016
ZnO	inf. L.D.	0.006	inf. L.D.	0.011	inf. L.D.	0.003
BaO	inf. L.D.	0.011	0.03	0.020	0.02	0.020
Rb_2O	0.06	0.011	0.06	0.007	0.05	0.013
F	0.14	0.037	0.1	0.023	0.13	0.031
Cl	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0
H_2O	3.503	0.058	3.358	0.033	3.408	0.052
<i>Total</i>	103.002		103.031		103.446	
<i>B apfu</i>	3	0	3	0	3	0
<i>Si</i>	5.936	0.033	5.844	0.022	5.89	0.035
<i>Al (T)</i>	0.064	0.033	0.156	0.022	0.11	0.035
<i>Al (Z)</i>	5.84	0.105	6	0	6	0
<i>Cr (Z)</i>	0.009	0.020	inf. L.D.	0	0	0
<i>Mg (Z)</i>	0.031	0.078	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0
<i>V (Z)</i>	0.027	0.046	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0
<i>Total (Z)</i>	6		6		6	
<i>Al (Y)</i>	inf. L.D.	0.003	0.402	0.032	0.327	0.136
<i>Mg</i>	2.025	0.127	1.74	0.035	1.823	0.078
Fe^{2+}	0.798	0.082	0.648	0.046	0.664	0.052
<i>Ti</i>	0.083	0.046	0.033	0.011	0.051	0.031
<i>Cr</i>	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0.002	0.001	0.002
<i>Li</i>	0.085	0.022	0.12	0.020	0.12	0.018
<i>V</i>	inf. L.D.	0.017	0.006	0.007	0.002	0.009
Mn^{2+}	0.003	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002
<i>Total Y</i>	3		3		3	
<i>Na</i>	0.65	0.025	0.523	0.011	0.537	0.021

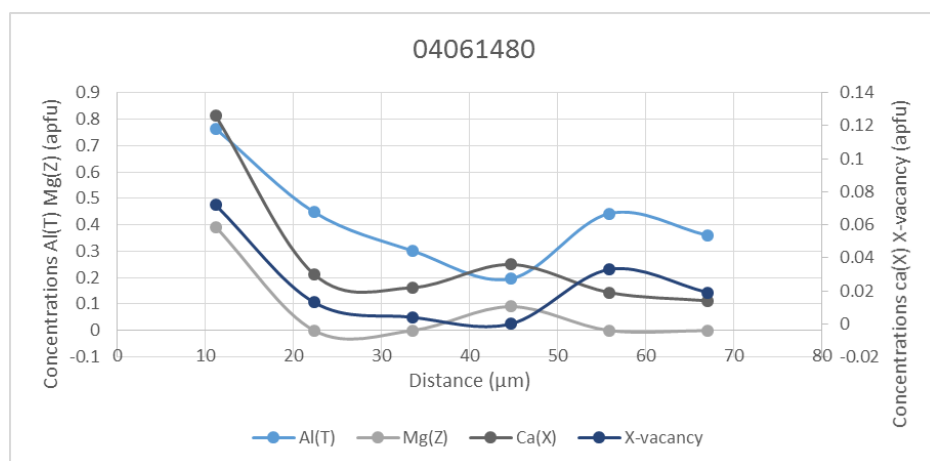
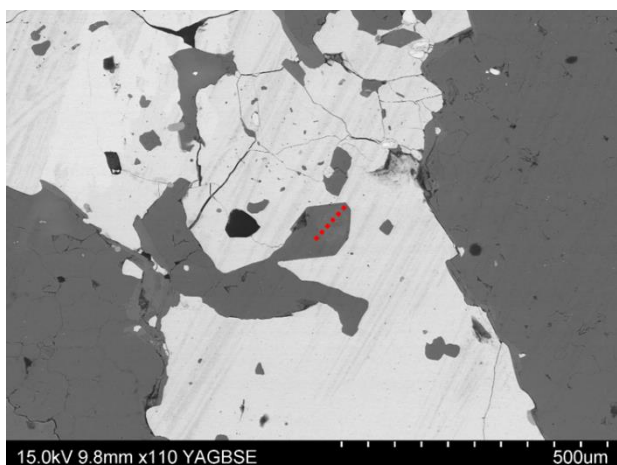
<i>Ca</i>	0.206	0.020	0.178	0.019	0.181	0.039
<i>l</i>	0.129	0.040	0.282	0.025	0.241	0.034
<i>K</i>	0.004	0.021	0.008	0.003	0.01	0.011
<i>Total X</i>	1		1		1	
<i>OH (V)</i>	3	0	3	0	3	0
<i>OH (W)</i>	0.731	0.038	0.546	0.030	0.58	0.045
<i>O (W)</i>	0.2	0.033	0.404	0.021	0.356	0.043
<i>Cl (W)</i>	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0	inf. L.D.	0

Annexe 12 : Profils microsonde des tourmalines

Juomasuo (Population I)

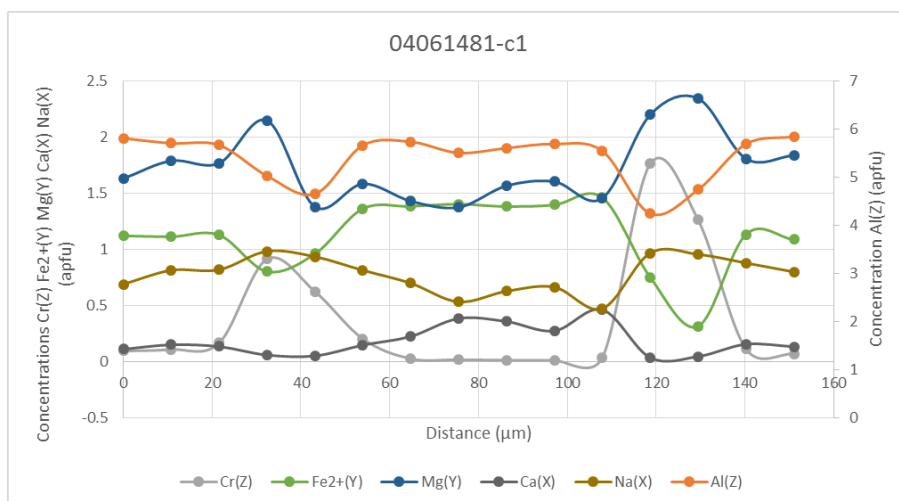
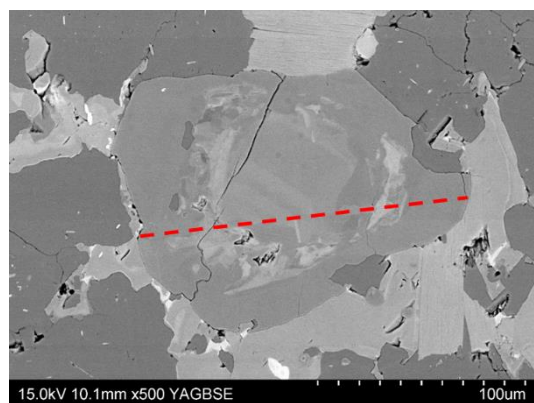


Profil des tourmalines de l'échantillon 04061481 (Points d'analyse en rouge)

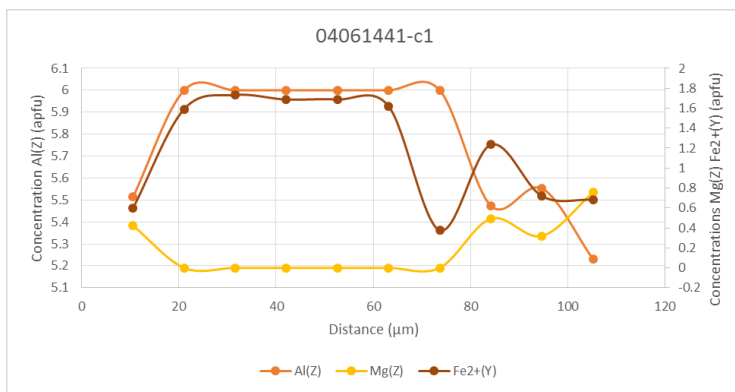
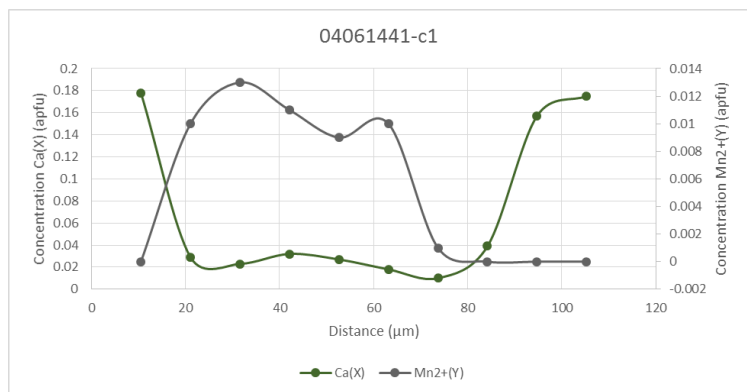
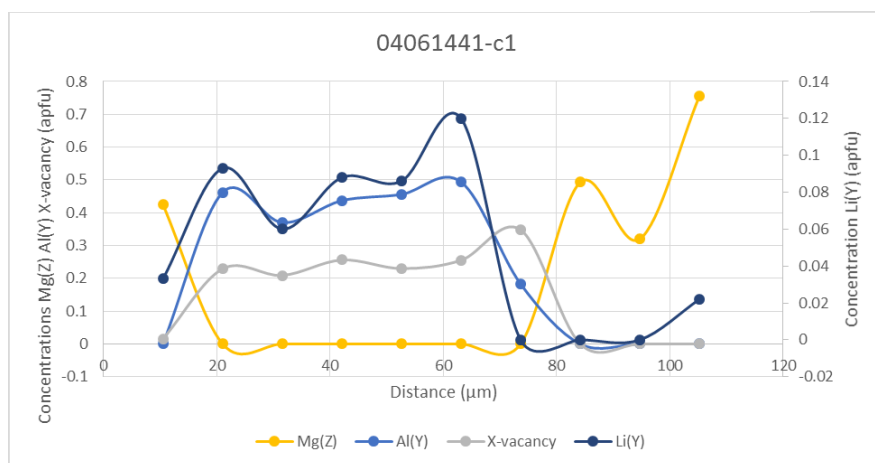
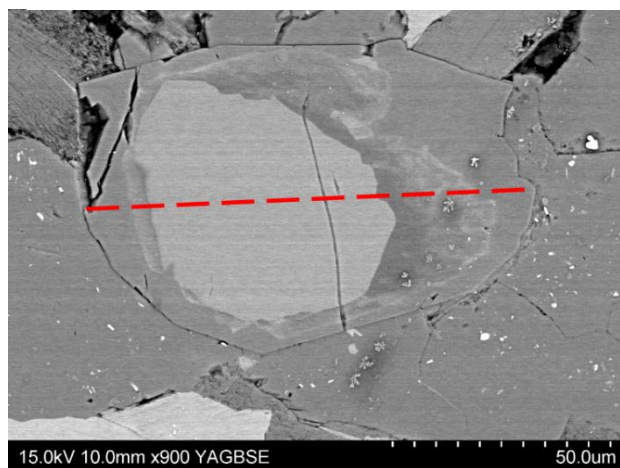


Profil des tourmalines de l'échantillon 04061480 (Points d'analyse en rouge)

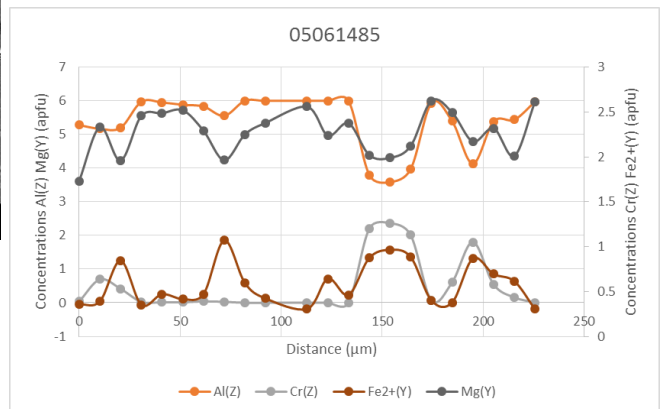
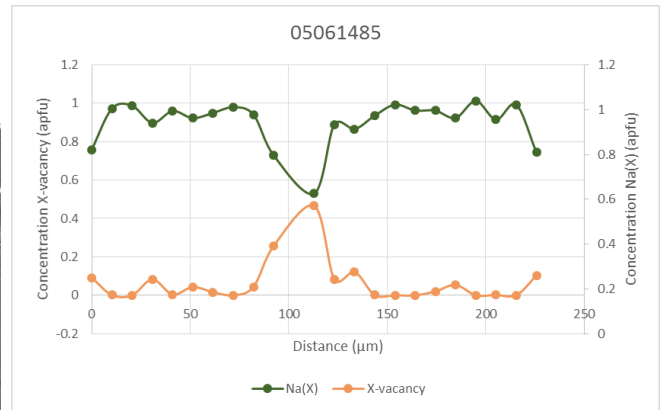
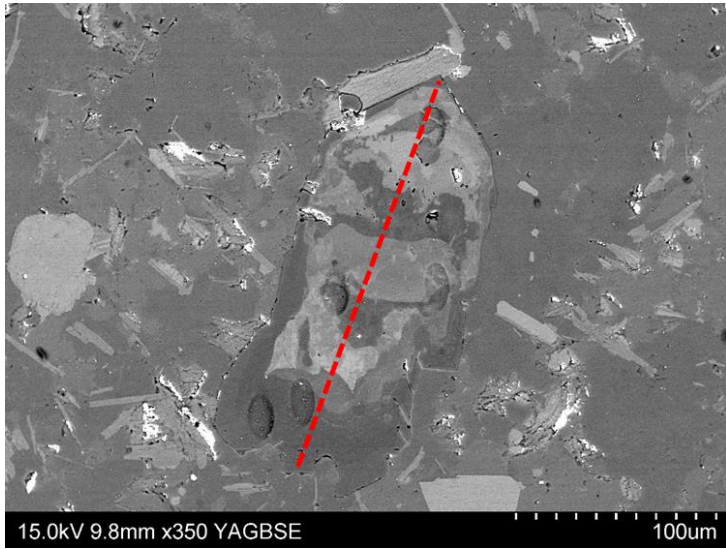
Juomasuo (Population II)



Profil des tourmalines disséminées de l'échantillon 04061481 (Points d'analyse en rouge)

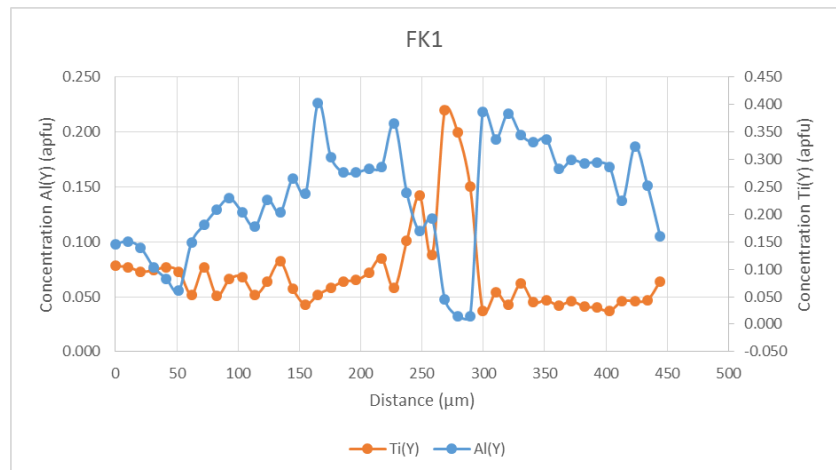


Profil des tourmalines de l'échantillon 04061441 (Points d'analyse en rouge)



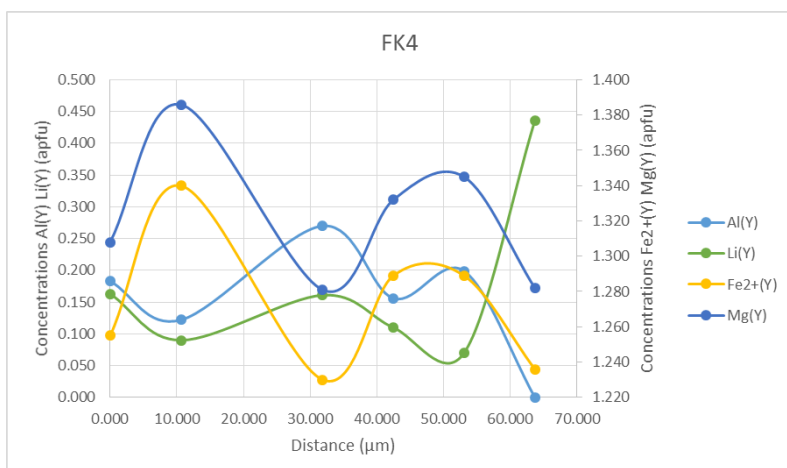
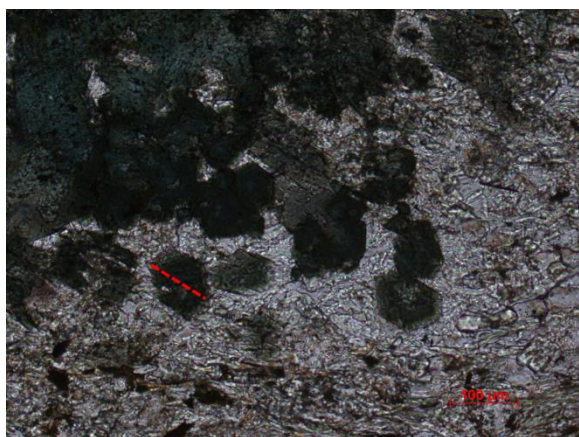
Profil des tourmalines de l'échantillon 05061485 (Points d'analyse en rouge)

Fété Kolé Population I



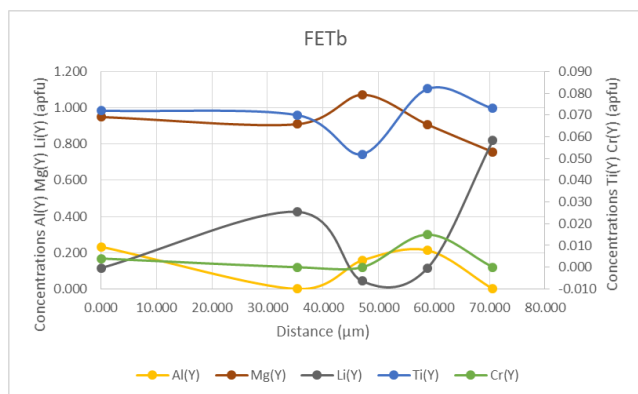
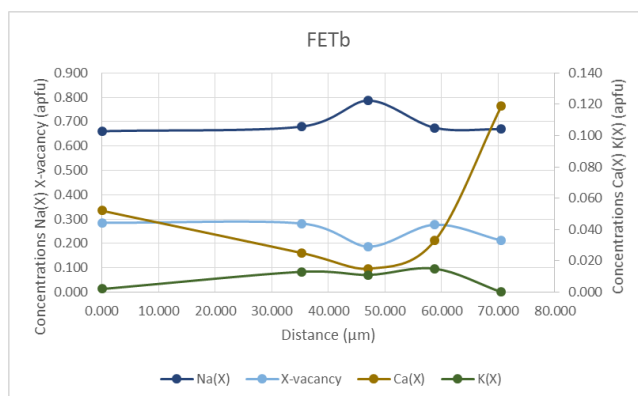
Profil des tourmalines de l'échantillon FK1 (Points d'analyse en rouge)

Fété Kolé Population II



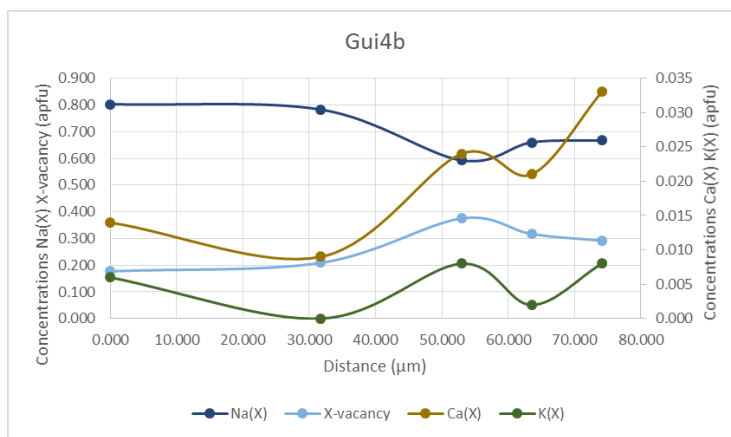
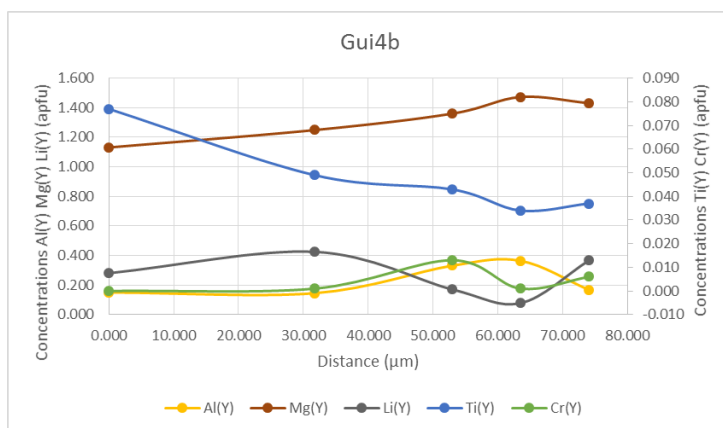
Profil des tourmalines de l'échantillon FK4 (Points d'analyse en rouge)

Fété Kolé Population III



Profil des tourmalines de l'échantillon FETb (Points d'analyse en rouge)

Guibaré



Profil des tourmalines de l'échantillon Gui4b (Points d'analyse en rouge)

Annexe 13 : Tableau récapitulatif des encaissants des gisements de l'étude et des gisements d'or comparatifs

Gisements	Encaissants	Référence
Hira Buddini (Inde)	Métabasaltique et métadacitique	Krienitz et al., 2008
Tapera Grande & Quartzito (SE Brésil)	Tapera : métabasite, métavolcanique, métapélite riches en sulfures et graphite, BIF, métandésite, métarhyolite, calcosilicates, tourmalinites et métahydrothermalites dérivées de roches mafiques et felsiques Quartzito : idem plus roches granitiques responsables de la formation de veines de quartz-tourmaline-carbonates	Garda et al., 2009
Val-d'Or (Canada)	Métavolcanites	Beaudoin et al., 2013
Eräjärvi, Kietyönmäki, Kutemajärvi, Riukka, Lepomäki, Ylöjärvi (SW Finlande)	Eräjärvi, Kietyönmäki : pegmatites granitiques Kutemajärvi, Riukka : métavolcanites Lepomäki, Ylöjärvi : métavolcanites au contact entre un batholithe et des roches supracrustales	Talikka et al., 2010
Big Bell & Mt Gibson (W Australie)	Big Bell : roches mafiques à ultramafiques et felsiques, quelques métasédiments Mt Gibson : métabasaltes, andésite, métasédiments, métavolcanites	Jiang et al., 2002
Juomasuo (Finlande)	Quartzites, métapélites	
Fété Kolé (Burkina Faso)	Métapélites, métavolcanites	
Guibaré (Burkina Faso)	Roches ultrabasiques à basiques	
Kiaka (Burkina Faso)	Métabasites, métapélites, métagrauweekes, micaschistes	