



Origine des granophyres du Complexe du Lac Doré (CLD) et minéralisations associées, région de Chibougamau, Sous-province de l'Abitibi (Québec)

PAR

YOUSSEUF AHMADOU YOUSSEOUFOU

M. Sc Géo

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en géologie et génie géologique

Québec, Canada

© Youssouf Ahmadou Youssoufou, 2018

RÉSUMÉ

Les granophyres du Complexe du Lac Doré (CLD) correspondent à l'ensemble des roches felsiques qui occupent les parties sommitales de l'intrusion anorthositique litée du Lac Doré. Dans la zone d'étude qui se situe à 10 km de la ville de Chibougamau, les granophyres du CLD sont encaissés par les rhyolites du membre de Scott de la Formation de Waconichi. Ces granophyres encaissent des minéralisations à Cu-Au qui sont reconnues dans quatre décapages exposés dans la zone d'étude. Ce projet de recherche vise à déterminer l'origine des granophyres du CLD, d'établir leur relation avec les minéralisations qu'ils encaissent et de définir s'il existe une relation génétique entre ces minéralisations et les systèmes minéralisateurs connus dans la région.

Deux unités de granophyres sont distinguées dans la zone d'étude. Le granophyre à grains grossiers est l'unité dominante, et elle recoupée par une unité tardive de granophyre à grains fins. Ces deux unités sont identiques du point de vue minéralogique et chimique, elles se distinguent essentiellement par leur granulométrie. La formation des granophyres du CLD a été attribuée à la fusion et l'assimilation des rhyolites encaissantes par le magma du CLD. Les résultats de cette étude ont démontré que ces granophyres correspondent au produit felsique généré par la différenciation poussée du magma du CLD et que les rhyolites qui les encaissent représentent leur équivalent extrusif.

Les minéralisations encaissées par les granophyres de la zone d'étude sont regroupées en deux familles. Celles des indices minéralisés de Ramsey et de GRH qui sont de type filonien et qui montrent des affinités génétiques avec les systèmes magmato-hydrothermaux de la région ; et celles des indices AXE et Golden Moon, qui sont sous forme de veines de quartz rubanée et en cisaillement qui ont des relations génétiques avec les systèmes orogéniques de Chibougamau. Cependant, les granophyres du CLD n'ont pas de lien génétique direct avec les minéralisations qu'ils encaissent. Ces unités se caractérisent par une forte compétence et un comportement cassant qui leur donne une facilité à se fracturer et à encaisser des minéralisations épigénétiques.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu, Lucie Mathieu, professeure à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), chargée du projet Metal Earth à Chibougamau, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet. Mes remerciements vont aussi à l'égard de Damien Gaboury, co-directeur du projet et professeur à l'UQAC, pour sa disponibilité à m'encadrer, sa confiance et son soutien pendant les moments difficiles et son aide inestimable apportée à la réalisation de ce projet. Ensuite j'exprime ma gratitude envers Réal Daigneault, Sarah-Jane Barnes et Paul Bédard, pour leur énorme contribution à ce projet.

Mes remerciements vont à l'endroit de notre chef d'équipe et chargé de projets *Metal Earth*, Pierre Bedeaux, post-doctorant à l'UQAC, pour sa patience, sa rigueur et son implication sans réserve dans la réalisation de ce projet. Aussi, je voudrais dire merci aux autres membres de l'équipe de Metal Earth à Chibougamau pour les discussions enrichissantes et pour le travail d'équipe réalisé ensemble. Je remercie également, Patrick Houle du Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN), pour sa disponibilité à nous accompagner sur le terrain, et pour le matériel de scie à roche mis à notre disposition.

Enfin, j'adresse mes plus profonds remerciements à mes parents, Ahmadou-Tidjani Youssoufou et Alimatou Garba, et à toute ma famille, pour leur soutien et leur encouragement tout au long de la réalisation de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ANNEXES	ix
CHAPITRE I.....	10
MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE.....	10
1.1 Introduction.....	10
1.2 Problématique générale.....	11
1.2.1 Les intrusions litées	11
1.2.2 Granophyres dans les intrusions litées.....	14
1.2.3 Processus de formation des granophyres	15
1.2.3 Minéralisations associées aux granophyres des intrusions litées.....	19
1.3 Les granophyres du Complexe du Lac Doré.....	21
1.4 Objectifs.....	23
1.5 Méthodologie	24
1.5.1 Travaux de terrain.....	24
1.5.2. Travaux de laboratoire	26
1.6 Géologie régionale	29
1.6.1 Cadre stratigraphique.....	29
1.6.2 Complexe du Lac Doré	30
1.6.3 Formation de Waconichi.....	31
1.6.4 Géologie structurale.....	32
1.6.5 Géologie économique	32
CHAPITRE II	43
GÉOLOGIE LOCALE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	43
2.1 Introduction.....	43
2.2 Secteur Ramsey.....	44
2.3 Secteur Golden Moon.....	46

2.3.1 Granophyres	46
2.3.2 Dykes d'aplite granophyrique	48
2.3.3 Dyke mafique	48
2.4 Autres affleurements	49
2.4.1 Ferrodiorite du CLD	49
2.4.2 Andésitique du membre de Scott de la Formation de Waconichi.....	49
CHAPITRE III.....	59
CARACTÉRISATION PETROGRAPHIQUES DES UNITÉS LITHOLOGIQUES	59
3.1 Introduction.....	59
3.2 Unités du Complexe du Lac Doré (CLD).....	62
3.2.1 Granophyre à grains grossiers	62
3.2.2 Granophyre à grains fins	64
3.2.3 Mélanogranophyre.....	66
3.2.4 Ferrodiorite.....	67
3.3 Formation de Waconichi.....	69
3.3.1 Rhyolite porphyrique	69
3.3.2 Andésite	70
3.4 Les dykes	71
3.4.1 Dyke d'aplite granophyrique.....	72
3.4.2 Dyke felsique de l'indice Ramsey	73
3.4.3 Dykes mafiques de l'indice Ramsey.....	73
3.4.4 Dyke mafique de l'indice AXE	73
3.5 Synthèse.....	74
CHAPITRE IV	89
CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES UNITÉS LITHOLOGIQUES	89
4.1 Introduction.....	89
4.2 Classification lithogéochimique des principales unités étudiées	91
4.2.1 Granophyres du CLD.....	91
4.2.2 Ferrodiorite et anorthosite du CLD.....	94
4.2.3 Formation de Waconichi.....	95
4.2.4 Dykes	96
4.3 Diagrammes Harker	97

4.4 Comparaison lithogéochimique entre les granophyres du CLD et les rhyolites de la formation de Waconichi	98
4.5 Altérations hydrothermales.....	100
4.5.1 Bilan de masse par modélisation de précurseur.....	100
4.5.2 Indices d'altération de la Consonorm-LG.....	102
4.6 Synthèse.....	105
CHAPITRE V	117
MINÉRALISATIONS DANS LES GRANOPHYRES DU CLD.....	117
5.1 Introduction.....	117
5.2 Styles des minéralisations.....	118
5.3 Pétrographie des minéralisations en sulfures	123
5.4 Signature en éléments traces des pyrites.....	127
5.4.1 Discrimination des pyrites de la zone d'étude.....	129
5.4.2 Comparaison aux systèmes minéralisateurs de Chibougamau	131
5.5 Synthèse.....	132
CHAPITRE VI.....	150
DISCUSSIONS.....	150
6.1 Introduction.....	150
6.2 Origine des granophyres du CLD.....	150
6.2.1 Évidences de terrain et typologie de granophyres.	151
6.2.2 Évidences pétrographiques.....	153
6.2.3 Évidences chimiques	155
6.2.4 Modélisation géochimique	157
6.3 Minéralisations dans les granophyres du CLD	159
6.3.1 Typologie des minéralisations et relation avec l'encaissant.....	159
6.3.2 Affinités avec les systèmes minéralisateurs de la région	161
6.4 Modèle évolutif pour la formation des granophyres du CLD.	163
CHAPITRE VII	168
CONCLUSION.....	168

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : LOCALISATION DE LA ZONE A L'ETUDE INDIQUEE PAR LE CADRE ROUGE.	35
FIGURE 1.2 : CARTE DU MONDE PRÉSENTANT LA LOCALISATION DE QUELQUES INTRUSIONS LITÉES BIEN CONNUES ET LEURS ÂGES GÉOLOGIQUES.....	35
FIGURE 1.3 : COUPE SCHÉMATIQUE EXPOSANT LES ZONALITÉS LITHOLOGIQUES DES INTRUSIONS LITÉES ET LES MINÉRALISATIONS QUI PEUVENT Y ÊTRE ASSOCIÉES.....	36
FIGURE 1.4 : SCHÉMA ILLUSTRANT LE PROCESSUS D'ASSIMILATION DE ROCHES CRUSTALES PAR LA MISE EN PLACE D'UNE CHAMBRE MAGMATIQUE DE COMPOSITION BASALTIQUE	37
FIGURE 1.5 : DIAGRAMME SCHÉMATIQUE ILLUSTRANT LA POSSIBILITÉ DE FORMATION DES GRANOPHYRES DU COMPLEXE DE LA RIVIÈRE BELL PAR L'ASSIMILATION DE ROCHES ENCAISSANTES ET LA FORMATION DES DÉPÔTS SMV DU CAMP MINIER DE MATAGAMI	38
FIGURE 1.6 : CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE DE LA SOUS PROVINCE D'ABITIBI, CANADA, MONTRANT LES PRINCIPAUX DISTRICTS MINIERS ET LA LOCALISATION DE LA RÉGION DE CHIBOUGAMAU.	39
FIGURE 1.7 : CARTE GÉOLOGIQUE SIMPLIFIÉE PRÉSENTANT LE CLD ET SON ENCAISSANT VOLCANIQUE DE LA FORMATION DE WACONICHI..	40
FIGURE 1.8 : LES DEUX COLONNES STRATIGRAPHIQUES PROPOSÉES POUR LES CYCLES VOLCANIQUES DE LA RÉGION DE CHIBOUGAMAU.	41
FIGURE 1.9 : EXEMPLE DE DIAGRAMMES DE DISCRIMINATION QUI SONT UTILISÉS POUR CARACTÉRISER LES MINÉRALISATIONS DE LA ZONE D'ÉTUDE.	42
FIGURE 2.1 : LA ZONE D'ETUDE ET LA LOCALISATION DES DEUX SECTEURS D'ETUDES.....	52
FIGURE 2.2 : CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DE LA ZONE D'ETUDE, MONTRANT LES PRINCIPALES UNITES LITHOLOGIQUES ET LA POSITION DES AFFLEUREMENTS ECHANTILLONNES..	53
FIGURE 2.3 : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE DETAIL DU DECAPAGE DE L'INDICE RAMSEY	54
FIGURE 2.4 : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE DETAIL DU DECAPAGE DE L'INDICE AXE.	55
FIGURE 2.5 : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE DETAIL DU DECAPAGE DE L'INDICE GOLDEN MOON.....	56
FIGURE 2.6 : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE DETAIL DU DECAPAGE DE L'INDICE GRH....	57
FIGURE 2.7 : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE DETAIL DE LA ZONE DE CONTACT ENTRE LES UNITES D'ANDESITE ET DE GRANOPHYRE.....	58
FIGURE 3.1 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LE GRANOPHYRE A GRAINS FINS ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.	64
FIGURE 3.2 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LE GRANOPHYRE A GRAINS FINS ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.	66
FIGURE 3.3: SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LES MELANOGRANOPHYRES ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.	67
FIGURE 3.4 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LA FERRODIORITE ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.....	68
FIGURE 3.5 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LES RHYOLITES ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.....	70
FIGURE 3.6 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS L'ANDESITE ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.....	71
FIGURE 3.7 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LES DYKES OBSERVÉS DE LA ZONE ETUDIÉE ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%.....	72
FIGURE 3.8 : SYNTHÈSE DES MINÉRAUX OBSERVÉS DANS LES UNITES DE GRANOPHYRES ET LES RHYOLITES PORPHYRIQUES ET LEURS PROPORTIONS NORMALISÉES A 100%	76
FIGURE 3.9 : PHOTOGRAPHIES DU GRANOPHYRE A GRAINS GROSSIERS ET SES CARACTÉRISTIQUES TEXTURALES ET MINÉRALOGIQUES.....	78

FIGURE 3.10 : MICROPHOTOGRAPHIES DES CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES DES LAMES MINCES DES GRANOPHYRES A GRAINS GROSSIERS.	79
FIGURE 3.11 : PHOTOGRAPHIES DU FACIES DES GRANOPHYRES A GRAINS FINS EN AFFLEUREMENT.	80
FIGURE 3.12 : PHOTOGRAPHIES DES ASPECTS PETROGRAPHIQUES MACROSCOPIQUES DES MELANOGRANOPHYRES.	81
FIGURE 3.13 : PHOTOGRAPHIES DES ASPECTS PETROGRAPHIQUES MACROSCOPIQUES DE LA FERRODIORITE.	82
FIGURE 3.14 : PHOTOGRAPHIES DES ASPECTS PETROGRAPHIQUES DES RHYOLITES PORPHYRIQUES DE LA FORMATION DE WACONICHI.	83
FIGURE 3.15 : PHOTOGRAPHIES DES ASPECTS PETROGRAPHIQUES DE L'ANDESITE DE LA FORMATION DE WACONICHI.	84
FIGURE 3.16 : PHOTOGRAPHIES ET MICROPHOTOGRAPHIES DES CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES DES DYKES D'APLITE GRANOPHYRIQUE.	85
FIGURE 3.17 : PHOTOGRAPHIES ET MICROPHOTOGRAPHIES DES CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES DU DYKE FELSIQUE DE L'INDICE RAMSEY.	86
FIGURE 3.18 : PHOTOGRAPHIES ET MICROPHOTOGRAPHIES DES CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES DES DYKES MAFIQUES DE L'INDICE RAMSEY.	87
FIGURE 3.19 : PHOTOGRAPHIES ET MICROPHOTOGRAPHIES DES CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES DES DYKES MAFIQUES DE L'INDICE AXE.	88
FIGURE 4.1 : DIAGRAMMES DE CLASSIFICATION LITHOGEOCHIMIQUE DES GRANOPHYRES DU CLD.	108
FIGURE 4.2 : DIAGRAMMES BINAIRES DE CLASSIFICATION LITHOGEOCHIMIQUE DES ECHANTILLONS PROVENANT DE LA PARTIE MAFIQUE DU CLD.	109
FIGURE 4.3 : DIAGRAMMES BINAIRES DE CLASSIFICATION LITHOGEOCHIMIQUE DES UNITES ECHANTILLONNEES DANS LA FORMATION DE WACONICHI.	110
FIGURE 4.4 : DIAGRAMMES BINAIRES DE CLASSIFICATION LITHOGEOCHIMIQUE DES DYKES IDENTIFIES DANS LA ZONE D'ETUDE.	111
FIGURE 4.5 : DIAGRAMMES HARKER MONTRANT LES CORRELATIONS ENTRE LA SiO_2 ET LES ELEMENTS MAJEURS DES UNITES DU CLD.	113
FIGURE 4.6 : COMPARAISON LITHOGEOCHIMIQUE ENTRE LES GRANOPHYRES DU CLD ET LES RHYOLITES DE LA FORMATION DE WACONICHI.	114
FIGURE 4.7 : HISTOGRAMMES PRESENTANT LES VALEURS DES CALCULS DES BILANS DE MASSES POUR LES GRANOPHYRES ET LES RHYOLITES DE LA FORMATION DE WACONICHI.	115
FIGURE 4.8 : DIAGRAMMES BOITES A MOUSTACHES PRESENTANT LES INDICES D'ALTERATIONS CALCULES A PARTIR DU CALCUL NORMATIF « CONSONORM LG » POUR LES GRANOPHYRES ET LES RHYOLITES DE LA FORMATION DE WACONICHI.	116
FIGURE 5.1 : SYNTHESE DES PROPORTIONS MINERALOGIQUES DES PRINCIPALES MINERALISATIONS A SULFURES PRESENTES DANS LES DECAPAGES ETUDIES.	134
FIGURE 5.2 : PHOTOGRAPHIES DES STYLES DE MINERALISATIONS DE L'INDICE RAMSEY.	135
FIGURE 5.3 : PHOTOGRAPHIES DES STYLES DES MINERALISATIONS DE L'INDICE GRH.	136
FIGURE 5.4 : PHOTOGRAPHIES DES STYLES DES MINERALISATIONS DE L'INDICE AXE.	137
FIGURE 5.5 : PHOTOGRAPHIES DES STYLES DES MINERALISATIONS DE L'INDICE GOLDEN MOON.	138
FIGURE 5.6 : MICROPHOTOGRAPHIES DES TEXTURES ET ASSEMBLAGES MINERALOGIQUES DU FILON SULFURE PRINCIPAL DE L'INDICE RAMSEY.	139
FIGURE 5.7 : MICROPHOTOGRAPHIES DES TEXTURES ET ASSEMBLAGES MINERALOGIQUES DE LA VEINE SULFUREE A QUARTZ±CARBONATES DE L'INDICE GRH.	140
FIGURE 5.8 : MICROPHOTOGRAPHIES DES TEXTURES ET ASSEMBLAGES MINERALOGIQUES DE LA VEINE RUBANEE A QUARTZ-CARBONATES-SULFURES DE L'INDICE AXE.	141
FIGURE 5.9 : MICROPHOTOGRAPHIES DES TEXTURES ET ASSEMBLAGES MINERALOGIQUES DE LA VEINE EN CISAILLEMENT A QUARTZ-CARBONATES-SULFURES DE L'INDICE GOLDEN MOON.	142
FIGURE 5.10 : DIAGRAMMES DE DISCRIMINATION DES PYRITES DES QUATRE INDICES MINERALISES DE LA ZONE D'ETUDE, SELON GENNA ET GABOURY (2015).	143

FIGURE 5.11 : DIAGRAMMES DE DISCRIMINATION DES PYRITES DES QUATRE INDICES MINERALISES DE LA ZONE D'ETUDE, SELON AUGUSTIN ET GABOURY (2019).	143
FIGURE 5.12 : COMPARAISON DES CHAMPS DES PYRITES DES QUATRE INDICES DE LA ZONE D'ETUDE, AUX PYRITES DES PRINCIPAUX SYSTEMES MAGMATO-HYDROTHERMAUX DE LA REGION DE CHIBOUGAMAU.	144
FIGURE 5.13 : COMPARAISON DES CHAMPS DES PYRITES DES QUATRE INDICES DE LA ZONE D'ETUDE, AUX PYRITES DES PRINCIPAUX SYSTEMES OROGENIQUES DE LA REGION DE CHIBOUGAMAU.	145
FIGURE 5.14 : COMPARAISON DES CHAMPS DES PYRITES DES QUATRE INDICES DE LA ZONE D'ETUDE, AUX PYRITES DES PRINCIPAUX SYSTEMES SMV DE LA REGION DE CHIBOUGAMAU.	146
FIGURE 5.15 : COMPARAISON DES CHAMPS DES PYRITES DES QUATRE INDICES DE LA ZONE D'ETUDE, AUX PYRITES DES PRINCIPAUX SYSTEMES MINERALISATEURS DE LA REGION DE CHIBOUGAMAU.	147
FIGURE 5.16 : MICROPHOTOGRAPHIES DES LIGNES D'ABLATION LASER DES PYRITES ANALYSEES POUR CETTE ETUDE.	148
FIGURE 5.17 : MICROPHOTOGRAPHIES DES LIGNES D'ABLATION LASER DES PYRITES DE PROVENANT DES SYSTEMES VOLCANOGENES DE CHIBOUGAMAU-CHAPAI.	149
FIGURE 6.1 : DIAGRAMMES REPRESENTANT LES RESULTATS DE LA MODELISATION GEOCHIMIQUE.	167
FIGURE 6.2 : MODÈLE ÉVOLUTIF PROPOSÉ POUR LA FORMATION DES GRANOPHYRES DU CLD.	167

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1 : SOMMAIRE DES ÂGES DE QUELQUES INTRUSIONS LITÉES	13
TABLEAU 1.2 : CARACTERISTIQUES DES QUELQUES GRANOPHYRES OBSERVES DANS DES INTRUSIONS LITÉES BIEN CONNUES.....	17
TABLEAU 3.1 : LISTE DES LAMES MINCES UTILISES POUR LES OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES.....	61
TABLEAU 4.1 : SYNTHÈSE DES RESULTATS DE CALCULS DES MINÉRAUX NORMATIFS SELON LA NORME CIPW	93
TABLEAU 4.2 : SYNTHÈSE DES RESULTATS DE CALCULS DE BILANS MASSES	102
TABLEAU 4.3 : SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX INDICES D'ALTERATION CALCULÉS SELON LA CONSONORM-LG.....	104
TABLEAU 5.1 : CARACTERISTIQUES DES DIFFÉRENTS INDICES MINÉRALISÉS ÉTUDIÉS.....	122
TABLEAU 6.1 : CARACTERISTIQUES DES DIFFÉRENTS INDICES MINÉRALISÉS ÉTUDIÉS.	122

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : ANALYSES LITHOGÉOCHIMIQUES	177
ANNEXE 2 : ANALYSES DE PYRITES UTILISÉES POUR LA CARACTÉRISATION DES MINÉRALISATIONS DE LA ZONE D'ÉTUDE ET CELLES UTILISÉES POUR DES FINS DE COMPARAISON.....	180
ANNEXE 3: RESULTATS DES DONNÉES DE LA MODÉLISATION GÉOCHIMIQUE DE L'ASSIMILATION DES RHYOLITES PAR LE MAGMA DU CLD.	184
ANNEXE 4 : RÉSUMÉ ET POSTER POUR LE CONGRÈS QUÉBEC MINES 2018	186

CHAPITRE I

MISE EN CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

1.1 Introduction

Le présent document expose les principaux résultats d'un projet de maîtrise réalisé dans le cadre du projet canadien *Metal Earth* à Chibougamau. Le projet *Meta Earth* a pour objectif de comprendre la différence d'enrichissement en or et métaux de base entre plusieurs ceintures de roches vertes Archéennes qui sont géologiquement similaires.

Cette maîtrise porte sur la détermination de l'origine des granophyres du Complexe du Lac Doré (CLD) et leurs relations avec les minéralisations Cu-Au qu'ils encaissent.

Ce premier chapitre met en exergue les processus connus pour la formation et la mise en place des granophyres associés aux intrusions litées dans le monde. Le cas spécifique des granophyres du CLD est énoncé, avec les hypothèses de leurs formations. Ensuite, les objectifs et la méthodologie de recherche de ce projet sont présentés. Finalement, s'en suit une mise en contexte géologique par la présentation du cadre géologique de la région à l'étude.

Le deuxième chapitre s'attarde à la caractérisation pétrographique des principales unités lithologiques de la zone d'étude. Le troisième chapitre est consacré à la géochimie de ces unités de roches et à la caractérisation des altérations qu'elles ont subies. L'étude des minéralisations encaissées par les granophyres du CLD est présentée dans le quatrième chapitre. Enfin, le cinquième chapitre apporte des discussions et conclusions sur l'origine des granophyres du CLD et le lien entre les minéralisations qu'ils renferment et les systèmes hydrothermaux de la région de Chibougamau.

1.2 Problématique générale

1.2.1 Les intrusions litées

Les intrusions litées mafiques à ultramafiques sont des corps géologiques qui fascinent les géologues parce qu'elles représentent l'exposition naturelle des chambres magmatiques cristallisées ayant enregistrées les processus d'évolution d'un magma. Ces intrusions représentent également la principale source de plusieurs métaux indispensables pour la société, à savoir : les EGP (éléments du groupe de platine), le chrome, le titane et le vanadium (Cawthorn et al. 2005; Godel 2015).

Les intrusions litées sont interprétées comme des produits de la différenciation d'un magma primitif, d'affinité tholéiitique (Wager et Brown 1967), issu de la fusion partielle du manteau et qui est généralement de composition basaltique (Cawthorn et al. 2005). Leurs formations et mises en place sont associées à des plumes mantelliques reliées à des systèmes d'ouverture de rifts intracratoniques (Pirajno 2007). Ces intrusions mafiques sont généralement de grand volumes et elles peuvent se former à différents âge géologique de la Terre (Tableau 1). Elles peuvent être retrouvées dans les séquences crustales des ceintures de roches vertes, dans les unités d'âge Archéen et protérozoïque, et dans les plaines de basaltes continentales ou océaniques (Figure 1.2) (Scoates et Wall 2015).

Selon les pulses magmatiques, ces intrusions peuvent être classées en deux catégories : 1) les systèmes fermés comprenant une injection unique de magma (p.ex. Skaergaard : Cox et al. 1979); et 2) les systèmes ouverts où plusieurs injections de magma sont possibles (p.ex. Bushveld : Cawthorn et McCarthy (1985). La structure des intrusions litées est généralement formée d'une succession de lits qui présentent des variations minéralogiques et texturales qui conduisent à une subdivision de l'intrusion litée en plusieurs

niveaux ou séries (Namur et al. 2015; Figure 1.3). Ainsi, les plus connues comportent généralement une zone inférieure à cumulus de roches mafiques à ultramafiques, sur laquelle repose une zone litée de composition mafique à intermédiaire. Les niveaux supérieurs de ces corps géologiques peuvent être occupés par des roches felsiques appelées granophyres dont le mode de formation est très débattu (p.ex. Bushveld, Skaergaard : Walraven 1985; Hirschmann 1992).

Tableau 1.1 : Sommaire des âges de quelques intrusions litées, modifié de Scoates et Wall (2015).

Intrusion	Region	Location	Era/Period	Age(s) ^a	Method ^b	Rock Type ^c	Reference
Ujaraaluk	Nuvvuagittuq	Québec	Hadean	4406 ± 14/- 17 Ma	¹⁴⁶ Sm- ¹⁴² Nd isochron	Meta-mafic/ ultramafic rocks	O'Neil et al. (2012)
Akilia	Itsaq, Isua	Greenland	Eoarchean	3811 ± 4 Ma (min.)	U-Pb zircon SHRIMP	Enclaves in tonalite	Nutman et al. (1996)
Stella		South Africa	Mesoarchean	3033.5 ± 0.3 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Gabbro	Maier et al. (2003)
Stillwater	Montana	USA	Neoarchean	2701 ± 8 Ma	¹⁴⁷ Sm- ¹⁴³ Nd isochron	Gabbro-norite	DePaolo and Wasserburg (1979)
Great Dyke		Zimbabwe	Neoarchean	2575.9 ± 1.0 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Orthopyroxenite	Oberthür et al. (2002)
Lukkulaivaara	Karelia	Russia	Paleoproterozoic	2442.1 ± 1.4 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Gabbroic pegmatite	Amelin et al. (1995)
Bushveld		South Africa	Paleoproterozoic	2056.88 ± 0.41 Ma	U-Pb zircon CA-TIMS	Pegmatitic orthopyroxenite	This study
Muskox	Nunavut	Canada	Mesoproterozoic	1269.4 ± 1.1 Ma	U-Pb bad-deleyite ID-TIMS	Feldspathic peridotite	French et al. (2002)
Duluth	Duluth Complex	Minnesota, USA	Mesoproterozoic	1099.1 ± 0.2 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Anorthosite	Schmitz et al. (2003)
Hongge	Emeishan	China	Permian	259.3 ± 1.3 Ga	U-Pb zircon ID-TIMS	Ilm-rich gabbro	Zhong and Zhu (2006)
Dufek	Ferrar	Antarctica	Jurassic	183.9 ± 0.3 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Granophyre	Minor and Mukasa (1997)
Skaergaard	East Greenland	Greenland	Eocene	55.40 ± 0.14 Ma	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar homblende	Granophyre	Hirschmann et al. (1997)
Val	Kerguelen	Indian Ocean	Oligocene	24.25 ± 0.15 Ma	U-Pb zircon ID-TIMS	Gabbro	Scoates et al. (2007)

1.2.2 Granophyres dans les intrusions litées

Les granophyres représentent un ensemble de roches felsiques et grenues qui font parties de la famille de granitoïdes et qui sont généralement observés dans les niveaux sommitaux des intrusions litées. Cette appellation « granophyre » réfère à la texture granophyrique développée dans ces roches. Il s'agit d'une croissance simultanée entre le quartz et le feldspath alcalin au cours d'une cristallisation à l'eutectique (Barker 1970). Certains auteurs ont suggéré que cette texture se forme par une cristallisation rapide due à un surefroidissement d'un magma silicaté, généralement en présence d'eau (Dunham 1965).

Dans les intrusions litées, ces granophyres sont observés au-dessus des séquences litées. Ils peuvent être retrouvés en plusieurs familles distinctes en fonction de leurs caractéristiques minéralogiques, texturales et de leurs formes géométriques, (p.ex. filons couches, dykes, veines - tableau 2; Walraven (1985); Alfaro 1990; Hirschmann 1992).

Malgré les nombreuses études réalisées sur les intrusions litées en générale, l'origine des granophyres qu'elles contiennent reste un débat d'actualité (Wager et Brown 1967; Kays et al. 1981; Walraven 1985; Walraven 1987; Alfaro 1990; Hirschmann 1992). De nombreux processus magmatiques et/ou post-magmatiques ont été proposés pour expliquer la formation des granophyres. Les plus largement acceptés sont : 1) la différenciation magmatique (Walraven 1985; McBirney et Naslund 1990) ; 2) la fusion et l'assimilation des roches encaissantes par le magma de l'intrusion (Kays et al. 1981; Alfaro 1990) et 3) un processus d'immiscibilité du magma (Jakobsen et al. 2005).

1.2.3 Processus de formation des granophyres

1.2.2.1 Différenciation magmatique

La différenciation est un processus très fréquent qui joue un rôle important dans l'évolution des magmas basaltiques des intrusions litées (Namur et al. 2015). Elle correspond à la cristallisation fractionnée du magma et induit soit une accumulation des minéraux par sédimentation à la base de la chambre magmatique (Wager et al. 1960), soit une cristallisation *in situ* des minéraux depuis les bordures vers l'intérieur de la chambre (Naslund et McBirney 1996).

Deux principaux modes de différenciation magmatiques, conduisant à la formation des granophyres, sont connus, soient les séries de Bowen et de Fenner. La série de Bowen (1956) implique une augmentation progressive du contenu en silice du magma résiduel, qui à la fin, pourra former les granophyres. La cristallisation fractionnée de Bowen s'applique à tous les magmas et prévoit l'accumulation de l'olivine, de plagioclase et de pyroxène dans des cumulus, provoquant ainsi l'augmentation de la silice. La série de Fenner (1929) implique que l'évolution d'un magma tholéiitique est marquée par un enrichissement important en fer à cause de la faible fugacité d'oxygène. Ultimement, à la fin de son évolution, ce magma va produire un liquide felsique à partir duquel pourra se former les granophyres.

Ces deux modes de différenciation ont été proposés pour la formation des granophyres de plusieurs intrusions litées, comme les complexes du Bushveld (Walraven 1985; Mathez et al. 2013), de Skaergaard (Wagner et Deer 1939; McBirney 1995) et de Duluth (Miller et Ripley 1996).

1.2.2.2 Assimilation des roches encaissantes

L'intrusion de magmas basaltiques chauds dans la croûte supérieure provoque un transfert de chaleur important et rapide qui peut conduire à la fusion partielle des roches encaissantes, puis au mélange, entre le magma et le liquide issu de la fusion partielle. Il s'agit ici d'un processus d'assimilation, aussi appelé contamination crustale (Huppert et al. 1985). Cette fusion est possible lorsque le point de fusion des roches encaissantes est inférieur à la température du magma. Dans le cas de la formation des granophyres par ce processus, les unités encaissantes doivent être des roches felsiques. Ainsi, le produit d'assimilation, qui est moins dense que le magma mafique basaltique, migre vers les niveaux supérieurs de la chambre magmatique en cours de cristallisation où il peut s'accumuler et former des roches felsiques telles que les granophyres (Figure 1.4; Campbell 1996).

Ce mode de formation a été documenté dans plusieurs intrusions litées pour expliquer la formation des granophyres. C'est le cas par exemple du complexe du Bushveld, où une partie de la suite granophyrique de Raseop est interprétée comme le produit de la fusion partielle et de l'assimilation des roches volcaniques felsiques encaissantes par le magma de la *Rustenburg Layered Suite* (Von Gruenewaldt 1968; Walraven 1987).

Ce processus a été évoqué aussi pour la formation des granophyres du complexe du Skaergaard par Kays et al. (1981). Selon leurs travaux de modélisation et d'études des éléments de terres rares, ils ont conclu que ces granophyres se sont formées par l'assimilation des gneiss encaissants. De même, Maier et al. (1996) à la suite de leurs travaux sur le Complexe de la Rivière Bell, ont conclu que la formation des granophyres de ce complexe est due à l'assimilation des roches volcaniques du groupe du Lac Watson ou des roches sédimentaires du groupe de Taibi.

Tableau 1.2 : Caractéristiques des quelques granophyres observés dans des intrusions litées bien connues.

	Intrusions	Épaisseur (%)	Types		Formes géométriques			Encaissants au toit				Modèle Formation			Minéralisation	Âges	Références
			Méla	Leu	F-C	Dykes	Veines	M	F	I	S	Diff	Imm	Assim			
Granophyres	Bushveld	22%	x	x	x				x		x	x	x	x	-	2056 Ma	Walraven (1985, 1987)
	Skaergaard	2,60%	x	x	x	x			x			x	x	x	-	55 Ma	Hirschmann (1992) Kays et al. (1981)
	Duluth	-	x	x	x			x				x		x	-	1099 Ma	Ripley (1996); Miller et al. (2002)
	Stillwater	< 1%		x			x				x				-	2701 Ma	Czamanske et al. (1991)
	Bell River	10%		x	x				x		x	x		x	-	2724 Ma	Maier et al. (1996)
	Sept Îles	-		x	x	x				x		x			-	540 Ma	O. Namur et al. (2015)
	Lac Doré	> 12%	x	x	x			x	x			x		x	Veines à Cu-Au	2727 Ma	Allard (1976); Daigneault et Allard (1990); Alfaro (1990)

Abréviations : Mé= Malénogranophyre, Leu= Leucogranophyre, F-C=filon-couche, M=Mafique, F=Felsique, I= Intermédiaire, S= sédimentaires Diff= Différenciation, Imm= Immiscibilité de liquides, Assim= Assimilation de roches ; Existence de l'élément : X= Oui, -- = Non. NB : Les épaisseurs en pourcentage représentent les calculs de proportion d'épaisseur des granophyres par rapport à l'épaisseur des intrusions litées déterminées à partir de la séquence stratigraphique des intrusions. Certaines épaisseurs peuvent être exagérées par manque d'information sur la stratigraphie totale (Lac Doré) ou parce que le granophyre est plus épais à l'endroit où la stratigraphie est établie (Bushveld).

1.2.2.3 Immiscibilité du magma

L'immiscibilité de magmas est un processus qui se produit généralement dans les magmas tholéitiques fortement fractionnés (Veksler et Charlier 2015). Il résulte de la séparation d'un magma en deux liquides magmatiques de compositions et de propriétés contrastées. Ce processus peut être la conséquence d'un enrichissement extrême en fer du magma initial et de la formation du magmatisme dit bimodal (Charlier et al. 2013; Fischer et al. 2016).

Dans les intrusions litées mafiques à ultramafiques, l'immiscibilité produit deux magmas : soit un magma riche en fer qui formera des ferrobasaltes, ou dans certains cas, des niveaux lités à magnétites vanadifère, et un deuxième magma riche en silice, aluminium et alcalins qui pourra former des rhyolites et/ou des granophyres (Naslund et McBirney 1996).

Ce processus a été documenté dans le complexe du Skaergaard où il est considéré par McBirney (1995) et Jakobsen et al. (2005) comme étant à l'origine de la formation des deux familles de granophyres connues. VanTongeren et Mathez (2012) ont proposé un modèle d'évolution pour le complexe du Bushveld par immiscibilité de liquides. Selon ces auteurs ce processus a conduit à une séparation physique d'un magma dense et riche en fer sur lequel flotte un magma riche en silice qui aurait formé les granophyres du Groupe de Rashoop et les volcanites du Groupe de Rooiberg. Les granophyres de l'intrusion litée de Sept Îles se sont formés aussi par ce processus d'immiscibilité de magma (Charlier et al. 2011; Veksler et Charlier 2015).

1.2.2.4 Autres processus

Les processus magmatiques décrits ci-dessus représentent ceux qui sont les plus évoqués pour la formation des granophyres dans les intrusions litées. D'autres mécanismes magmatiques ont également été proposés pour expliquer l'origine des granophyres. Par exemple, dans le complexe du Bushveld, un processus de recristallisation in situ des roches sédimentaires du groupe de Pretoria a été proposé par Strauss (1947) et Walraven (1985). Dans le complexe de Stillwater, les granophyres sont observés sous forme de veines de 1-2 cm d'épaisseurs sur une longueur de plus de 100 m. L'origine de ces unités a été attribuée à la consolidation d'une solution aqueuse felsique, enrichie en chlore, vers les dernières phases de solidification des séries litées (Czamanske et al. 1991).

1.2.3 Minéralisations associées aux granophyres des intrusions litées

Dans les intrusions litées mafiques à ultramafiques, les minéralisations sont généralement de types magmatiques (EGP-Cr, Ni-Cu, Fe-Ti-V) et elles sont restreintes aux niveaux lités mafiques et ultramafiques (Lee 1996; Godel 2015). Les granophyres occupant les niveaux sommitaux de ces intrusions sont dépourvus de minéralisations magmatiques ou hydrothermales.

Toutefois, ces intrusions litées peuvent, en cas de mise en place à faible profondeur dans des régions volcaniques actives, servir de source de chaleur pour la mise en place de minéralisation de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) (Figure 1.5 : (Maier et al. 1996). Une fois solidifier, ces intrusions peuvent servir d'encaissant pour des minéralisations magmato-hydrothermales en forme de veines qui peuvent se retrouver dans les niveaux occupés par les granophyres (p.ex. Complexe du Lac Doré; Pilote et Guha 2006).

Une hypothèse possible, est qu'en cas de formation par assimilation de roches encaissantes altérées (hydratées) et minéralisées (riches en sulfures), ces granophyres pourraient, au cours de leurs formations, contribuer à générer des fluides hydrothermaux et remobiliser des métaux.

1.3 Les granophyres du Complexe du Lac Doré

Le Complexe du Lac Doré (CLD), daté à 2728.3 ± 1.2 Ma (Mortensen 1993), est localisé dans la région de Chibougamau, au NE de la Sous-province Archéenne de l'Abitibi (Figure 1.6), qui est la plus vaste des ceintures de roches vertes au monde (Thurston et al. 2008). C'est une intrusion synvolcanique, d'affinité tholéitique, métamorphisée au faciès des schistes verts (Allard 1976; Daigneault et Allard 1990). Il s'agit d'une intrusion anorthositique, localement litée, dont l'épaisseur exposée varie de 5 à 7 km sur une longueur de 55 km dans la direction E-O. Le CLD (Figure 1.7) s'est mis en place dans les roches du premier cycle volcanique (2730 à 2726 Ma; Mortensen 1993; Leclerc et al. 2011) de l'empilement stratigraphique de la région, pour lesquelles il semble avoir servi de chambre magmatique (Bédard et al. 2009; Polat et al. 2018).

Cette intrusion représente le cœur de la région de Chibougamau parce qu'en plus d'être le moteur thermique de plusieurs minéralisations de type SMV, elle est aussi l'encaissant du camp minier central à Cu-Au (Pilote et Guha 2006; Leclerc et al. 2012) et l'hôte d'importants dépôts de Fe-Ti-V (Taner et al. 1998; Girard et D'Amour, 2015).

A l'instar de plusieurs intrusions litées, le CLD comprend, dans sa partie supérieure, une zone de granophyre connue sous le nom de « zone de sodagranophyre » qui a la particularité d'encaisser des minéralisations sous forme de veines à Cu-Au. Le préfixe « soda » a été ajouté à l'appellation de ces roches par Allard (1976) à cause de leur contenu élevée en Na_2O et de leur faible contenu en K_2O . Il s'agit d'une roche felsique très grenue à porphyrique par endroit, dont la minéralogie est constituée essentiellement de quartz et feldspaths et en moindres proportions par la muscovite, l'épidote, la chlorite, et des traces d'amphibole, apatite, zircon et pyrite.

Les granophyres sont reconnus sur les deux flancs du CLD, où ils sont communément observés au-dessus des niveaux lités à magnétite et en contact avec les roches volcaniques felsiques de la Formation de Waconichi du premier cycle volcanique du Groupe de Roy (Daigneault et Allard 1990; Figure 1.7). Leur épaisseur varie de 150 à 900m sur le flanc sud (Allard 1976). Cette relation spatiale a amené Allard (1976) et Daigneault et Allard (1990), à suggérer que les granophyres du CLD se sont formés par l'assimilation des roches volcaniques felsiques encaissantes, à l'occurrence, les rhyolites de la Formation de Waconichi.

Dans ces travaux, Alfaro (1990) avait distingué deux types de granophyres : 1) le leucogranophyre, qui correspondrait à un magma ayant assimilé des rhyolites de la Formation de Waconichi par le magma du CLD et 2) le mélanogranophyre qui se serait formé par la différenciation du magma du CLD. Ces travaux étaient essentiellement concentré sur le Flanc Sud du CLD.

Les granophyres du CLD ont été très peu étudiés, les récents travaux datent des années 1990 (Alfaro 1990; Daigneault et Allard 1990). Cependant, beaucoup d'études restent à faire sur ces unités afin de comprendre les processus à l'origine de leur formation. Les questions suivantes demeurent des problématiques encore débattues :

- Les granophyres du CLD se sont-ils formés par la différenciation du CLD ou par l'assimilation des rhyolites de la Formation de Waconichi qui les encaissent?
- Est-il possible qu'ils se soient formés par les deux processus à différents stades de l'évolution du magma du CLD?
- Quelle est la nature de leur contact et leur relation avec les rhyolites de la Formation de Waconichi?

- Quelle est la relation entre les granophyres du CLD et les minéralisations à Cu-Au qu'ils encaissent?

Étudier toutes ces questions représente les enjeux de ce projet de maîtrise. Cela permettra de comprendre les processus d'évolution et de mise en place du CLD en général et de la formation des granophyres en particulier. Ce projet permettra aussi de documenter le CLD et la Formation de Waconichi qui sont deux formations d'importances économiques dans la région de Chibougamau, respectivement, pour les minéralisations à Cu-Au et les systèmes SMV. Toutes ces questions représentent un aspect particulièrement important pour le projet *Metal Earth*.

1.4 Objectifs

Le but principal de ce projet est de déterminer l'origine des granophyres du CLD et de définir leurs relations avec les roches encaissantes et les minéralisations à Cu-Au de la région. Afin d'atteindre ce but, les trois objectifs suivants ont été fixés :

- Déterminer l'origine des granophyres du CLD par une caractérisation pétrographique et géochimique.
- Caractériser la nature de l'encaissant et son contact avec les granophyres du CLD.
- Déterminer les styles des minéralisations dans les granophyres et caractériser leurs compositions métalliques en vue de définir leur relation avec les types génétiques connus dans la région de Chibougamau.

1.5 Méthodologie

Atteindre le but de ce projet a nécessité d'établir une méthodologie rigoureuse qui puisse répondre aux différents objectifs qui ont été fixés. Cette méthodologie comporte deux phases distinctes. La première phase a consisté à la cueillette des informations et données géologiques sur le terrain. Celle-ci correspond aux travaux de cartographie de détail et aux prélèvements d'échantillons, la prise de mesures structurales, la cartographie d'affleurements dans la zone d'étude et la préparation des échantillons. La seconde phase regroupait les travaux de laboratoire, qui comprennent entre autres, les études pétrographiques, les analyses et traitements lithogéochimiques, et des analyses *in situ* d'éléments traces sur des pyrites.

1.5.1 Travaux de terrain

1.5.1.1 Cartographie de détail des décapages

Quatre décapages correspondant à des indices minéralisés ont fait l'objet d'une cartographie de détail dans les deux secteurs d'étude à savoir : Ramsey et Golden Moon. Cela avait pour objectifs 1) d'identifier et de décrire les différentes unités lithologiques présentes dans la zone d'étude; 2) de réaliser les mesures structurales; 3) de qualifier les altérations observées et 4) de déterminer la géométrie et les styles des minéralisations. L'ensemble des données recueillies sur ces décapages a été digitalisé par les logiciels ArcGIS et Illustrator afin de produire des cartes géologiques numériques et en couleur pour chaque décapage.

1.5.1.2 Cartographie d’affleurements dans la zone d’étude

La cartographie de 120 affleurements a été réalisée dans la zone d’étude et le long du profil sismique du projet *Metal Earth*, dans l’optique d’avoir une meilleure compréhension de l’ensemble de la zone d’étude. Cette étape a consisté à la description et à l’échantillonnage de plusieurs affleurements qui font partie des granophyres du CLD, de la zone à ferrodiorite du CLD et des rhyolites de la Formation de Waconichi. Les caractéristiques minéralogiques et texturales de ces unités lithologiques ont été notées. La nature et la géométrie des contacts ont été décrites en vue de déterminer les relations entre les principales unités lithologiques observées dans la zone d’étude.

1.5.1.3 Échantillonnage et préparation des échantillons

C’est au total plus de 120 échantillons qui ont été prélevés dans le cadre de la phase de cartographie de terrain, soit le long du profil sismique, soit dans les décapages cartographiés. Une quarantaine d’échantillons ont été sélectionnés et préparés pour la réalisation des analyses lithogéochimiques et la confection de lames minces. L’approche adoptée pour l’échantillonnage consistait à faire des prélèvements d’échantillons de manière à ce qu’ils soient représentatifs des unités lithologiques identifiées dans la zone d’étude. Leurs préparations consistaient à enlever les patines d’altération et les niveaux minéralisés pour les échantillons destinés aux analyses lithogéochimiques. Enfin, ceux destinés à la fabrication de lames minces ont été préparés selon la même rigueur. Les échantillons ont été envoyés à l’Atelier de Pétrographie Louis Fortin à Québec pour la confection des lames minces.

1.5.2. Travaux de laboratoire

1.5.2.1 Traitement des données lithogéochimiques et QA/QC

Les études lithogéochimiques concernaient 37 analyses de roches totales, dont cinq duplicatas. Quatre matériaux de références internes ont été analysés pour des fins de contrôle de qualité analytique. Les analyses ont été réalisées au Laboratoire ALS Global de Vancouver. Les éléments majeurs ont été analysés par ICP-AES et les éléments traces par ICP-MS. L'ensemble des analyses comprend 69 éléments, incluant les éléments majeurs et traces, la PAF (perte au feu) et certains volatils (C, S, F, Cl et H₂O).

L'ensemble des traitements de données lithogéochimiques a été réalisée à l'aide du logiciel Lithomodeleur (Trepanier 2010). Ce traitement consiste à l'exploitation des données d'analyses lithogéochimiques. Au préalable à ce traitement, un nettoyage de la base de données a été réalisé avec un regard critique sur de toutes les données pour identifier des erreurs éventuelles et des valeurs aberrantes. Ensuite, un contrôle de qualité a été effectué sur les données du laboratoire d'analyses pour s'assurer de la validité des données et des méthodes analytiques. Plus spécifiquement, les validations suivantes ont été effectuées : 1) vérification des corrélations entre les valeurs de matériaux de référence analysés et leurs valeurs certifiées; 2) validation de la reproductibilité des analyses à partir du calcul des écarts entre les duplicatas; et 3) vérifier s'il n'y a eu de contamination au niveau du laboratoire par validation des analyses des échantillons de blancs. Ces validations ont démontré que les analyses sont de très bonnes qualités pour qu'elles soient utilisées pour les objectifs du projet.

1.5.2.2 Études pétrographiques

Les études pétrographiques ont été réalisées sur 40 lames minces qui sont représentatives des principales unités lithologiques identifiées et 8 lames minces provenant des minéralisations de la zone d'étude. Les observations et examens des assemblages minéralogiques, des textures des minéraux magmatiques et de la nature des minéraux d'altération ont été effectuées à l'aide du microscope optique dans les laboratoire de l'UQAC. Ces observations ont été complétées par l'utilisation de la cathodoluminescence (MK5-1 CITL) disponible à laboratoire LabMater de l'UQAC. Cela a permis d'observer les zonations dans les feldspaths, leurs natures et leurs proportions, mais aussi, d'identifier plusieurs phases minérales secondaires et accessoires comme les apatites et les zircons.

1.5.2.3 Études lithogéochimiques

Les études lithogéochimiques visaient à la caractérisation géochimique des principales unités lithologiques présentes dans la zone d'étude. Les noms des roches ont été déterminés à l'aide de diagrammes de type TAS (Total Alkali Silicate) pour les roches intrusives (Middlemost 1985) et son équivalent utilisant des éléments immobiles (Winchester et Floyd 1977) pour les roches extrusives. Le diagramme QAP (Streckeisen 1967), utilisant des minéraux normatifs calculés à partir la norme CIPW, a été utilisé en particulier pour la classification des roches felsiques du CLD, plus précisément les granophyres.

L'affinité géochimique des roches a été définie à l'aide du diagramme utilisant les ratios d'élément immobiles Th/Yb vs Zr/Y (Ross et Bédard 2009). Des diagrammes multiéléments (éléments classés selon l'ordre de Pearce (2008) et spectres d'éléments de terres rares (ETR) normalisés au manteau primitif de Hofmann (1988), ont été réalisés dans le but de déterminer le degré de fractionnement des roches et aussi de confirmer leurs affinités géochimiques.

Des diagrammes de variations géochimiques de type Harker (SiO_2 vs éléments majeurs) ont été réalisés pour les roches du CLD dans l'optique d'étudier l'évolution du magma.

Les altérations hydrothermales dans les granophyres du CLD et dans les rhyolites de la Formation de Waconichi ont été caractérisées à l'aide des outils de calcul développés par le CONSOREM à savoir : les calculs de bilan masses (Trépanier et al. 2016) et les calculs de minéraux normatifs et indices d'altérations pour les conditions schistes verts (Consonorm-LG (modèle 350°C et 2,5 kbars ; Trépanier et al. (2015). L'ensemble des calculs et diagrammes a été réalisé à l'aide du logiciel de traitement lithogéochimique « Lithomodeleur » développé par le CONSOREM.

1.5.2.4 Analyses in situ d'éléments traces des pyrites

C'est un de total 133 grains de pyrites qui ont été analysés au LA-ICP-MS (Résolution M-50 Excimer 193 nm et Agilent 7900) du LabMater de l'UQAC pour un ensemble de 45 éléments traces et majeurs. Quatre échantillons de matériaux de références internes ont servi pour la calibration et le contrôle de qualité analytique.

Les résultats de ces analyses ont été d'abord traités et convertis en ppm (partie par million) par le logiciel Iolite v2.5 (Paton et al. 2011), ensuite ces données ont été intégrées dans des diagrammes de discrimination des pyrites (Figures 19; Genna et Gaboury 2015; Augustin et Gaboury 2018). L'ensemble des analyses effectuées au LA-ICP MS suit le protocole expérimental de Genna et Gaboury (2015). Cette étude a pour objectif de faire une comparaison des signatures géochimiques des pyrites provenant des indices minéralisés de la zone d'étude, avec celles des minéralisation typiques des systèmes magmato-hydrothermaux de la région de Chibougamau.

1.6 Géologie régionale

1.6.1 Cadre stratigraphique

La région de Chibougamau présente une stratigraphie qui est dominée par deux cycles volcaniques bimodaux mafiques-felsiques constituant le groupe de Roy, sur lequel repose en discordance la séquence de roches sédimentaires du groupe d'Opémisca (Figure 1.7 et 1.8; Daigneault et Allard 1990; Leclerc et al. 2011). La description de la géologie de la région de Chibougamau est disponible dans les travaux de Daigneault et Allard (1990), Leclerc et al. (2017). Le lecteur est référé à ces documents pour une description détaillée et une compréhension approfondie de l'histoire géologique de la région de Chibougamau.

Le premier cycle volcanique du groupe de Roy comprend, à sa base, la Formation d'Obatogamau (Midra 1989; Leclerc et al. 2011), qui est constituée d'un assemblage de basaltes andésitiques massifs à coussinés, d'affinité tholéitique et localement à macrocristaux de plagioclases. La Formation d'Obatogamau est surmontée par la Formation de Waconichi (2729-2726 Ma; Mortensen 1993; Leclerc et al. 2011), qui est constituée de rhyolites à rhyodacites et de volcanoclastites mafiques à felsiques, d'affinité transitionnelle à calco-alcaline, localement tholéitique (Daigneault et Allard 1990; Leclerc et al. 2011; Clairet et al. 2017; Leclerc et al. 2017). Le second cycle (2720-2717 Ma; Leclerc et al. 2011) regroupe de la base au sommet, la Formation de Bruneau constituée de basaltes et andésites tholéitiques, la Formation de Blondeau à dominance de volcanosédimentaires d'affinités calco-alcalines, et la Formation de Bordeleau constituée essentiellement de roches sédimentaires (Lefebvre 1991; Leclerc et al. 2011).

Enfin, le groupe d'Opémisca est dominé par des roches sédimentaires conglomératiques et subarkosiques, interstratifiées avec des lentilles de laves andésitiques (Leclerc et al. 2017).

La région de Chibougamau est marquée par trois activités intrusives de natures variées qui sont reliées au volcanisme de la région. Il s'agit de l'intrusion anorthositique du Lac Doré (Figure 1.8) connue sous le nom de « CLD », le pluton de Chibougamau, qui correspond à des tonalite, trondjémite et diorite, et enfin les filons-couches mafiques à ultramafiques du Complexe de Cummings (Bédard et al. 2009; Leclerc et al. 2011).

Le Groupe de Roy est aussi recoupé par plusieurs intrusions syn à tardi-tectoniques qui sont de compositions intermédiaires à felsiques. L'histoire intrusive de la région de Chibougamau s'est terminée par la mise en place de nombreux dykes de diabases d'âge Protérozoïque qui recoupent toutes les unités (Leclerc et al. 2017).

1.6.2 Complexe du Lac Doré

Le CLD, daté à 2728.3 ± 1.2 Ma (Mortensen 1993) est l'un des objets géologiques les plus fascinants de la région de Chibougamau. C'est une intrusion anorthositique, synvolcanique et contemporaine au premier cycle du Groupe de Roy. Le CLD a été plissé et métamorphisé aux faciès des schistes verts (Allard 1976; Daigneault et Allard 1990). Il est interprété comme une intrusion stratiforme mafique à ultramafique, d'affinité tholéitique (Daigneault et Allard 1990; Leclerc et al. 2011) à localement calco-alcaline (Bédard et al. 2009).

Par analogie à d'autres complexes stratiformes, le CLD est divisé en trois principales séries (Figure 1.7; Daigneault et Allard 1990; Leclerc et al. 2017). La Série Inférieure est constituée essentiellement d'anorthosite et de gabbro-anorthositique. Elle comprend aussi la

sous zone à magnétite et à péridotite. La Série Litée comprend une alternance de lits de ferrograbbro à magnétite, de magnétite vanadifère, de dunite, de péridotite, de pyroxénite et de ferrodiorite. Enfin, la Série Supérieure est formée d'une zone à granophyre et une zone de bordure discontinue (Allard 1976).

Le CLD est recoupé par de nombreuses failles (Daigneault et Allard 1990), dont certaines sont interprétées comme synvolcaniques (Leclerc et al. 2011). Le cœur du CLD est occupé par le Pluton de Chibougamaui qui est une intrusion considérée comme synvolcanique contemporaine au deuxième cycle volcanique du Groupe de Roy (Leclerc et al. 2008; Leclerc et al. 2017).

1.6.3 Formation de Waconichi

La Formation de Waconichi a épaisseur estimée de 2400 m (Caty 1975) et elle regroupe l'ensemble des unités volcaniques felsiques et volcanoclastites du premier cycle du Groupe de Roy (Daigneault et Allard 1990). La stratigraphie de la Formation de Waconichi est complexe. Elle est subdivisée en plusieurs membres et faciès, dont les plus connus sont : le membre de Lemoine, Le membre de Scott, le membre d'Allard, le membre de Portage et le membre de Queylus (Clairet et al. 2017; Leclerc et al. 2017).

Dans son ensemble, la Formation de Waconichi est constituée de rhyodacites et de rhyolites porphyriques, de volcanoclastites felsiques, de tufs, de tufs à blocs et des formations de fer du lac Sauvage (Daigneault et Allard 1990). La Formation a également une importance économique dans la région parce qu'elle est l'encaissant de l'ancienne mine Lemoine, et contient d'autres dépôts et indices de styles SMV (sulfures massifs volcanogènes Mercier-Langevin et al. 2014; Clairet et al. 2017). Le membre de Scott est celui qui est situé dans la zone d'étude et est constitué d'un assemblage de rhyolite, rhyodacite et d'andésite (Daigneault et Allard 1990 ; Leclerc et al. 2017).

1.6.4 Géologie structurale

Les unités géologiques de la région de Chibougamau ont enregistré trois principaux évènements de déformation ductile cassante (D1-D3), suivi d'un quatrième évènement (D4) tardif qui date du protérozoïque (Daigneault et Allard 1990). La phase D1 correspond à des grands plis régionaux précoces dont les empreintes n'apparaissent que localement. La phase D2, qui représente l'évènement majeur de déformation, a engendré une série de synclinaux et d'anticlinaux d'orientation E-O. Elle s'est manifestée par la formation d'une schistosité S2 d'orientation E-O, dite « schistosité principale Sp », qui est bien développée dans les roches volcaniques et sédimentaires. L'évènement de déformation D3 a eu pour conséquence la formation des failles NE et des décrochements dextres orientés NE-SO. Enfin, la dernière phase de déformation D4 correspond à des petits plis asymétriques en Z orientés NE-SO, auxquels sont associés des clivages de crénulations.

1.6.5 Géologie économique

Le district minier de Chibougamau a été l'un des plus productifs et diversifiés de la partie québécoise de la Sous-province de l'Abitibi (Leclerc et al. 2012). De 1953 à 2008, la région de Chibougamau a produit 1,57 Mt Cu, 176,1 t Au, 108.8 t Ag, et 0.7 Mt de Zn, principalement à partir de systèmes de veines à Cu-Au de types Chibougamau ou Lac Doré (Pilote et Guha 2006; Leclerc et al. 2012).

Les minéralisations de la région de Chibougamau peuvent être regroupées en six types, selon les travaux de Pilote et Guha (2006) et de Leclerc et al. (2012) : 1) les dépôts de Fe-Ti-V magmatiques situés dans les niveaux de magnétites litées du CLD, 2) les dépôts de SMV retrouvés dans les roches volcaniques felsiques de la Formation de Waconichi, 3) les

dépôts de type porphyre à Cu-Au \pm Mo qui sont associés génétiquement au pluton de Chibougamau, 4) les filons polymétalliques à Au-Cu-Ag-Zn retrouvés dans des failles et des zones de cisaillements précoces (pré-D2), 5) les filons à Cu-Au dans les zones de cisaillement NO-SE qui représentent les minéralisations du Camp Central et 6) les filons à Au et Au-Cu de type orogénique. Le lecteur est référé aux travaux de Pilote et Guha (2006) et Leclerc et al. (2012) pour de plus amples informations sur les minéralisations de la région de Chibougamau.

FIGURES DU CHAPITRE I



Figure 1.1 : Localisation de la zone à l'étude indiquée par le cadre rouge (Google Map 2018).

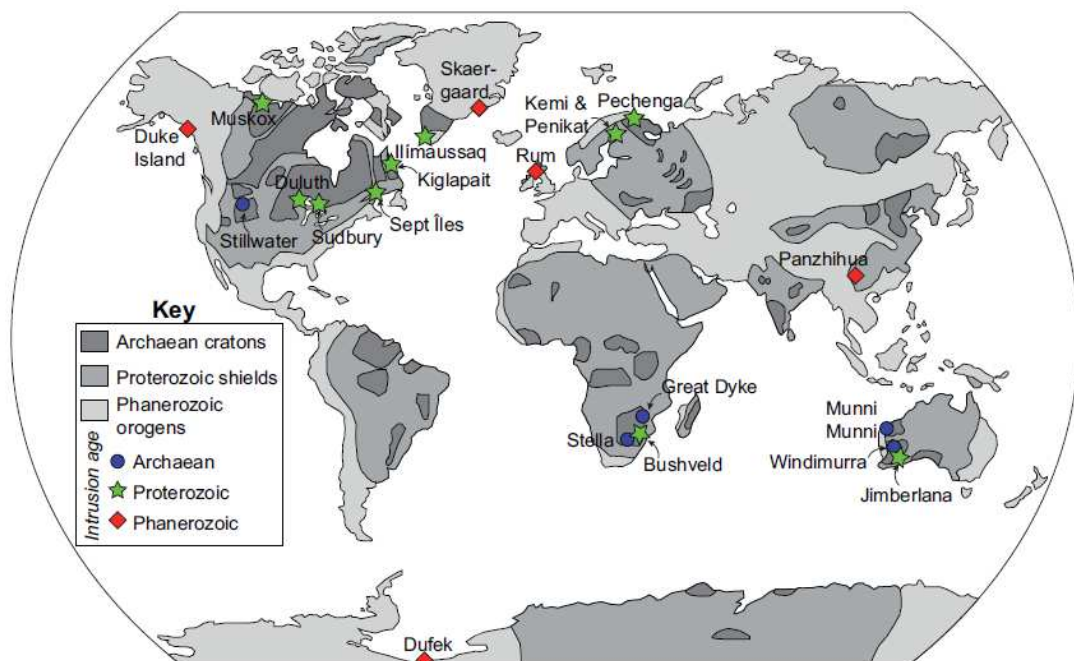


Figure 1.2 : Carte du monde présentant la localisation de quelques intrusions litées bien connues et leurs âges géologiques. (O'Driscoll et VanTongeren 2017)

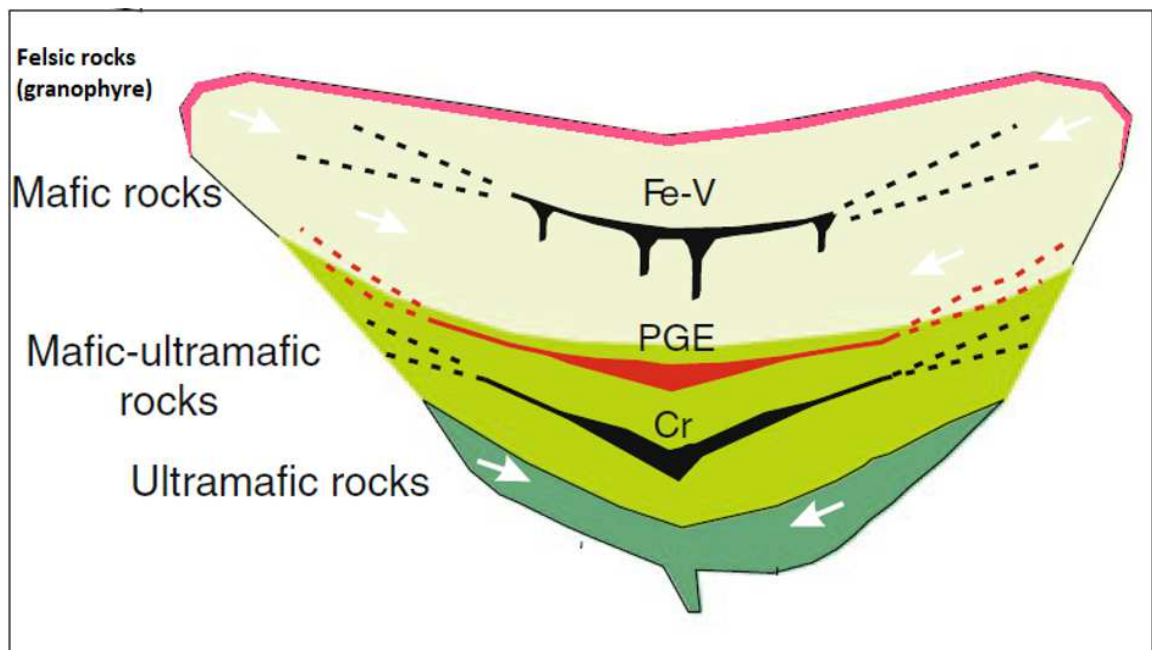


Figure 1.3 : coupe schématique exposant les zonalités lithologiques des intrusions litées et les minéralisations qui peuvent y être associées. (Maier et Groves 2011)

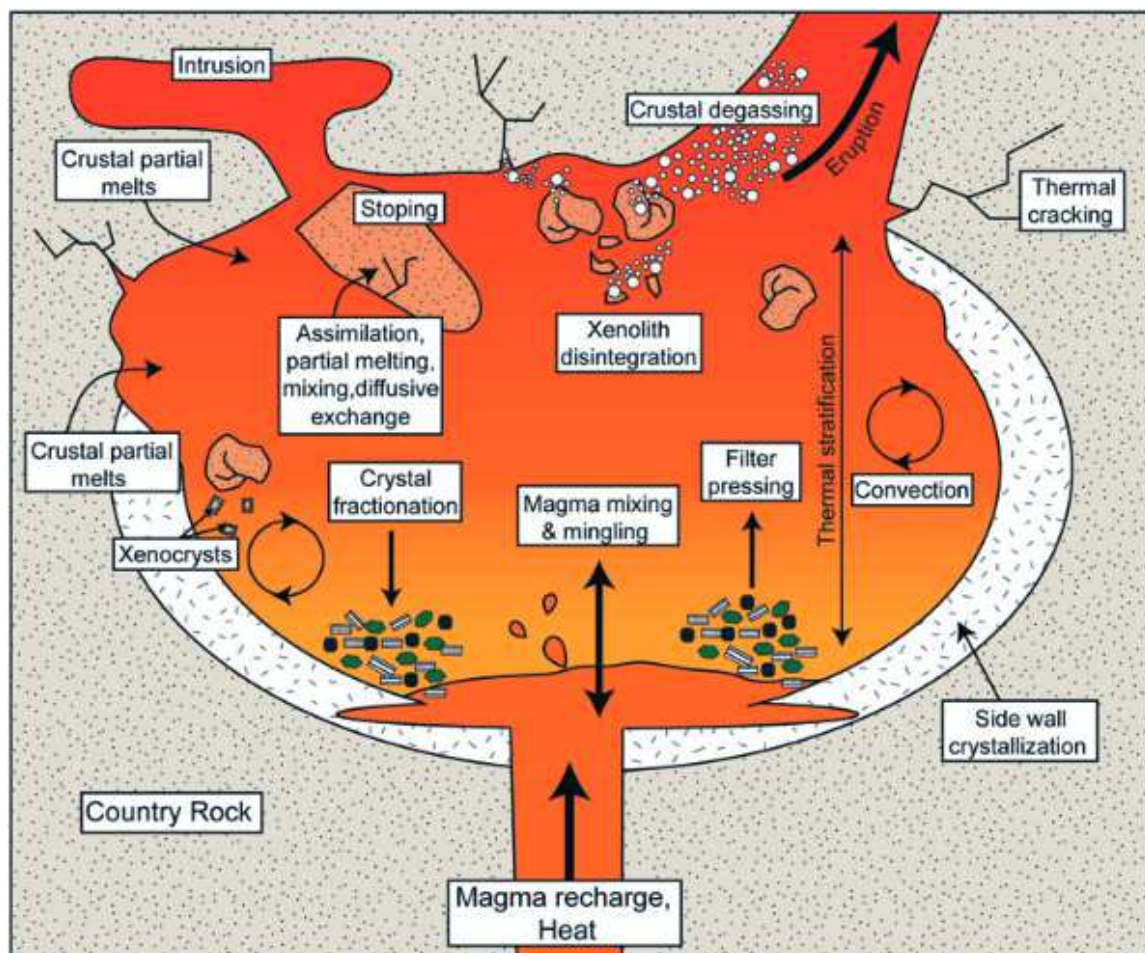


Figure 1.4 : Schéma illustrant le processus d'assimilation de roches crustales par la mise en place d'une chambre magmatique. (Deegan 2010)

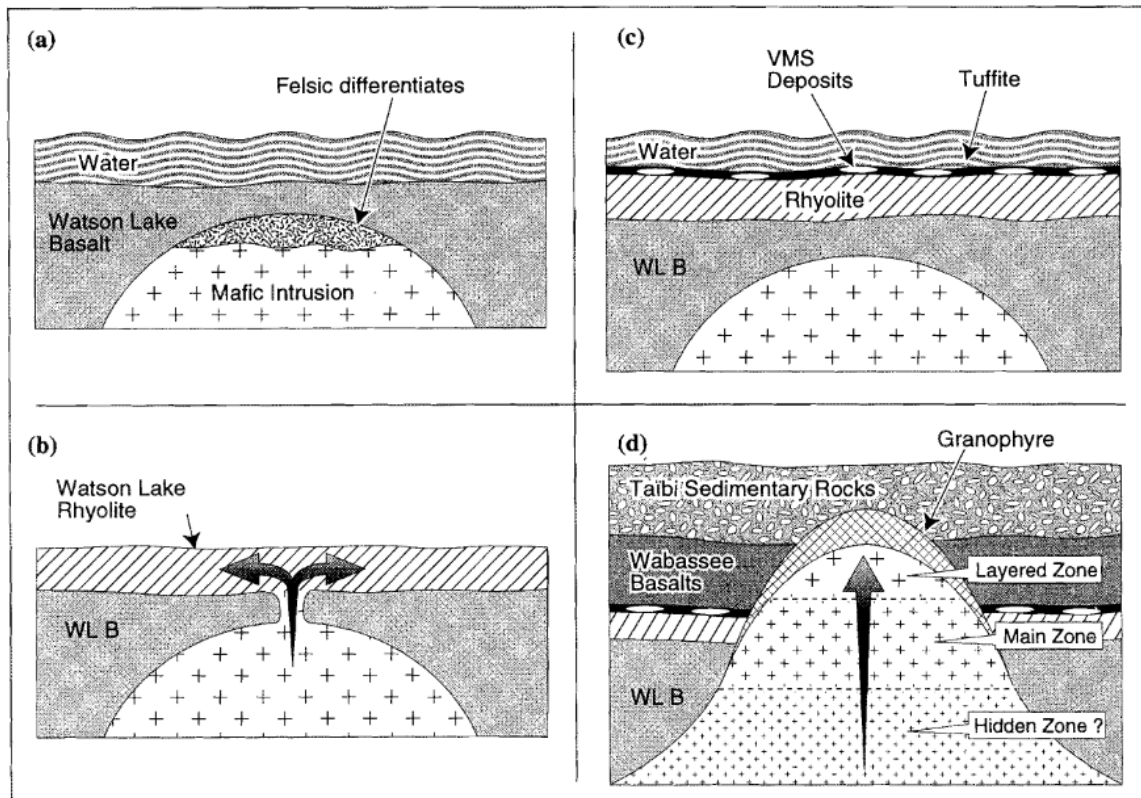


Figure 1.5 : Diagramme schématique illustrant la possibilité de formation des granophyres du Complexe de la Rivière Bell par l'assimilation de roches encaissantes et la formation des dépôts SMV du camp minier de Matagami. Figure tirée de Maier et al. (1996).

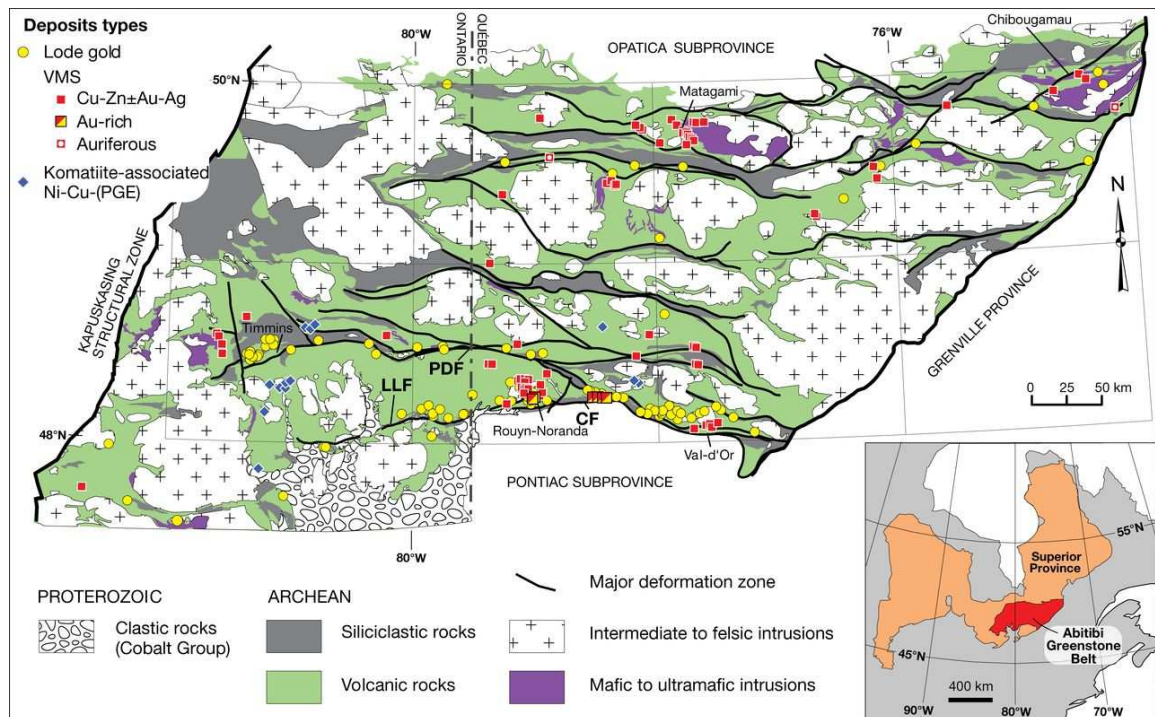


Figure 1.6 : Carte géologique simplifiée de la sous province d'Abitibi, Canada, montrant les principaux districts miniers et la localisation de la région de Chibougamau au NE; figure tirée de Mercier-Langevin et al. (2014). LLF= Larder lake fault; PDF= Porcupine Destor Fault; CF=Cadillac Fault.

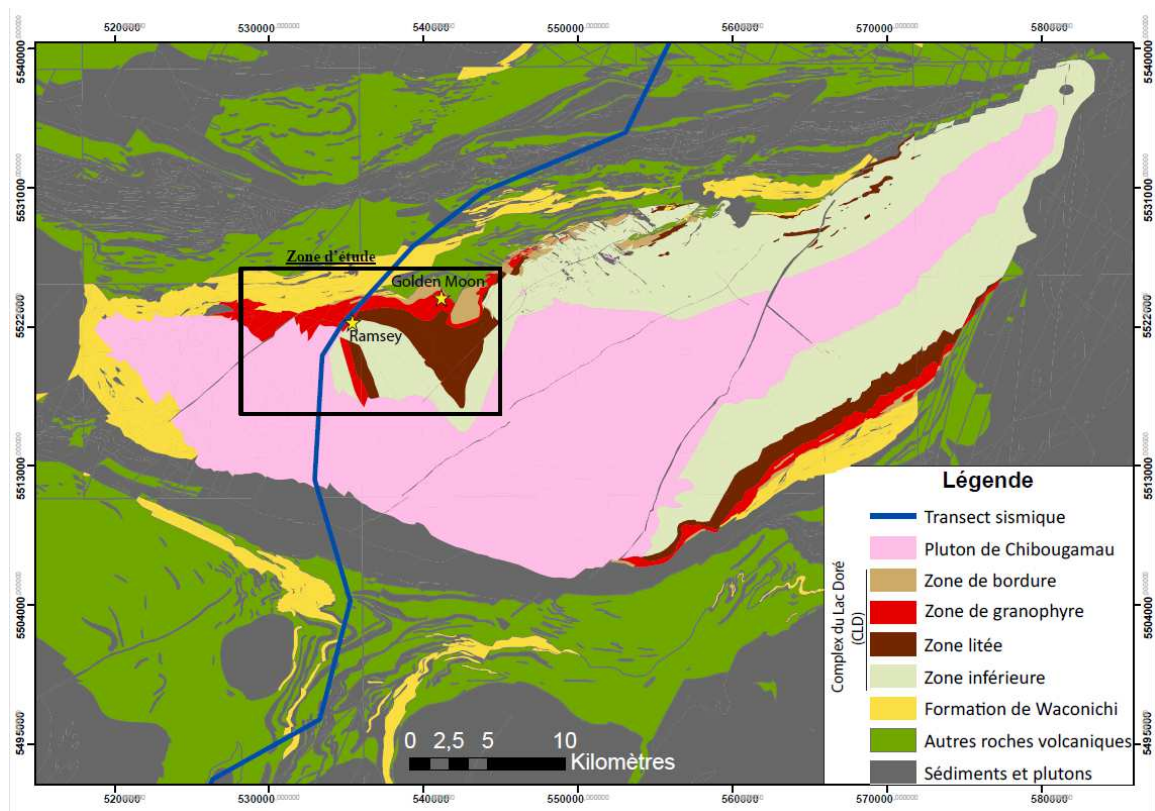


Figure 1.7 : Carte géologique simplifiée présentant le CLD et son encaissant volcanique de la Formation de Waconichi. Modifiée du SIGEOM (Leclerc et al. 2017). Toutes les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18. L'encadré représente la zone d'étude.

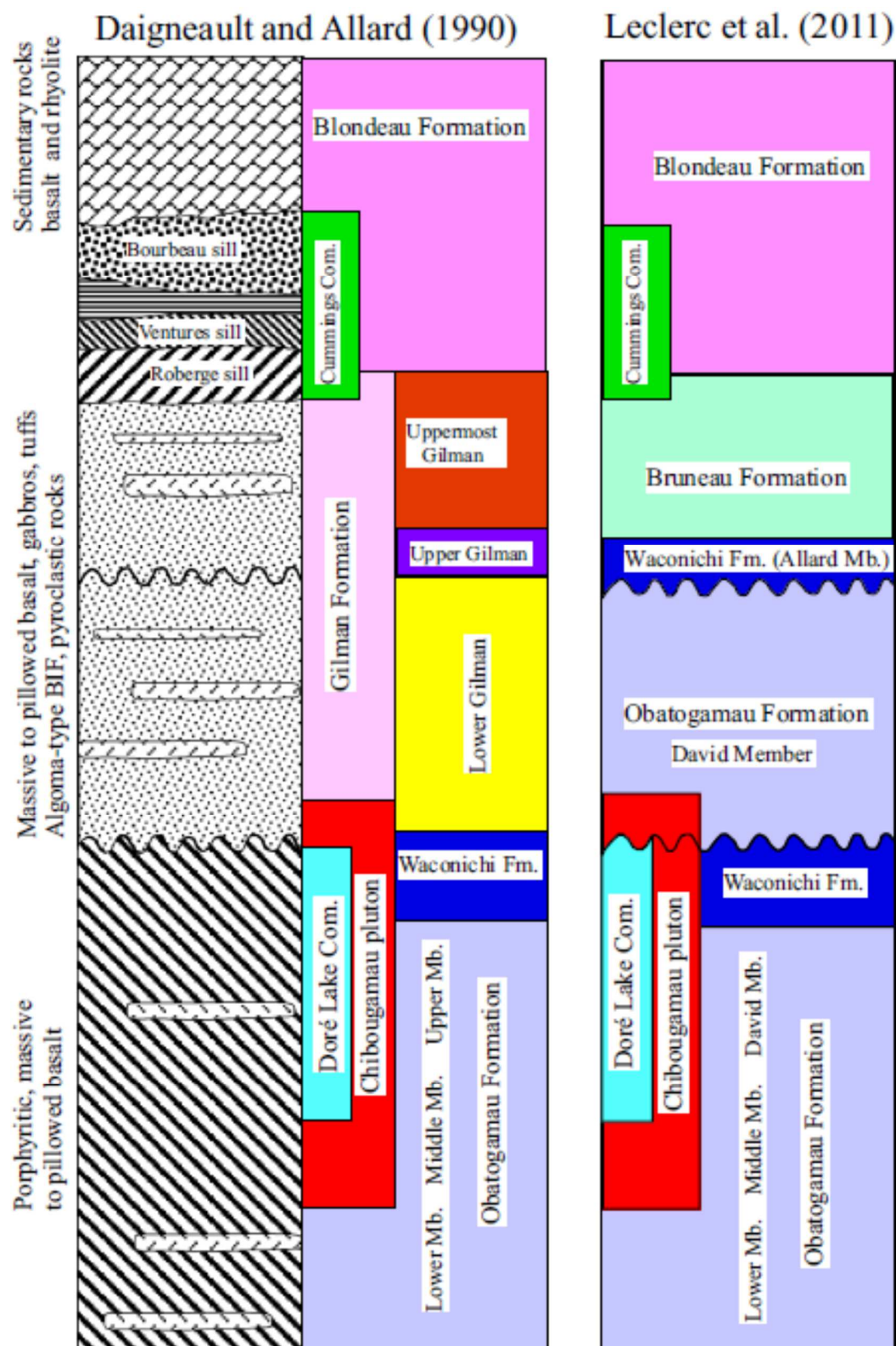


Figure 1.8 : Les deux colonnes stratigraphiques proposées pour les cycles volcaniques de la région de Chibougamau. Tirée de (Polat et al. 2018).

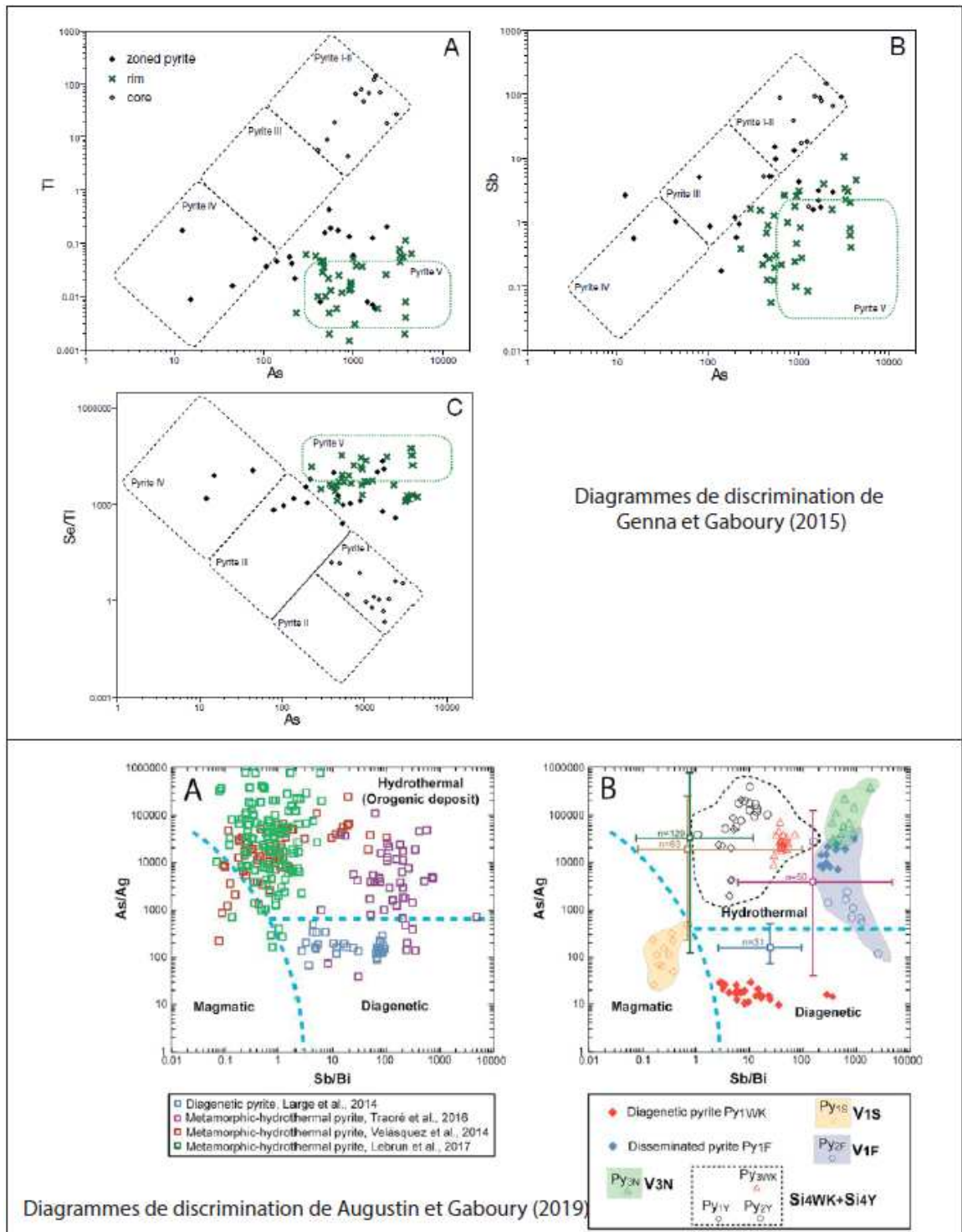


Figure 1.9 : Exemple de diagrammes de discrimination qui sont utilisés pour caractériser les minéralisations de la zone d'étude (Genna et Gaboury, 2015 ; Augustin et Gaboury, 2019).

CHAPITRE II

GÉOLOGIE LOCALE DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de caractériser la géologie la zone d'étude qui se situe à moins de 10 km au SO de la ville de Chibougamau (Figure 2.1). Les travaux de ce projet ont porté sur deux secteurs principaux, le secteur de l'indice Ramsey et celui de l'indice Golden Moon (Figure 2.1). Néanmoins, plusieurs affleurements (Figure 2.2), se situant le long du profil sismique du projet *Metal Earth*, ont été décrits dans le but d'avoir une bonne couverture de l'information géologique.

D'un point de vue géologique, la zone d'étude se situe sur le flanc nord de l'anticlinal de Chibougamau. D'après la cartographie géologique de la région (Leclerc et al. 2017), les principales unités lithologiques qui sont reconnues dans la zone d'étude sont : 1) l'anorthosite du CLD ; 2) la ferrodiorite du CLD ; 3) le granophyre du CLD ; 4) les faciès rhyolitique et andésitique du membre de Scott de la Formation de Waconichi ; et 5) le Pluton de Chibougamau (Figure 2.2). Les deux secteurs qui ont fait l'objet de cartographie de détail se trouvent dans l'unité de granophyre du CLD.

Dans ce chapitre, l'emphasis a été mise sur l'inventaire et la description géologique des principales unités lithologiques identifiées sur les décapages des indices minéralisés qui ont été cartographiés, ainsi que, quelques affleurements qui ont été visités et cartographiés. Les minéralisations présentes sur ces décapages sont ici décrites sommairement, car cet aspect sera abordé en détail au chapitre 5.

2.2 Secteur Ramsey

Ce secteur est accessible en empruntant le chemin forestier 1040 direction nord, depuis la route régionale 113 (Figure 2.1). L'accès au décapage de l'indice Ramsey se fait à partir d'un sentier se trouvant aux environs de la borne kilométrique 14. Ce décapage se trouve sur une propriété qui appartient au prospecteur David Malouf.

Le décapage de l'indice Ramsey fait une dimension de 100 m x 20 m et il expose les unités lithologiques suivantes : 1) le granophyre du CLD ; 2) une rhyolite porphyrique ; 3) des dykes mafiques dioritiques ; et 4) un dyke felsique (Figure 2.3). Ces unités sont décrites ci-dessous. Une structure minéralisée en sulfures recoupe l'ensemble des unités présentes sur ce décapage (Figure 2.3). Elle est orientée essentiellement E-W avec un pendage subverticale. De nombreuses veines pegmatitiques de quartz±carbonates d'orientations variables sont également présentes.

2.2.1 Granophyre

Sur ce décapage, l'unité de granophyre a une granulométrie grossière et homogène, et localement porphyrique. Cette unité représente environ 80% de la surface du décapage (Figure 2.3). Elle apparaît sous forme d'une roche massive, de forte compétence et de couleur blanc-grisâtre à localement rosâtre. Elle est marquée par un degré de fracturation important et des mouvements de petits blocs. Globalement, les fractures ont une orientation NO-SE et un pendage qui varie de 60 à 70°. Certaines fractures sont minéralisées, caractérisées par la présence de rouille et de sulfures. L'unité de granophyre ne présente pas d'évidence d'altération hydrothermale, à l'exception d'une légère chloritisation, développée localement à proximité des fractures à sulfures.

2.2.2 Rhyolite porphyrique

Cette unité de lave felsique est observée en contact avec l'unité de granophyre (Figure 2.3), dont elle se distingue par sa texture porphyrique à phénocristaux de quartz et de feldspaths dans une matrice aphanitique. Le contact entre ces deux unités est net et irrégulier, par endroit, il semble même être faillé. La rhyolite porphyrique est massive, de couleur gris pâle à beige et elle présente une fracturation N-S et localement E-O. Ces fractures sont de tailles millimétriques et portent un halo d'altération en chlorite et séricite. La roche quant à elle, présente une légère altération en chlorite et une foliation légèrement développée.

2.2.3. Dykes

Le décapage de l'indice Ramsey présente un dyke felsique et deux dykes mafiques (Figure 2.3). Le dyke felsique a une texture aphanitique et son épaisseur varie de 20 à 40 cm. Il recoupe le granophyre dans une direction NO-SE et son pendage est de 70° vers l'est. Les dykes mafiques sont parallèles entre eux, un des dykes recoupe le granophyre tandis que l'autre se trouve à l'intérieur de la structure minéralisée principale (Figure 2.3). Ce dernier a une épaisseur qui varie de 5 à 10 cm et il est discontinu au sein de la structure minéralisée. Le dyke mafique qui recoupe le granophyre a une épaisseur qui varie de 2 à 3 m. Il présente une ramification qui recoupe la rhyolite porphyrique et la structure minéralisée. Les deux dykes mafiques ont une orientation globalement E-O et un pendage qui varie entre 65 et 80° (Figure 2.3). Ils sont marqués par une altération en carbonates et localement chlorite, et une légère foliation subverticale orientée E-O.

2.3 Secteur Golden Moon

Ce secteur est accessible à partir de la route régionale 113 (Figure 2.1), en prenant le chemin forestier de la baie Demers en direction du nord. Le secteur comprend trois décapages : le décapage de l'indice Golden Moon (Figure 2.4), celui de l'indice AXE (Figure 2.5) et celui de l'indice GRH (Figure 2.6). Ces décapages sont sur une propriété de la compagnie Fieldex Exploration. La distance entre ces décapages varie de 100 à 300 m.

Les principaux assemblages lithologiques qui ont été identifiés sur ces décapages comprennent : 1) des unités de granophyres ; 2) des dykes d'aplite granophyrique ; et 3) un dyke mafique. Ce dernier est présent uniquement sur l'indice AXE (Figure 2.4). Les minéralisations présentes sur ces décapages sont principalement sous forme de veines de quartz à textures variables entre laminée, massive et pegmatitique, avec des carbonates \pm magnétite \pm sulfures. Les attitudes, textures et assemblages minéraux sont variables d'un décapage à un autre et même au sein d'un seul décapage.

2.3.1 Granophyres

Deux types de granophyres ont été identifiés dans le secteur de Golden Moon, le granophyre à grains grossiers et celui à grains fins. Ces unités sont massives, de couleur blanc grisâtre à localement rosâtre et elles renferment localement une forte fracturation.

Le granophyre à grains grossiers, l'unité la plus abondante, peut occuper jusqu'à > 90% de la surface des décapages. Sur le décapage de l'indice GRH, uniquement le granophyre à grains grossiers est observé (Figure 2.6). Ce granophyre se caractérise par sa texture grossière à localement porphyrique, et les proportions de quartz et de feldspaths sont quasi identiques.

Le granophyre à grains fins se distingue par une granulométrie fine et l'abondance des feldspaths par rapport au quartz. Cette unité peut occuper jusqu'à 8% de la surface des décapages, lorsque présente. Elle se présente en injections dans le granophyre à grains grossiers, communément sous forme lenticulaire (Figures 2.4 et 2.5).

Le contact entre ces deux types de granophyres varie beaucoup au sein d'un même décapage (Figures 2.4 et 2.5). Le contact est communément irrégulier, mais, par endroit, il peut être net et droit. Localement, le contact forme des demi-cercles discontinus et de tailles millimétriques, qui se matérialisent par une texture de bordure figée en relief positif. Sur l'indice Golden Moon, des petits dykes d'aplite granophyrique occupent le contact entre ces deux unités.

Les granophyres du secteur de Golden Moon présentent des cavités miarolitiques de tailles variables (entre 10 à 50 cm), qui peuvent être localement très abondantes. Ces cavités miarolitiques sont occupées par des minéraux idiomorphes de tailles pegmatitiques, localement à texture radiale (Figure 2.6). De nombreuses poches de carbonates fer, de taille centimétrique à décimétrique et de forme subarrondie, ont aussi été identifiées dans les granophyres du secteur de Golden Moon (Figures 2.4, 2.5 et 2.6). Ces granophyres, dans leur ensemble, ont enregistré une altération faible en carbonates, épidote, et localement en séricite.

2.3.2 Dykes d'aplite granophyrique

Les dykes d'aprites granophyriques sont présents dans les trois décapages du secteur de Golden Moon. Macroscopiquement, ils se distinguent par leur forme qui est globalement rectiligne et leur granulométrie très fine. En revanche, la minéralogie de ces unités est très semblable à celle des granophyres. Ces dykes recoupent les deux types de granophyre et localement, ils occupent le contact entre ces deux unités (Figure 2.5). Ils sont discontinus et leur épaisseur varie de 3 à 10 cm. Deux orientations ont été distinguées pour ces dykes, ceux qui sont orientés E-O avec des pendages qui varient de 40 à 45 degrés et ceux qui sont orientés N-S avec un pendage de 30 degrés (Figures 2.5 et 2.6). Les dykes d'aprites contiennent, par endroit, de petites poches de carbonates de forme circulaire qui sont alignées dans la direction des dykes (Figure 2.6).

2.3.3 Dyke mafique

Ce dyke a été identifié uniquement sur le décapage de l'indice AXE. Il occupe au moins de 10 % de sa superficie. Il a une épaisseur d'environ 5 m et il coupe le granophyre dans une direction N-S et avec un pendage de 65°. Il présente une ramification qui a la même orientation, mais avec une épaisseur d'environ 50 cm. Ce dyke est marqué par une forte altération en chlorite et ankérite et il est recoupé par une schistosité subverticale qui est orientée N-S. Les relations de recoupement et de déplacement de son encaissant granophyrique ont permis d'interpréter que ce dyke a accommodé un mouvement senestre.

2.4 Autres affleurements

2.4.1 Ferrodiorite du CLD

Dans le CLD, les granophyres reposent sur une bande constituée d'unités de compositions intermédiaire à mafique, appelée « zone à ferrodiorite » (Figure 2.1). Daigneault et Allard (1990) soulignent que le contact entre les granophyres et les unités de ferrodiorite est graduel. Cette unité a été observée dans la zone d'étude sous la forme d'unité d'aspect intrusif, magnétique et de couleur gris foncé à clair (Figure 2.14a et 2.14b). La roche présente un litage bien développé (Figure 2.14a et 2.14b) et elle est localement minéralisée en sulfures. D'après Alfaro (1990), le contact entre la zone à ferrodiorite et les granophyres est marqué par un horizon discontinu, dans lequel des injections de dykes granophyres ont été identifiées.

2.4.2 Andésite du membre de Scott de la Formation de Waconichi

Cette unité affiliée au membre de Scott de la formation de Waconichi à cause de sa composition et de sa position géographique, est retrouvée à environ 400 m au nord de l'indice Ramsey (Figure 2.1). Ce secteur présente un ensemble d'affleurements qui exposent une unité de roche de composition intermédiaire, légèrement grenue, qui est en contact avec le faciès grossier des granophyres du CLD (Figure 2.7). Cette unité d'andésite est injectée et bréchifiée par les granophyres (Figures 2.15a à 2.16d). Ces figures d'injection et de bréchification témoignent de la mise en place intrusive des granophyres du CLD dans ses encaissants de la Formation de Waconichi.

2.5 Synthèse

La zone d'étude est caractérisée par une variété d'unités géologiques. Les granophyres représentent les unités dominantes. Néanmoins, les deux secteurs cartographiés exposent, globalement, les mêmes types de roches.

Deux types de granophyres ont été distingués dans le secteur de Golden Moon, le granophyre à grains grossiers et celui à grains fins. De petits dykes d'aplite granophyrique recoupent ces deux unités. Dans le secteur de Ramsey, seul le granophyre à grains grossiers est présent. Ce dernier est recoupé par un dyke felsique aphanitique qui présente des caractéristiques minéralogiques semblables aux dykes d'aplite présents dans le secteur de Golden Moon. Les granophyres se démarquent aussi par la présence d'importante poches et cavités miarolitiques à minéraux pegmatitiques, qui témoignent de la présence de fluides dans ces unités et d'une mise en place à faible profondeur. Des injections de granophyre dans l'unité d'andésite de la Formation de Waconichi indiquent une mise en place intrusive des unités de granophyre.

Des dykes mafiques, d'épaisseur variant entre 10 cm à 5 m, recoupent les granophyres du décapage de l'indice AXE et celui de l'indice Ramsey. La texture et la minéralogie de ces dykes sont très semblables. Il pourrait s'agir de la même famille de dyke. Un de ces dykes a été retrouvé au cœur de la structure minéralisée principale de l'indice Ramsey.

Les minéralisations du secteur de Ramsey et celles du secteur de Golden Moon sont de nature, de forme et de style contrastés. Dans le secteur de Ramsey, la minéralisation est sous la forme de fracture rouillée et sulfurée. Dans le secteur de Golden Moon, la minéralisation est sous la forme de veines de quartz-carbonates \pm magnétite \pm sulfures, mais avec des styles, textures et assemblages variables au sein d'un même décapage.

FIGURES DU CHAPITRE II

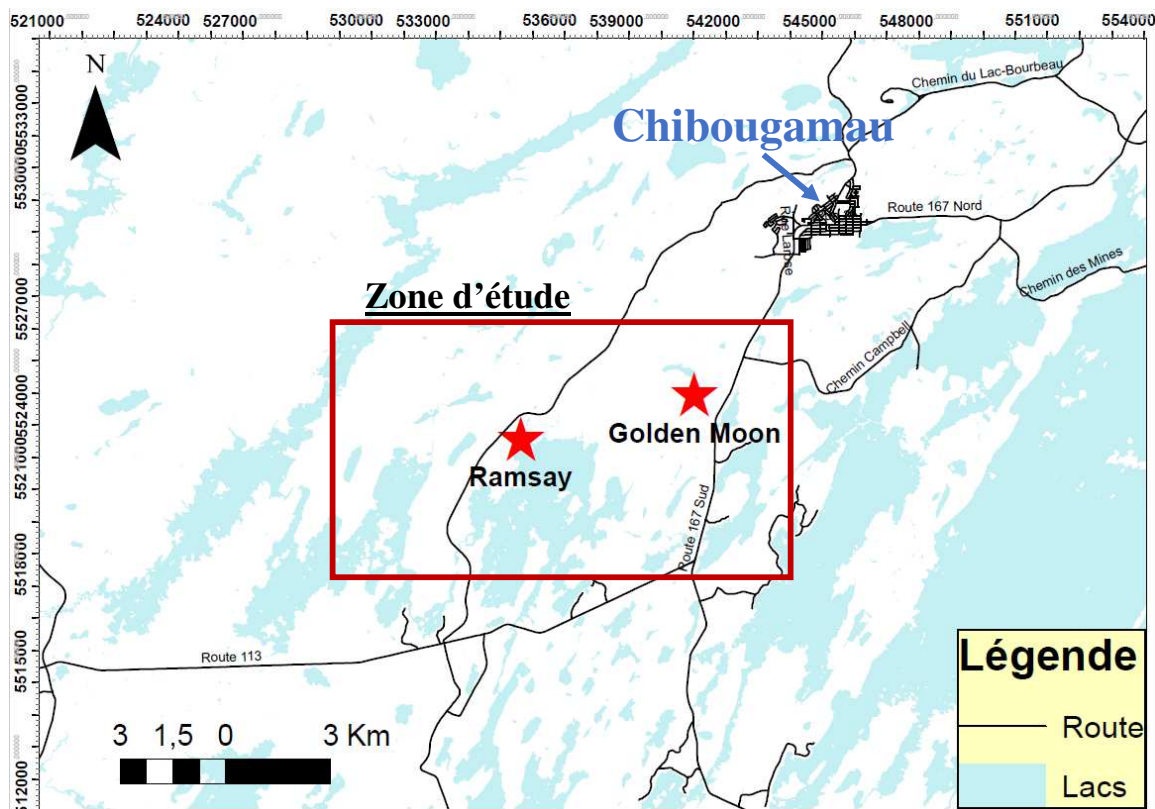


Figure 2.1 : la zone d'étude (cadrant rouge) et la localisation des deux secteurs d'études (étoiles rouges) et leurs chemins d'accès.

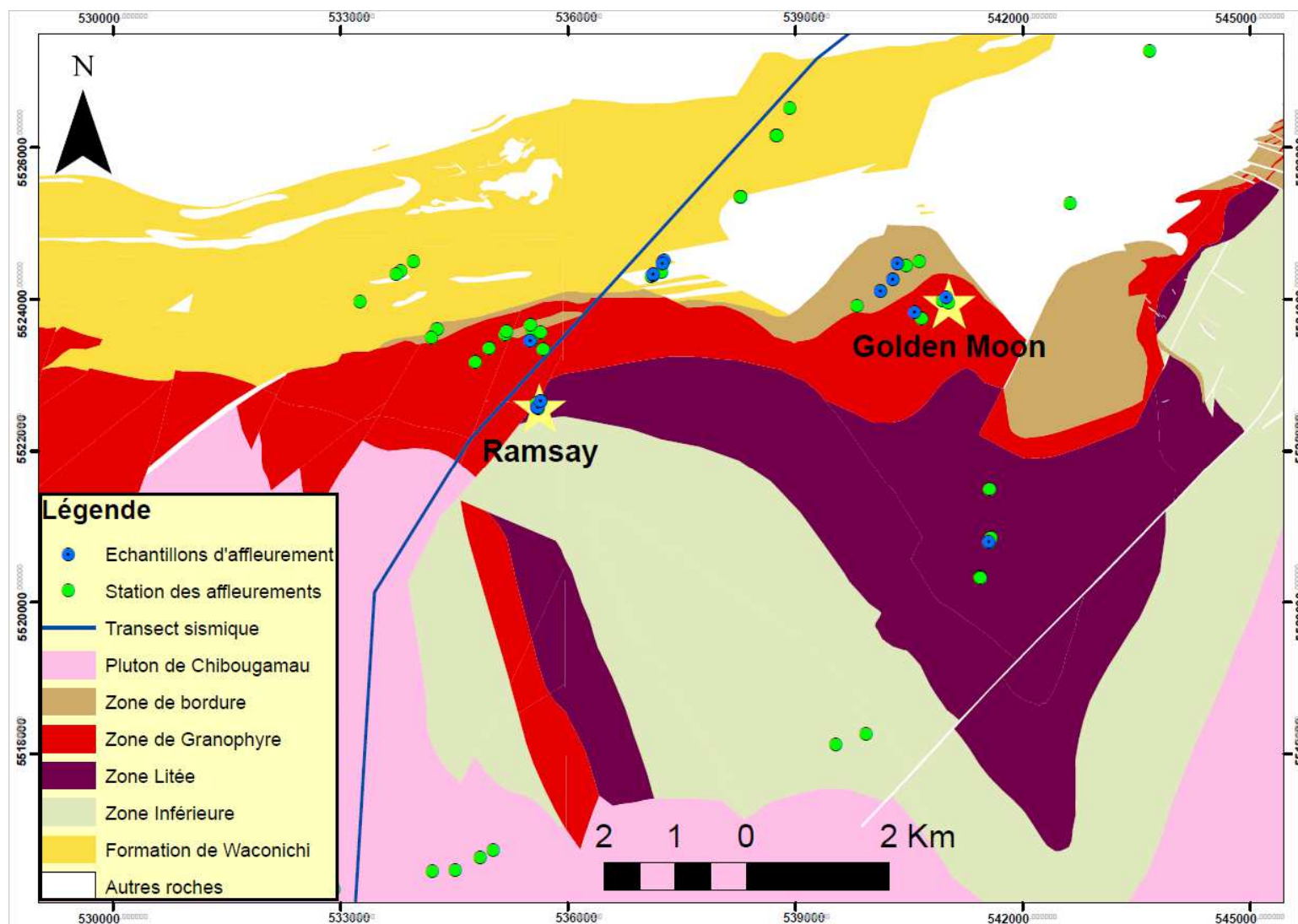


Figure 2.2 : Carte géologique simplifiée de la zone d'étude, montrant les principales unités lithologiques et la position des affleurements échantillonnés pour cette étude. Les étoiles jaunes correspondent aux positions des indices minéralisés, cartographiés, pour cette étude. Les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18.

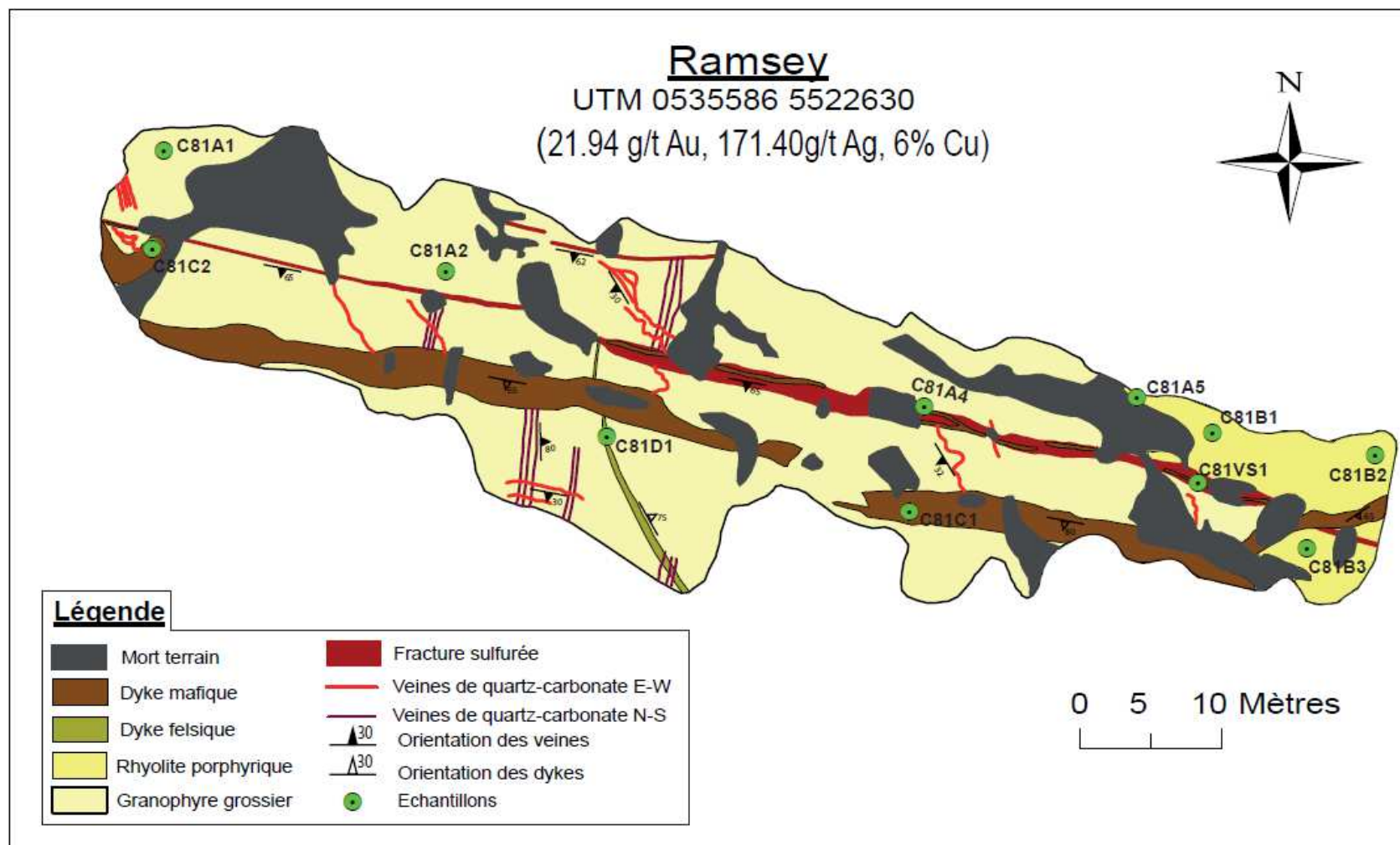


Figure 2.3 : Cartographie géologique de détail du décapage de l'indice Ramsey. Les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18

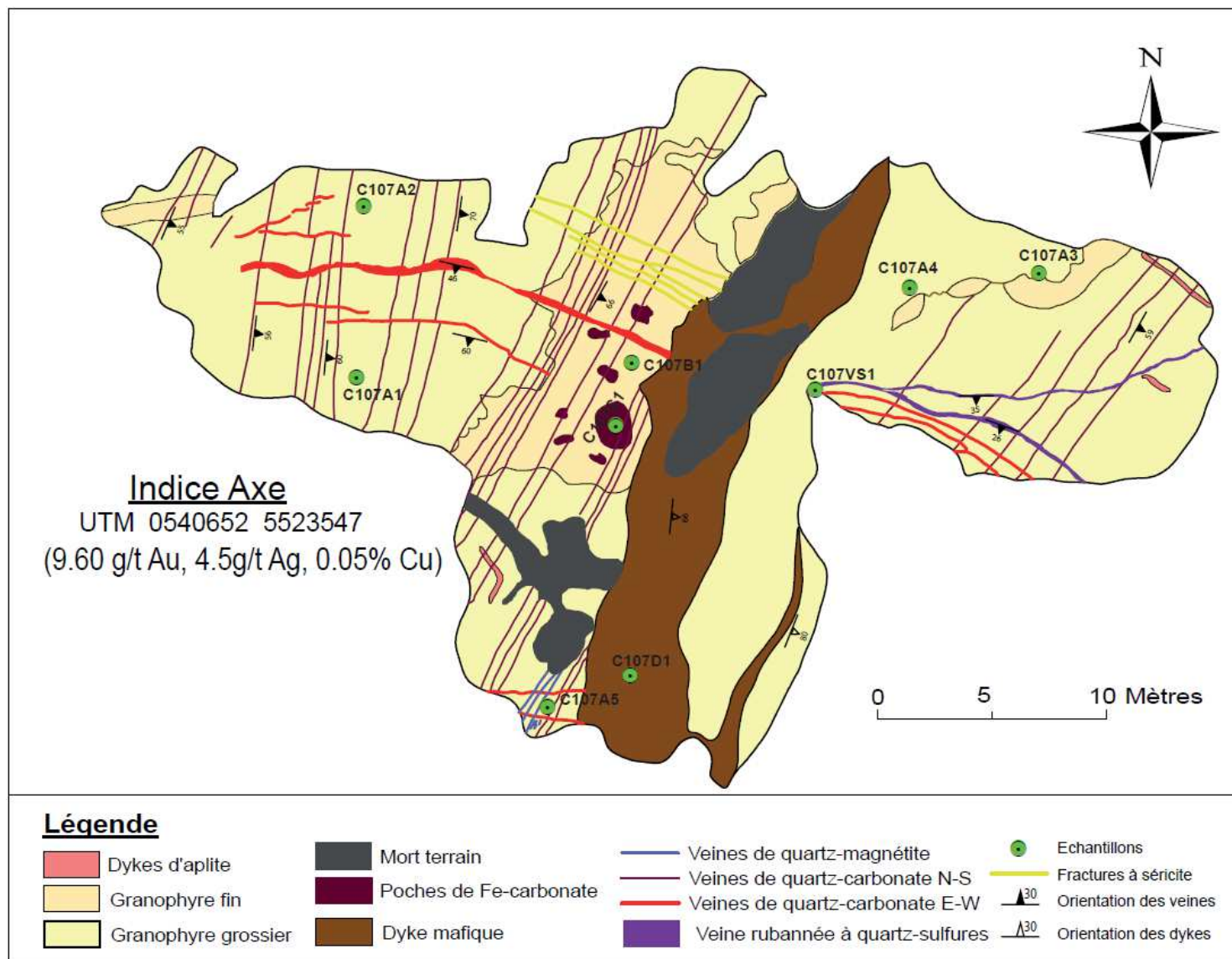


Figure 2.4 : Cartographie géologique de détail du décapage de l'indice AXE. Les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18.

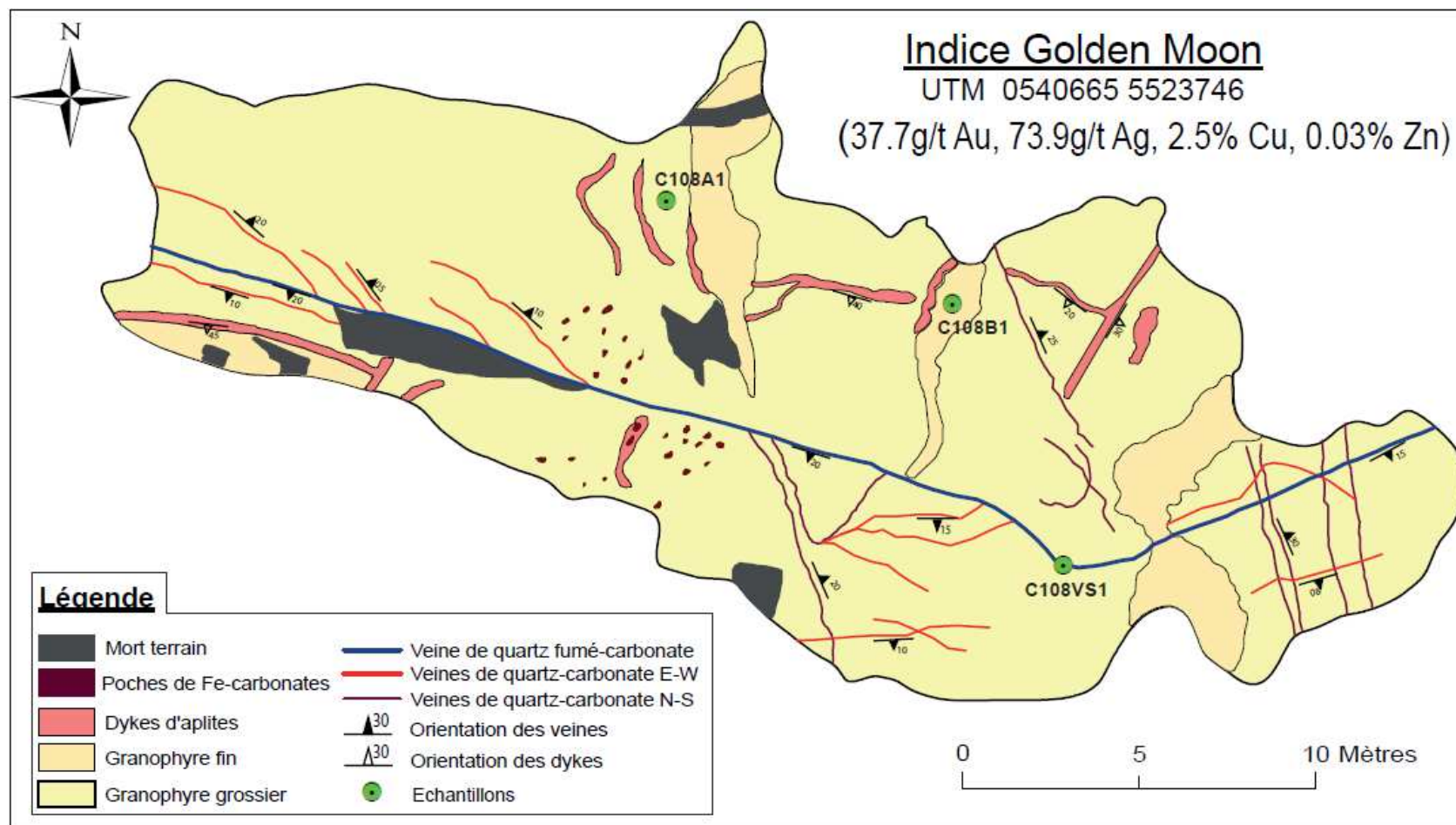


Figure 2.5 : Cartographie géologique de détail du décapage de l'indice Golden Moon. Les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18.

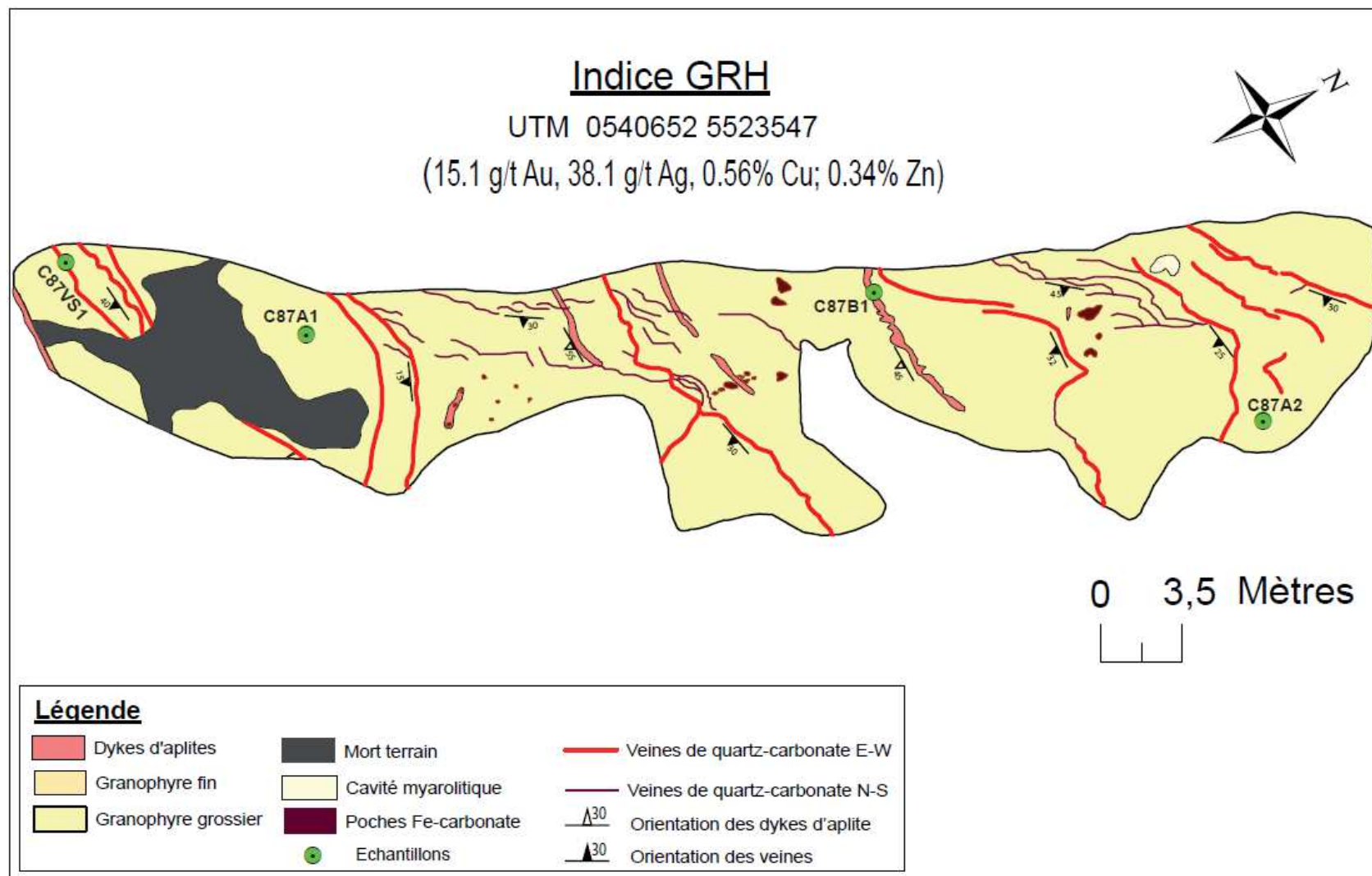


Figure 2.6 : Cartographie géologique de détail du décapage de l'indice GRH. Les coordonnées sont en UTM NAD 83 zone 18.

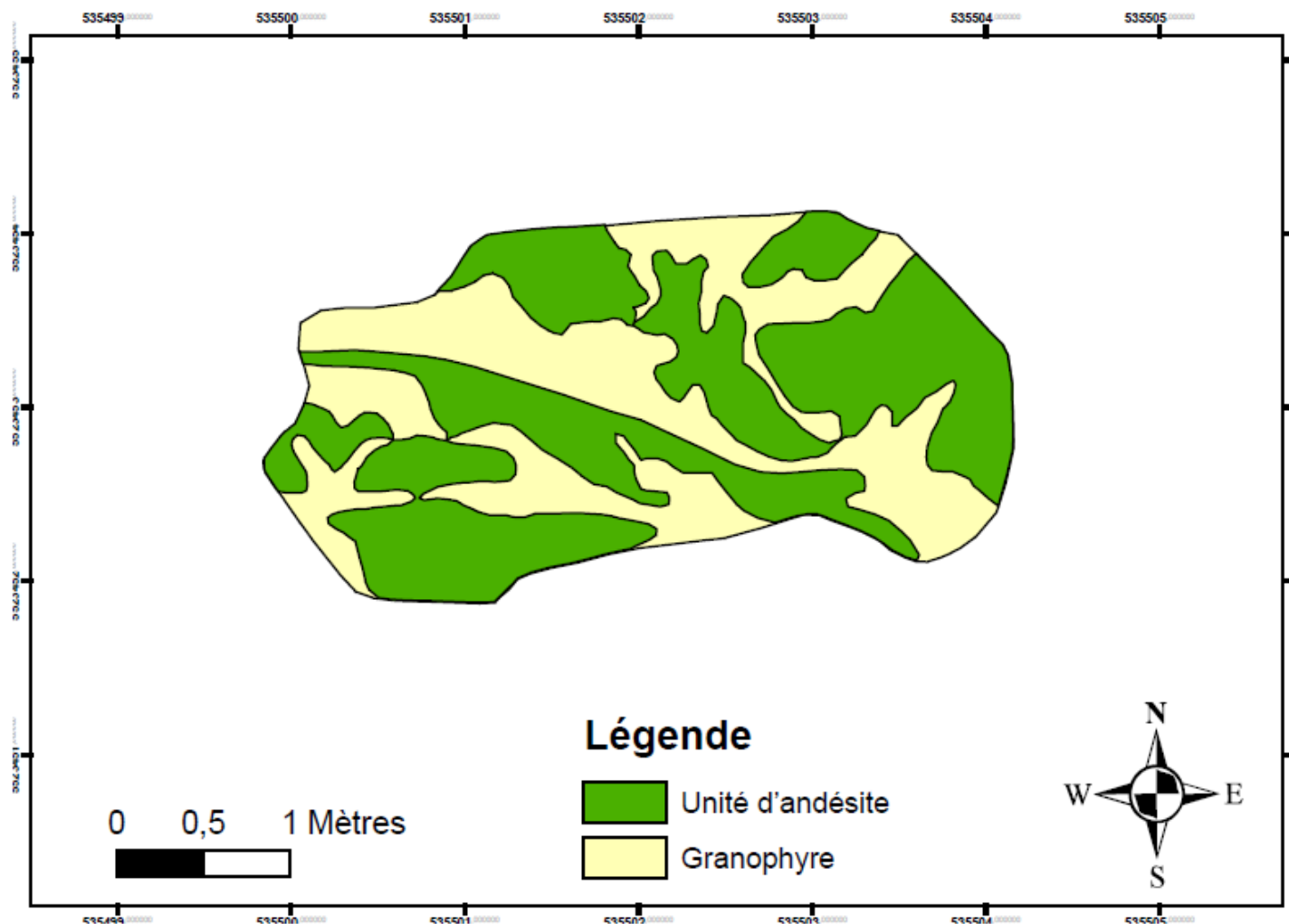


Figure 2.7 : Cartographie géologique de détail de la zone de contact entre les unités d'andésite et de granophyre. Coordonnées en UTM NAD 83 zone 18.

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION PETROGRAPHIQUES DES UNITÉS LITHOLOGIQUES

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les caractéristiques pétrographiques macroscopiques et microscopiques des principales unités lithologiques de la zone d'étude et leurs relations mutuelles. Cette caractérisation vise à identifier des indications pétrographiques qui pourraient fournir des informations sur le processus de formation des granophyres du CLD. Pour rappel, deux hypothèses sont considérées : 1) les granophyres sont formés par la différenciation du magma du CLD, ou 2) les granophyres correspondent au produit de la fusion partielle des rhyolites de la Formation de Waconichi.

La caractérisation a porté sur les unités lithologiques suivantes : 1) les granophyres du CLD ; 2) la ferrodiorite du CLD ; 3) les rhyolites et une andésite de la Formation de Waconichi ; et 4) des dykes présents dans la zone d'étude.

Cette caractérisation pétrographique se base sur la description mégascopique de 120 affleurements et sur l'étude microscopique de 36 lames minces (Tableau 3.1). Les échantillons de lames minces proviennent principalement des décapages des indices minéralisés et de quelques affleurements périphériques de ces indices.

Les observations microscopiques ont été réalisées à l'aide d'un microscope optique. Elles ont permis d'identifier les différentes textures et les phases minérales primaires et secondaires des unités lithologiques étudiées. Les informations pétrographiques recueillies ont été complétées grâce à l'examen d'échantillons de granophyre au microscope à cathodoluminescence (MK5-1 CITL). Cela a aussi permis d'observer les différents feldspaths, et les zonations qu'ils contiennent. De plus, plusieurs autres phases minérales secondaires et accessoires comme les apatites et les zircons ont pu être identifiées. La liste des échantillons de lames minces qui ont servi pour les observations microscopiques et leurs provenances est présentée dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Liste des lames minces utilisés pour les observations microscopiques. Toutes les coordonnées sont en UTM NAD 83 Zone 18

Lames Minces	Estant	Nordant	Provenance	Noms roches
A009A1	540570	5523828	AFFLEUREMENT	Anorthosite
A011A1	540995	5524019	AFFLEUREMENT	Granophyre grossier
C001A1	537267	5524515	AFFLEUREMENT	Rhyolite QFP
C016A1	541548	5520798	AFFLEUREMENT	Ferrodiorite
C068A1	535589	5522573	AFFLEUREMENT	Granophyre grossier
C069A1	535607	5522569	AFFLEUREMENT	Granophyre grossier
C070A1	535640	5522659	AFFLEUREMENT	Granophyre grossier
C071A1	537245	5524468	AFFLEUREMENT	Rhyolite QFP
C072A1	537129	5524322	AFFLEUREMENT	Rhyolite QFP
C073A1	537130	5524324	AFFLEUREMENT	Rhyolite QFP
C077A1	540350	5524473	AFFLEUREMENT	Mélanogranophyre
C078A1	540286	5524265	AFFLEUREMENT	Mélanogranophyre
C079A1	540124	5524106	AFFLEUREMENT	Mélanogranophyre
C081A1	535556	5522639	RAMSEY	Granophyre grossier
C081A3	535611	5522619	RAMSEY	Granophyre grossier
C081A4	535629	5522618	RAMSEY	Granophyre grossier
C081A5	535611	5522619	RAMSEY	Granophyre grossier
C081B1	535631	5522614	RAMSEY	Rhyolite QFP
C081B3	535637	5522606	RAMSEY	Rhyolite QFP
C081C1	535609	5522609	RAMSEY	Dyke mafique Ramsey
C081C2	535555	5522632	RAMSEY	Dyke mafique Ramsey
C081D1	535587	5522617	RAMSEY	Dyke felsique tardif
C086A1	535502	5523453	AFFLEUREMENT	Granophyre grossier
C086B1	535502	5523453	AFFLEUREMENT	Andésite
C087A1	540657	5523762	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C087A2	540689	5523759	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C087B1	540676	5523764	GOLDEN MOON	Dyke d'aplite
C107A1	540943	5523980	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C107A2	540943	5523988	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C107A3	540970	5523985	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C107A4	540967	5523984	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C107B1	540956	5523979	GOLDEN MOON	Granophyre fin
C107C1	540955	5523977	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C107D1	540955	5523964	GOLDEN MOON	Dyke mafique AXE
C108A1	541019	5523965	GOLDEN MOON	Granophyre grossier
C108B1	541026	5523961	GOLDEN MOON	Granophyre fin

3.2 Unités du Complexe du Lac Doré

3.2.1 Granophyre à grains grossiers

Le granophyre à grains grossiers sont les roches les plus communes de la zone d'étude. Il est observé dans les deux secteurs étudiés (Ramsey et Golden Moon ; Figures 2.1 et 2.2) où il occupe près de 70% de la superficie des décapages cartographiés. Cette unité présente couramment une couleur blanchâtre à gris claire, qui localement, peut virer au rose-orangé.

Les observations pétrographiques au microscope montrent une granulométrie grossière et hétérogène dans les granophyres à grains grossiers (Figure 3.10a et 3.10b). La minéralogie est à dominance de quartz (50%), de feldspaths (40%) et localement des minéraux ou agrégats à texture granophyrique, constitués de lamelles interdigitées de quartz et de feldspaths. Quelques échantillons présentent une texture porphyrique à phénocristaux de quartz et de feldspaths qui peuvent faire jusqu'à 6 mm de long.

Les minéraux magmatiques constituant le granophyre à grains grossiers sont formés de quartz, des feldspaths et des minéraux à texture granophyrique (constitués d'agrégats de quartz et de feldspaths interdigités). Les minéraux secondaires comprennent la muscovite, la chlorite, des carbonates, l'épidote et des minéraux opaques (pyrite). Des traces de magnétite, de biotite et d'amphiboles ont été aussi observées. La synthèse des proportions minérales est présentée à la figure 3.1.

Les grains de quartz sont communément xénomorphes et de tailles variables (Figures 3.10a et 3.10b). Localement, ils peuvent montrer des textures de recristallisation. Ils sont légèrement fracturés et contiennent des inclusions fluides et des inclusions de feldspaths. Les feldspaths observés sont constitués par ordre d'abondance d'albite, d'orthose, de microcline.

Ces minéraux peuvent présenter des textures perthitiques (Figures 3.10b et 3.10h). La proportion minérale des feldspaths peut varier dans le même échantillon ou d'un échantillon à un autre. Les feldspaths sont couramment zonés. Ces zonations sont fréquentes dans les phénocristaux d'albite (Figure 3.10g). Des perthites se forment perpendiculairement aux bordures des cristaux de feldspaths (Figures 3.10g et 3.10h). Ces perthites sont formées d'une exsolution d'albite et d'orthose en forme de lamelles, mais elles peuvent contenir aussi de l'anorthite (Figures 3.10e et 3.10f).

Les agrégats à textures granophyriques caractéristiques des unités de granophyres peuvent représenter en moyenne de 5 à 20% de la proportion minérale des granophyres à grains grossiers. Toutefois, ces agrégats ne sont observés que dans 5 des 17 échantillons de granophyre à grains grossiers examinés au microscope. Ces agrégats présentent une texture d'intercroissance squelettiques de lamelles de quartz et de feldspaths (Figure 3.10c). Le ratio quartz-feldspath est en moyenne de 1, mais peut varier d'un agrégat à un autre. Les feldspaths qui sont identifiés dans ces agrégats sont l'albite et l'orthose (Figure 3.10d). La nucléation des lamelles granophyriques peut se faire de manière radiale à partir d'un grain de quartz ou de feldspath.

Dans son ensemble, le granophyre à grains grossiers est marqué par une altération modérée à localement forte en séricite carbonates (Figure 3.10a et 3.10b). Localement, il peut présenter une altération en chlorite et épidote.

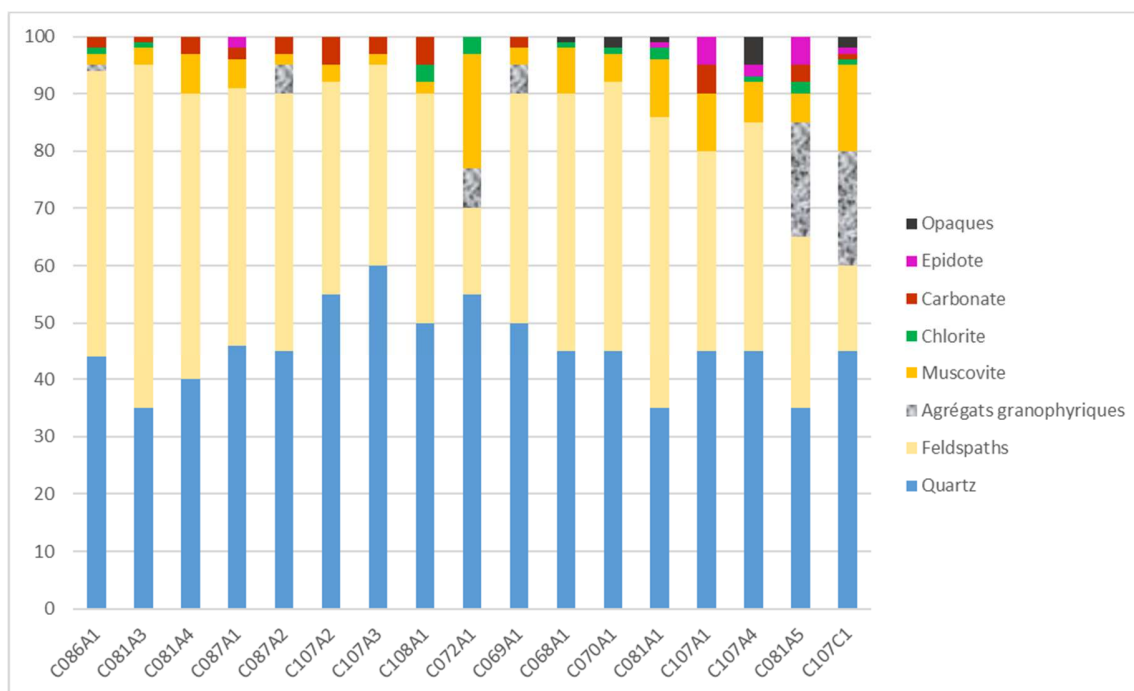


Figure 3.1 : Synthèse des minéraux observés dans le granophyre à grains fins et leurs proportions normalisées à 100%.

3.2.2 Granophyre à grains fins

Le granophyre à grains fins est observé uniquement sur les décapages du secteur de Golden Moon (Figures 2.1 et 2.2). Il peut représenter jusqu'à 10% de la superficie des décapages cartographiés. Le granophyre à grains fins est marqué par une altération importante en séricite et une carbonatation qui est présente sous forme de petites taches brunâtres, arrondies et disséminés (Figures 3.11a et 3.11d). Des épidotes, ayant la même forme que les carbonates et distribuées de la même manière sont aussi observées dans la roche.

En lames minces, le granophyre à grains fins est caractérisé par une granulométrie fine à moyenne dont la taille des grains ne dépasse pas 1 mm en moyenne (Figures 3.11e et

3.11f). La minéralogie, très semblable à celle du granophyrique à grains grossiers, est à dominance de quartz et feldspaths en proportion variables. Les minéraux magmatiques sont constitués de quartz, de feldspaths et de agrégats à texture granophyrique. Les minéraux secondaires comprennent la muscovite, la chlorite, des carbonates et de l'épidotes. Des traces de magnétite, de biotite et de zircon ont aussi été observées. La synthèse des proportions minérales de ces unités est présentée à la figure 3.2.

Les feldspaths représentent la phase dominante des minéraux magmatiques, ils sont constitués d'albite, d'orthose et de microcline (Figures 3.11e et 3.11f). Quelques minéraux à textures perthitiques ont aussi été observés. Les feldspaths sont xénomorphes à localement hypidiomorphes. Ils sont marqués par une forte altération en séricite (Figures 3.11g et 3.11h). Le quartz est la deuxième phase la plus abondante, il est xénomorphe et de taille variable. Les agrégats à textures granophyriques constituent en moyenne 20% de la composition minéralogique de ces unités (Figures 3.11g et 3.11h). Ils sont constitués de lamelles vermiculaires de quartz et de feldspaths interdigitées entres elles (Figures 3.11f et 3.11h). Les agrégats à texture granophyrique sont composés de 50% quartz et 50% feldspaths. Les feldspaths dans ces agrégats peuvent être totalement altérés en séricite (Figure 3.11h).

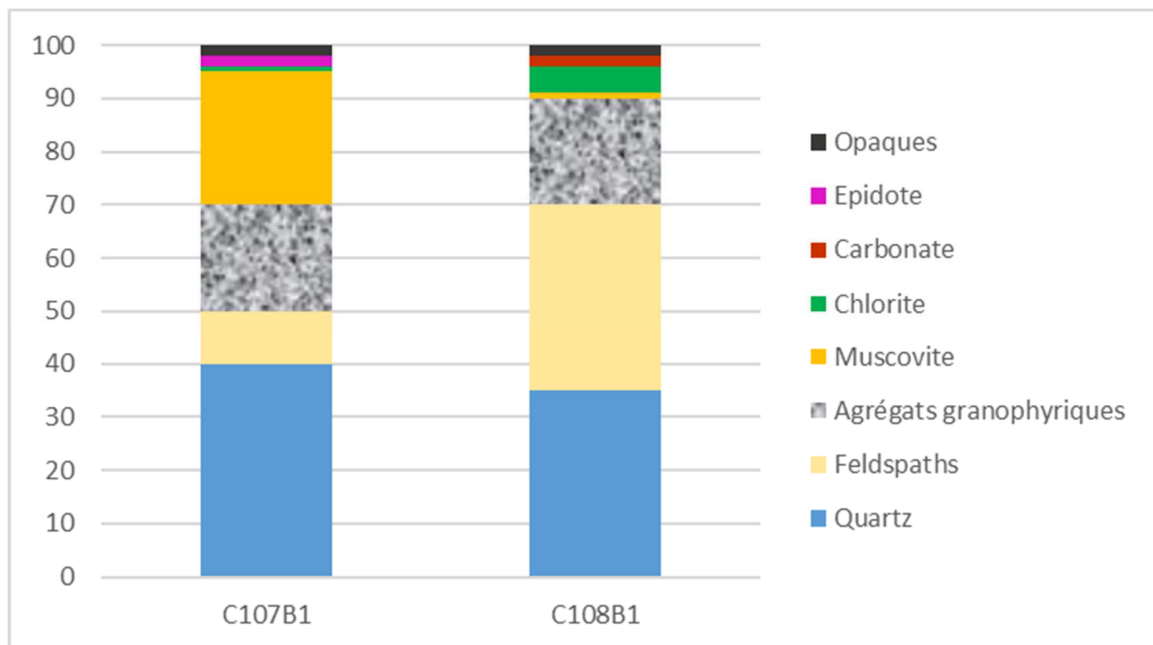


Figure 3.2 : Synthèse des minéraux observés dans le granophyre à grains fins et leurs proportions normalisées à 100%.

3.2.3 Mélanogranophyre

Cette unité affleure au nord du secteur de Golden Moon. D'après sa position sur la carte géologique de la région de Chibougamau, elle se situe dans la zone de bordure du CLD (Figure 2.2). Sur le terrain, les mélanogranophyres correspondent à des roches grenues de couleur vert sombre (Figure 3.12a). Elles possèdent une patine de surface qui se distingue par un amalgame de grains de quartz similaire à celui des granophyres grossiers (Figure 3.12b).

En lame mince les mélanogranophyres présentent une granulométrie grossière et hétérogène. La composition minéralogique de ces unités comprend le quartz, les feldspaths et des agrégats à texture granophyrique comme phases magmatiques. Les minéraux secondaires sont constitués de chlorite, de séricite, de carbonates, d'épidote et des minéraux opaques (Figure 3.12e et 3.12f). Des traces de zircon et d'amphibole sont aussi présents dans

les échantillons observés. Les mélanogranophyres ont des caractéristiques pétrographiques semblables à celles des granophyres à grains grossiers. Ils se distinguent par leurs abondances de chlorite qui peut représenter plus de 10% de la roche (Figure 3.12e et 3.12f). La synthèse des proportions minérales des mélanogranophyres est présentée à la figure 3.3.

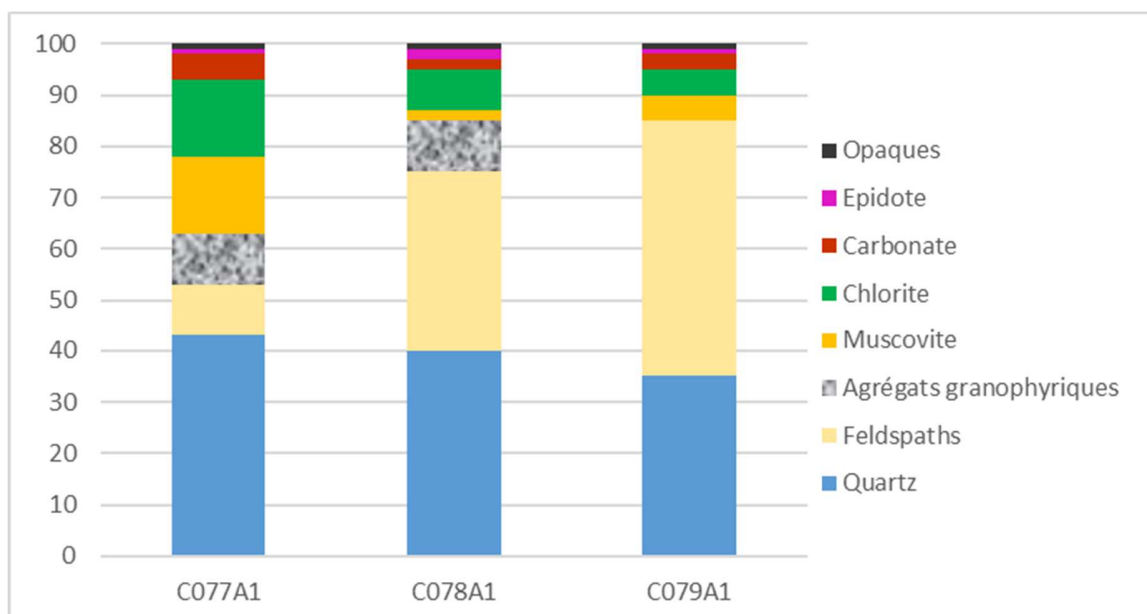


Figure 3.3: Synthèse des minéraux observés dans les mélanogranophyres et leurs proportions normalisées à 100%.

3.2.4 Ferrodiorite

D'après la stratigraphie de la région, la ferrodiorite se situe en dessous des granophyres du CLD (Allard 1976 ; Leclerc et al. 2017). Les observations de terrain présentent une unité de composition intermédiaire, à texture grenue et de couleur gris foncé à gris clair (Figures 3.13a et 3.13b). La ferrodiorite est massive, magnétique et elle montre localement un litage (Figure 3.13a). Elle est marquée par une forte altération en chlorite et présente des zones minéralisées en sulfures.

Les observations au microscope optique révèlent que la ferrodiorite est caractérisée par une granulométrie moyenne et une minéralogie à dominance mafique (Figures 3.13c et

3.13d). Les minéraux magmatiques identifiés sont constitués d'amphiboles, de pyroxènes, de quartz, de feldspaths, de biotite et de magnétite. Les phases secondaires ou accessoires comprennent la chlorite, la muscovite, la pyrite et l'ilménite qui sont observées en faibles proportions. La synthèse des proportions minérales de cette unité est présentée à la figure 3.4.

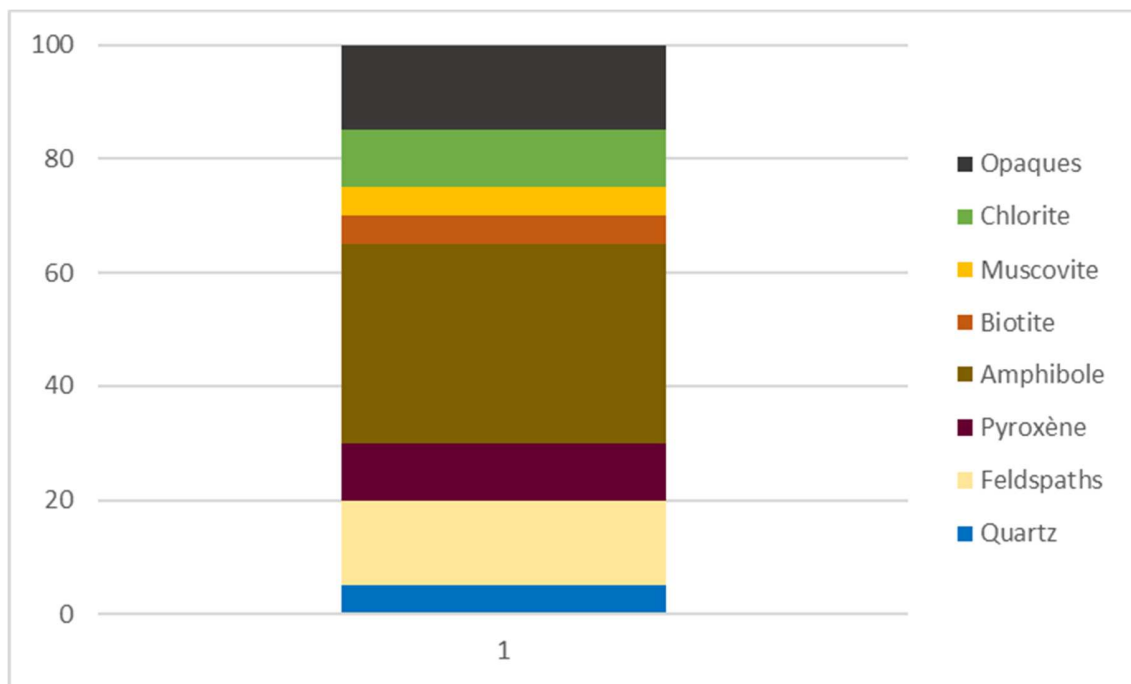


Figure 3.4 : Synthèse des minéraux observés dans la ferrodiorite et leurs proportions normalisées à 100%.

3.3 Formation de Waconichi

3.3.1 Rhyolite porphyrique

Les rhyolites porphyriques ont été observées uniquement dans le secteur de Ramsey (Figures 2.2 et 2.3). Elles se caractérisent par leur aspect porphyrique à phénocristaux de quartz et de feldspaths (Figure 3.14a), ce qui permet de les distinguer des granophyres. Ces unités se démarquent aussi des granophyres par la présence d'une foliation importante et une forte altération en séricite, chlorite et carbonates (Figures 3.14b, 3.14d et 3.14e).

Les observations en lames minces montrent une texture porphyrique de phénocristaux de quartz et de feldspaths qui baignent dans une matrice aphanitique à dominance de quartz et de feldspaths (Figures 3.14c et 3.14d). Les proportions des phénocristaux varient d'un échantillon à un autre. Ils peuvent représenter plus de 10% de l'échantillon et leur taille fait en moyenne 2 mm. Les phases magmatiques de la composition minéralogique sont constituées de quartz et de feldspaths. Les minéraux secondaires identifiés comprennent la muscovite, la chlorite, des carbonates, des épidotes, des amphiboles, des biotites et des pyrites. La synthèse des proportions minérales est fournie à la figure 3.5.

Des agrégats à texture granophyrique ont été identifiés à l'intérieur de deux échantillons (Figures 3.14e et 3.14f). Ils peuvent représenter en moyenne 10% des échantillons concernés. Le développement des lamelles granophyriques se fait par nucléation autour d'un grain de quartz ou de feldspath. Cela indique que la texture granophyrique n'est pas restreinte uniquement au granophyrique et qu'elle se développent aussi localement dans les rhyolites porphyriques.

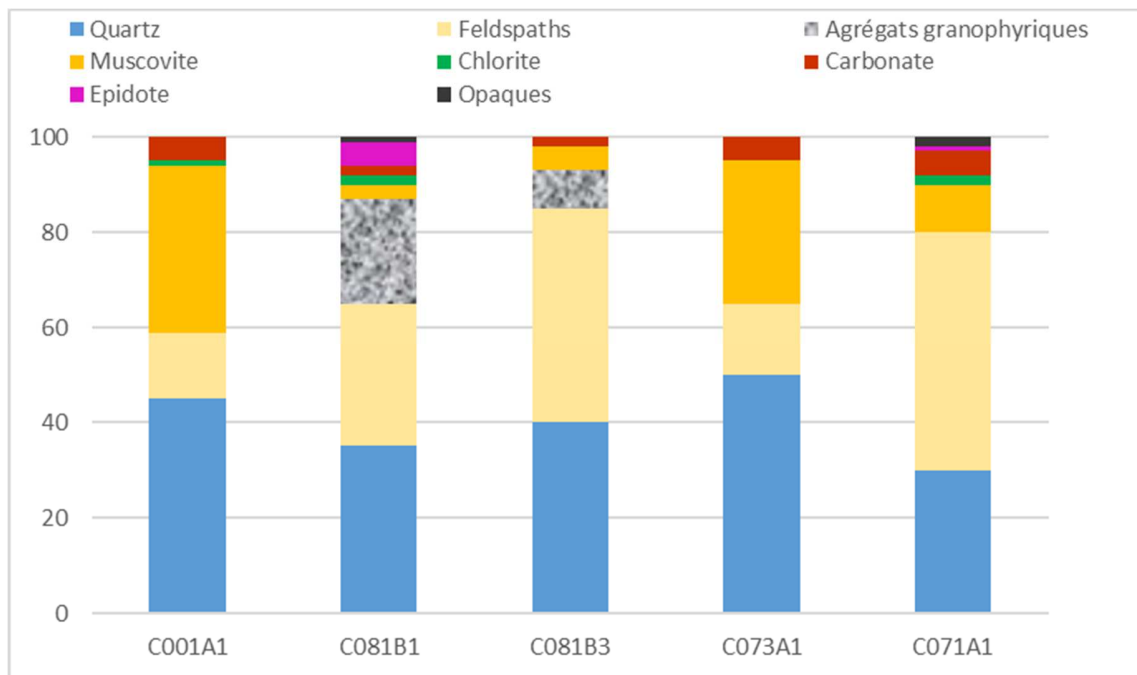


Figure 3.5 : Synthèse des minéraux observés dans les rhyolites et leurs proportions normalisées à 100%.

3.3.2 Andésite

Cette unité affiliée à la Formation de Waconichi a été observée au nord du secteur Ramsey. Elle est observée en association avec une unité de granophyre qui présente des figures d'injection (Figures 2.7, 3.15a et 3.15b). Il pourrait s'agir de la zone de contact entre les granophyres du CLD et la partie mafique du membre de Scott de la Formation de Waconichi.

En lames minces, cette unité est caractérisée par une minéralogie à dominance mafique et une granulométrie fine (Figures 3.15c et 3.15d). Les phases magmatiques de la composition minéralogique sont le quartz, les feldspaths, les amphiboles et la biotite. Les minéraux secondaires observés sont la chlorite, les carbonates, la muscovite, l'épidote et du

rutile. La synthèse de proportions minérales de l'andésite est présentée à la figure 3.6. L'andésite de la Formation de Waconichi est marquée par une forte altération en chlorite qui est présente sous forme de remplacement des minéraux d'amphibole et de pyroxène. Les chlorites sont associées aux altérations en carbonates (Figures 3.15c et 3.15d).

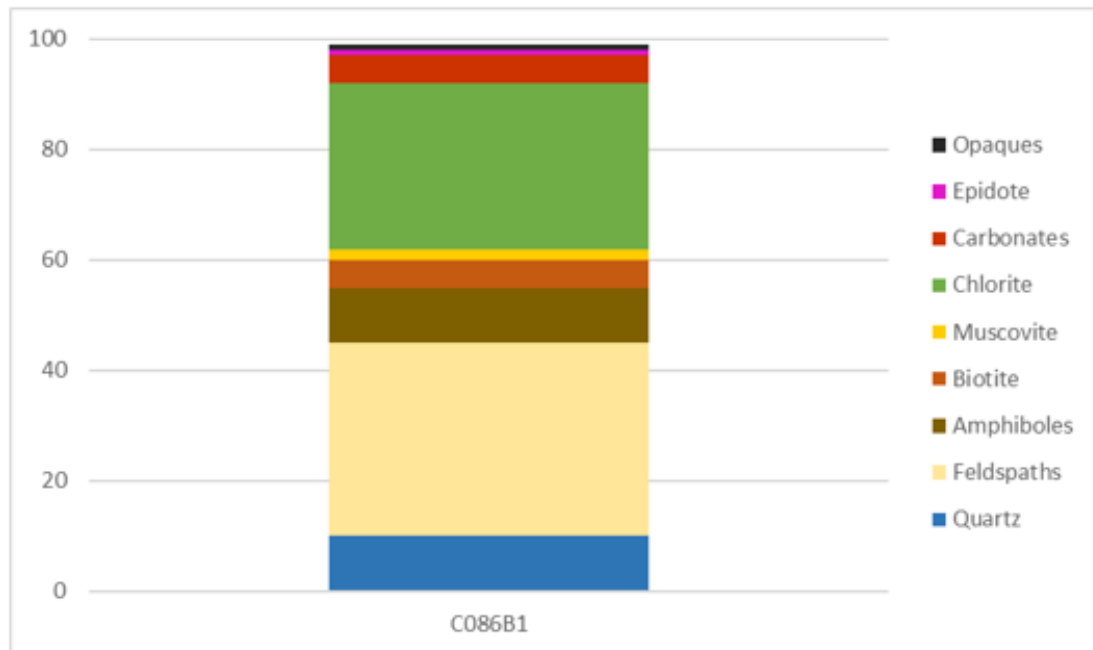


Figure 3.6 : Synthèse des minéraux observés dans l'andésite et leurs proportions normalisées à 100%.

3.4 Les dykes

Les dykes qui sont décrits ici correspondent à des unités qui ont été identifiées sur les principaux décapages qui ont été cartographiés pour cette étude. Il s'agit de : (1) les dykes d'aprites granophyriques, présents sur les décapages du secteur de Golden Moon, (2) le dyke felsique de l'indice Ramsey, (3) le dyke mafique AXE et (4) celui de l'indice Ramsey.

3.4.1 Dyke d'aplite granophyrique

Les dykes d'aplite granophyrique sont présents sur les décapages du secteur de Golden Moon (Figures 2.1 et 2.2). Ils se caractérisent par une texture aplitique, mais leur minéralogie est semblable à celle des granophyres.

En lame mince, les dykes d'aplite granophyrique présentent une granulométrie fine et une minéralogie à dominance de quartz (47%) et de feldspaths (40%) (Figure 3.16d). Dans leur ensemble les grains sont xénomorphes et équigranulaires. En revanche, quelques phénocristaux de plus de 2 mm de taille sont observés (Figures 3.16d). Les dykes d'aplite granophyriques sont marquées par la présence d'une forte altération en carbonate et en séricite (Figures 3.16c et 3.16d). La synthèse des proportions minéralogiques de cette unité est présentée à la figure 3.7.

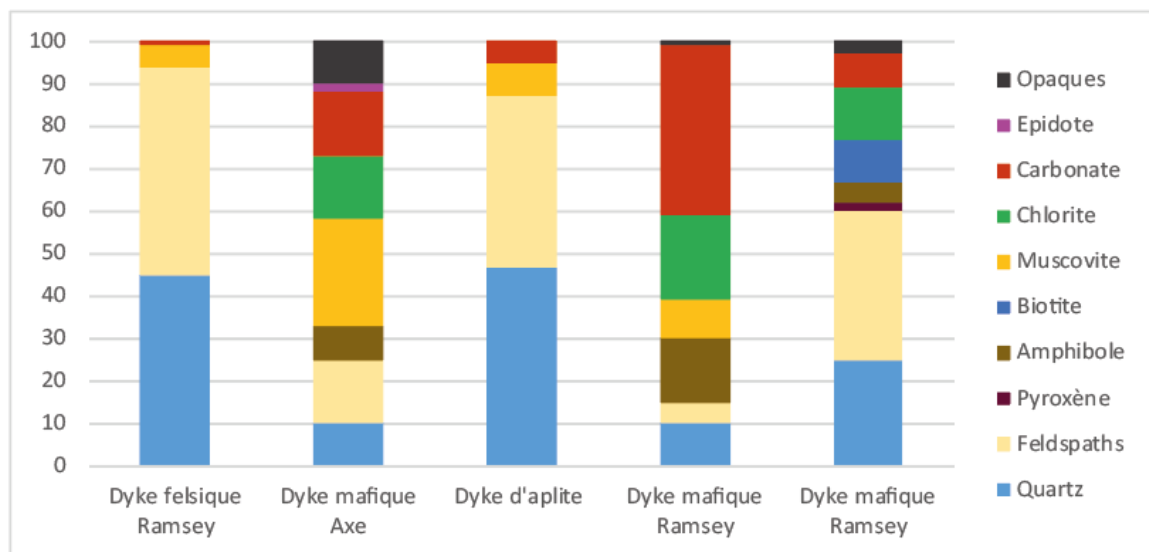


Figure 3.7 : Synthèse des minéraux observés dans les dykes observés de la zone étudiée et leurs proportions normalisées à 100%.

3.4.2 Dyke felsique de l'indice Ramsey

Ce dyke felsique a été observé sur le décapage de l'indice Ramsey où il recoupe les granophyres. Ce dyke a une forme rectiligne à localement irrégulière et il est observé sur une longueur de plus de 10 m. Il possède une texture aphanitique et une minéralogie à dominance de quartz (45%) et feldspaths (49%) (Figures 3.17c et 3.17d). Les observations pétrographiques indiquent une forte altération en séricite et des altérations modérées en carbonates, épidotes et chlorites (Figure 3.17d). La figure 3.7 présente la synthèse des proportions minérales de ce dyke felsique.

3.4.3 Dykes mafiques de l'indice Ramsey

Les dykes mafiques observés sur l'indice Ramsey sont au nombre de trois et ils occupent environ 10% de la superficie du décapage. Les dykes mafiques recoupent les granophyres de l'indice Ramsey en direction E-O, avec un pendage subvertical. Un de ces dykes est observé à l'intérieur de la structure minéralisée sulfurée de direction E-O (Figure 3.18a) de l'indice Ramsey. Ces dykes présentent une granulométrie fine (Figure 3.18b), et une minéralogie à dominance de quartz, feldspath, amphibole, pyroxène et biotite (Figures 3.18c et 3.18d). Les minéraux magmatiques sont affectés par une forte altération en chlorite et carbonate. La figure 3.7 présente la synthèse de la composition minéralogique et les proportions minérales d'un des dykes mafiques de l'indice Ramsey.

3.4.4 Dyke mafique de l'indice AXE

L'indice AXE est situé dans le secteur de Golden Moon. Le dyke mafique de ce décapage recoupe, en direction N-S, les deux faciès de granophyres du décapage, avec un pendage de 65° vers l'ouest. En lame mince, ce dyke est caractérisé par une granulométrie

fine et hétérogène. Les minéraux magmatiques de la composition minéralogique sont constitués de quartz, de feldspath, d'amphibole, d'oxydes de fer. Les minéraux secondaires sont la chlorite, des carbonates et la muscovite (Figures 3.19b et 3.19c). La synthèse des proportions minérales est présentée à la figure 2.18.

3.5 Synthèse

Cette section vise à présenter une synthèse des principales caractéristiques pétrographiques des unités lithologiques étudiées. L'emphasis est mise essentiellement sur les unités de granophyres du CLD et les principales unités associées.

Dans leur ensemble, les trois unités de granophyres identifiées dans la zone d'étude présentent des caractéristiques minéralogiques et texturales similaires. Quelques variations locales peuvent être soulignées, notamment la différence de granulométrie entre les granophyres à grains grossiers et ceux à grains fins. Les contacts nets entre ces deux unités, impliquent nécessairement des injections différentes, avec des conditions thermiques différentes de cristallisation. Les mélanogranophyres se démarquent des autres granophyres par leur forte altération en chlorite qui expliquerait le caractère mélanocrate de cette unité. La présence de cavités miarolitiques à minéraux pegmatitiques dans ces unités suggère qu'elles se sont mises en place à une faible profondeur et en présence d'éléments volatils (Thomas et Davidson 2016). A faible profondeur, la pression sera suffisamment basse pour permettre au magma d'exsolver des fluides capables de former des poches qui formeront par la suite des cavités.

La texture granophyrique sous forme d'agrégats, est présente dans tous les trois unités de granophyres. Mais elle est inégalement répartie dans ces unités et elle n'a été

observée que dans quelques échantillons étudiés. Cette texture résulte de la croissance simultanée du quartz et du feldspath au cours d'une cristallisation à l'eutectique d'un magma et en présence d'eau (Barker 1970). La présence de perthites et de feldspaths zonés à bordures perthitiques suggère une déstabilisation des minéraux magmatiques par l'ajout de fluide aqueux au cours ou à la fin de la cristallisation du magma. Les inclusions de feldspaths idiomorphes observées dans des minéraux magmatiques de quartz, laissent penser à un processus de cristallisation fractionnée. Globalement, à l'exception du quartz qui présente localement des bordures recristallisées et des extinctions roulantes, l'ensemble des minéraux observés ont conservés leurs textures magmatiques.

Les dykes d'aplite du secteur de Golden Moon présentent des caractéristiques pétrographiques semblables à celle du dyke felsique qui recoupe les granophyres de l'indice Ramsey. Cette similarité suggère qu'il pourrait s'agir de la même famille de dyke.

Les rhyolites de la Formation de Waconichi se distinguent des granophyres par leur caractère porphyrique et leur matrice aphanitique. En revanche, les compositions minéralogiques de ces deux unités sont identiques (Figure 3.8). A l'instar des granophyres, quelques échantillons de rhyolites possèdent aussi des agrégats minéraux à texture granophyrique. Les similarités minéralogiques et texturales entre les granophyres et les rhyolites encaissantes (Figure 3.8) témoignent de la proximité pétrographique entre ces deux unités. La synthèse des observations minéralogiques des unités de granophyres et des rhyolites de la Formation de Waconichi est présentée à la figure 3.8.

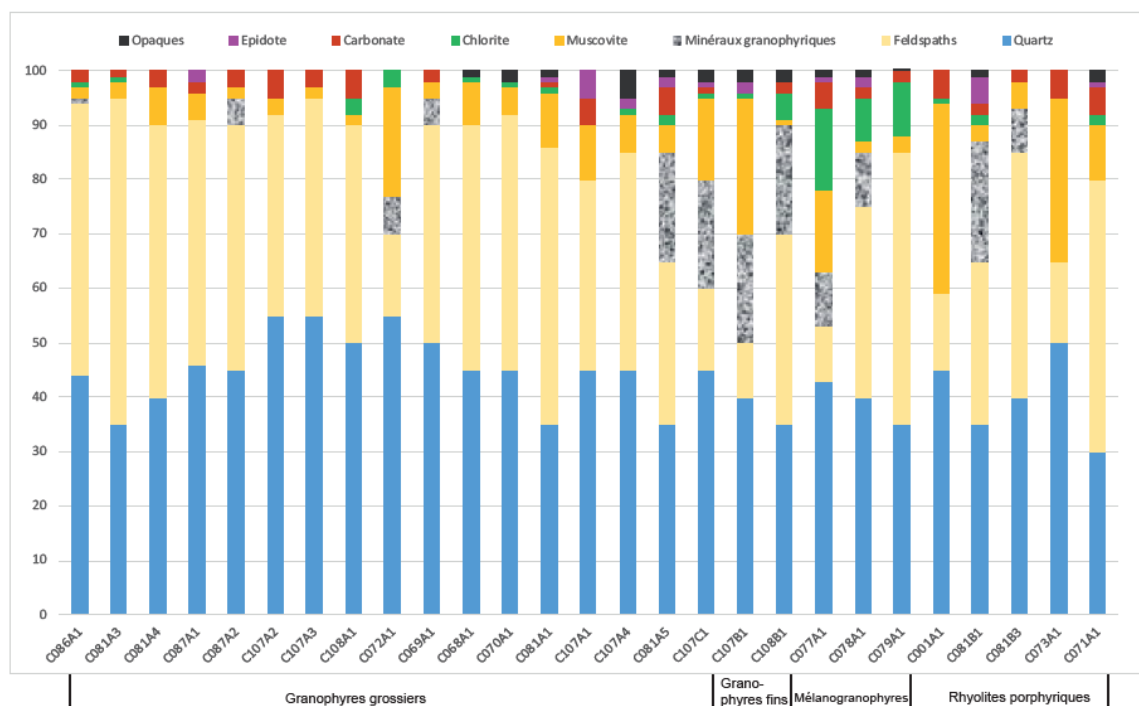


Figure 3.8 : Synthèse des minéraux observés dans les unités de granophyres et les rhyolites porphyriques et leurs proportions normalisées à 100%. Notez les faibles variations des compositions minéralogiques de ces unités et la présence locale d'agrégats à texture granophyrique.

FIGURES DU CHAPITRE III

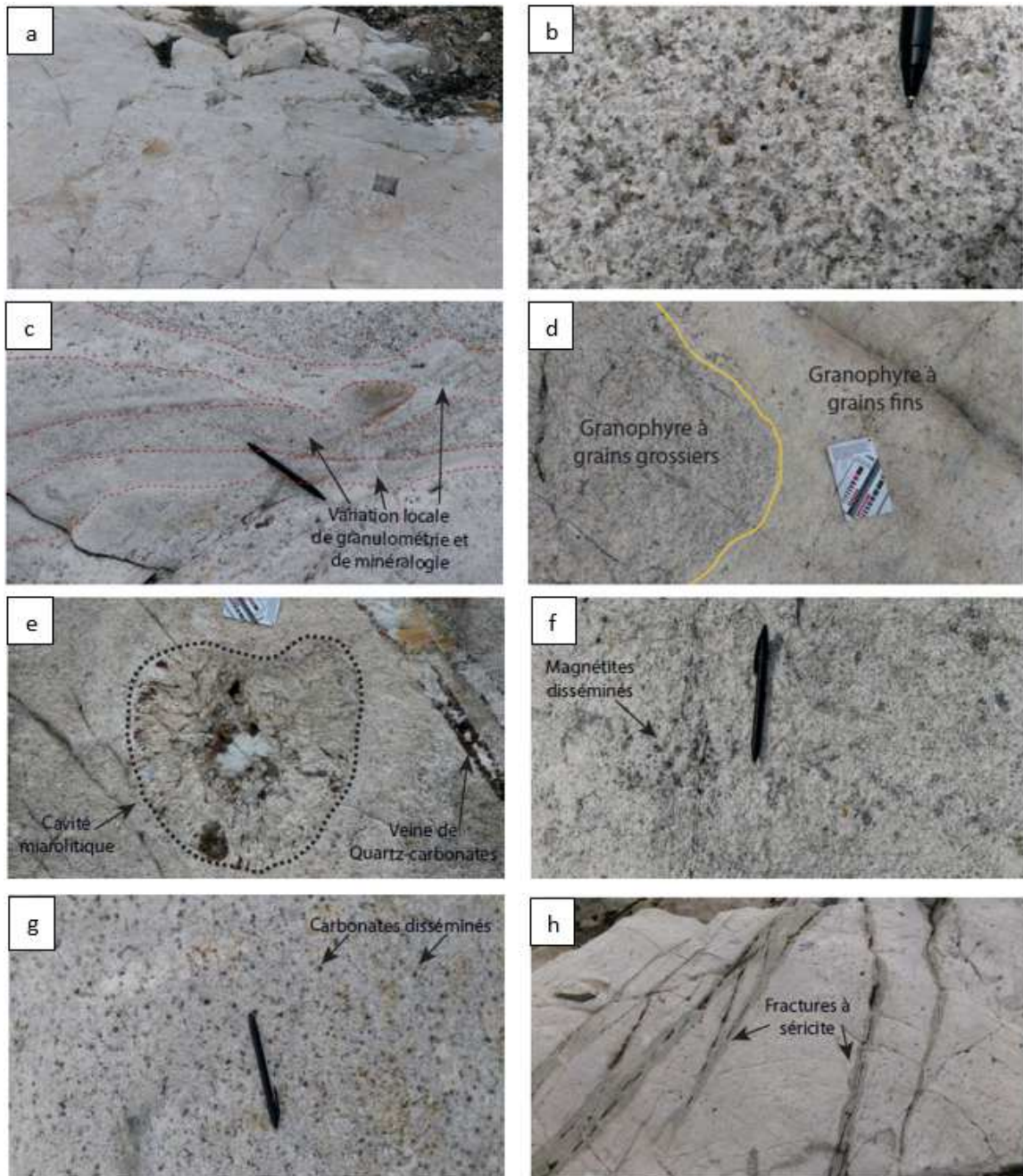


Figure 3.9 : Photographies du granophyre à grains grossiers et ses caractéristiques texturales et minéralogiques. a) Granophyre à grains grossiers. b) Texture grenue des granophyres à grains grossiers. c) Variation locale de granulométrie et de minéralogie observée dans les granophyres à grains grossiers. d) Contact entre le granophyre à grains grossiers et celui à grains fins. e) Cavité miarolitique et veine pegmatitique de quartz-carbonates. f) Magnétite disséminé dans le granophyre. g) Carbonates disséminés dans le granophyre. h) Halo d'altération en séricite autour de fractures parallèles dans le granophyre.

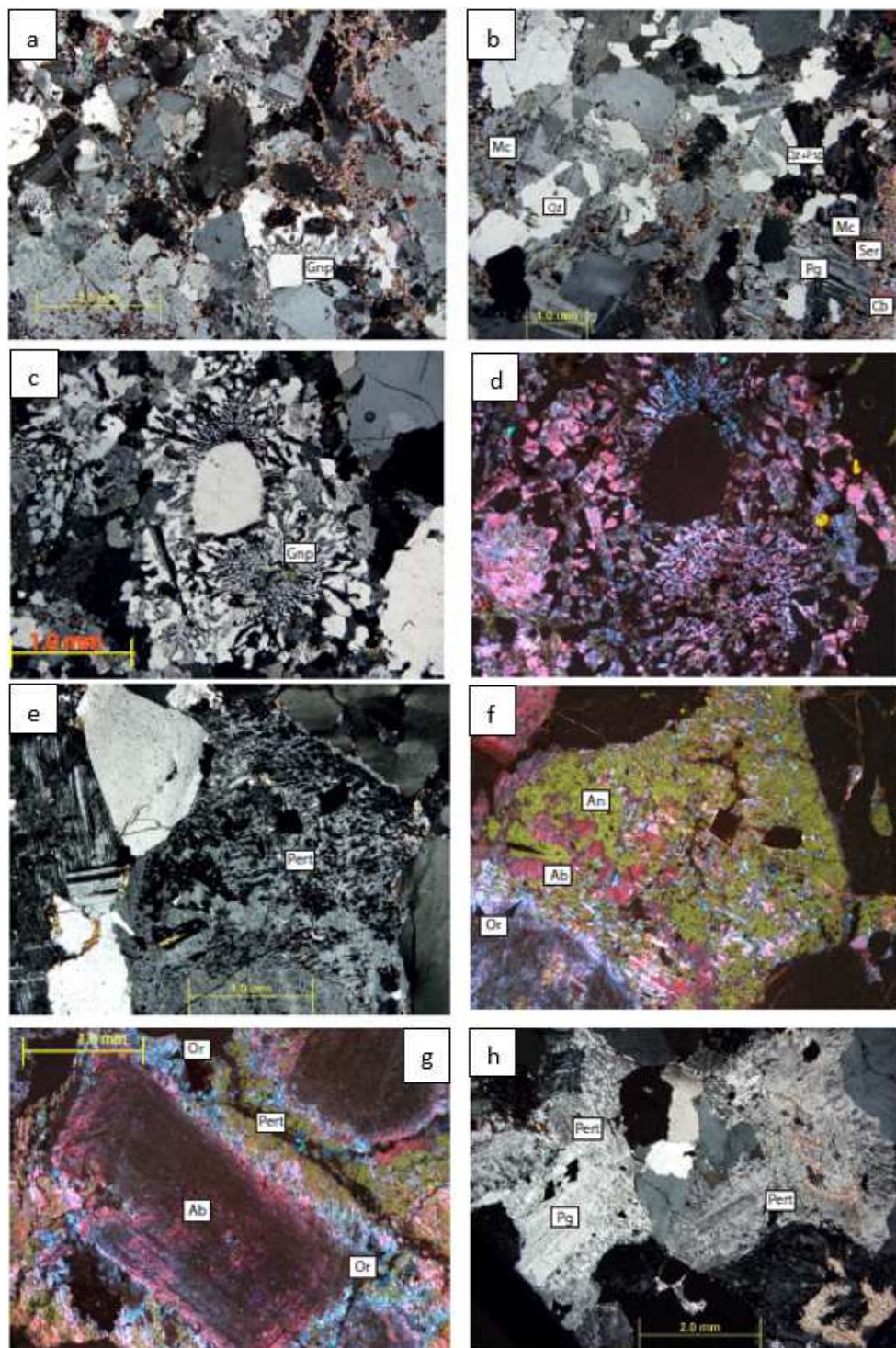


Figure 3.10 : Microphotographies des caractéristiques pétrographiques des lames minces des granophyres à grains grossiers; a, b, c, e et h - images en LPA et d, f et g - images en cathodoluminescence. a) et b) Texture et association minérale typiques des granophyres à grains grossiers. Notez l'altération en séricite (Ser) et carbonate (Cb). c) et d) Agrégats à texture granophyrique (Gnp). Notez la nucléation autour d'un grain de quartz de l'intercroissance en lamelles de quartz (Qz) et Feldspaths (Fs). L'orthose (Or) et l'abite (Ab) sont les principaux feldspaths. e) et f) Perthitique (Pert) identifiés dans les granophyres à grains grossiers. Notez la présence de trois types de feldspaths dans les perthites. g) et h) Phénocristaux d'albite zonés à bordures perthitiques.

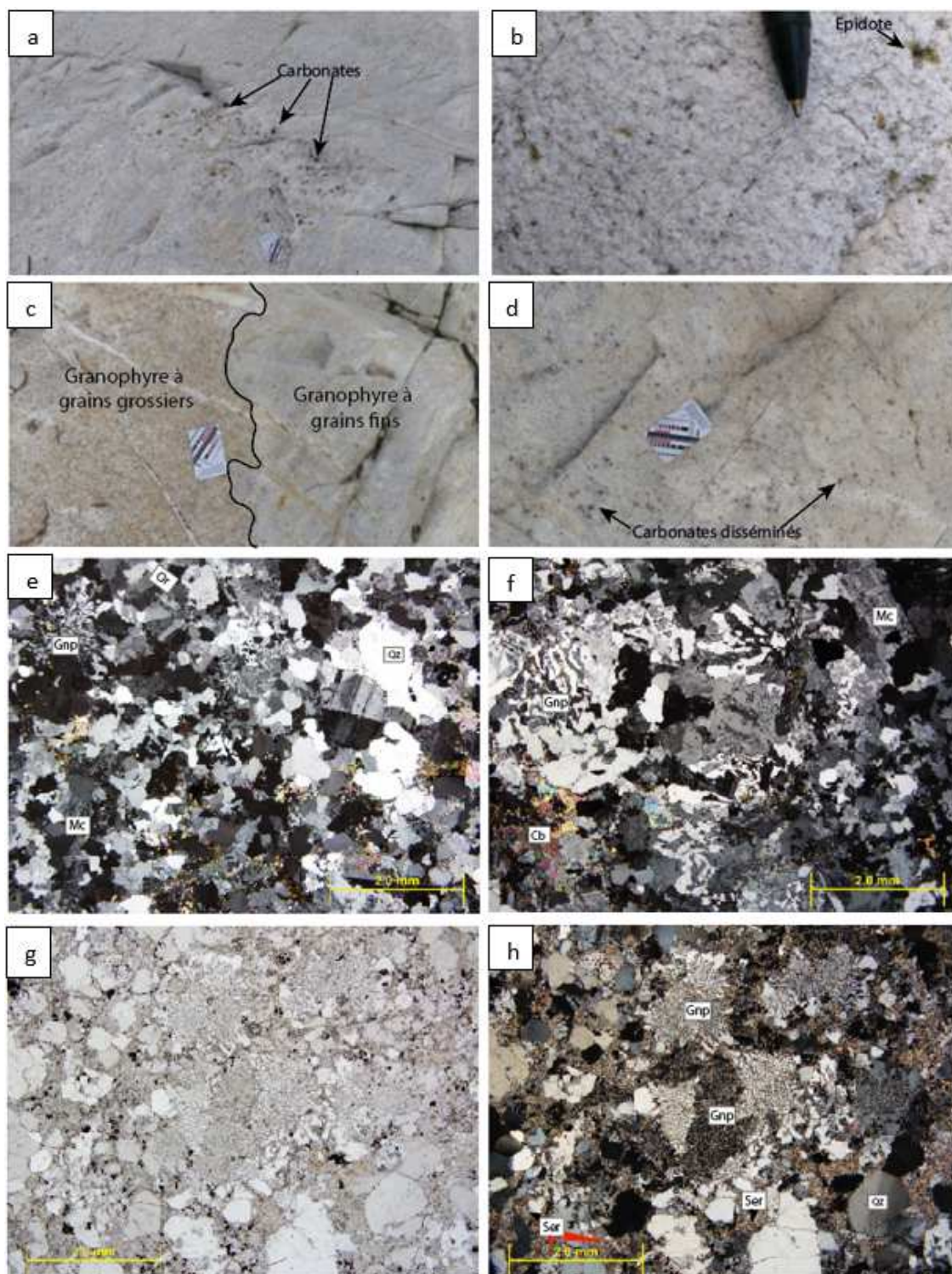


Figure 3.11 : Photographies du faciès des granophyres à grains fins en affleurement. a) Granophyres à grains fins contenant des poches à carbonates de fer. b) Texture mégascopique de des granophyres à grains fins. Notez l'abondance des feldspaths et l'altération en épidote. c) Exemple du contact entre les granophyres à grains fins et ceux à grains grossiers. d) Altération en carbonates de fer disséminés dans les granophyres à grains fins. e, f) Microphotographies en LPA et g en LN. e) et f) Texture et minéralogie des granophyres à grains fins. g) et h) Abondance de la texture granophyrique et de l'altération en séricite.

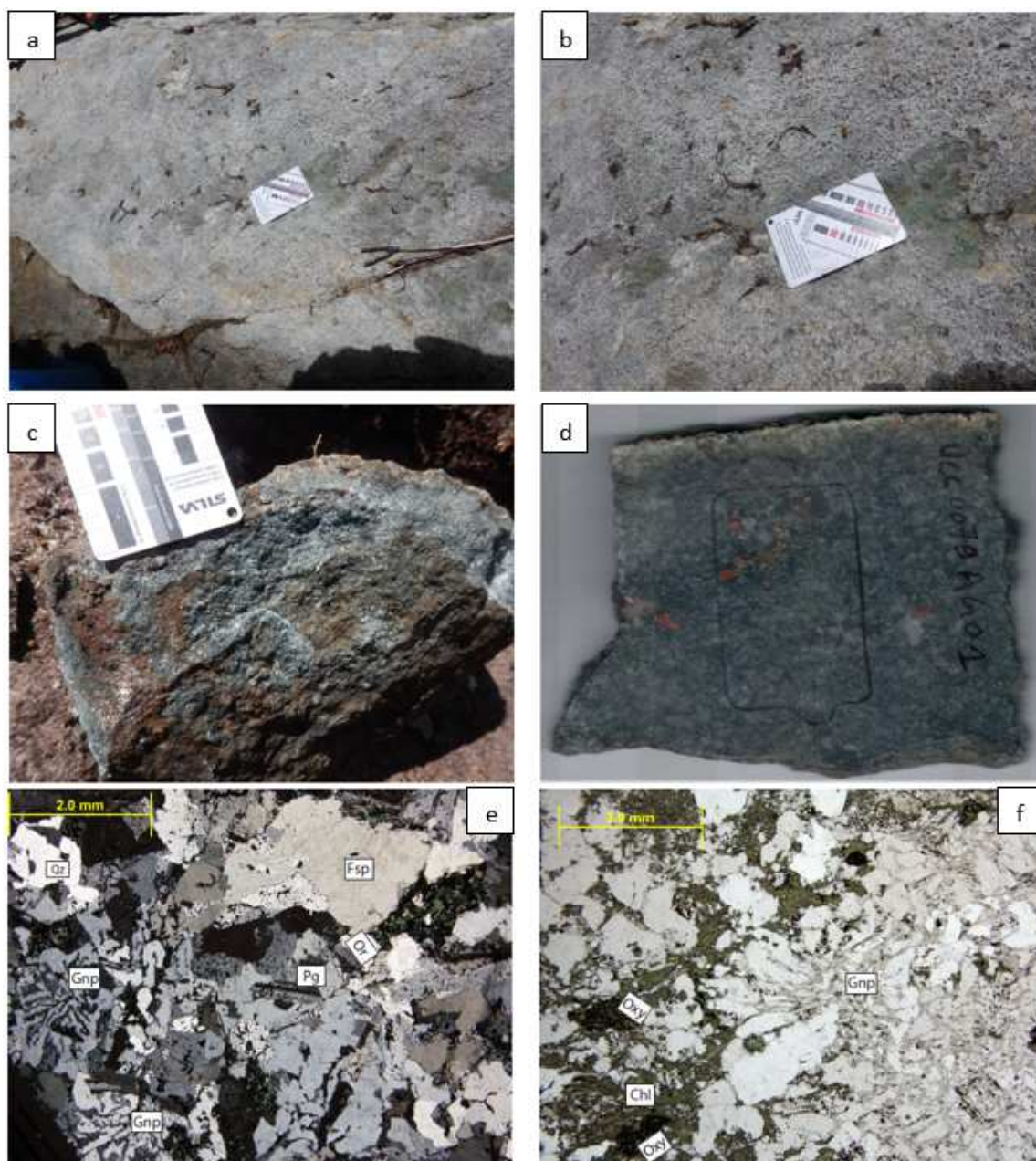


Figure 3.12 : Photographies des aspects pétrographiques macroscopiques des mélanogranophyres. a) et b) textures de surface des mélanogranophyres. c) Textures en cassure fraîche des mélanogranophyres. d) Échantillon coupé montrant l'aspect mélanocratique de cette unité et l'altération en carbonate. e) et f) Microphotographie de la composition minéralogique et texturale des mélanogranophyres, respectivement en LPA et LN. Oxy= Oxydes. Chl= Chlorite. Pg= Plagioclase

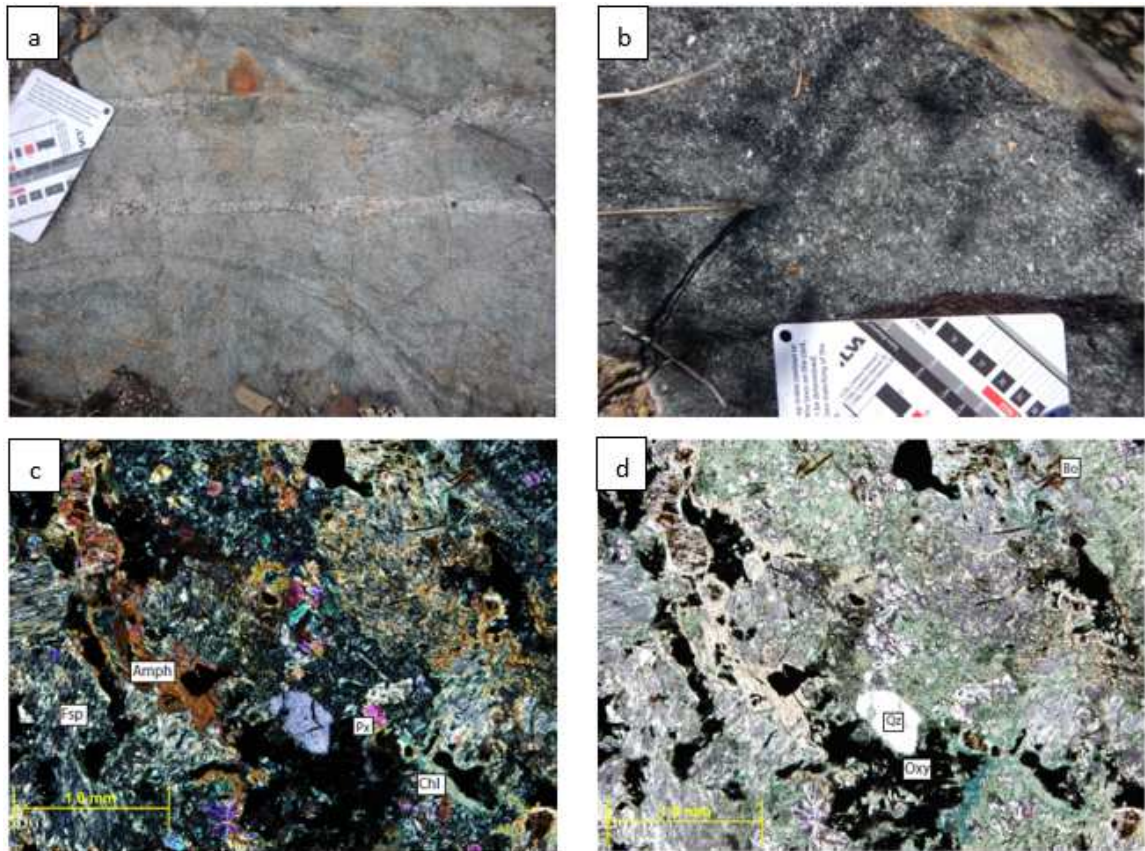


Figure 3.13 : Photographies des aspects pétrographiques macroscopiques de la ferrodiorite. a) Aspect macroscopique de surface de la ferrodiorite. Notez la présence du litage. b) Texture en cassure fraîche de la ferrodiorite. Notez l'abondance de minéraux mafiques. c) et d) Microphotographies respectivement en LPA et LN, de la composition minéralogique et texturale d'un échantillon de ferrodiorite. Amp= Amphiboles, Px= Pyroxènes.

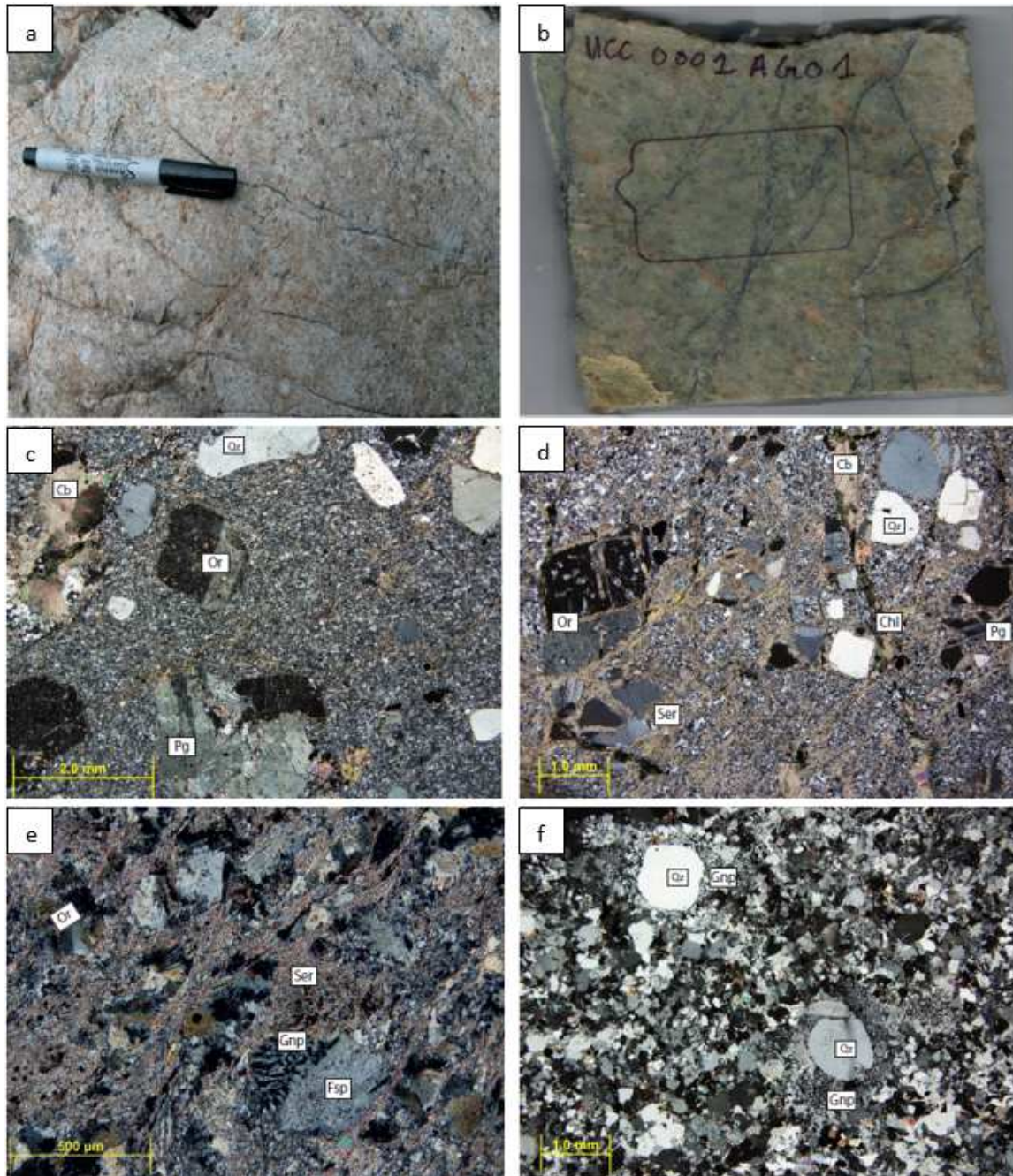


Figure 3.14 : Photographies des aspects pétrographiques des rhyolites porphyriques de la Formation de Waconichi. a) Rhyolite porphyrique à phénocristaux de quartz et de feldspaths. b) Texture d'un échantillon coupé de la rhyolite porphyrique. Notez la présence d'altération en carbonate et des fractures chloritisées. c) et d) Microphotographies en LPA, montrant la texture porphyrique caractéristiques des rhyolites de la formation de Waconichi. Notez l'altération en séricite, carbonate et chlorite. e) et f) Microphotographies en LPA montrant la présence de minéraux à texture granophyrique dans les rhyolites. Notez la foliation et l'altération en séricite dans la photo e).

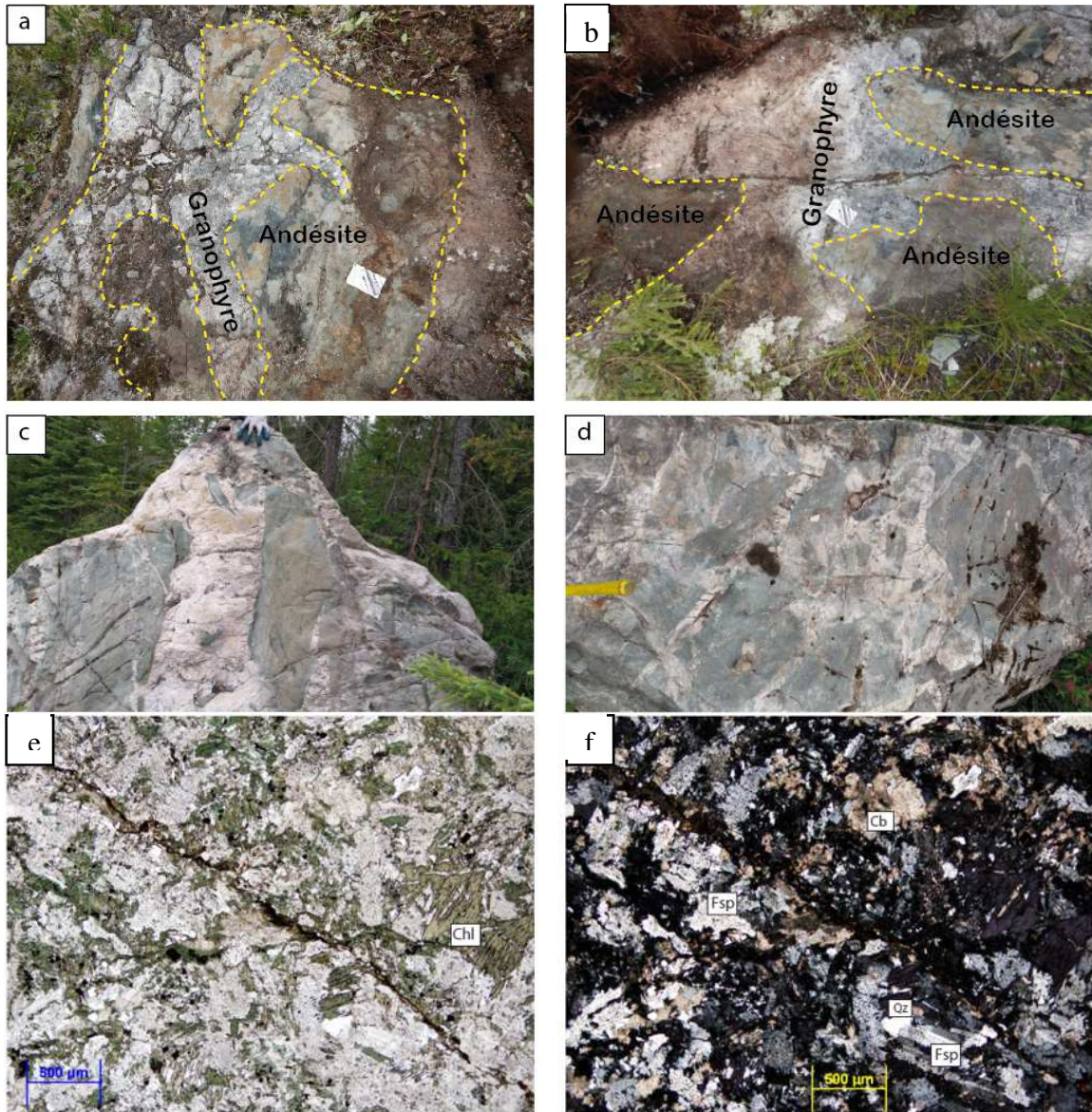


Figure 3.16 : Photographies des aspects pétrographiques de l'andésite de la Formation de Waconichi. a), b), c) et d) Andésite injectée par une unité de granophyre. Notez la géométrie complexe de l'injection. e) et f) Microphotographies, respectivement en LN et LPA, montrant la texture, la composition minéralogique et la texture de l'andésite.

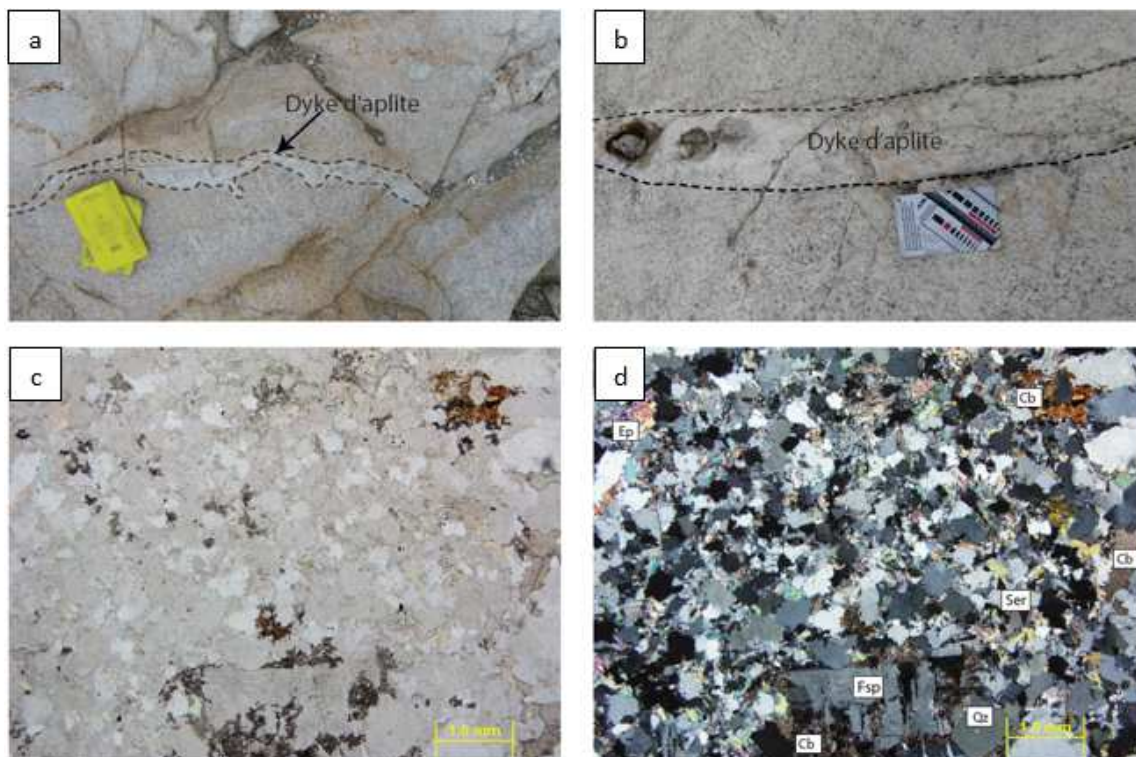


Figure 3.16 : Photographies et microphotographies des caractéristiques pétrographiques des dykes d'aplite granophyrique. a) et b) Dyke d'aplite qui recoupe le granophyre du décapage de Golden Moon. c) et d) microphotographies, respectivement en LN et LPA, de la texture et la composition minéralogique d'un dyke d'aplite du secteur de Golden Moon.

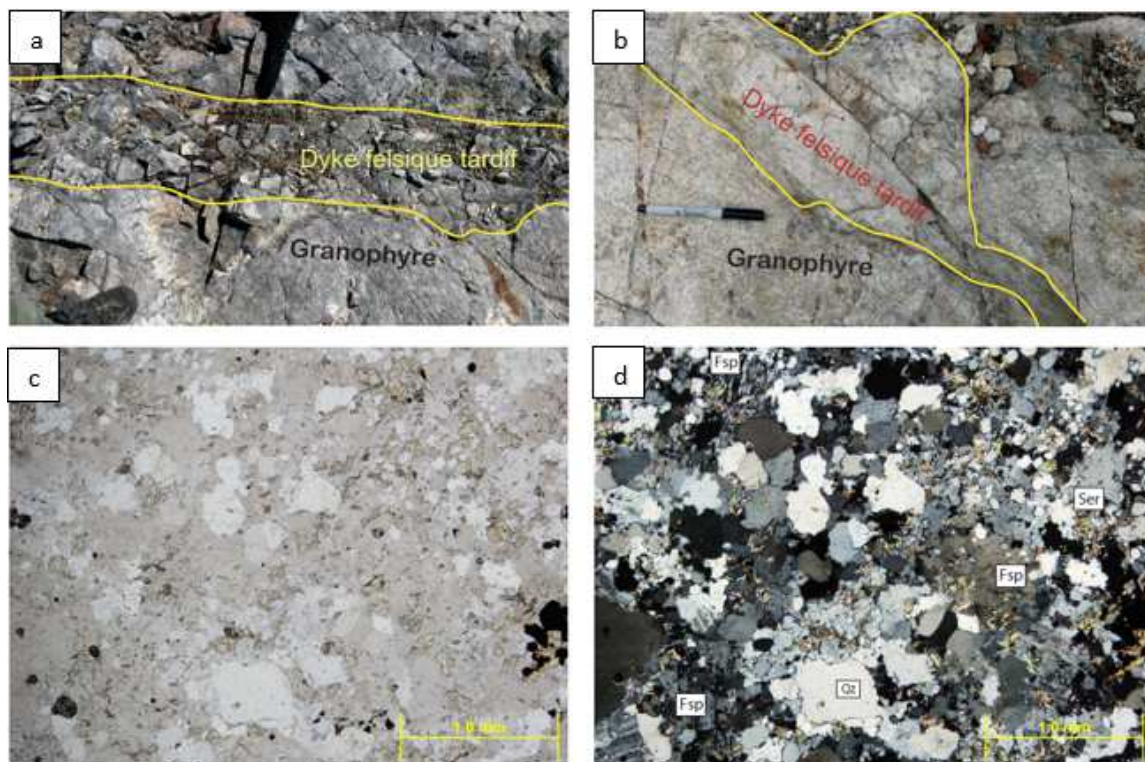


Figure 3.17 : Photographies et microphotographies des caractéristiques pétrographiques du dyke felsique de l'indice Ramsey. a) et b) Granophyre de l'indice Ramsey recoupé par le felsique. c) et d) Microphotographies, respectivement en LN et LPA, de la texture et la composition minéralogique du dyke felsique de l'indice Ramsey.

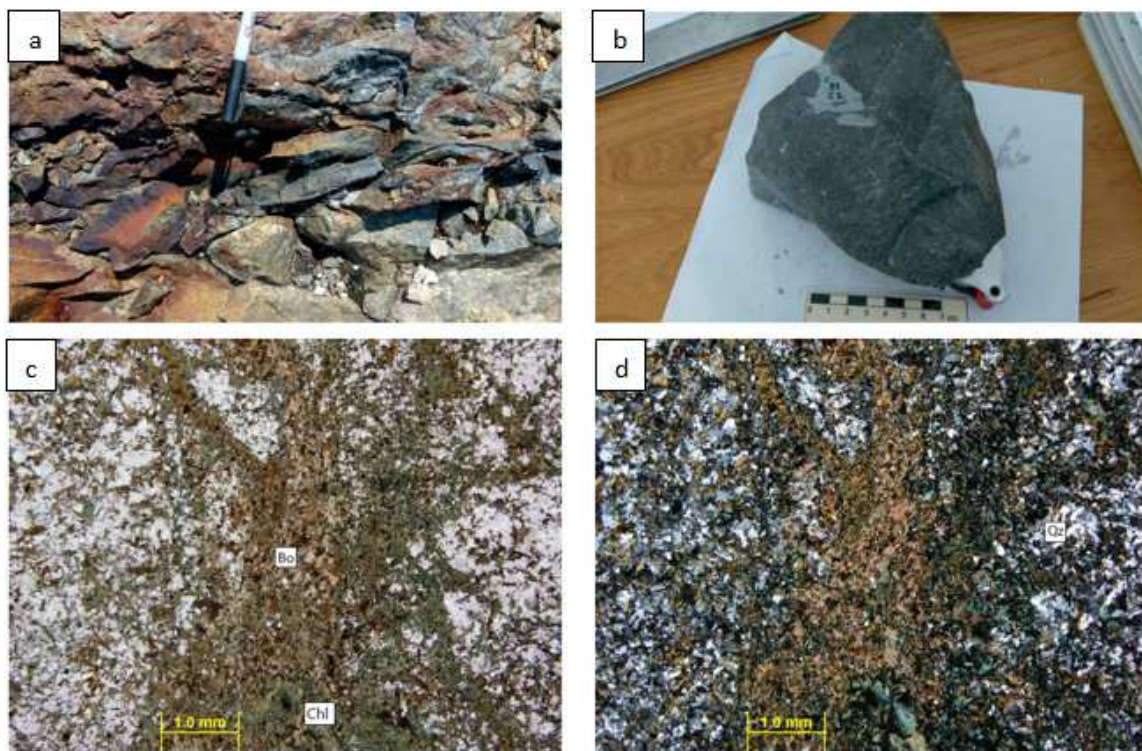


Figure 3.18 : Photographies et microphotographies des caractéristiques pétrographiques des dykes mafiques de l'indice Ramsey. a) Dyke mafique dans la structure minéralisée. b) Échantillon coupé montrant la texture macroscopique des dykes mafiques. c) et d) Microphotographies, respectivement en LN et LPA, de la texture et la composition minéralogique d'un échantillon des dykes mafiques de l'indice Ramsey.

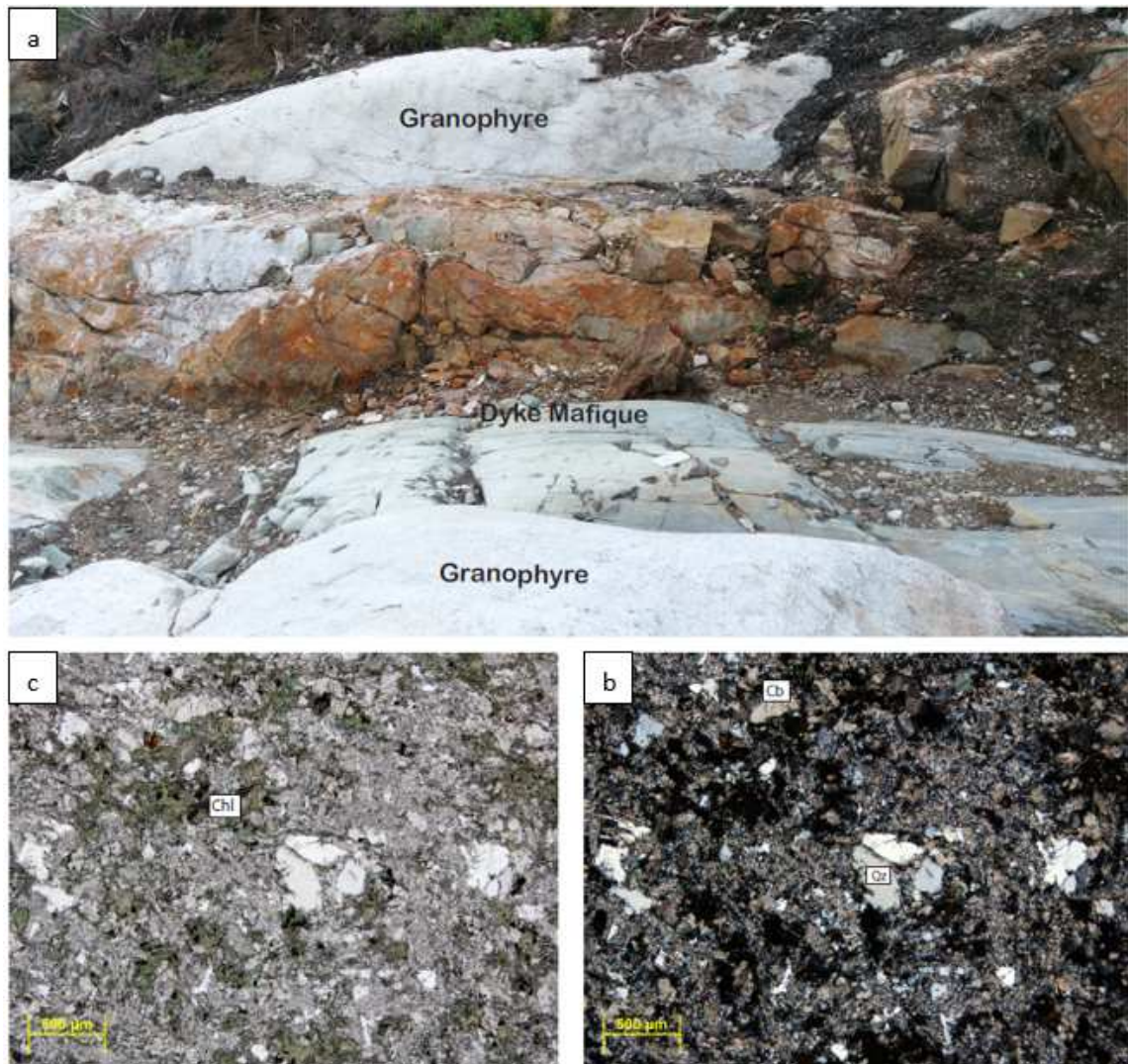


Figure 3.19 : Photographies et microphotographies des caractéristiques pétrographiques des dykes mafiques de l'indice AXE. a) Photographies des caractéristiques macroscopiques des dykes mafiques de l'indice AXE du secteur Golden Moon. b) et c) Microphotographies, respectivement en LN et LPA, de la texture et la composition minéralogique d'un dyke mafique de l'indice AXE du secteur Golden Moon.

CHAPITRE IV

CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES UNITÉS LITHOLOGIQUES

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la caractérisation lithogéochimique des principales unités échantillonnées sur le terrain et sélectionnées pour les analyses géochimiques. Cette caractérisation s'inscrit dans le cadre du premier objectif de ce projet qui consiste à déterminer l'origine des granophyres du Complexe du Lac Doré (CLD).

La caractérisation lithogéochimique porte sur les unités du CLD et celle de la formation de Waconichi. Les échantillons du CLD se déclinent ainsi : 17 échantillons de granophyre (dont 13 du faciès à grains grossiers, deux granophyres du faciès à grains fins et deux mélanogranophyres) ; trois échantillons de la ferrodiorite et un échantillon d'anorthosite. Pour la Formation de Waconichi, cinq rhyolites porphyriques et une andésite ont été analysées. De plus, des échantillons de deux dykes mafiques et un dyke d'aplite granophyrique ont été ajoutés à la sélection afin d'être représentatif des principales unités identifiées dans la zone d'étude. L'ensemble des analyses de type roches totales qui ont fait l'objet de cette étude est disponible à l'annexe 1.

Des calculs normatifs ont également été intégrés à la méthodologie. Cependant, la norme CIPW a été calculée pour aider à compléter la classification des roches, à travers la réalisation de diagramme ternaire de type QFP (Quartz-Feldspaths alcalins-Plagioclase ; Streckeisen 1967). La norme « Consonorm LG » (Trépanier et al. 2015) et les bilans de masses par modélisation du précurseur (Trépanier et al. 2016), ont été calculés pour servir dans la caractérisation des altérations hydrothermales enregistrées par les roches.

Dans les sections suivantes, il sera question de la classification lithogéochimique, en vue de : 1) caractériser la nature géochimique des roches échantillonnées, 2) définir leurs affinités magmatiques, et 3) préciser leur degré de fractionnement. Dans un deuxième temps, l'évolution chimique du magma du CLD au cours de la cristallisation fractionnée sera étudiée. Enfin, l'altération hydrothermale enregistrée par ces roches sera quantifiée et qualifiée. L'ensemble du traitement des données et des diagrammes a été réalisé avec le logiciel de traitement géochimique « Lithomodeleur » du CONSOREM.

4.2 Classification lithogéochimique des principales unités étudiées

Les noms des roches ont été définis à l'aide de diagrammes de type TAS (Total Alkali Silicate) pour les roches intrusives (Middlemost 1985) et leur équivalent extrusif en utilisant des éléments immobiles (Winchester et Floyd 1977). Le diagramme QFP (Streckeisen 1967), réalisé sur la base de minéraux normatifs calculés selon la norme CIPW (Tableau 3.1), a été utilisé exclusivement pour classer les granophyres, car ce diagramme est conçu pour des roches intrusives felsiques.

L'affinité géochimique des roches est déterminée à l'aide du diagramme utilisant les ratios d'éléments immobiles Th/Yb vs Zr/Y (Ross et Bédard 2009). Des diagrammes multiéléments (éléments classés selon l'ordre de Pearce 2008) et des spectres d'éléments de terres rares (ETR), tous deux normalisés au manteau primitif de Hofmann (1988), ont été réalisés dans le but de déterminer le degré de fractionnement des roches et de confirmer leur affinité géochimique.

4.2.1 Granophyres du CLD

Dans leur globalité, les granophyres du CLD ont une composition felsique, définie par une concentration moyenne en SiO_2 d'environ 75%poids. L'ensemble des échantillons de granophyre se retrouvent dans le champ « granite à feldspaths alcalins » du diagramme de Streckeisen (Figure 4.1a) à l'exception de trois échantillons. Parmi ces trois échantillons, un échantillon de mélanogranophyre est situé dans le champ « greisen », 1 échantillon du faciès à grains fins se situe dans le champ « granite » et 1 échantillon du faciès à grains grossiers qui tombe dans le champ « monzogranite ».

Sur le diagramme TAS de Middlemost (1985) (Figure 4.1b), l'ensemble des granophyres se situe dans le champ des granites à l'exception d'un échantillon de mélanogranophyre qui se retrouve

dans le champ des granodiorites. Il s'agit du même échantillon qui, sur le diagramme de Streckeisen, est situé dans le champ « Greisen ».

L'affinité des granophyres est essentiellement tholéiitique selon le diagramme de discrimination de Ross et Bédard (2009) (Figure 4.1c) à l'exception de trois échantillons. Deux tombent dans le champ transitionnel, soient un mélanogranophyre et un granophyre à grains grossiers. Le troisième, un échantillon de mélanogranophyre, est d'affinité calco-alcaline. Tous les granophyres sont caractérisés par un ratio Zr/Y qui varient de 1 à 6 alors que le ratio Th/Yb est homogène avec une valeur moyenne comprise entre 3 et 4.

Les granophyres sont caractérisés par des profils multiéléments plats et un contenu en éléments traces qui se situent autour de 100 en moyenne. Une anomalie négative en Ti est observée, elle a des valeurs normalisées de 2 pour les mélanogranophyres et de 0,8 pour les autres granophyres (Figure 4.1d). Toutefois, les mélanogranophyres sont moins enrichis en éléments traces par rapport aux autres granophyres. En effet, ces roches présentent un profil plat autour de 40 et un des échantillons montre des légères anomalies positives en Zr et Hf (Figure 4.1d).

Les spectres des éléments des terres rares (Figure 4.1e) de l'ensemble des granophyres présentent des patrons plats et une anomalie négative en Eu, mais cette anomalie est très peu prononcée pour les mélanogranophyres. Ce diagramme (Figure 4.1e) montre un léger fractionnement avec un enrichissement en terres rares légères par rapport au terres rares lourdes ($La/Yb_N=2,7$ en moyenne).

Le faible fractionnement des ces roches, caractérisé par des profils plats sur les diagrammes multiéléments et le spectre de terres rare confirme leur affinité tholéiitique à transitionnelle déjà observée sur le diagramme de Ross et Bédard (2009).

Tableau 4.1 : Synthèse des résultats de calculs des minéraux normatifs selon la norme CIPW

Échantillon	Noms de roche	Corindon	Calcite	Quartz	Orthose	Albite	Ilménite	Anorthite	Forstérite	Fayalite	Enstatite	Ferrosilite	Apatite	Wollastonite	Magnéite	Spinelles	Hercynite
A006A1	Anorthosite	0	3.27	5.33	0.06	7.55	0.08	47.20	0	0	17.28	8.68	0.02	0	2.62	5.39	2.51
A009A1	Granophyre Gros	0	0.84	46.45	9.96	37.40	0.29	0	0	0	0	0.19	0.05	0	2.00	0.07	2.74
A011A1	Granophyre Gros	0	2.81	37.89	0.58	52.45	0.23	0	0	0	0.33	2.44	0.11	0	2.37	0.06	0.40
C015A1	Ferrodiorite	0	0.26	0.77	1.21	15.44	7.07	21.84	0	0	11.49	22.86	0.43	10.24	8.40	0	0
C016A1	Ferrodiorite	0	0.35	0	0.93	3.03	10.83	26.58	1.35	3.93	10.46	27.56	0.66	5.63	8.68	0	0
C018C1	Ferrodiorite	0	0.77	0.92	1.04	16.76	2.33	23.81	0	0	14.95	21.76	0.29	10.04	7.28	0	0
C070A1	Granophyre Gros	0.17	0.34	43.67	13.03	38.97	0.25	0	0	0	0.10	1.15	0.05	0	1.21	0.14	1.52
C071A1	Rhyolite QFP	1.35	2.76	45.78	6.41	41.02	0.39	0	0	0	0.38	0.41	0.07	0	0.58	0.54	0.54
C072A1	Rhyolite QFP	0	0.20	61.21	6.00	9.02	0.60	0	0	0	3.30	3.41	0.10	0	3.46	6.43	6.17
C073A1	Rhyolite QFP	6.13	2.94	57.21	18.89	10.36	0.42	0	0	0	0.68	0.91	0.07	0	0.77	0.96	1.21
C077A1	Mélanogranohyre	0	1.29	61.58	6.53	9.69	0.73	0	0	0	0.61	1.86	0.14	0	4.07	3.47	9.87
C078A1	Mélanogranohyre	0	0.67	50.20	1.39	33.01	0.62	0	0	0	0.60	2.00	0.09	0	3.85	1.85	5.70
C081A3	Granophyre Gros	0	0.91	42.32	13.96	38.21	0.24	1.34	0	0	0.10	0.43	0.02	0	1.24	0.24	0.97
C081A4	Granophyre Gros	1.05	2.50	44.59	5.14	44.60	0.23	0	0	0	0.20	0.44	0.02	0	0.52	0.29	0.58
C081B1	Rhyolite QFP	0.96	1.11	45.84	5.77	41.42	0.35	0	0	0	0.33	1.38	0.05	0	1.29	0.47	1.81
C081B3	Rhyolite QFP	0.31	1.69	42.58	4.66	45.60	0.33	0.90	0	0	0.30	1.19	0.05	0	1.17	0.43	1.56
C081C1	Dyke mafique	0	9.95	23.78	12.92	25.08	2.03	0	0	0	4.52	3.73	0.60	0	5.29	6.77	5.19
C081D1	Dyke felsique	1.67	1.13	44.27	6.55	44.30	0.13	0	0	0	0.20	0.52	0.01	0	0.53	0.28	0.69
C086A1	Granophyre Gros	0	0.91	43.71	0.76	50.11	0.23	0.44	0	0	0.23	0.32	0.05	0	1.11	0.91	1.20
C086B1	Andésite	0	7.71	16.28	1.37	33.89	1.12	7.09	0	0	6.85	9.90	0.32	0	6.81	3.68	4.95
C087A1	Granophyre Gros	0	1.46	44.55	5.81	40.02	0.21	0	0	0	0.08	2.42	0.02	0	1.96	0.11	3.18
C087A2	Granophyre Gros	0	3.07	43.09	11.28	36.48	0.21	0	0	0	0.01	0.15	0.02	0	1.78	0.10	2.48
C087B1	Dyke d'aplite	1.20	1.08	48.15	10.12	31.65	0.17	0	0	0	0.42	2.14	0.05	0	1.62	0.59	2.82
C107A1	Granophyre Gros	0	2.32	46.11	5.84	38.75	0.24	0	0	0	0.00	0.05	0.02	0	1.90	0.17	3.08
C107A2	Granophyre Gros	0	1.77	44.02	4.16	43.48	0.27	0	0	0	0.01	0.68	0.05	0	2.13	0.05	2.49
C107A3	Granophyre Gros	0	2.54	43.91	5.38	40.48	0.25	0	0	0	0.03	0.70	0.05	0	2.17	0.13	2.66
C107B1	Granophyre Fin	1.93	4.20	49.52	10.81	28.01	0.21	0	0	0	0.20	1.85	0.05	0	1.36	0.29	2.43
C107C1	Granophyre Gros	0.66	2.05	46.85	7.94	35.66	0.21	0	0	0	0.18	2.19	0.02	0	1.72	0.25	2.89
C107D1	Dyke mafique	0	9.78	28.53	16.89	17.96	1.74	0	0	0	3.81	2.34	0.58	0	4.24	8.83	5.04
C108A1	Granophyre Gros	0	1.77	42.70	12.48	37.10	0.25	1.43	0	0	0.03	1.23	0.02	0	1.88	0.03	1.05
C108B1	Granophyre Fin	0	0.49	39.43	14.84	39.23	0.24	2.03	0	0	0.02	1.32	0.01	0	1.81	0.01	0.56

4.2.2 Ferrodiorite et anorthosite du CLD

La partie mafique du CLD est représentée dans ce travail par les analyses de trois échantillons de la zone à ferrodiorite et 1 échantillon de cumulat anorthositique. Ces échantillons sont définis par le diagramme TAS de Middlemost (1985) comme des gabbros à gabbros péridotiques (Figure 4.2a). Les noms de « gabbro à gabbro péridotique » donnés à ces roches indiquent qu'il s'agit de roches riches en Mg, alors qu'elles sont réputées être riches en Fe (Lapallo 1988; Alfaro 1990). Cela est lié au fait que le diagramme ne prend pas en compte le ratio Fe/Mg. Ces échantillons ont une composition en SiO₂ variant de 37 à 48% et des valeurs de Na₂O+K₂O qui ne dépassent pas 2%poids. Leur affinité géochimique, telle que déterminée par le diagramme de discrimination de Ross et Bédard (2009), est tholéitique (Figure 4.2b).

La ferrodiorite est caractérisée par des profils multiéléments plats (Figure 4.2c), dont les valeurs en éléments traces, sont comprises entre 1 et 6. Des anomalies positives en Nb, Ta et Ti, ayant des valeurs en éléments traces comprises entre 10 et 12, sont présentes. L'échantillon d'anorthosite montre un profil différent. Il est moyennement fractionné et présente un appauvrissement général en éléments traces par rapport aux ferrodiorites. Une anomalie positive en Ta et une anomalie négative en Zr sont observées dans le profil d'éléments traces de l'échantillon d'anorthosite.

Les spectres des terres rares des échantillons de ferrodiorites sont caractérisés par un patron plat ($La/Yb_N = 1,21$) et une légère anomalie positive en Eu. L'anorthosite est caractérisée par un spectre de terres rares fractionné ($La/Yb_N = 6,25$) et présente une anomalie positive en Eu (Figure 4.2d).

4.2.3 Formation de Waconichi

Les échantillons provenant de la Formation de Waconichi correspondent à cinq rhyolites porphyriques à phénocristaux de quartz et feldspaths, et une andésite. D'après le diagramme d'éléments immobiles de Winchester et Floyd (1977), tous les échantillons de rhyolites se situent dans le champ « rhyolite » (Figure 4.3a). Ces roches ont des ratios Zr/TiO_2 et Nb/Y allant de 0,2 à 0,4. L'échantillon d'andésite se positionne dans le champ « andésite » selon le diagramme de Winchester et Floyd (1977). Il est caractérisé par des ratios Zr/TiO_2 et Nb/Y de 0,03 et de 0,3 respectivement.

D'après le diagramme de Ross et Bédard (2009), l'affinité géochimique des rhyolites porphyriques varie de tholéitique à transitionnelle (Figure 4.3b), avec des ratios Th/Yb et Zr/Y dont les valeurs varient respectivement de 0,3 à 0,5 et de 1 à 10. Selon le même diagramme, l'échantillon d'andésite a une affinité tholéitique et présente des ratios Th/Yb et Zr/Y ayant des valeurs de 0,03 et de 1 respectivement.

Les profils multiéléments des rhyolites porphyriques de la Formation de Waconichi (Figure 3.3c) présentent des patrons plats et une anomalie négative en Ti. Les valeurs en éléments traces de ces roches sont comprises entre 70 et 100.

L'échantillon d'andésite présente aussi un profil plat et montre des anomalies négatives en Th, Ta, Zr, Hf et Ti (Figure 4.3c). L'andésite est caractérisée aussi par un enrichissement moins important en éléments traces les plus incompatibles par rapport aux rhyolites porphyriques.

Le spectre de terres rares est peu fractionné ($La/Yb_N = 3,1$) (Figure 4.3d), il montre un profil globalement plat et une légère anomalie négative en Eu. Cette dernière est plus prononcée pour les rhyolites porphyriques (valeur normalisée de l'anomalie entre 8 et 30).

4.2.4 Dykes

Les dykes qui ont fait l'objet d'une classification lithogéochimique ont été identifiés et échantillonnés sur les décapages des deux secteurs d'étude. Il s'agit d'échantillons de deux dykes mafiques qui recoupaient les granophyres des indices AXE et Ramsey, d'un dyke felsique tardif qui recoupe toutes les unités de l'indice Ramsey et d'un échantillon de dyke d'aplite granophyrique représentatif des aprites identifiées dans le secteur de Golden Moon.

En ce qui concerne les deux dykes mafiques, le diagramme TAS de Middlemost (1985) les définit comme étant des gabbros dioritiques (Figure 4.4a). Ils sont caractérisés par une composition de 55 %poids de SiO_2 et 5 %poids de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ en moyenne. Le dyke felsique tardif et l'aplite granophyrique se retrouvent dans le champ « granite », selon les critères du diagramme TAS (Figure 4.1a). Ces deux dykes felsiques sont caractérisés par une teneur en $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ comprise entre 5 et 6 %poids alors que la composition moyenne en SiO_2 est de 80 %poids.

D'après le diagramme Th/Yb vs Zr/Y de Ross et Bédard (2009), l'échantillon d'aplite granophyrique et celui provenant du dyke mafique de l'indice Ramsey ont une affinité transitionnelle, tandis que le dyke felsique tardif de l'indice Ramsey et le dyke mafique de l'indice AXE ont une affinité calco-alcaline (Figure 4.4b).

Les compositions en éléments traces de ces dykes, représentés par le diagramme multiéléments normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988 ; Figure 4.4c), sont caractérisées par un léger fractionnement pour l'aplite granophyrique et une anomalie négative en Ti. Le dyke felsique tardif est caractérisé par un fractionnement modéré et des anomalies négatives importantes en La, Ce, Pr, Nd et Ti ayant des valeurs moyennes de 10 (Figure 4.4c). Les profils des dykes mafiques sont plats, avec un léger enrichissement en terres rares légères par rapports aux lourdes et de faibles anomalies négatives en Nb et Ti.

Les spectres des terres rares (Figure 4.4d) des deux dykes mafiques sont légèrement différents. En effet, le dyke mafique de l'indice Ramsey a un patron plat et des valeurs en éléments traces de 10 en moyenne. L'échantillon provenant du dyke mafique de l'indice AXE montre un fractionnement modéré et il est caractérisé par un enrichissement important en terres rares légères par rapport aux lourdes ($La/Yb = 9,15$). Le dyke felsique tardif et le dyke d'aplite sont caractérisés par des anomalies négatives en Ti et leur contenu global en terres rares diffère (Figure 4.4d). Aussi, le dyke d'aplite a un patron plat alors le dyke tardif montre un léger fractionnement inverse caractérisé par un enrichissement modéré en terres rares lourdes par rapport aux terres rares légères.

4.3 Diagrammes Harker

Plusieurs diagrammes de Harker (SiO_2 vs un autre élément) ont été réalisés pour les roches du CLD (Figure 4.5). Pour cette étude, uniquement les éléments majeurs sont considérés dans la réalisation de ces diagrammes. Ces derniers permettent de mettre en évidence l'existence de corrélations entre SiO_2 et les éléments majeurs, ce qui pourrait, dans certains cas, indiquer que les roches étudiées sont reliées à un processus de différenciation ou si le fractionnement a été perturbé au cours évolution du magma. Par conséquent, le SiO_2 est utilisé comme indice de différenciation.

Les teneurs en Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , P_2O_3 et MnO présentent une décroissance progressive en fonction de l'augmentation du contenu en SiO_2 , depuis les termes les moins différenciés vers les termes les plus felsiques (granophyres).

Une corrélation positive de la teneur en SiO_2 avec celles en Na_2O et K_2O est observée, ce qui se traduit par une augmentation des concentrations de ces éléments depuis les termes mafiques vers les termes les plus différenciés. Néanmoins, une grande dispersion est observée dans les granophyres, dont les concentrations en Na_2O et K_2O varient de façon importante.

Les variations du Cr_2O_3 et Al_2O_3 , dans leur ensemble, montrent des tendances atypiques par rapport aux autres éléments majeurs. En effet, les concentrations de ces éléments sont restées globalement constantes tout au long de la différenciation du magma. Néanmoins, de légères augmentations peuvent être notées, de l'ordre de 2 % pour l' Al_2O_3 et 0,03% pour le Cr_2O_3 .

Dans leur ensemble, les diagrammes Harker permettent de tirer les constats suivants. Les variations des éléments majeurs en fonction de la silice pourraient être expliquées par un processus de cristallisation fractionnée depuis les termes mafiques du magma du CLD vers les termes les plus felsiques ; à l'occurrence les granophyres. La différenciation magmatique, cependant, n'explique pas les variations en Na_2O et K_2O qui pourraient être dues à un processus d'altération hydrothermale.

4.4 Comparaison lithogéochimique entre les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi

Dans l'optique de déterminer la relation génétique entre les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi, il convient de comparer la chimie des roches totales disponibles pour ces deux unités. Pour ce faire, des diagrammes binaires de classification utilisant des ratios d'éléments immobiles et des diagrammes de variations des éléments traces (multiéléments) et d'éléments de terres rares (spectre des terres rares), ont servi d'outils de comparaison (Figure 4.6).

Les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi se trouvent tous dans le champ « rhyolite » selon le diagramme de classification de Winchester et Floyd (1977). Il faut noter dans le cas des roches intrusives, ce champ correspond à des « granites » (Figure 4.6a).

D'après le diagramme de discrimination d'affinité géochimique de Ross et Bédard (2009), les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi sont caractérisés par une affinité qui varie de tholéiitique à transitionnelle, mais dont la majorité des échantillons est définie comme tholéiitique (Figure 4.6b). Les valeurs du ratio Th/Yb sont quasiment constantes (0,3 en moyenne) pour ces deux unités, alors que le ratio Nb/Y variait de 1 à 10.

Les variations en éléments traces, présentée par le diagramme multiéléments (Figure 4.6c), montre des signatures similaires pour les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi. Cela se caractérise par un profil plat autour d'une valeur normalisée de 100 en moyenne et des anomalies négatives en Ti de valeur normalisée variant entre 1 et 3.

Les spectres d'ETR des granophyres et des rhyolites de la Formation de Waconichi sont également identiques. Les deux unités sont caractérisées par un profil plat normalisé et une anomalie négative en Eu.

D'après le diagramme multiéléments et le spectre des ETR, les unités mafiques du CLD, à savoir la ferrodiorite et l'anorthosite, montrent des profils et des spectres d'ETR dont les patrons sont similaires à ceux des granophyres, à l'exception des différences au niveau des anomalies en Ti, et Eu. En effet, ces trois unités sont caractérisées par des patrons plats, très peu fractionnés en éléments traces et en ETR. Toutefois, un enrichissement progressif en éléments traces et en ETR est observé de l'unité la plus mafique du CLD (l'anorthosite) vers l'unité la plus felsique du CLD à savoir le granophyre.

4.5 Altérations hydrothermales

Les résultats de caractérisation des altérations hydrothermales des granophyres du CLD ainsi que des rhyolites encaissantes sont présentés par des histogrammes qui montrent les valeurs moyennes des bilans de masses calculés (Figure 4.7) et des boîtes à moustaches (Figure 4.8) pour les indices d'altération de la Consonorm-LG.

4.5.1 Bilan de masse par modélisation de précurseur

Les bilans de masse sont des méthodes de modélisation qui permet de déterminer la composition en éléments majeurs du précurseur (roche fraîche) calculée à partir d'une roche altérée. Une fois le précurseur calculé, le logiciel le compare à la roche altérée analysée grâce à un calcul de bilan de masse, qui permet d'estimer la quantité d'éléments gagnés ou perdus par une roche suite à une altération hydrothermale. Cette approche permet de calculer le meilleur précurseur pour chaque échantillon (Trépanier et al., 2016). Enfin, elle permet d'éviter de choisir spécifiquement un précurseur, ce qui est un avantage quand les roches ont enregistré une altération hydrothermale généralisée.

Les calculs de bilans de masse sont présentés de manière absolue (en grammes de masse gagnée ou perdue pour 100g de précurseur). Le gain ou la perte sont considérés significatifs lorsque le changement de masse est supérieur ou inférieur à 1, pour les éléments présents en faible concentration (< 5%wt par exemple). Le tableau 4.2 présente la synthèse des résultats des calculs de bilans de masse pour les roches considérées.

Les granophyres à grains grossiers montrent globalement un léger gain en SiO_2 et peu de variation de masse en ce qui concerne les autres éléments majeurs considérés pour le calcul de (Figure 4.7a). Le gain en SiO_2 atteint jusqu'à 4g, ce qui est négligeable en considérant que la silice est l'élément le plus abondant des granophyres. Pour la silice, une silicification se traduit généralement par un gain d'au moins 10g.

Les granophyres à grains fins sont caractérisés par des pertes en Na_2O et K_2O (Figure 4.7c) atteignant jusqu'à plus de 2g, une perte modérée en SiO_2 et un léger gain en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$. Les pertes en alcalins traduisent la destruction des feldspaths par les fluides hydrothermaux. Cela se manifeste par une altération (transformation) des feldspaths en séricite (séricitisation).

Les mélanogranophyres montrent, dans leur ensemble, des changements de masses importants pour tous les éléments majeurs, à l'exception de CaO (Figure 4.7d). Ces roches sont caractérisées par un gain en SiO_2 d'environ 6g (Figure 3.6a), un gain en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ atteignant jusqu'à 5,5g (Figure 4.7b) et une perte en alcalins de l'ordre de 5g (Figure 4.7c). Ces changements sont caractéristiques des altérations en séricite pour les pertes en alcalins et en chlorite pour les gains considérables en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$.

Les rhyolites porphyriques montrent globalement un gain négligeable en SiO_2 (12g sur les 100g de la masse ; Figure 4.7a), un léger gain en $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (Figure 4.7b) et une perte importante en Na_2O et K_2O de plus de 2g (Figure 4.7c). L'interprétation est que ces changements de masse indiquent que ces unités ont subi une silicification modérée et une légère séricitisation.

Tableau 4.2 : Synthèse des résultats de calculs de bilans masse (Trépanier et al. 2016).

Échantillon	Fe ₂ O ₃ T (g)	K ₂ O (g)	MgO (g)	Na ₂ O (g)	SiO ₂ (g)	K ₂ O+Na ₂ O (g)	Fe ₂ O ₃ +MgO (g)	CaO (g)
A009A1	1,33	-2,24	-0,10	0,50	7,36	-1,74	1,23	0,00
A011A1	2,12	-4,01	0,13	2,22	3,34	-1,79	2,25	0,00
C070A1	0,23	-1,64	-0,18	1,14	10,31	-0,50	0,05	0,00
C071A1	-1,61	-2,63	-0,11	1,43	14,62	-1,21	-1,72	0,00
C072A1	4,79	-3,18	3,12	-3,20	6,36	-6,38	7,91	0,00
C073A1	-0,74	-0,52	-0,15	-2,31	8,38	-2,82	-0,89	0,00
C077A1	6,60	-2,53	1,00	-2,89	10,40	-5,41	7,60	0,00
C078A1	2,89	-3,76	0,59	-0,72	1,81	-4,48	3,48	0,00
C081A3	0,24	-1,56	-0,08	1,00	6,68	-0,55	0,16	1,61
C081A4	-1,04	-3,15	-0,18	1,53	2,83	-1,62	-1,22	0,00
C081B1	0,47	-2,80	-0,19	2,11	19,28	-0,70	0,27	0,00
C081B3	-0,05	-3,06	-0,19	2,02	10,06	-1,04	-0,24	0,00
C086A1	-0,32	-3,97	0,00	1,45	2,13	-2,52	-0,32	0,64
C087A1	1,46	-3,13	-0,01	0,69	0,32	-2,44	1,45	-0,18
C087A2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C107A1	1,46	-3,01	-0,04	0,72	4,70	-2,28	1,43	0,00
C107A2	1,79	-3,21	-0,10	1,35	4,35	-1,87	1,69	0,00
C107A3	2,18	-3,01	-0,10	1,30	6,19	-1,71	2,08	-0,01
C107B1	0,39	-2,34	0,06	-0,87	-0,95	-3,22	0,45	0,00
C107C1	1,03	-2,76	0,02	0,01	-1,89	-2,75	1,05	0,00
C108A1	1,12	-1,86	0,01	0,38	8,56	-1,48	1,13	1,18
C108B1	0,83	-1,63	-0,09	0,55	-1,29	-1,08	0,74	0,00

4.5.2 Indices d'altération de la Consonorm-LG

Cette méthode permet de calculer des minéraux normatifs et de définir des indices d'altération. Les indices calculés pour ce projet sont ALT_CARB (carbonatation), ALT_SER (séricitisation) et ALT_CHLO (chloritisation) (Figure 4.8). Le calcul a été effectué selon les conditions du modèle SV350 (schistes verts 350°), soit en considérant une pression de 2,5 kbar et une température de 350° (Trépanier et al. 2015). La valeur de chaque indice est représentée sous forme de boîte à moustaches. La synthèse des résultats des calculs des indices d'altération est présentée dans le tableau 4.3.

La carbonatation observée (Figure 4.8a) est très intense pour les granophyres à grains grossiers, avec la moyenne des échantillons qui sont à plus de 50% pour un indice qui varie entre 0 et 100%. Les granophyres à grains fins et les rhyolites porphyriques montrent une carbonatation modérée avec des moyennes légèrement en dessous de 40%. Les échantillons de mélanogranophyres ne présentent pas de carbonatation car la valeur de l'indice est inférieure à 10%.

La figure 4.8b, montre qu'une chloritisation modérée, dont la valeur moyenne de l'indice est de 16%, a été enregistrée dans les mélanogranophyres. L'indice de séricitisation (Figure 4.8c) présente des valeurs élevées pour les mélanogranophyres et les rhyolites porphyriques. Ces valeurs sont de l'ordre de 14% en moyenne pour ces deux unités. Une séricitisation négligeable est présente aussi dans les granophyres à grains grossiers avec une valeur moyenne d'environ 2% de l'indice d'altération en séricite.

Dans ensemble, les échantillons étudiés ont subi une carbonatation importante, qui est principalement observée dans les granophyres à grains grossiers, ceux à grains fins ainsi que dans les rhyolites porphyriques. L'altération en chlorite (chloritisation) est observée uniquement dans les échantillons de mélanogranophyre. Elle est faiblement présente dans les granophyres à grains grossiers. Enfin, l'altération en séricite est présente dans les rhyolites de manière modérée, moyennement dans les mélanogranophyres et faiblement dans les granophyres à grains grossiers et à grains fins.

Tableau 4.3 : Synthèse des principaux indices d'altération calculés selon la méthode du Consonorm-LG (Trépanier et al. 2015).

Échantillon	ALT_CHLO	ALT_SER	ALT PARA	ALT PHYLLLO	ALT_CHLO CC TLC	ALT_SER_CARBS	ALT_CARBS
A006A1	28,56	0,11	5,4	34,07	5,52	0	4,02
A009A1	4,25	4,55	0	8,8	27,22	16,95	15,34
A011A1	0	0	0	0	48,08	17,11	45,06
C015A1	2,19	0	0	2,19	0	0	0
C016A1	11,83	0	0	11,83	0	0	0
C018C1	4,95	0	0	4,95	1,16	0	0,41
C070A1	2,38	4,74	0	7,13	11,04	7,16	13,42
C071A1	0,53	0	0	0,53	65,2	63,27	72,7
C072A1	30,8	21,5	29,61	81,91	0	1,32	1,7
C073A1	2,87	43,95	0	46,82	51,85	63,72	62,96
C077A1	22,25	22,3	27,83	72,39	10,05	1,84	8,55
C078A1	13,32	3,84	17,1	34,27	11,15	0	4,94
C081A3	2,16	0	0	2,16	32,28	11,89	18,68
C081A4	0	0	0	0	64,91	61,89	76,66
C081B1	2,46	9,1	0	11,56	27,66	49,52	32,09
C081B3	2,48	0,44	0	2,92	44,81	44,25	31,86
C081C1	10,46	0	0	10,46	68,34	35,64	29,83
C081D1	0,99	9,09	0	10,08	50,28	55,44	52,58
C086A1	3,34	1,92	0,19	5,45	35,62	0	19,2
C086B1	13,08	0	0	13,08	48,84	4,17	16,61
C087A1	4,38	3,16	0	7,54	0	93,23	97,6
C087A2	0	0	0	0	10,77	57,78	98,09
C087B1	4,58	15,6	0	20,18	0	85,8	97,26
C107A1	3,18	0	0	3,18	0	93,97	97,95
C107A2	3,23	0	0	3,23	0	81,85	67,22
C107A3	1,28	0	0	1,28	0	91,7	98,14
C107B1	3,03	0,6	0	3,63	54,96	62,62	63,32
C107C1	4,18	4,31	0	8,49	0	69,65	60,24
C107D1	14,28	0	0	14,28	62,32	44,76	32,11
C108A1	0	0	0	0	55,37	7,62	24,49
C108B1	2,43	0	0	2,43	20,93	3,47	7,97

ALT= Altération; CHLO= Chlorite; SER= Séricite; PARA= Paragonite; PHYLLLO= Phyllosilicate; CC= Calcite; TLC= Talc; CARBS= Carbonates.

4.6 Synthèse

La classification lithogéochimique révèle que le CLD a une affinité magmatique tholéiitique pour les phases mafiques (anorthosite et ferrodiorite) et tholéiitique à transitionnelle pour la phase felsique qui correspond aux granophyres. Cela a été définie par le diagramme de discrimination de Ross et Bédard (2009) et confirmée par les diagrammes multiéléments et spectres des terres rares de ces unités qui sont caractérisées par des profils plats. Toutefois, les concentrations en éléments traces et en ETR des unités du CLD montrent un enrichissement progressif en éléments traces incompatibles de la phase mafique (anorthosite) à la phase felsique représentée par les granophyres. Il s'agit probablement de la conséquence de la différenciation du magma du CLD au cours de son évolution depuis les phases mafiques vers les phases felsiques.

Les unités de la Formation de Waconichi, qui encaissent le CLD, sont caractérisées par une affinité magmatique tholéiitique à transitionnelle. Les rhyolites porphyriques de cette formation présentent des caractéristiques géochimiques très similaires, voire identiques aux granophyres du CLD. Cela s'observe par le diagramme de Ross et Bédard (2009) où les ratios Th/Yb et Nb/Y sont identiques pour ces deux unités. De plus, ces deux unités sont caractérisées par des profils multiéléments et spectres de terres rares similaires, avec le même degré de fractionnement faible et les mêmes anomalies négatives en Ti et en Eu. Ces caractéristiques géochimiques identiques entre les granophyres et les rhyolites porphyriques suggèrent que ces deux unités sont comagmatiques.

Le dyke d'aplite granophyrique présente des caractéristiques lithogéochimiques qui sont identiques à celles des granophyres étudiés. Il pourrait donc s'agir d'un dyke issue du magma qui a formé les granophyres. Le dyke felsique tardif identifié sur l'indice Ramsey, a une affinité calco-alcaline, mais présente des profils multiéléments et des terres rares semblables au dyke d'aplite

granophyrique, à l'exception des anomalies en La, Ce, Pr, Nd et Ti observées pour le dyke felsique tardif. Les deux dykes mafiques identifiés dans la zone d'étude ont des affinités magmatiques différentes. En effet, le dyke mafique de l'indice AXE est d'affinité calco-alcaline tandis que celui de l'indice Ramsey est transitionnelle. Malgré cette différence, ces deux dykes mafiques montrent des similarités de leur spectre des ETR et des éléments traces, de même que des anomalies négatives identiques. Ils sont donc probablement cogénétiques, mais sans lien génétique avec le CLD.

Les diagrammes de Harker sont réalisés pour observer les variations des éléments majeurs au cours de l'évolution magmatique du CLD. Ils ont montré des corrélations dans la distribution des éléments majeurs en fonction de la SiO_2 . Ce comportement global des éléments majeurs semble compatible avec une différenciation du magma du CLD par cristallisation fractionnée. Néanmoins, le Na_2O et le K_2O montrent des variations aléatoires, incohérentes avec une simple différenciation magmatique du CLD. Ces variations s'expliquent par des processus d'altération hydrothermale.

Selon les bilans de masse, les granophyres ont enregistré une altération modérée en séricite, expliquant les variations chaotiques en Na_2O et le K_2O . Par contre, les rhyolites ont subi une silicification faible à modérée tandis que les mélanogranophyres ont enregistré la chloritisation importante. Les indices d'altérations de la Consonorm-LG indiquent une carbonatation importante des granophyres à grains grossiers, ceux à grains fins ainsi que dans les rhyolites porphyriques ; une chloritisation présente dans les mélanogranophyres et une séricitisation dans les granophyres à grains fins et les rhyolites porphyriques. Globalement les roches étudiées dans ce projet ont subi des altérations en séricite, en carbonates et en chlorite. Ces altérations sont probablement l'expression des systèmes des minéralisations de type magmato-hydrothermales de la région.

FIGURES DU CHAPITRE IV

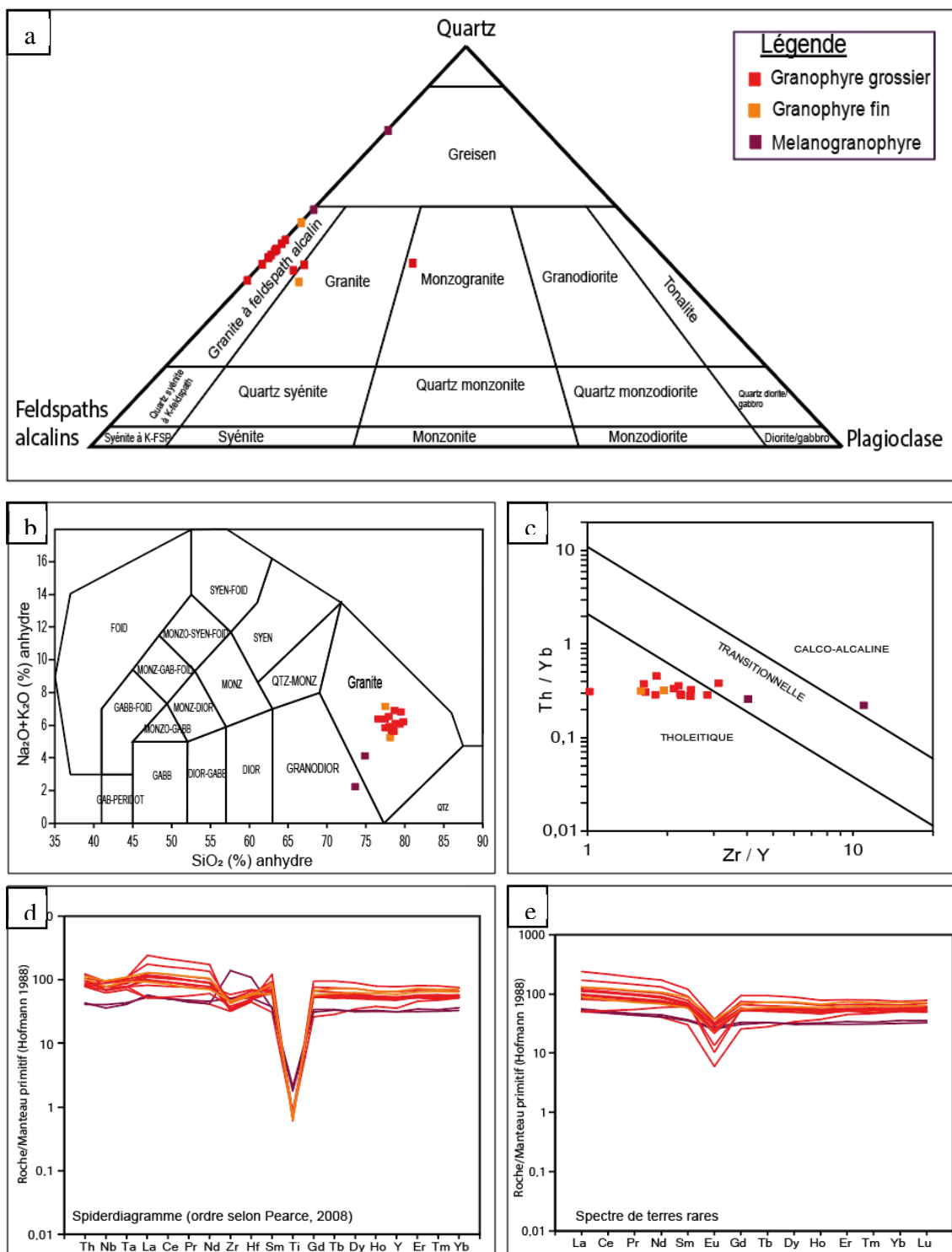


Figure 4.1 : Diagrammes de classification lithogéochimique des granophyres du CLD a) Diagramme ternaire de classification QFP (quartz - feldspaths alcalin – plagioclase ; Streckeisen 1967). b) Classification selon le diagramme TAS (Na₂O+K₂O vs SiO₂ ; Middlemost 1985). c) Diagramme Th/Yb vs Zr/Y définissant l’affinité magmatique (Ross et Bédard 2009). d) Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif (Hofmann 1988), éléments classés selon l’ordre de Pearce (2008). e) Spectre des éléments de terres rares (ETR) normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988).

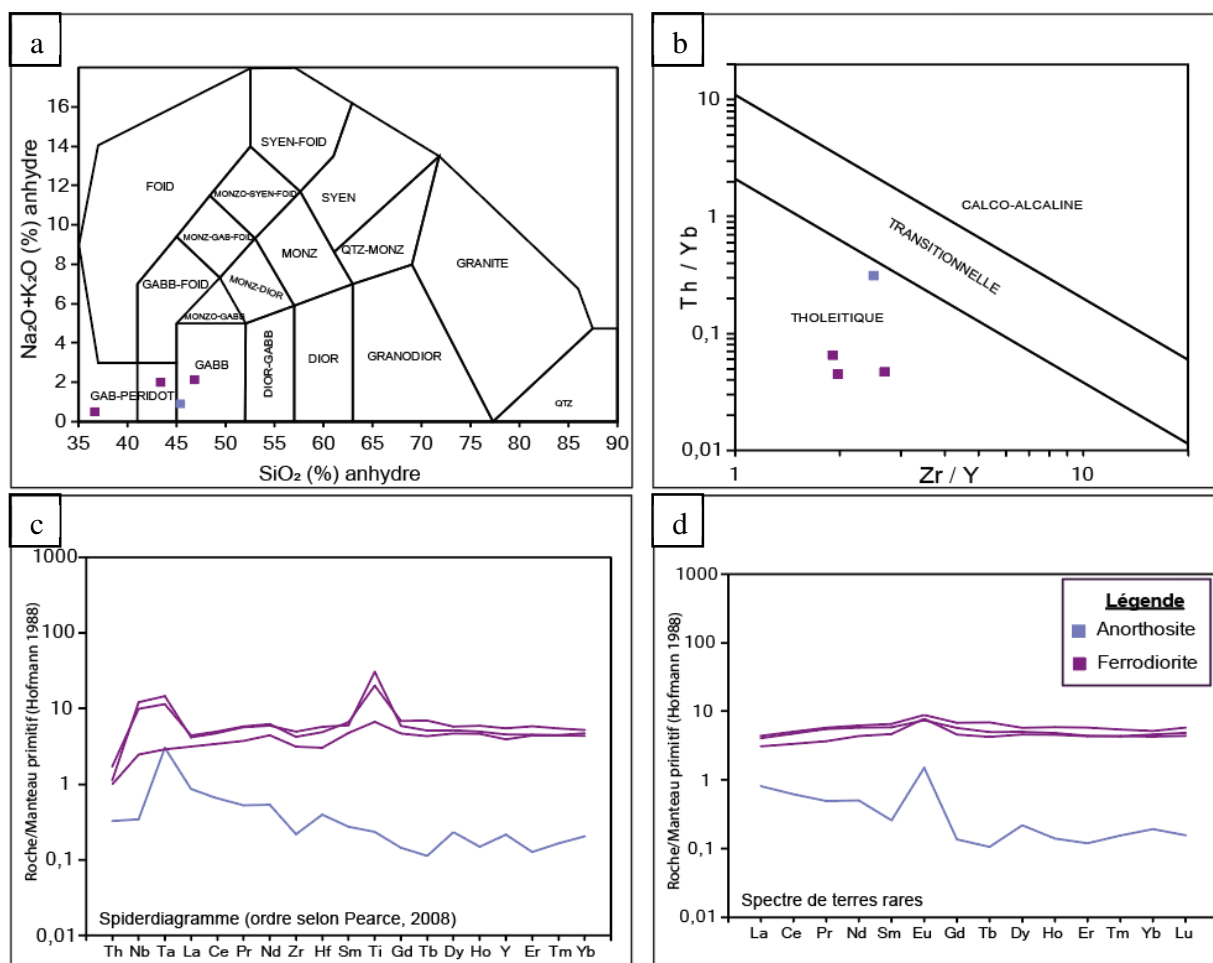


Figure 4.2 : Diagrammes binaires de classification lithogéochimique des échantillons provenant de la partie mafique du CLD : la ferrodiorite (en mauve) et l'anorthosite (en bleu). a) Classification selon le diagramme TAS ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 ; Middlemost 1985). b) Diagramme Th/Yb vs Zr/Y définissant l'affinité magmatique (Ross et Bédard 2009). c) Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif (Hofmann 1988), éléments classés selon l'ordre de Pearce (2008). d) Spectres des éléments de terres rares normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988).

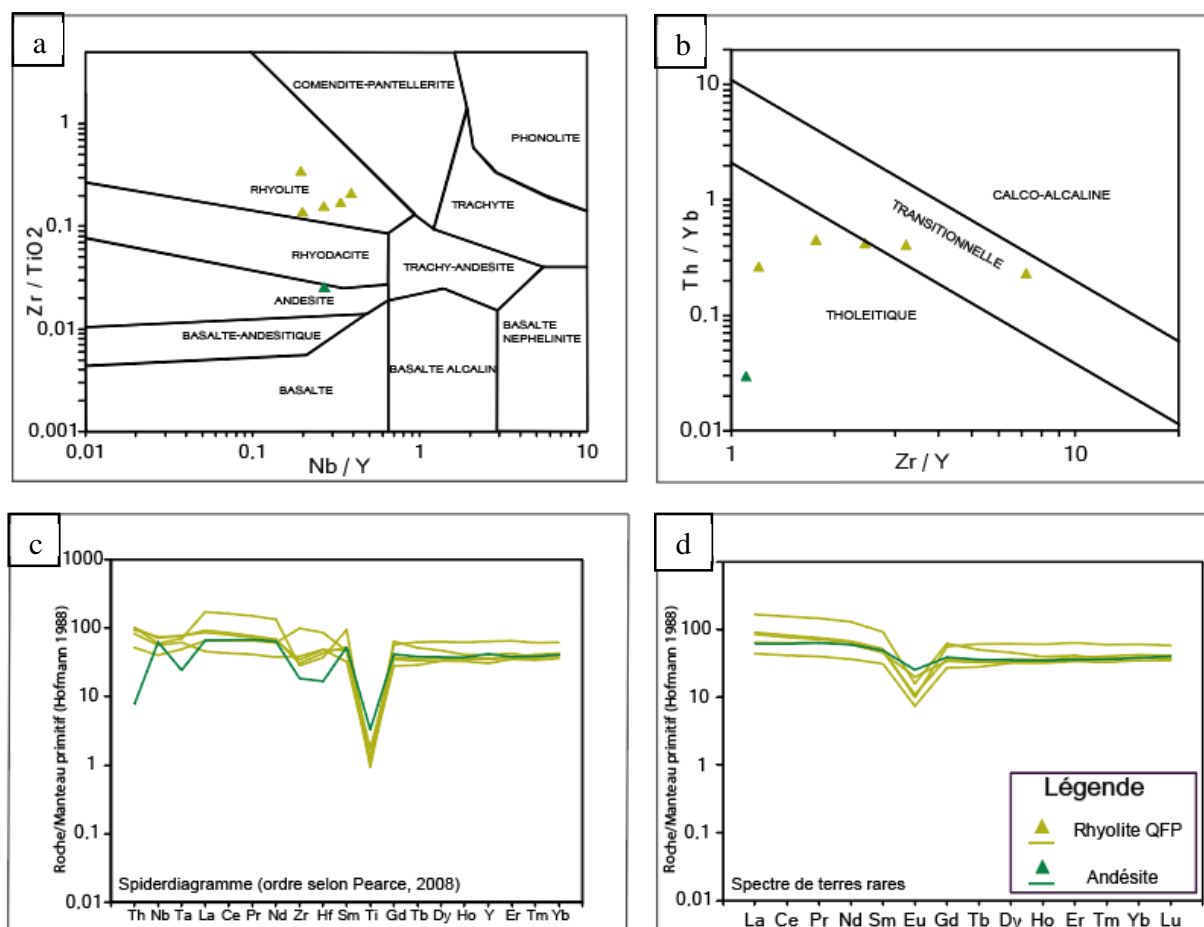


Figure 4.3 : Diagrammes binaires de classification lithogéochimique des unités échantillonnées dans la Formation de Waconichi : rhyolite porphyrique (vert olive), andésite (en vert foncé). a) Classification selon les ratios Zr/TiO_2 vs Nb/Y (Winchester et Floyd 1977). b) Diagramme Th/Yb vs Zr/Y définissant l'affinité magmatique (Ross et Bédard 2009). c) Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif (Hofmann 1988), éléments classés selon l'ordre de Pearce (2008). d) Spectre des éléments de terres rares normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988).

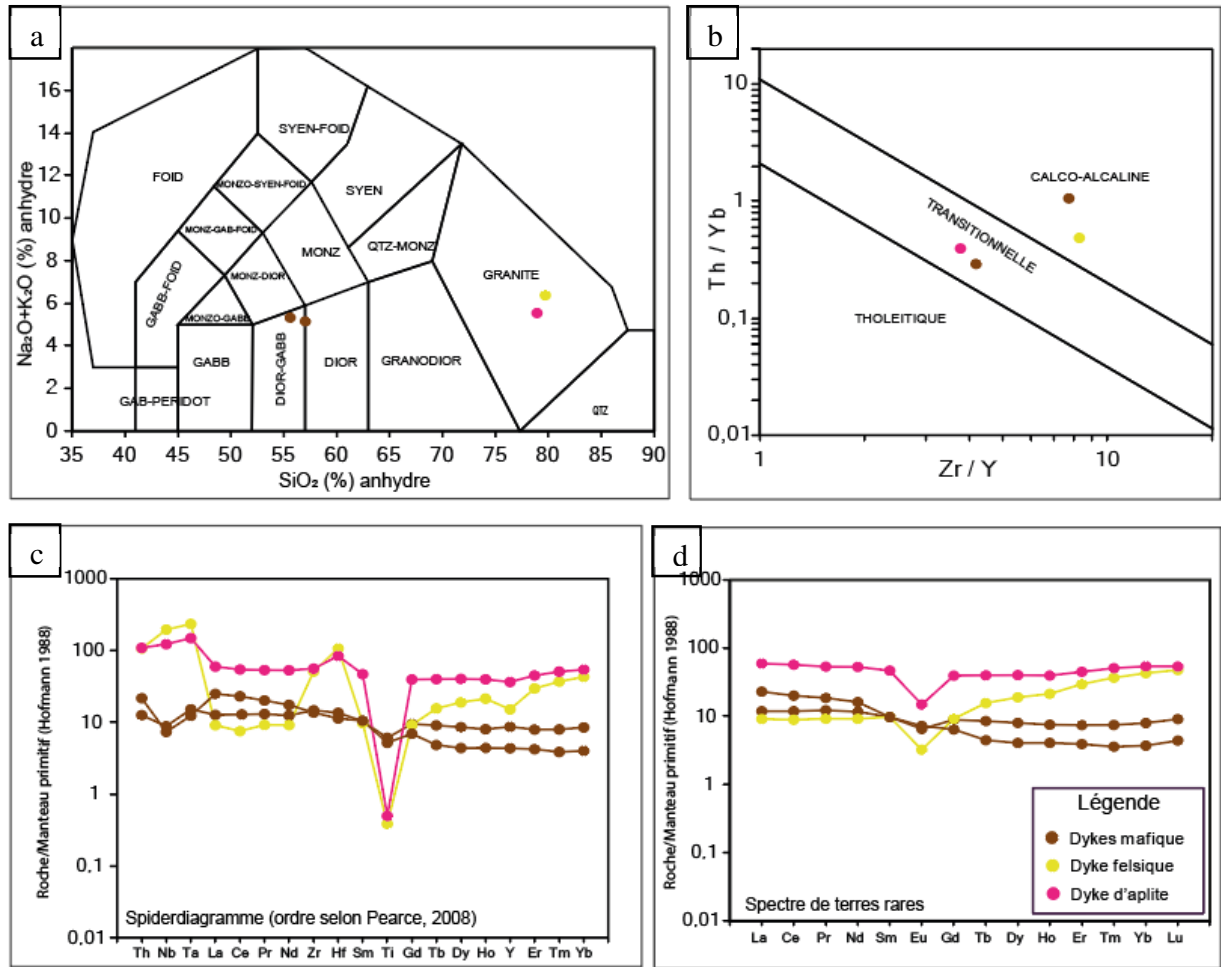
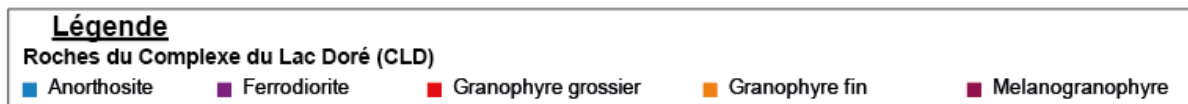
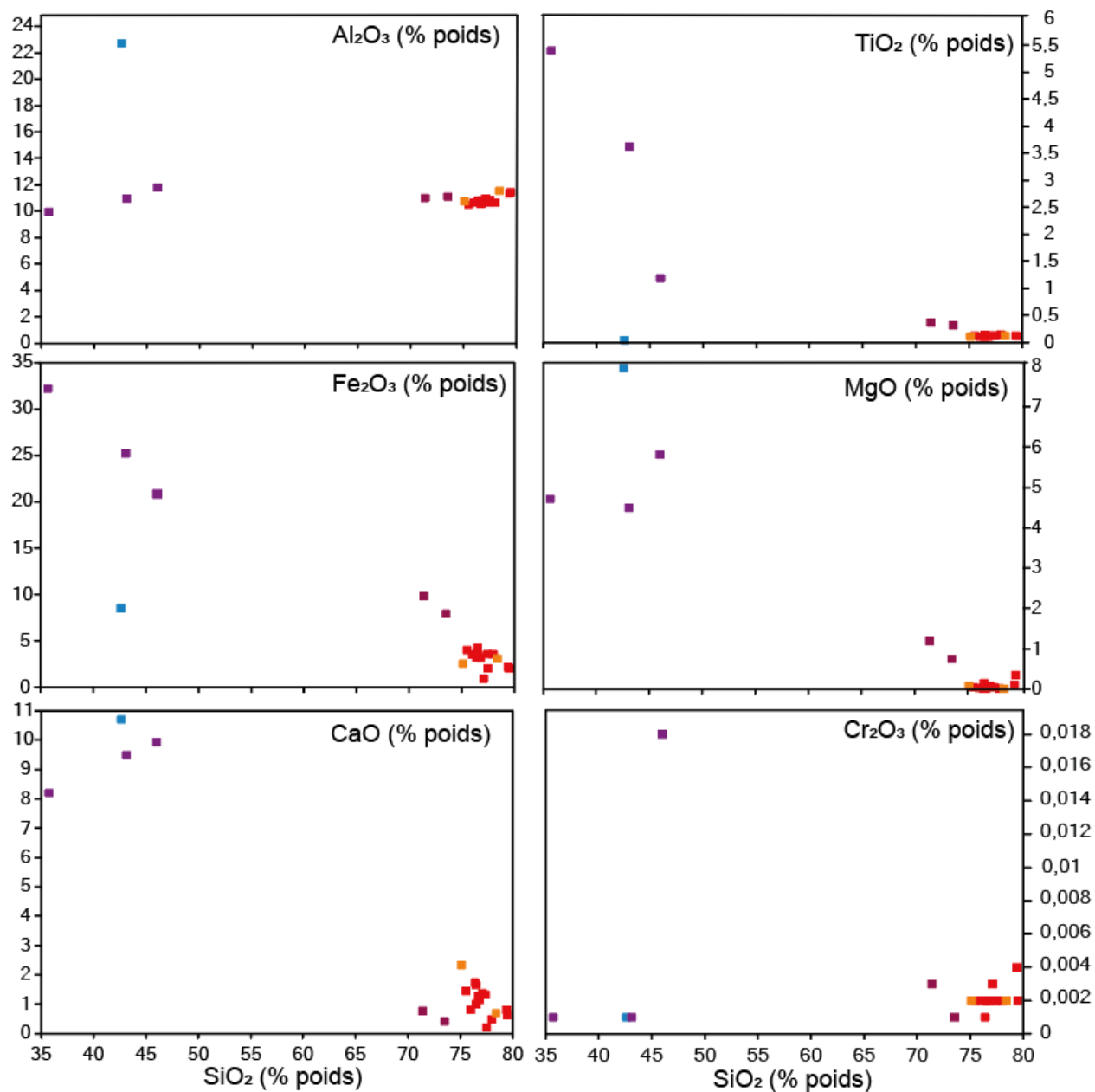


Figure 4.4 : Diagrammes binaires de classification lithogéochimique des dykes identifiés dans la zone d'étude. a) Classification selon le diagramme TAS ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 ; Middlemost 1985). b) Diagramme Th/Yb vs Zr/Y définissant l'affinité magmatique (Ross et Bédard 2009). c) Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif (Hofmann 1988), éléments classés selon l'ordre de Pearce (2008). d) Spectre des éléments de terres rares normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988).



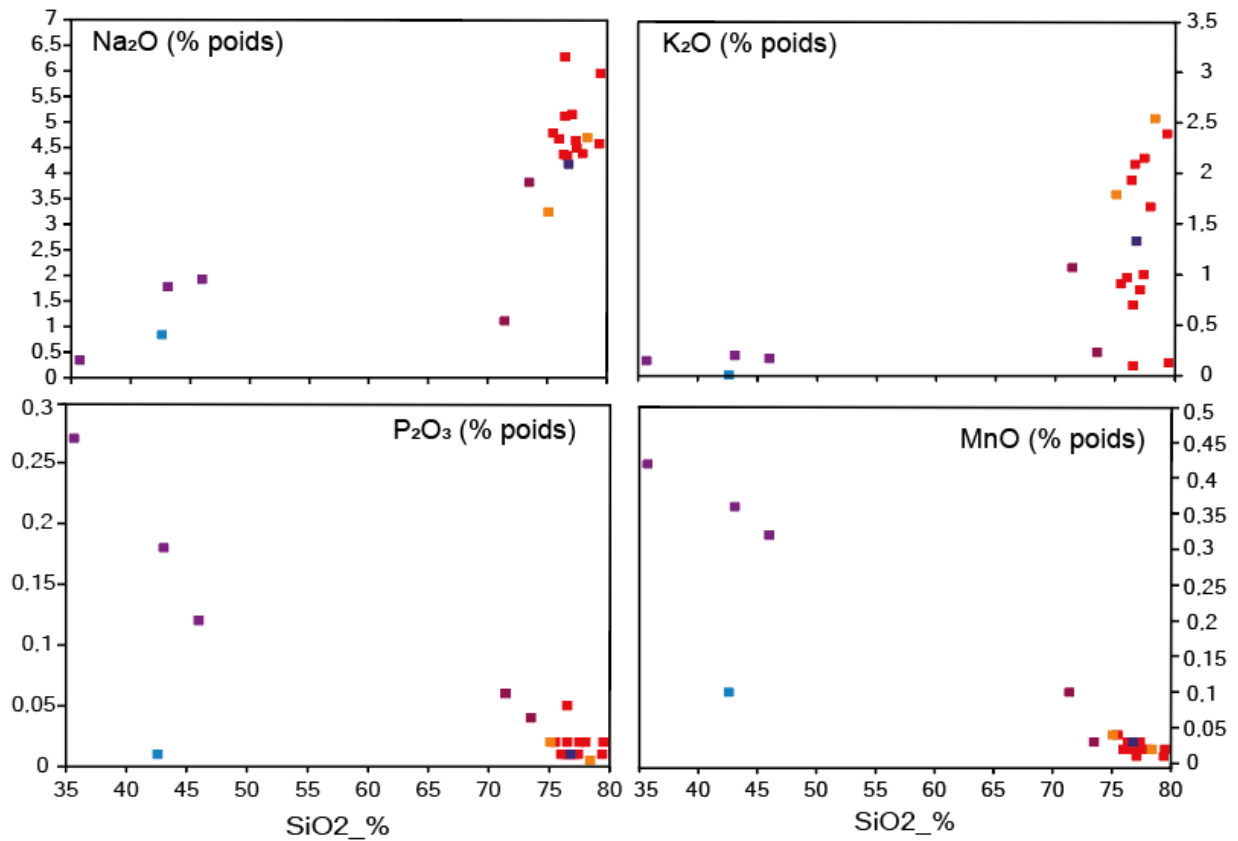


Figure 4.5 : Diagrammes Harker montrant les corrélations entre la SiO₂ et les éléments majeurs des unités du CLD au cours de la différenciation du magma.

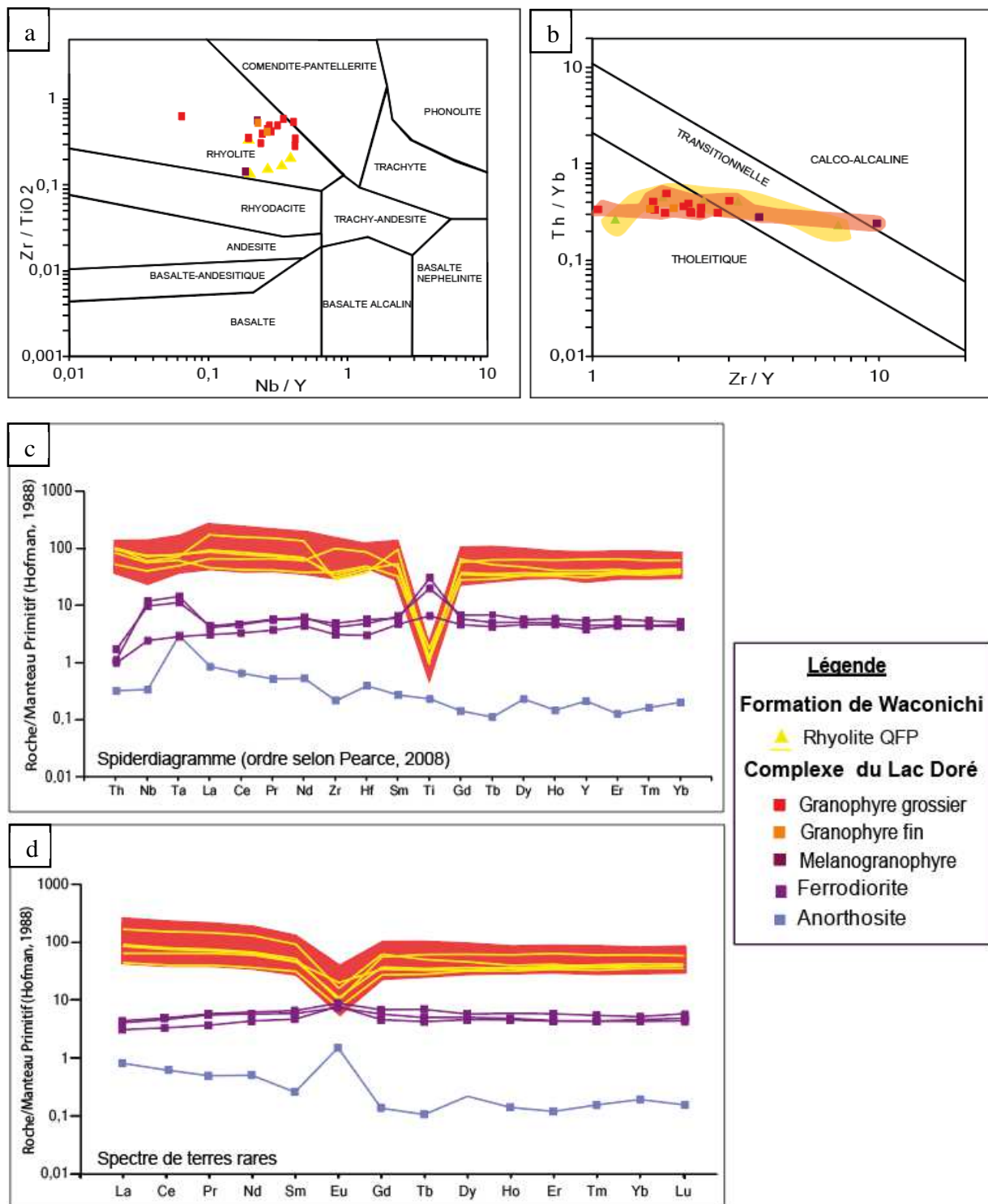


Figure 4.6 : Comparaison lithogéochimique entre les granophyres du CLD et les rhyolites de la Formation de Waconichi a) Classification selon les ratios Zr/TiO_2 vs Nb/Y (Winchester et Floyd 1977). b) Diagramme Th/Yb vs Zr/Y définissant l'affinité magmatique (Ross et Bédard 2009). c) Diagramme multiéléments normalisé au manteau primitif (Hofmann 1988), éléments classés selon l'ordre de Pearce (2008). d) Spectre des éléments de terres rares normalisés au manteau primitif (Hofmann 1988).

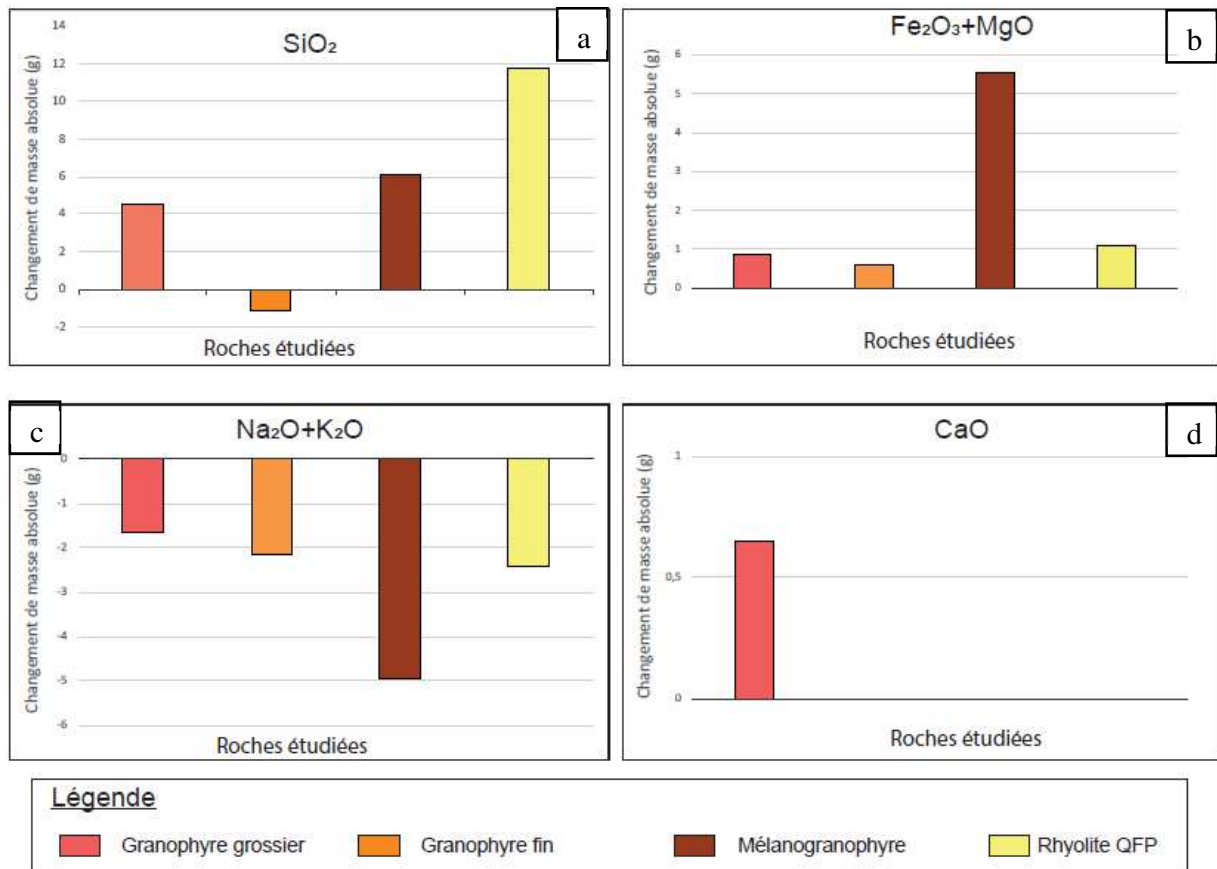


Figure 4.7 : Histogrammes présentant les valeurs des calculs des bilans de masses pour les granophyres et les rhyolites de la formation de Waconichi. a) Changement de masse en silice. b) Changement de masse en $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$. c) Changement de masse en $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$. d) Changement de masse en CaO . Il s'agit des moyennes des valeurs pour chacune des unités représentées.

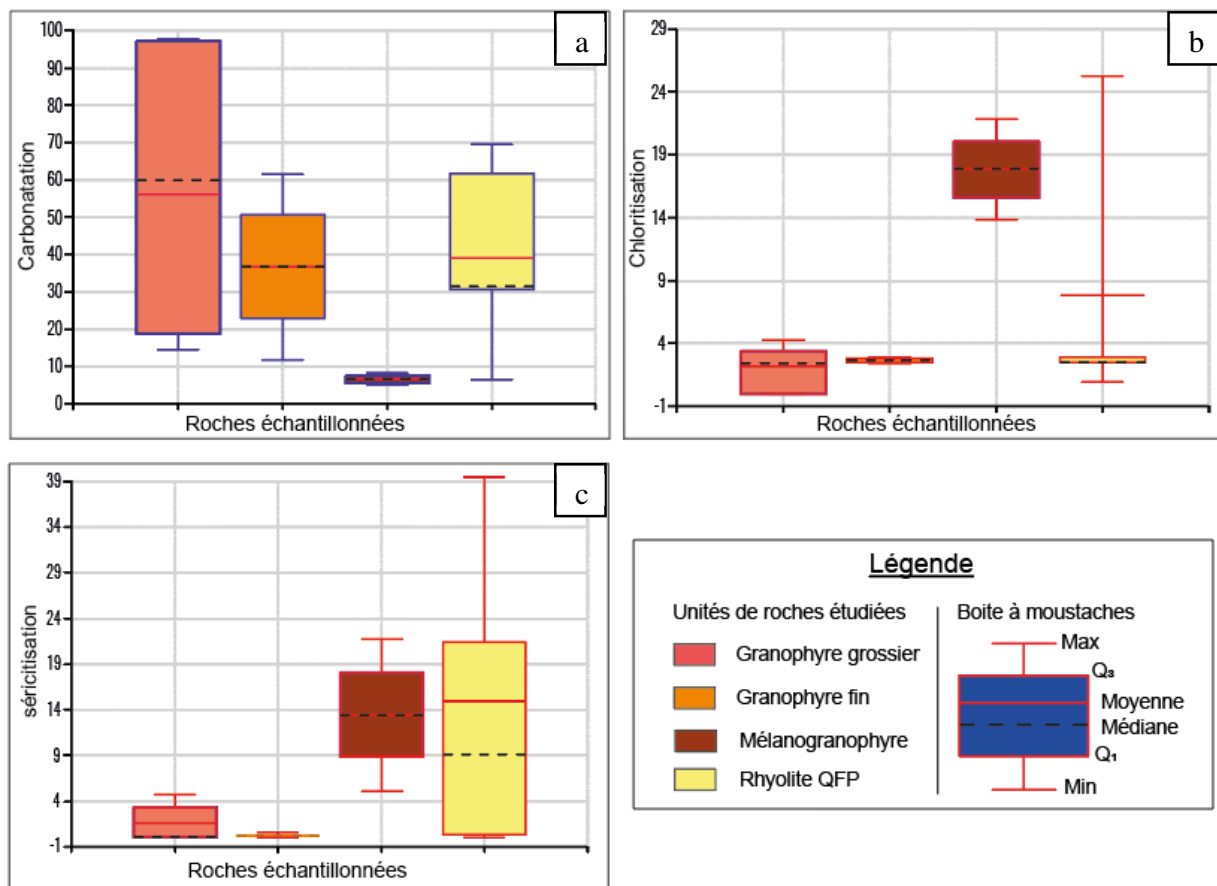


Figure 4.8 : Diagrammes boîtes à moustaches présentant les indices d'altérations calculés à partir du calcul normatif « Consonorm LG » pour les granophyres et les rhyolites de la formation de Waconichi. a) Indice d'altération en carbonate. b) Indice d'altération en chlorite. c) Indice d'altération en séricite.

CHAPITRE V

MINÉRALISATIONS DANS LES GRANOPHYRES DU CLD

5.1 Introduction

L'un des objectifs de ce projet de maîtrise est d'étudier les minéralisations encaissées par les granophyres du CLD dans l'optique de déterminer leur relation avec les types de minéralisations connus dans la région de Chibougamau. Pour ce faire, quatre décapages correspondant à des indices minéralisés, présents dans la zone d'étude, ont été cartographiés et caractérisés (Figures 2.2 à 2.6).

Ce chapitre présente dans un premier temps, une description des styles de minéralisation présente sur chaque décapage. Ensuite, la deuxième partie portera sur la pétrographie et la paragenèse minéralogique des principales minéralisations. Puis, la troisième partie s'attardera à la comparaison des signatures en éléments traces de pyrites analysées au LA-ICP-MS. Il s'agit de pyrites provenant des principales minéralisations des quatre indices étudiés. Ces signatures en éléments traces sont par la suite comparées à celles des pyrites provenant de différentes minéralisations connues dans la région de Chibougamau. Il s'agit des systèmes magmato-hydrothermaux, SMV et Au-orogénique (Pilote et Guha, 2006 ; Leclerc et al. 2012). Enfin, la dernière section de ce chapitre consistera à la synthèse de l'étude des minéralisations.

5.2 Styles des minéralisations

Les minéralisations décrites dans cette section sont celles qui sont présentes sur les décapages de l'indice Ramsey (21,94g/t Au, 171,40g/t Ag et 6,0 % Cu; Tremblay 2014), de l'indice GRH (15,1g/t Au, 38,1g/t Ag, 0,56% Cu et 0,34% Zn; Sansfaçon 2017), de l'indice AXE (37,7g/t Au, 73,9g/t Ag, 2,5% Cu et 0,03% Zn; Sansfaçon, 2017) et de l'indice Golden Moon (9,6g/t Au, 4,5g/t Ag, 0,05% Cu et 0,03% Zn; Sansfaçon, 2017). Dans leur ensemble, ces minéralisations sont encaissées par les granophyres du CLD (Figure 2.2), à l'exception de l'indice Ramsey, où la minéralisation traverse aussi une unité de rhyolite porphyrique de la Formation de Waconichi. Les styles des minéralisations qui ont été étudiées comprennent des filons (fractures) sulfurés, des veines rubanée et en cisaillement, un système de veines et veinules à quartz±carbonates±sulfures±magnétites. Les carbonates retrouvés dans ces veines sont formés d'ankérite et/ou de sidérite. Les caractéristiques de chacun des indices minéralisés sont présentées au tableau 5.1.

5.2.1 Décapage de l'indice Ramsey

Sur ce décapage, la minéralisation se présente sous forme filonienne d'aspect rouillé, principalement dans des fractures (Figure 5.2a). Elle est composée de sulfures massifs à semi-massifs (Figure 5.2b) et elle peut avoir un halo de rouille, autour des fractures qui varie de 10 cm à 1,5 m de large. Ces fractures recoupent les granophyres dans une direction E-O et avec un pendage qui varie de 65 à 70° vers le S (Figure 2.3). Le filon à sulfures principal, contient en son cœur un dyke mafique chloritisé et discontinu (Figures 2.3 et 5.2c). Ce filon est recoupé par un autre dyke mafique à l'extrémité est du décapage (Figure 2.3).

La minéralisation se présente aussi sous la forme de petites poches de sulfures (Figure 5.2d). Celles-ci sont de tailles variables et elles sont réparties de manière aléatoire dans l'unité de granophyre.

Par ailleurs, de nombreuses veines pegmatitiques à quartz \pm carbonates, qui peuvent être attribuées à des remplissages de fractures, sont présentes sur ce décapage (Figure 2.3). Deux types de veines ont été identifiés : (1) les veines orientées E-O à pendage subhorizontal (18 à 20° vers le S) avec une épaisseur variant de 5 à 20 cm et (2) les veinules orientées N-S à pendage subvertical (72 à 75° vers l'O) avec une épaisseur < 3cm et qui sont recoupées par les veines E-O.

5.2.2 Décapage de l'indice GRH

Les minéralisations observées sur ce décapage sont sous la forme de veines pegmatitiques à quartz \pm carbonates \pm sulfures (Figures 2.6, 5.3a, 5.3b, 5.3c, et 5.3d). Deux principaux types ont été distingués : (1) à quartz-carbonates et (2) à quartz-sulfures \pm carbonates.

Les veines à quartz-carbonates (Figure 5.3a) montrent une croissance des minéraux pegmatitiques de l'extérieur vers l'intérieur de la veine. Les carbonates se trouvent en bordures (Figure 5.3c), ce qui suggère qu'ils étaient précoces par rapport au quartz. Ces veines sont globalement orientées E-O (Figure 2.6), leur pendage varie entre 20 et 40° vers le S, et elles peuvent avoir jusqu'à 10 cm d'épaisseur. À ces veines sont associées de petites veines subsidiaires (Figures 5.3c et 5.3d), épaisses de moins de 3 cm et orientées N050 et avec un pendage qui varie de 20° à 30° vers le S.

Les veines rouillées à quartz-sulfures±carbonates sont constituées de sulfures semi-massifs (Figure 5.3b), essentiellement de la chalcopryrite et de la pyrite. Ces veines sont orientées E-O avec un pendage de 25° vers le S et leurs épaisseurs ne dépassent pas 5 cm.

5.2.3 Décapage de l'indice AXE

Ce décapage contient une variété de veines de quartz, d'orientation et d'épaisseur variables. Quatre principaux types de veines ont été distingués sur la base de leur texture, leur forme et leur orientation. Il s'agit des veines (1) rubanée à quartz±carbonates±sulfures, (2) à quartz-carbonates orientées E-O, (3) à quartz-carbonates orientées N-S et (4) à quartz-magnétite.

La veine rubanée à quartz±carbonates±sulfures est orientée E-O avec un pendage de 10° vers le sud (Figure 2.4). Cette veine a une épaisseur qui varie de 5 à 20 cm et elle est caractérisée par une texture rubanée de type « crack and seal », impliquant de multiples ouvertures (Figures 5.4a et 5.4b). Les sulfures sont constitués de pyrite et chalcopryrite, sont sous forme semi-massive à disséminée et ils sont intercalés entre les rubans. Une forte altération en séricite et en carbonate et localement en chlorite est présente dans les épontes de cette veine, matérialisant un halo d'altération qui a une largeur maximale de 5 m.

Les veines à quartz-carbonates orientées E-O (Figures 2.4, 5.4c et 5.4b) sont très abondantes (n >30) et montrent un espacement qui varie de 30 cm à 3 m. Communément, elles sont orientées N105 à N120 avec un pendage qui varie entre 10 et 50° vers le S. Ces veines ont des épaisseurs variables (entre 2 cm et 2 m, Figures 2.4 et 5.4b) et elles peuvent présenter une altération en séricite faible de leur éponte.

Les veines à quartz-carbonates orientées N-S (Figure 5.4c) sont recoupées par celles orientées E-O. Ces veines N-S sont les plus abondantes de ce décapage (n >100). Elles sont

très rapprochées (espacées de 2 à 30 cm) et localement, elles sont discontinues (Figure 2.4). Elles sont de petite taille et leur épaisseur varie entre 0,5 et 3 cm. L'orientation de ces veines varie entre N010 et N020 tandis que leur pendage est compris entre 10 et 40° vers l'O (Figure 2.4).

Les veines à quartz-magnétite sont observées localement dans la partie sud de ce décapage (Figure 2.4). Elles sont orientées globalement N-S et elles ont un pendage d'environ 70° vers l'O. Ces veines sont discontinues et très rapprochées, leur épaisseur varie de millimétrique à centimétrique (Figure 5.4e). Par endroit, l'altération hydrothermale de ces veines se présente sous la forme de remplissage de géodes avec des minéraux pegmatitiques qui montrent une association quartz-magnétite-ankérite±sidérite. Dans les géodes, la croissance des cristaux est radiale et se fait de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 5.4f).

5.2.4 Décapage de l'indice de Golden Moon

Ce décapage est caractérisé par la présence de trois types de veines : (1) une veine en cisaillement à quartz-carbonates-sulfures, (2) de veines à quartz prismatique et (3) des veines à quartz-carbonates d'orientation E-O et N-S.

La veine en cisaillement recoupe le décapage en direction E-O avec un pendage moyen de 20° vers le sud (Figure 2.5). Elle a une épaisseur qui varie de 10 à 30 cm et elle peut être suivie sur plus de 50 m (Figure 2.5). Cette veine est composée de quartz fumé, de carbonates et de sulfures. La pyrite est le principal sulfure. Les carbonates sont présents principalement sous forme d'altération dans les éponges formant un halo de séricite±carbonates qui peut être large de plus de 3 m.

Les veines à quartz prismatiques se caractérisent par des vides correspondant à des carbonates de fer dissouts exposant de gros cristaux de quartz de forme prismatique (Figures

5.5a et 5.5b). Elles sont spatialement reliées à la veine de cisaillement et elles peuvent avoir une épaisseur de plus de 10 cm. Ces veines sont orientées globalement NO-SE, et leur pendage varie de 5 à 20° (Figure 2.5). En revanche, ce pendage change de direction de part et d'autre de la veine de cisaillement. Au nord de la veine en cisaillement, le pendage est vers le nord tandis qu'au sud il est vers le sud (Figure 2.5). Les caractéristiques texturales et de pendage impliquent qu'il s'agit de veines en extension, associées à un mouvement à composante verticale dissipé essentiellement par la veine en cisaillement.

Les veines de quartz±carbonates, identifiées sur ce décapage, possèdent deux orientations : E-O et N-S (Figures 2.5, 5.5c et 5.5d). Ces veines se caractérisent par des quartz prismatiques et une minéralogie à quartz-carbonates, dont les carbonates se retrouvent en bordure de veines (Figures 5.5e et 5.5f). Elles sont de tailles variables et elles peuvent être discontinues (Figures 5.5f). Les veines à quartz-carbonates semblent être recoupées par la veine de cisaillement. Le tableau 5.1 résume les principales caractéristiques de chacun des indices minéralisés étudiés.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des différents indices minéralisés étudiés.

Indices	Type	Forme	Orientation	Sulfures	Gangue	Teneurs
RAMSEY	Sulfures massifs à semi-massifs	Filon dans fracture	280/65-70	Py-Cp-Sph-Cov	Carb-Chl-Qz-Ser	21g/t Au, 171g/t Ag et 6 % Cu
GRH	Sulfures semi-massifs	Filon	120/20	Cp-Sph-Cov-Py	Qz-Fsp-Carb-Ser	15g/t Au, 38g/t Ag, 0,5% Cu et 0,3% Zn
AXE	Sulfures disséminés	Veine rubanée	110/10	Py-Sph-Cp	Qz-Carb-Ser	37g/t Au, 73g/t Ag, 2,5% Cu et 0,03% Zn
GOLDEN MOON	Sulfures disséminés	Veine de cisaillement	120/15-20	Py-Cp	Qz-Ser-Carb	9g/t Au, 4g/t Ag, 0,05% Cu et 0,03% Zn

Py=Pyrite; Cp=Chalcopyrite; Sph=Sphalérite; Cov=Covelitte; Qz=Quartz; Carb=carbonates; Ser=Séricite; Chl=Chlorite; Fsp=Feldspaths.

5.3 Pétrographie des minéralisations en sulfures

Cette section présente les descriptions pétrographiques des assemblages de sulfures et des minéraux de gangues des minéralisations de la zone d'étude. L'emphase a été mise, ici, principalement sur les minéralisations en sulfures de chaque décapage. Il s'agit de : (1) la fracture principale sulfurée-rouillée de l'indice Ramsey, (2) de la veine rouillée à quartz-sulfures±carbonates de l'indice GRH, (3) de la veine rubanée à quartz-carbonates-sulfures de l'indice AXE et (4) de la veine de cisaillement à quartz fumé-sulfures± carbonates de l'indice Golden Moon. Ces quatre minéralisations sont celles qui ont livrés les teneurs en métaux présentées à la section 5.2.

5.3.1 Filon sulfuré de l'indice Ramsey

Les observations pétrographiques montrent que la minéralisation est constituée d'environ 60% de sulfures et 40% de minéraux de gangue. La gangue est constituée d'agrégats de quartz xénomorphes, associés à la chlorite et/ou aux carbonates (Figures 5.6a et 5.6b). Les sulfures sont constitués de pyrite, de chalcoppyrite, de sphalérite et de traces de covellite. Une synthèse des assemblages et proportions minéralogiques est présentée à la Figure 5.1.

La pyrite constitue la phase métallique principale et deux types sont identifiés. Il s'agit : (1) d'amas de pyrites hypidiomorphes, recristallisées et légèrement fracturées et (2) d'agrégats de pyrites xénomorphes qui présentent une porosité importante (Figure 5.6c). Les cristaux de pyrites recristallisées sont en association avec la chalcoppyrite (Figure 5.6c).

La chalcopryrite est communément présente sous la forme de plages massives, de grande taille, regroupées entre des grains ou assemblages de grains de pyrites (Figure 5.6d). Ces plages sont xénomorphes, poreuses et elles sont associées aussi à la sphalérite (Figure 5.6d). La sphalérite se développe en bordure des plages de chalcopryrite (Figure 5.6d), essentiellement en remplacement et forme des plages de plus petites dimensions.

5.3.2 Veine à quartz-sulfures±carbonates de l'indice GRH

Cette veine est constituée d'environ de 50% de sulfures et 50% de minéraux de gangue. La gangue est formée de macrocristaux de quartz et de feldspath, qui peuvent faire plus de 3 mm de long (Figure 5.7a). Ils sont xénomorphes à hypidiomorphes et ils montrent une association avec des phases secondaires de séricite, carbonates, et localement d'épidote (Figure 5.7a). Les sulfures présents dans cette veine sont constitués de chalcopryrite, de sphalérite, de pyrite et de covellite. Les assemblages et proportions minérales de cette veine sont présentés à la figure 5.1.

La chalcopryrite est le minéral dominant des phases métalliques. Elle forme de gros cristaux individuels, xénomorphes et poreux (Figure 5.7b). Localement, les cristaux renferment un réseau chaotique de fractures et une légère oxydation (Figure 5.7d). Ces fractures sont couramment occupées par de la sphalérite et de la covellite.

La covellite est toujours présente en remplacement dans la chalcopryrite. Elle se développe dans les fractures et les bordures de la chalcopryrite sous forme de fine lamelles squelettiques (Figures 5.7b et 5.7d). Son origine est probablement secondaire, résultant de la météorisation.

La sphalérite représente le deuxième sulfure le plus abondant de cette veine. Elle est communément observée en association avec la chalcoppyrite et localement avec la pyrite (Figures 5.7b, 5.7c et 5.7d). Elle forme des amas squelettiques à terminaisons dendritiques, qui se développent en bordures des grains de chalcoppyrite et/ou de pyrite.

La pyrite forme des amas de grains hypidiomorphes, légèrement fracturés et poreux. Elle est souvent en association avec la sphalérite (Figures 5.7c et 5.7b).

5.3.2 Veine rubanée de l'indice AXE

La gangue occupe environ 75% de cette veine rubanée. Elle est à dominance de macrocristaux xénomorphes de quartz et de carbonates (Figure 5.8a). Le quartz présente des textures de recristallisation dans de petites zones de déformation locales. Les sulfures sont constitués d'une association de pyrite, de chalcoppyrite et de sphalérite. La synthèse des assemblages et proportions minérales de cette veine est présentée à la figure 5.1.

La pyrite est la phase métallique la plus abondante. Elle forme des amas massifs de grains très rapprochés (Figures 5.8b et 5.8c). Ces grains sont idiomorphes à hypidiomorphes. Localement, certains grains montrent une intense fracturation qui peut occuper l'entièreté des grains (Figure 5.8c). Par endroit, les grains constituant les amas sont allongés et moulent les gros grains idiomorphes (5.8b). Des pyrites recristallisées sont également présentes en grains individuels hypidiomorphes (Figures 5.8e et 5.8f).

La sphalérite est présente sous forme de grosses plages aux contours irréguliers atteignant plus de 3 mm de long (Figure 5.8d). Elle est en association avec la pyrite et elle contient des inclusions de chalcoppyrite et de pyrite recristallisée (Figure 5.8e). Deux types de sphalérite sont identifiés : (1) la sphalérite poreuse à bordures irrégulières voire squelettique,

présente en plages individuelles (Figure 5.8d), et (2) la sphalérite non poreuse, légèrement fracturée et intercalée entre les amas de pyrite (Figure 5.8e).

La chalcoppyrite est fréquemment observée en inclusion dans la sphalérite sous forme de « *chalcoppyrite disease* » (Figures 5.8d et 5.8e). Cette texture indique un remplacement de la sphalérite par la chalcoppyrite, issue d'un fluide plus chaud lors de l'évolution de l'activité hydrothermale (Barton Jr et Bethke 1987).

5.3.2 Veine de cisaillement de l'indice Golden Moon

Cette veine montre une minéralogie à dominance de minéraux de gangue. Elle est constituée de quartz, de carbonates et de séricite (Figure 5.9a). Le quartz est présent sous deux formes (Figure 5.9a) : (1) les macrocristaux subarrondies à allongés, et (2) les cristaux de plus petites tailles qui sont plus ou moins interdigités entre eux. Pour ces derniers, plusieurs cristaux possèdent des jonctions triples indiquant une recristallisation.

La minéralisation en sulfures, qui occupe moins de 5% de la veine, est constituée essentiellement de pyrite et des traces de chalcoppyrite. Les assemblages et les proportions minéralogiques de cette veine sont présentés à la figure 5.1.

Trois familles de pyrites ont été identifiées dans cette veine. Il s'agit : (1) de la pyrite recristallisée et de forme cubique (Figure 5.9b), (2) de la pyrite subarrondie remplie d'inclusions de silicates et légèrement poreuse (Figure 5.9c), et (3) de la pyrite hypidiomorphe à texture fracturée (Figure 5.9d), qui peut, localement, contenir des inclusions de chalcoppyrite. La chalcoppyrite est présente en grains individuels, xénomorphes et de petites tailles, essentiellement intercalés entre les minéraux de la gangue (Figure 5.9c).

5.4 Signature en éléments traces des pyrites

Le contenu en éléments traces des pyrites reflète la composition des fluides hydrothermaux et celles des roches encaissantes (Fontboté et al. 2017). Cela permet ainsi d'utiliser la chimie de ce minéral pour déterminer l'évolution des systèmes minéralisateurs (Large et al. 2009 ; Reich et al. 2013). Ces concepts ont déjà été utilisés pour discriminer des épisodes hydrothermaux et surtout pour identifier l'origine des fluides minéralisateurs (Genna et Gaboury 2015 ; Augustin et Gaboury 2018).

Comme la pyrite est omniprésente dans les minéralisations du CLD, cette approche est utilisée ici pour établir l'existence d'un lien génétique ou non entre les différentes minéralisations étudiées dans ce projet et pour tenter de déterminer leur contexte gîtologique.

Cette même approche est testée ici pour discriminer les principales minéralisations présentes dans les granophyres du CLD, en vue d'établir l'existence d'un lien génétique entre elles, en se basant sur la signature géochimique des pyrites qu'elles contiennent.

Pour ce faire, 50 grains de pyrites, qui proviennent des quatre indices minéralisés de la zone d'étude (Figure 2.1), ont été analysés par LA-ICP-MS au LabMater de l'UQAC. Ces minéraux ont été identifiés au préalable par observation au microscope optique. Les analyses au LA-ICP-MS ont été réalisées à l'aide d'un laser Excimer 193nm Resonetics M-50 couplé à un spectromètre de masse Agilent 7700x. Le paramétrage de l'appareil a été fait avec 14Hz de fréquence, une puissance de 2J et 12,5 $\mu\text{m/s}$ pour la vitesse. Des lignes d'ablation qui couvrent l'entièreté des grains de pyrites ont été réalisées, car les minéraux analysés ne sont pas zonés (Figure 5.16). Le diamètre d'ablation varie entre 40 et 90 μm selon la taille des minéraux et le temps d'analyse varie de 25 à 55s pour les mêmes raisons. Les éléments mesurés sont présentés à l'Annexe 2. Cinq standards internes MASS1, JB5,

UQAC_FeSB et LAFLAMME ont été utilisés comme matériaux de références pour la calibration. Le traitement des données a été réalisé à partir du logiciel Igor Pro-Iolite v2.5 (Paton et al. 2011). Les limites de détection considérées sont celles qui ont été calculés par le logiciel.

Ces données de comparaison ont été générées en partie dans cette étude et une partie provient des travaux de Clairet et al. (2017). Les données de Clairet et al. 2017) ont été générées selon les mêmes procédure et protocole analytiques que celles considérées dans cette étude (Figure 5.17). Un tableau qui liste l'ensemble de toutes ces données est disponible à l'annexe 2.

Dans un premier temps, les signatures en éléments traces des quatre indices minéralisés de la zone d'étude sont comparées entre elles. Par la suite, ces signatures géochimiques sont comparées à celles de pyrites provenant des systèmes porphyriques (Dépôt Devlin, Mines Copper Rand et Grand Roy), SMV (Mine Lemoine et dépôt Scott) et Au-orogénique (Mine Norbeau de Chibougamau) dans le but d'établir un lien génétique entre les indices étudiés et ces systèmes minéralisateurs de la région de Chibougamau.

Les diagrammes binaires de discrimination de Genna et Gaboury (2015) et de Augustin et Gaboury (2018) sont utilisés dans ce chapitre pour l'exploitation des données générées par le laser pour les comparaison du contenu en éléments traces des pyrites.

5.4.1 Discrimination des pyrites de la zone d'étude

5.4.1.1 Discrimination selon les diagrammes de Genna et Gaboury (2015)

Les diagrammes de Genna et Gaboury (2015) ont été développés pour les systèmes volcanogènes. Ils permettent en utilisant les éléments Tl, Se et As, de : 1) définir l'affinité volcanogène ou non des minéralisations, 2) de déterminer la température de formation des pyrites volcanogènes et 3) d'identifier les pyrites d'origine métamorphique.

Selon ces diagrammes, deux familles pyrites sont clairement distinguées dans la zone d'étude (Figures 5.10a à 5.10c). Il s'agit premièrement de la famille des pyrites définie par Genna et Gaboury (2015) comme de type IV, caractérisée par des contenus en éléments traces de 1-100 ppm en As, 0,0003-0,008 ppm en Tl, 0,02-2 ppm de Sb et un ratio Se/Tl compris entre 100 et 100000 ppm (Figures 5.10a à 5.10c). La deuxième famille correspond aux pyrites de type V, qui se caractérise par des valeurs de 300-9000 ppm d'As, 0,0003-0,02 ppm de Tl, 0,03-2 2 ppm de Sb et un ratio Se/Tl de 300-13000 ppm (Figures 5.10a à 5.10c).

Les pyrites, qui proviennent du filon sulfuré de l'indice Ramsey, se positionnent dans leur grande majorité dans le champ des pyrites de type IV (Figures 5.10a à 5.10c), défini par Genna et Gaboury (2015) comme étant des pyrites d'affiliation volcanogène de haute température ($>350^{\circ}$) associées à la chalcopryrite. De même, les pyrites qui proviennent de la veine sulfurée à quartz \pm carbonates de l'indice GRH tombent également dans le champ des pyrites de type IV (Figures 5.10a à 5.10c). Cela suggère que ces deux indices minéralisés sont probablement liés à un même système minéralisateur.

Les pyrites de la veine rubanée de l'indice AXE et celles de la veine de cisaillement de l'indice Golden Moon se positionnent dans le champ des pyrites de type V (Figures 5.10a à 5.10c), défini par Genna et Gaboury (2015) comme des pyrites associées au

métamorphisme régional. Ces résultats impliquent que les minéralisations de ces deux indices sont similaires et qu'elles pourraient être liées à un système minéralisateur à composante métamorphique.

5.4.1.2 Discrimination selon le diagramme de Augustin et Gaboury (2019)

Augustin et Gaboury (2019) ont développé des diagrammes pour les contextes de minéralisations orogéniques. Ils ont utilisé les ratios As/Ag vs Sb/Bi, qui sont considérés comme des bons indicateurs pour distinguer les pyrites diagenétiques (As/Ag faible, Sb/Bi intermédiaire), de celles qui sont d'origine métamorphique-hydrothermale (As/Ag et Sb/Bi, élevés) ou d'origine magmatique (As/Ag et Sb/Bi, faibles).

D'après ce diagramme, il est possible de visualiser dans un premier temps un bon groupement des données selon les différents indices. Plus spécifiquement, il est possible d'observer trois grandes familles de pyrites (Figure 5.11). Il s'agit (1) de la famille des pyrites magmatiques qui regroupent les pyrites des indices Ramsey et GRH principalement, (2) la famille des pyrites correspondant à celles de l'indice Golden Moon, qui sont en grande partie magmatique, mais dont quelques échantillons se trouvent dans le champ hydrothermale-métamorphique, et (3) la famille définie par le groupe des pyrites de l'indice AXE, qui se positionne autour de la zone d'intersection des trois champs définis par ce diagramme.

Les variations des ratios As/Ag vs Sb/Bi indiquent que les minéralisations des indices Ramsey et GRH sont identiques en termes de compositions en éléments traces des pyrites (Figure 5.11). En revanche, la minéralisation de l'indice Golden Moon qui semble avoir deux composantes (magmatique et hydrothermale-métamorphique), se distingue de celle de l'indice AXE où les pyrites qui se regroupent à la jonction entre les champs diagenétique, magmatique et hydrothermale-métamorphique (Figure 5.11).

5.4.2 Comparaison aux systèmes minéralisateurs de Chibougamau

La comparaison de la signature en éléments traces des pyrites des indices étudiés avec celles des principaux systèmes minéralisateurs de la région a été réalisé en utilisant les diagrammes de Genna et Gaboury (2015) et Augustin et Gaboury (2019).

D'après les diagrammes de Genna et Gaboury (2015) (Figures 5.12a à 5.12c), les relations suivantes peuvent être soulevées. Les indices Ramsey et GRH présentent des signatures en éléments traces qui s'apparentent aux gisements de type porphyrique de la région de Chibougamau (Figures 5.12a à 5.12c). Les indices AXE et Golden Moon ont des signatures géochimiques similaires au système orogénique de la mine Norbeau (Figures 5.13a à 5.13c). Les signatures géochimiques des minéralisations de la zone d'étude sont différentes de celles des systèmes SMV de la région (Figures 5.14a à 5.15c).

La comparaison basée sur l'utilisation des diagrammes de Augustin et Gaboury (2019) révèle les relations suivantes. Les pyrites des indices Ramsey et GRH ont des chimies similaires aux des dépôts porphyriques de la région (Figure 5.16a), qui sont définis par ce diagramme comme d'origine magmatique. Les pyrites des indices Golden Moon et AXE sont comparables au système orogénique de la mine Norbeau qui est défini par le diagramme comme d'origine hydrothermale-métamorphique (Figure 5.16b). Les minéralisations de la zone d'étude ne semblent pas avoir de lien génétique avec les systèmes SMV dans la région (Figure 5.16c).

5.5 Synthèse

La zone d'étude montre quatre principaux styles de minéralisation encaissés par les granophyres du CLD : 1) un filon à sulfures massifs à semi massifs; 2) une veine rubanée à quartz-carbonates±pyrite±chalcopyrite; 3) des veines de cisaillement à quartz fumée-carbonates±pyrite±chalcopyrite et 4) des veines à quartz-carbonates±magnétites d'orientation E-O et N-S.

Des similarités pétrographiques ont été établies entre certains indices minéralisés de la zone d'étude. En effet, les indices Ramsey et GRH sont caractérisés par les mêmes styles de minéralisation et des assemblages minéralogiques quasi-identiques. Les indices AXE et Golden Moon sont également similaires d'un point de vue de style et d'assemblage minéralogique.

Les analyses en éléments traces des pyrites confirment également l'existence de deux types de minéralisations dans la zone d'étude. Il s'agit : 1) des minéralisations magmatiques, caractérisées par des pyrites de haute température (>350°C), qui correspondent à celles des indices Ramsey et GRH, et 2) des minéralisations hydrothermales-métamorphiques des indices AXE et Golden Moon, qui sont caractérisées par des pyrites métamorphiques.

La comparaison des signatures en éléments traces a révélé qu'il existe des relations entre les minéralisations de la zone d'étude et certains types génétiques connus dans la région de Chibougamau. Ainsi, les indices Ramsey et GRH s'apparentent plus aux systèmes magmato-hydrothermaux de la région de Chibougamau, tandis que les indices AXE et Golden Moon ont des similarités géochimiques avec les systèmes orogéniques de la région. En revanche, les minéralisations de la zone d'étude n'ont pas d'affinité avec les systèmes volcanogènes du district de Chibougamau-Chapais.

FIGURES DU CHAPITRE V

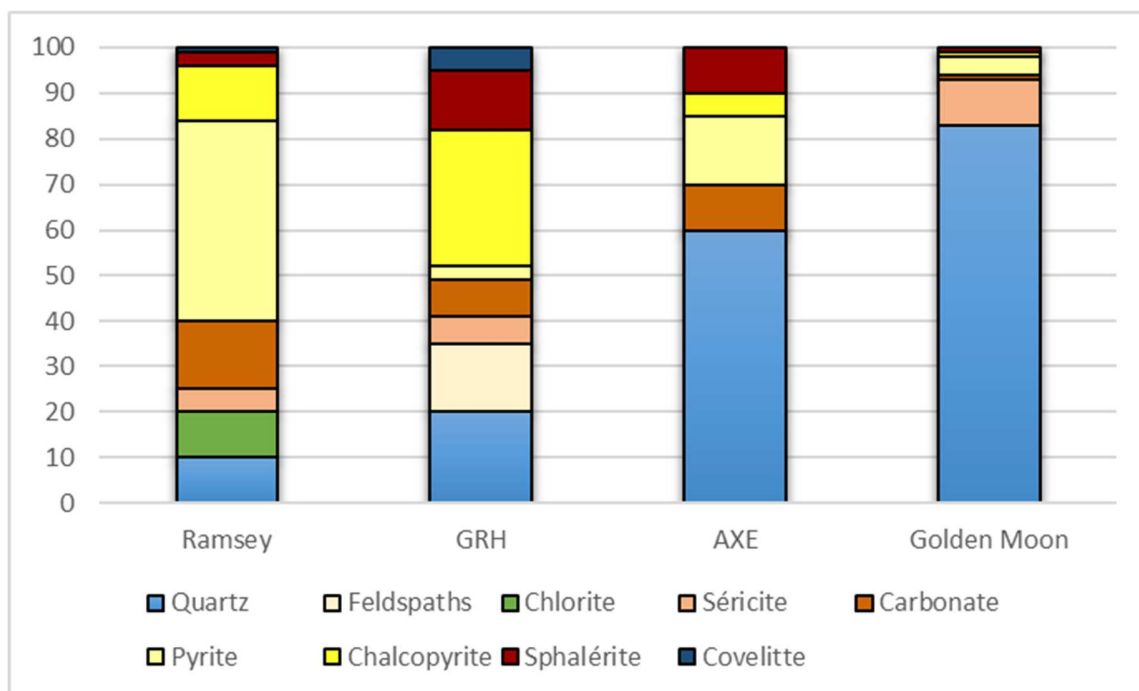


Figure 5.1 : Synthèse des proportions minéralogiques des principales minéralisations à sulfures présentes dans les décapages étudiés. Pourcentage normalisée à 100%. Notez la grande différence au niveau de la proportion des sulfures entre les différents indices.

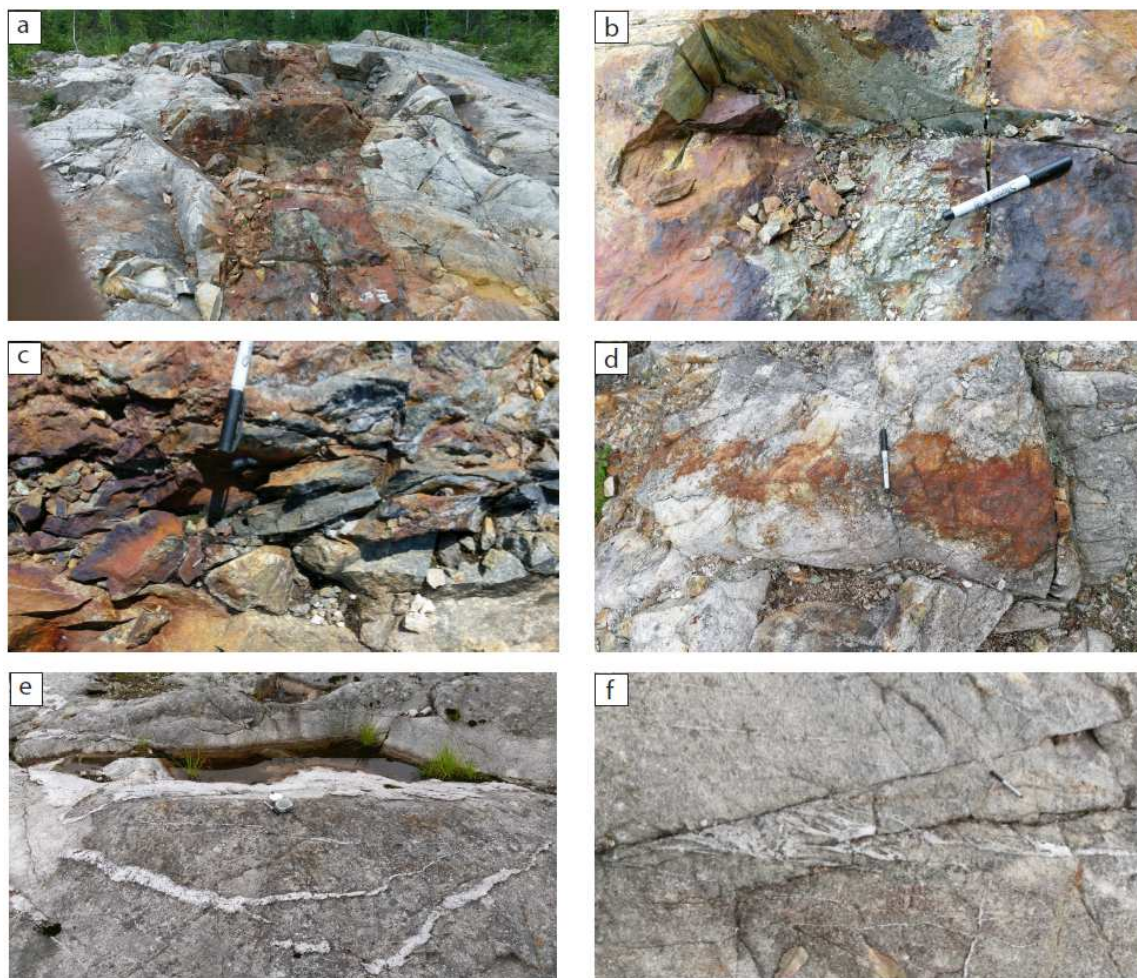


Figure 5.2 : Photographies des styles de minéralisations de l'indice Ramsey. a) et b) Filon sulfurée principal. c) Dyke mafique dans le filon sulfuré principal. d) Poches de sulfures dans le granophyre. e) et f) Veines tardives à quartz \pm carbonates.



Figure 5.3 : Photographies des styles des minéralisations de l'indice GRH. a) Veines à quartz-carbonates, orientées E-O avec des cristaux de quartz prismatiques. b) Veine sulfurée à quartz±carbonates. c) Veines subsidiaires à quartz-carbonates reliées aux veines E-O. d) Veines à quartz-carbonates de forme sigmoïdale.

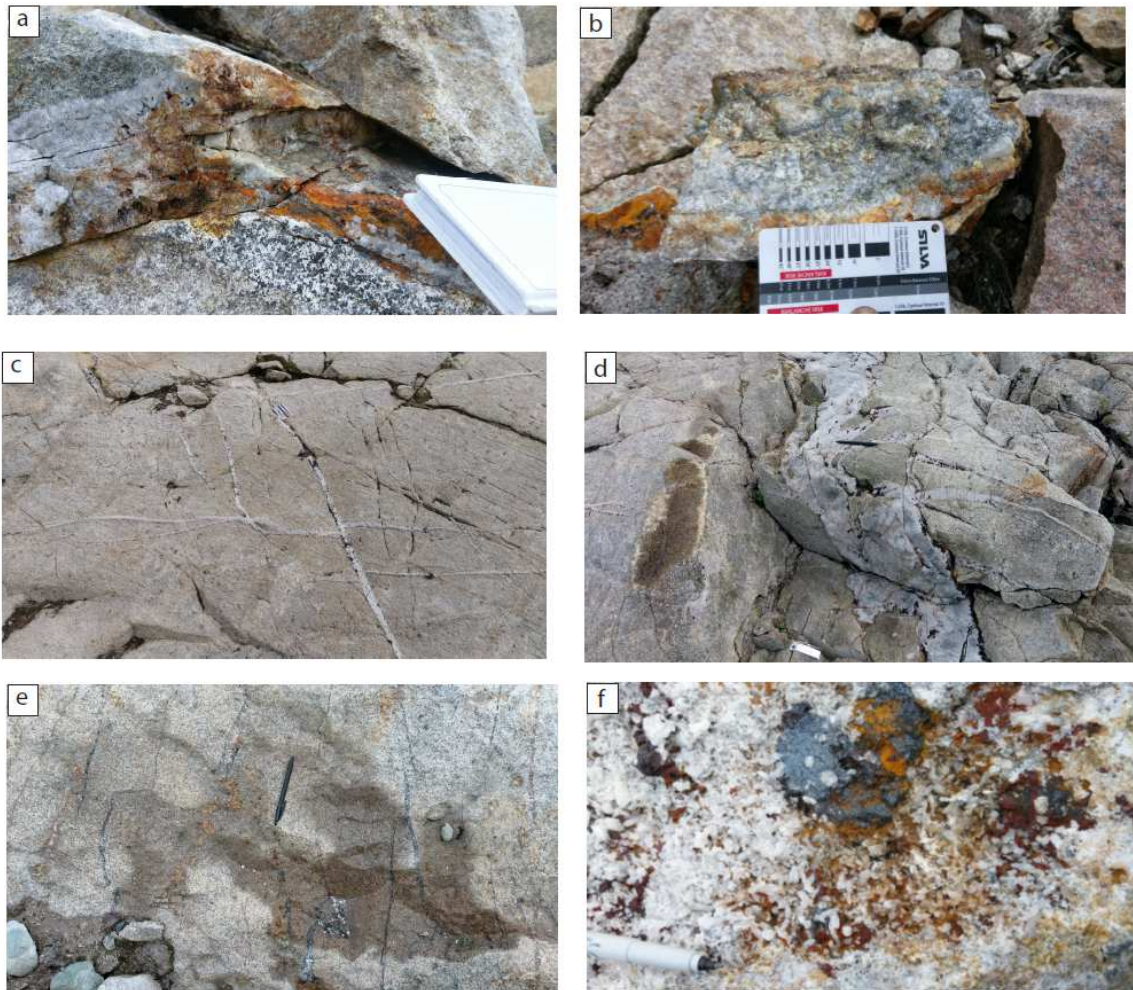


Figure 5.4 : Photographies des styles des minéralisations de l'indice AXE. a) et b) Veine rubanée à quartz-carbonates-sulfures. c) et d) Veines à quartz-carbonates d'orientation E-O et N-S. Notez les relations de recoupement. e) Veines discontinues à quartz-magnétites. f) Veine à quartz±magnétites ±carbonates avec des dissolutions de carbonates exposant les quartz prismatiques.

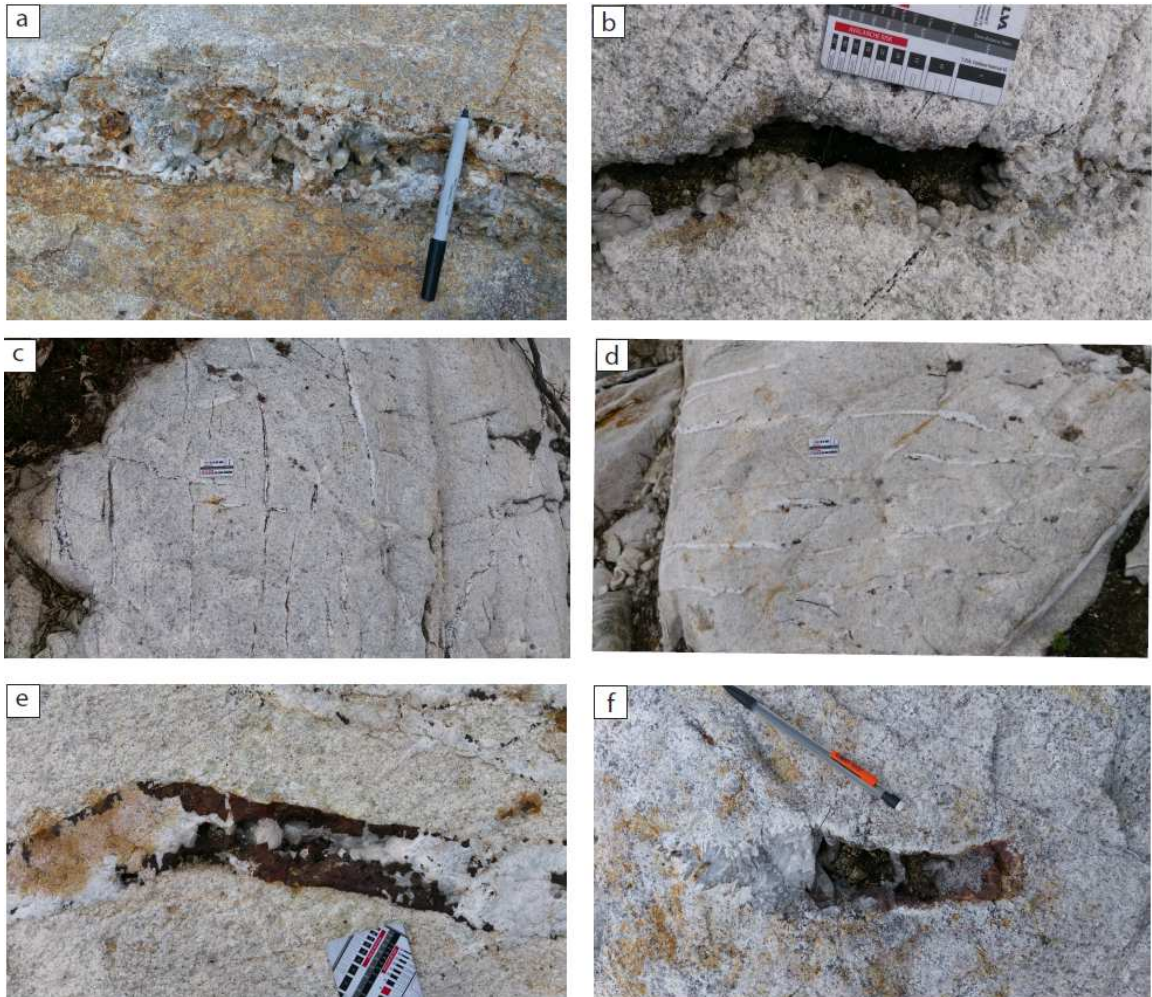


Figure 5.5 : Photographies des styles des minéralisations de l'indice Golden Moon. a) et b) Veines avec des vides de dissolution exposant les quartz prismatiques. c) Veines à quartz-carbonates orientées N-S. d) Veines à quartz-carbonates d'orientation E-O. e) Vue rapprochée des veines à quartz-carbonates. f) Poche ouverte à quartz \pm carbonates.

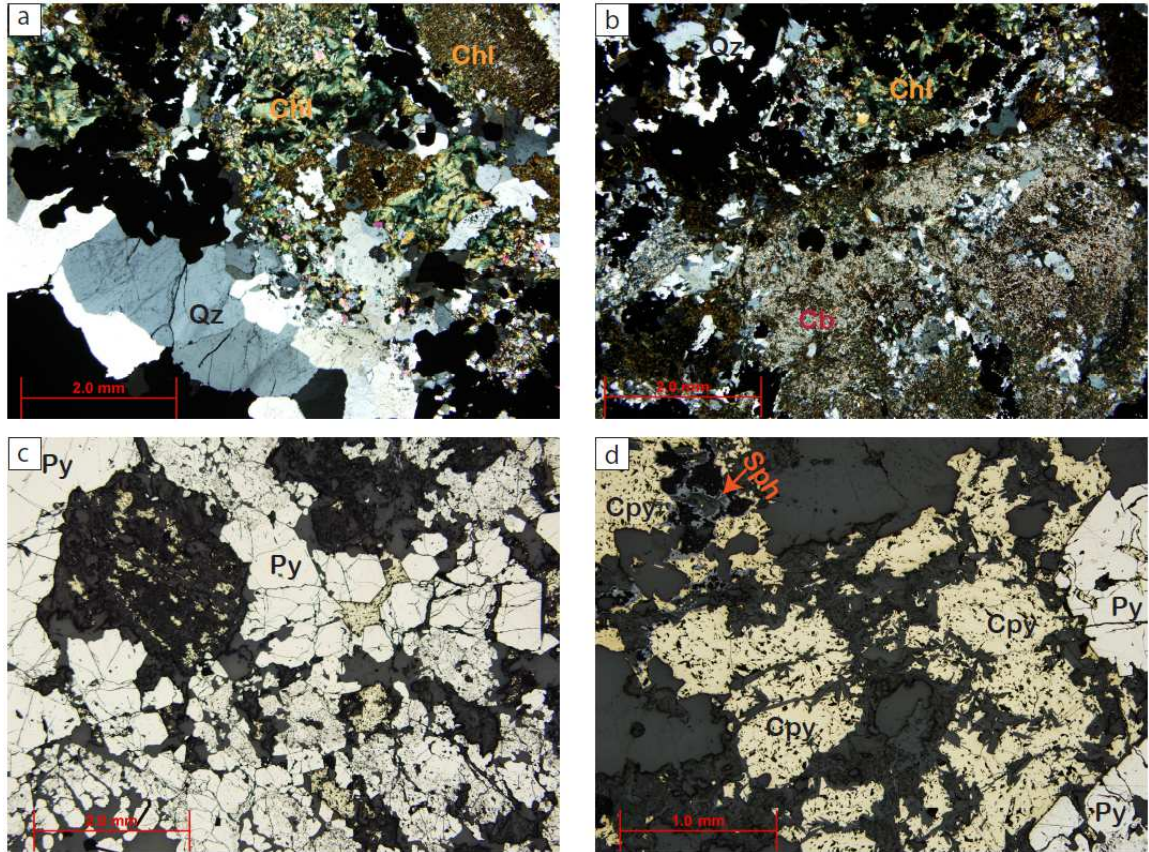


Figure 5.6 : Microphotographies des textures et assemblages minéralogiques du filon sulfuré principal de l'indice Ramsey. a) et b) Minéraux de gangue constituant le filon. c) et d) Textures et associations des sulfures constituant la minéralisation.

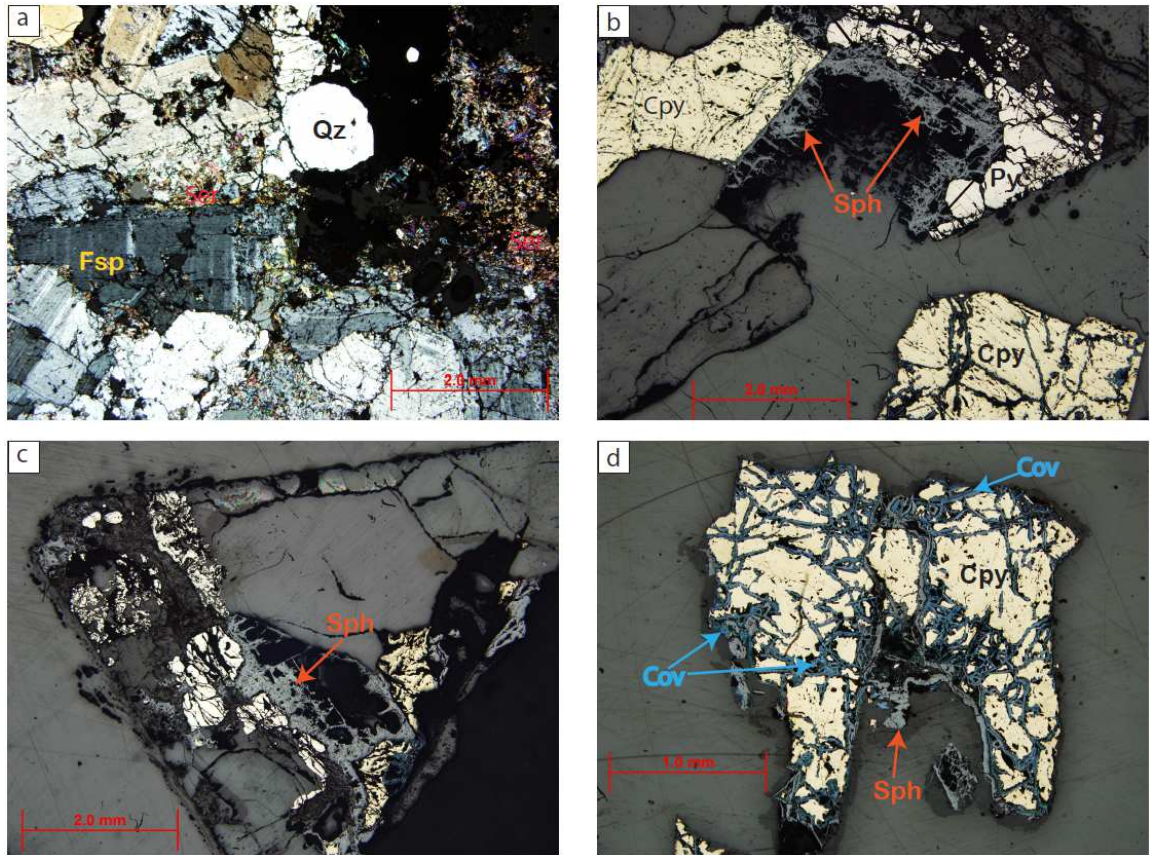


Figure 10 : Microphotographies des textures et assemblages minéralogiques de la veine sulfurée à quartz±carbonates de l'indice GRH. a) Minéraux de gangue constituant la veine. b), c) et d) Textures et associations des sulfures constituant la minéralisation.

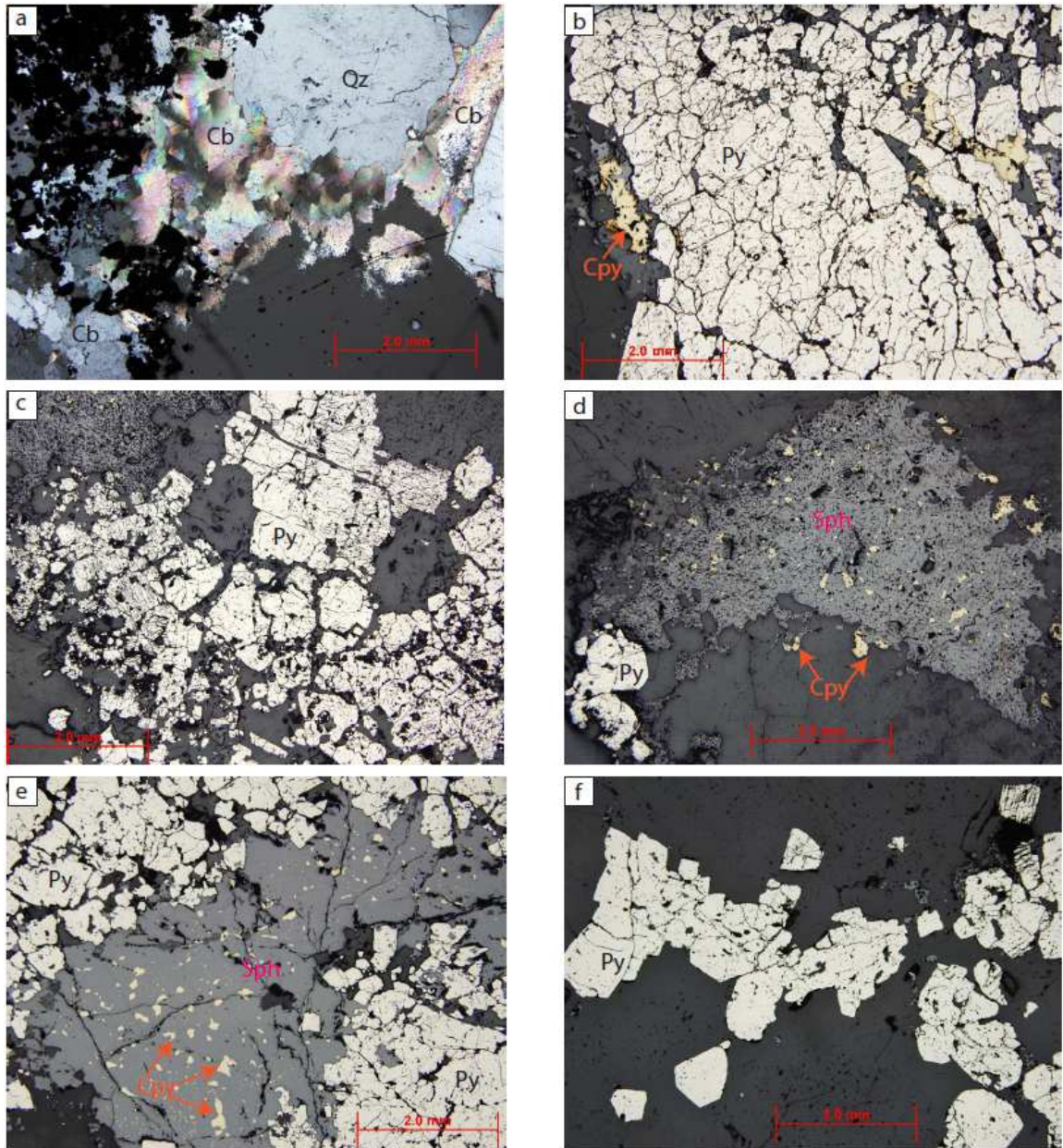


Figure 5.8 : Microphotographies des textures et assemblages minéralogiques de la veine rubanée à quartz-carbonates-sulfures de l'indice AXE. a) Minéraux de gangue constituant la veine. b), c) d) e) et f) Textures et associations des sulfures constituant la minéralisation.

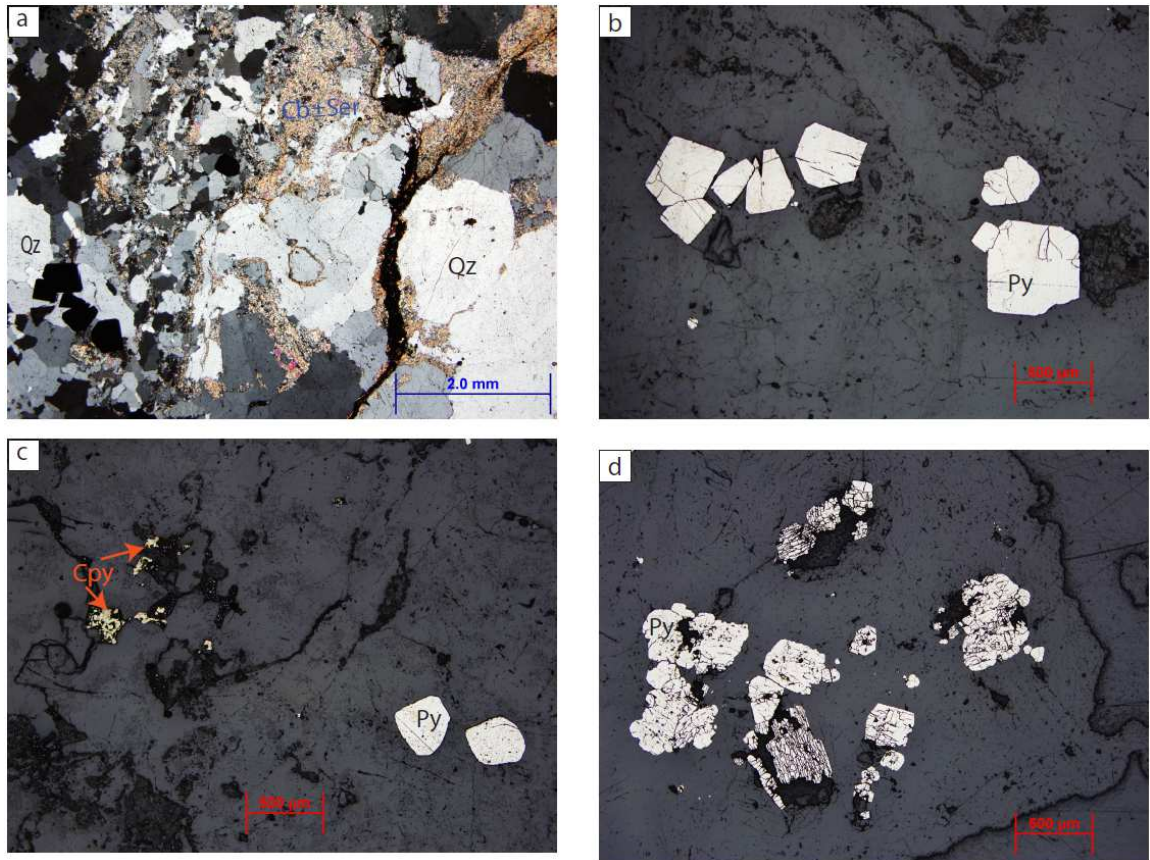


Figure 5.9 : Microphotographies des textures et assemblages minéralogiques de la veine en cisaillement à quartz-carbonates-sulfures de l'indice Golden Moon. a) Minéraux de gangue constituant la veine. b), c) et d) Textures et associations des sulfures constituant la minéralisation.

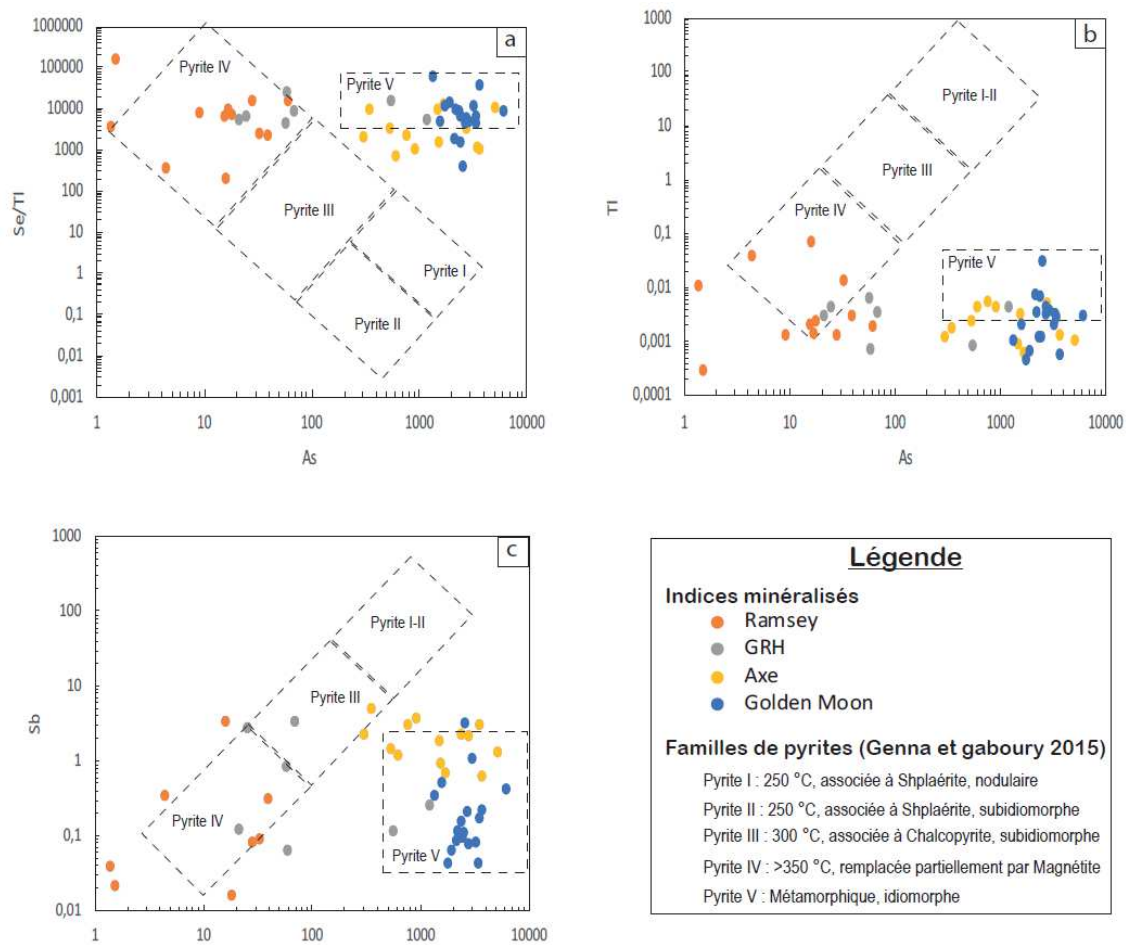


Figure 5.10 : Diagrammes de discrimination des pyrites des quatre indices minéralisés de la zone d'étude, selon Genna et Gaboury (2015).

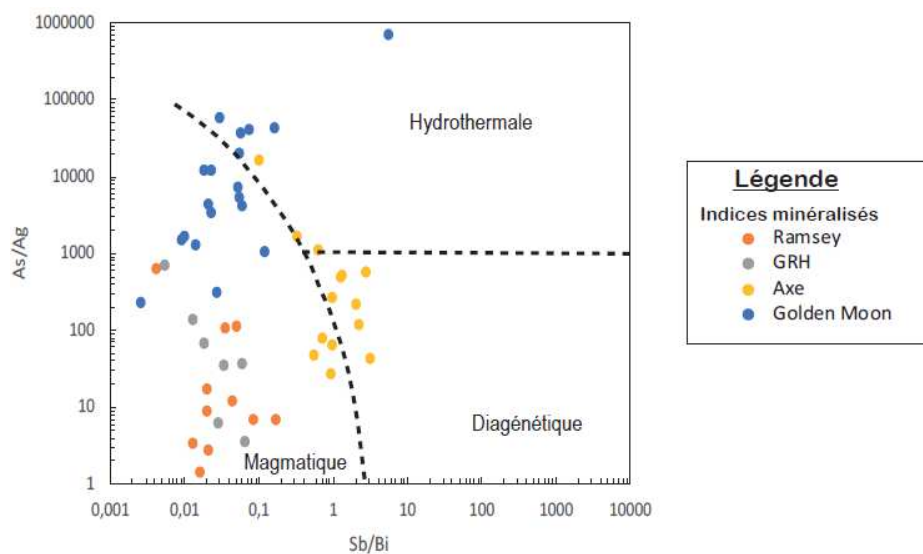


Figure 5.11 : Diagrammes de discrimination des pyrites des quatre indices minéralisés de la zone d'étude, selon Augustin et Gaboury (2019).

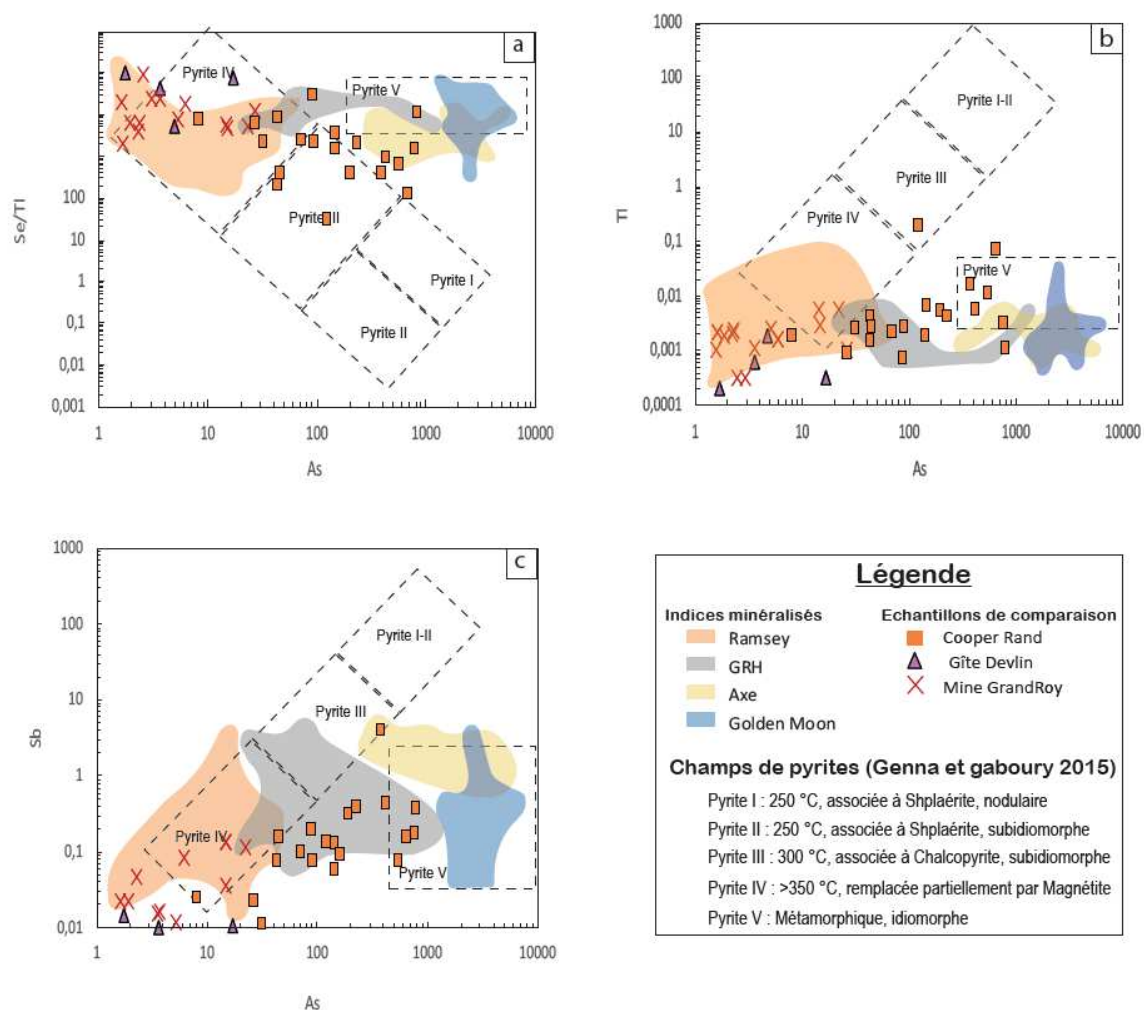


Figure 5.12 : Comparaison des champs des pyrites des quatre indices de la zone d'étude, aux pyrites des principaux systèmes magmato-hydrothermaux de la région de Chibougamau. Diagrammes, d'après Genna et Gaboury (2015).

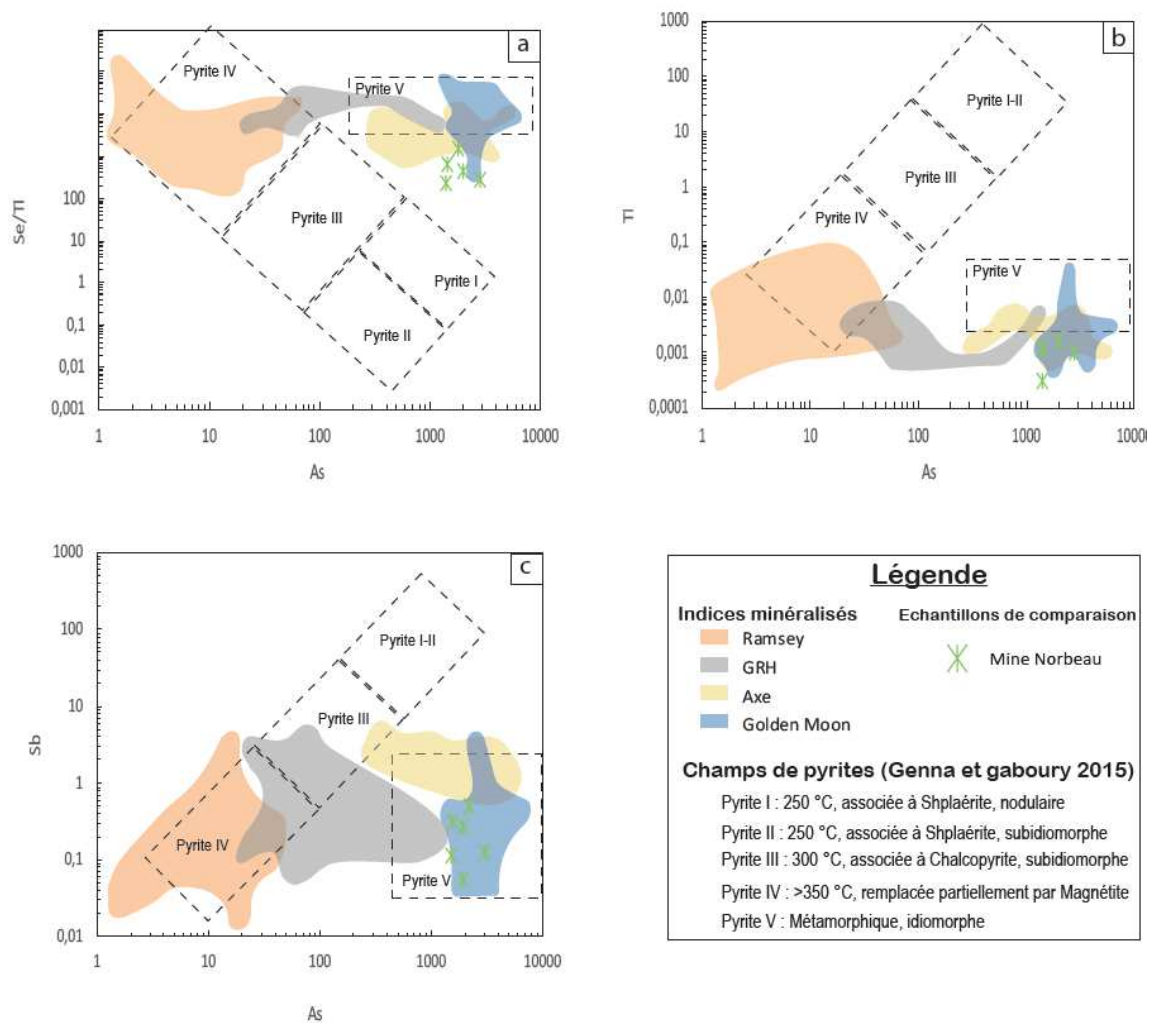


Figure 5.13 : Comparaison des champs des pyrites des quatre indices de la zone d'étude, aux pyrites des principaux systèmes orogéniques de la région de Chibougamau. Diagrammes, d'après Genna et Gaboury (2015).

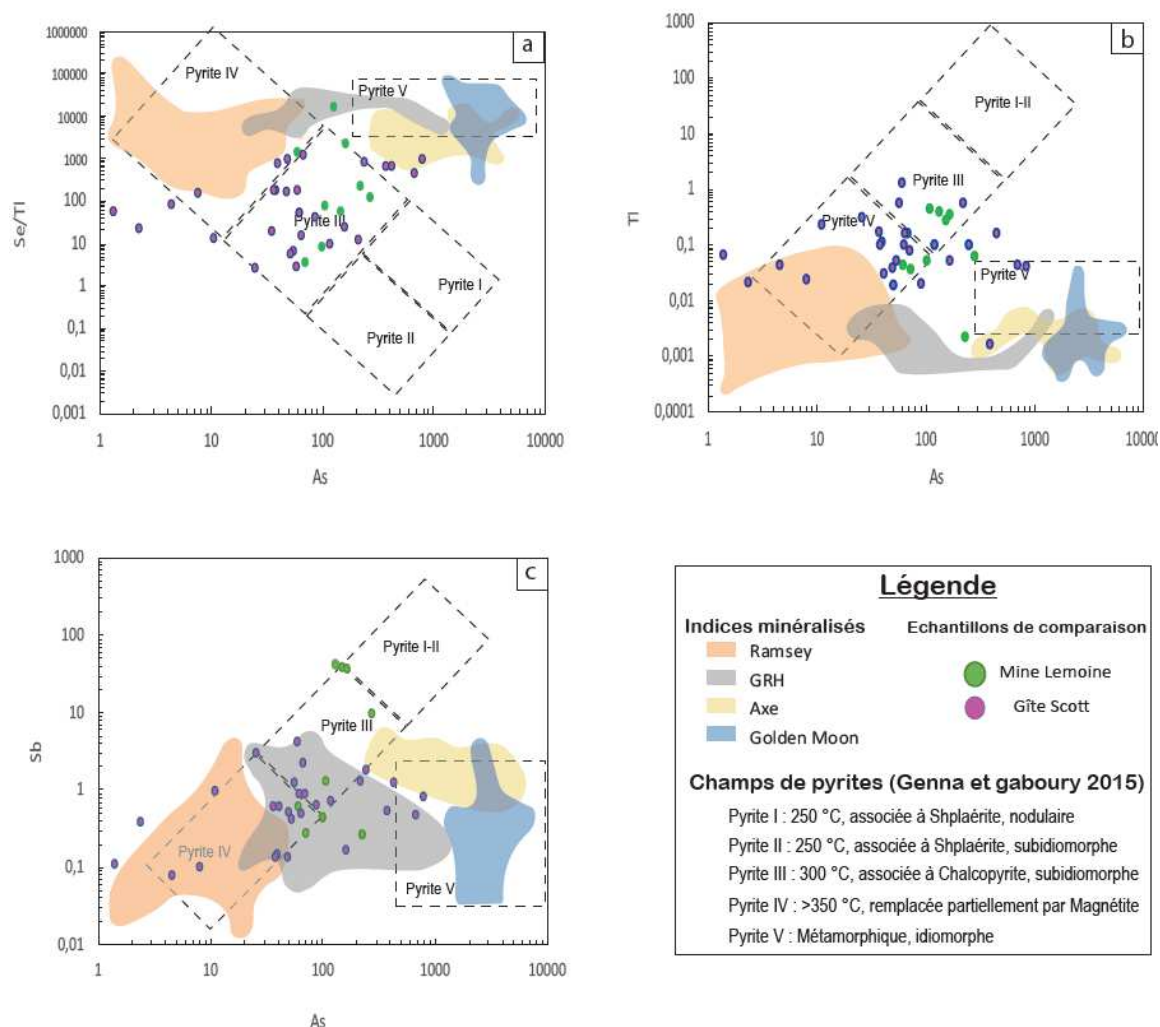


Figure 5.14 : Comparaison des champs des pyrites des quatre indices de la zone d'étude, aux pyrites des principaux systèmes SMV de la région de Chibougamau. Diagrammes, d'après Genna et Gaboury (2015).

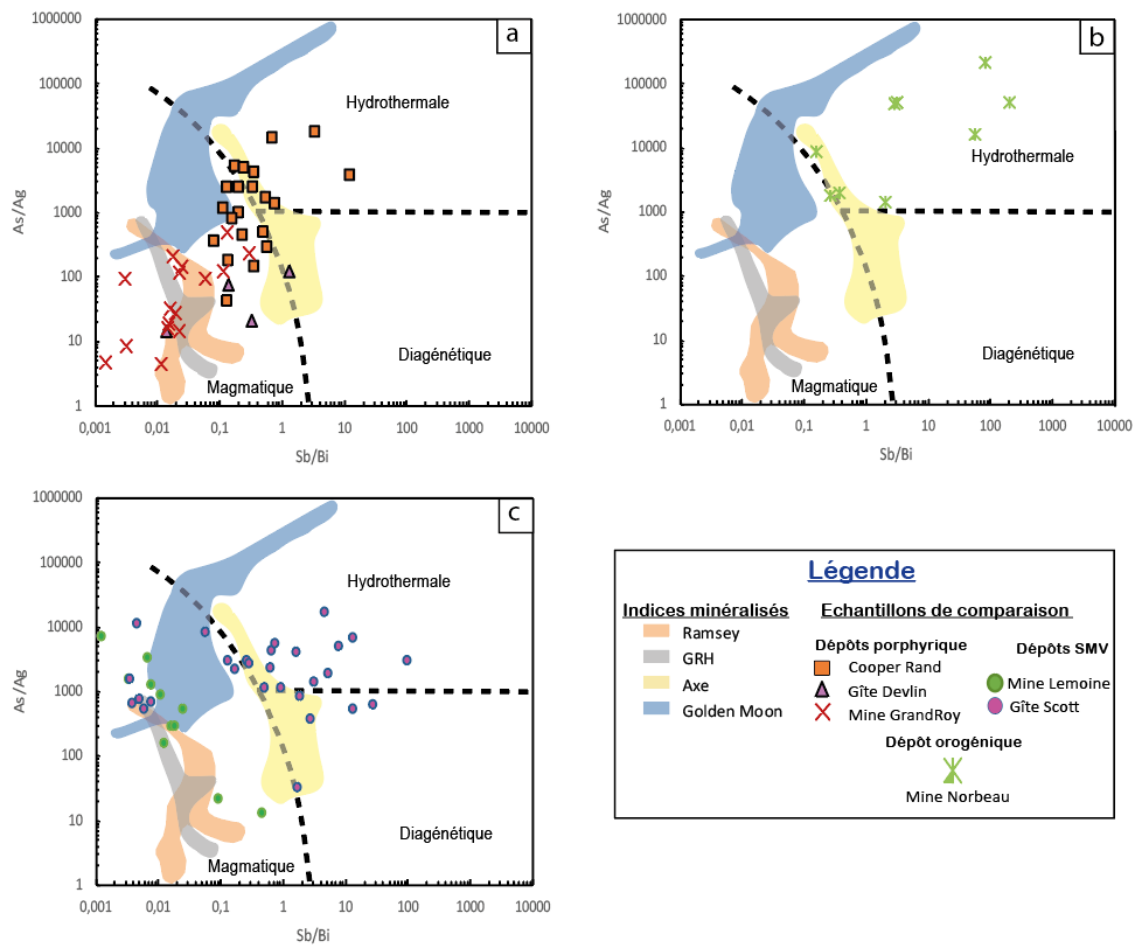


Figure 5.15 : Comparaison des champs des pyrites des quatre indices de la zone d'étude, aux pyrites des principaux systèmes minéralisateurs de la région de Chibougamau. Diagrammes, d'après Augustin et Gaboury (2019).

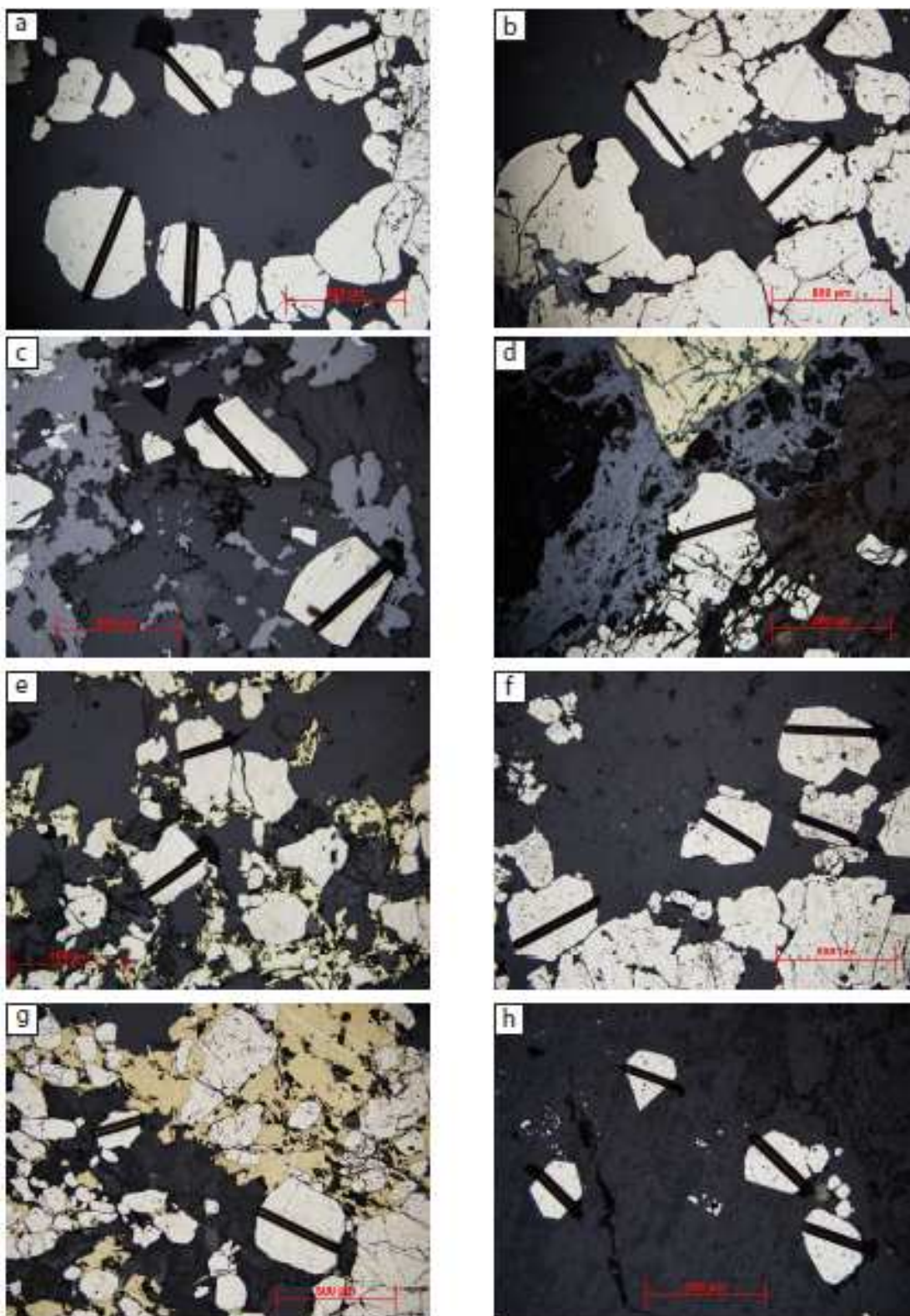


Figure 5.16 : Microphotographies des lignes d’ablation laser des pyrites analysées pour cette étude. a), b), c) et d) représentent les lignes d’analyses pour les indices minéralisées de la zone d’étude. e), f), g), et h) représentent les lignes d’analyses pour les systèmes minéralisés de la région de Chibougamau.

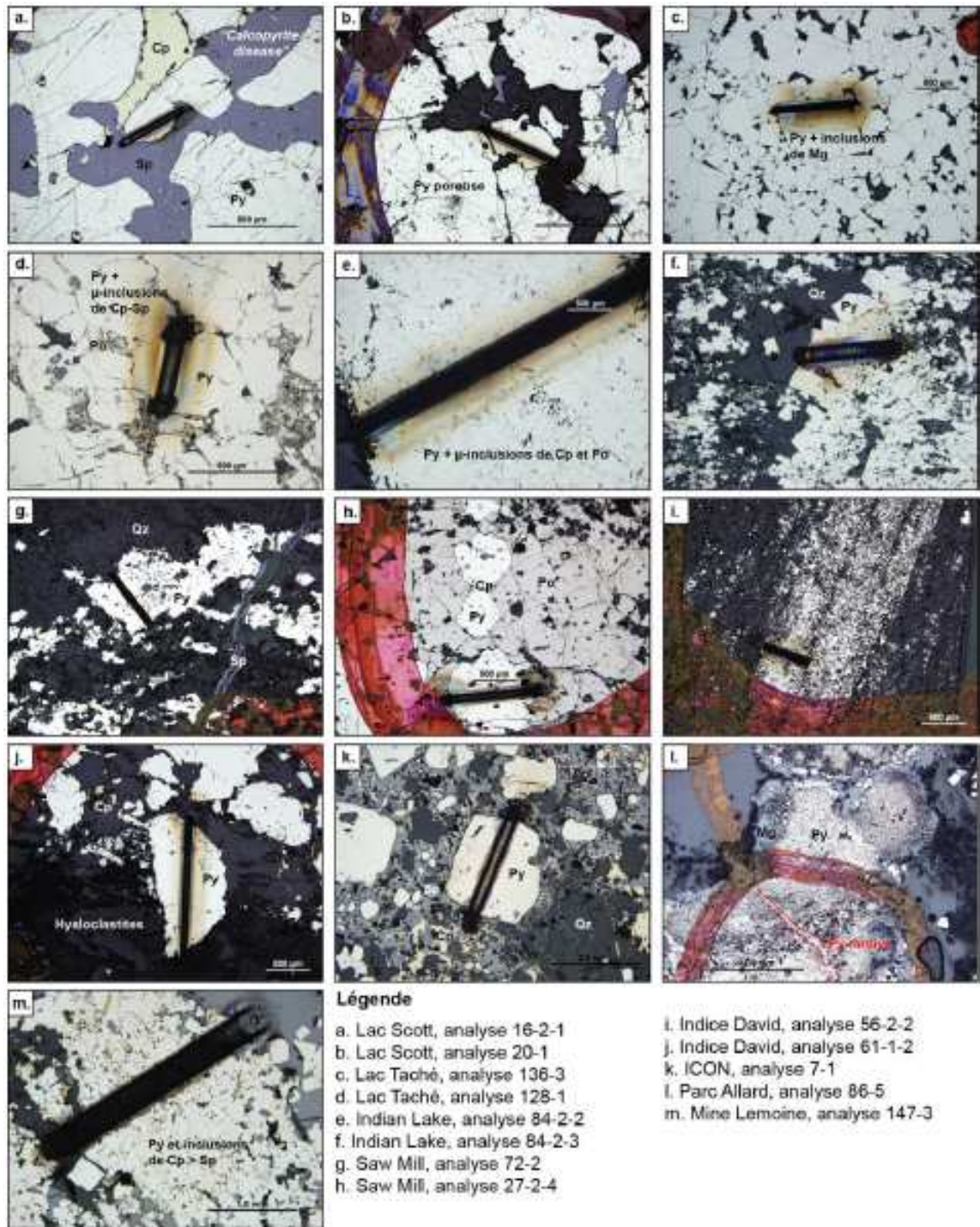


Figure 5.17 : Microphotographies des lignes d'ablation laser des pyrites de provenance des systèmes volcanogènes de Chibougamau-Chapais utilisées pour des fins de comparaison. (Clair et al. 2017).

CHAPITRE VI

DISCUSSION

6.1 Introduction

Ce chapitre présente des discussions portant sur l'intégration des résultats et interprétations des quatre précédents chapitres, en vue de répondre à l'objectif global de cette étude. Cet objectif vise à déterminer l'origine des granophyres du CLD et leur relation avec les minéralisations qu'ils encaissent.

Les discussions qui suivent dans les prochaines sections porteront sur les évidences pétrographiques et géochimiques de l'origine des granophyres du CLD. Ensuite, les minéralisations encaissées par les granophyres et la définition d'un contexte gîtologique régional sont abordées. Enfin, un modèle évolutif est proposé pour la formation des granophyres sur la base de toutes les interprétations qui sont tirées de ce chapitre.

6.2 Origine des granophyres du CLD

Les hypothèses de départ, qui ont été proposées pour la formation des granophyres du CLD, suggéraient que ceux-ci aient été formés, soit par l'assimilation des rhyolites encaissantes par le magma du CLD, soit par un processus de différenciation de ce magma (Alfaro 1990 ; Daigneault et Allard, 1990). Dans cette section l'emphase de la discussion porte essentiellement sur les granophyres et les rhyolites encaissantes de la Formation de Waconichi.

6.2.1 Évidences de terrain et typologie de granophyre.

Deux principaux types de granophyres ont été identifiés dans la zone d'étude d'après les caractéristiques texturales et minéralogiques. Il s'agit du granophyre à grains grossiers et de celui à grains fins. Ces deux unités se distinguent par leur granulométrie et leur proportion minérale. Le granophyre à grains grossiers est le plus abondant. Il se caractérise par des grains de grande taille, localement porphyrique et un contenu élevé en quartz qu'en feldspath. Au contraire, le granophyre à grains fins contient plus de feldspaths que de quartz et sa granulométrie est fine et homogène. Localement, le granophyre à grains grossiers a un aspect mélanocratique, qui est probablement le résultat de l'altération hydrothermale subie par ces roches, à cause de leur proximité aux systèmes minéralisateurs de l'ancien camp minier de la région.

Les observations de terrain ont permis de constater que ces deux unités de granophyres sont interdigitées, et que le granophyre à grains fins semble être encaissé par celui à grains grossiers. Cette relation indique qu'il s'agit bien de deux unités de granophyre qui se sont mises en place à des moments différents, et que le granophyre à grains fins est tardive dans l'histoire de leur formation. Le contact entre ces deux unités permet aussi de confirmer cette hypothèse. En effet, ce contact est net et irrégulier et par endroit, il se matérialise par des bordures figées qui suggèrent une mise en place tardive par injection d'un magma dans une phase précoce et refroidie.

Dans la zone d'étude, les granophyres sont encaissés par le membre de Scott de la Formation de Waconichi, qui est constituée de roches volcaniques felsiques à intermédiaires (Figure 2.2; Leclerc et al. 2017). Des affleurements visités à environ 400 m au nord de l'indice Ramsey, exposent une zone de contact entre le granophyre à grains grossiers et une unité andésitique. Cette zone de contact, large de plus de 50 m, présente des figures

d'injection et de bréchification de l'unité andésitique par le granophyre à grains grossiers (Figures 2.7 et 3.15a à d). Il s'agit probablement de la zone de contact entre les granophyres du CLD et la partie andésitique de membre de Scott de la Formation de Waconichi. En revanche, aucune évidence de présence de xénolithes ou de digestion des roches encaissantes, qui laisserait penser à une assimilation, n'a été identifiée dans cette zone. La géométrie et l'attitude des contacts entre les granophyres et leur encaissant suggèrent une mise en place intrusive des granophyres dans la Formation de Waconichi.

Les rhyolites de la Formation de Waconichi ont été datées à 2728 ± 0.8 Ma (Leclerc et al. 2011), ce qui correspond à un âge contemporain à la formation des granophyres qui ont été datés à 2727 ± 1.3 Ma (Mortensen 1993). Cette relation chronologique suggère que les granophyres se sont probablement formés brièvement après l'épanchement des rhyolites qui les encaissent. Le CLD, dont la partie supérieure est occupée par ces granophyres, correspond alors à une intrusion subvolcanique, à partir de laquelle ont été extraites les roches volcaniques qui l'encaissent. Cette hypothèse avait déjà été évoquée par Bédard et al. (2009) à la suite de leurs travaux de modélisation sur le CLD.

La mise en place à faible profondeur des granophyres du CLD se confirme aussi par la présence de cavités miarolitiques à minéraux pegmatitiques observées dans ces unités. Il s'agit probablement de poches riches en fluides qui se sont formées dans le magma des granophyres juste avant leur cristallisation. Or, ces poches ne peuvent se former qu'à faible profondeur où la pression lithostatique est faible pour permettre la croissance des minéraux à texture pegmatitique (Thomas et Davidson 2016).

6.2.2 Évidences pétrographiques

L'étude pétrographique confirme l'existence de deux types de granophyres qui se distinguent par leur granulométrie. Toutefois, les caractéristiques minéralogiques et texturales de ces granophyres sont identiques (Figures 3.8, 3.10 et 3.11) à l'exception des zones qui sont touchées par l'altération hydrothermale, qui peuvent montrer localement une récurrence des minéraux d'altération comme la chlorite, la séricite et des carbonates.

Les granophyres du CLD sont constitués essentiellement de quartz, de feldspaths et d'une association de ces deux minéraux sous forme d'agrégats à texture granophyrique. Les examens pétrographiques ont révélé l'existence de feldspaths à zonation oscillatoire et la présence d'inclusions de feldspaths primaires dans des grains de quartz. Ces relations sont indicatrices d'un magma qui se différencie par cristallisation fractionnée (Bowen 1928). Ces indications représentent des évidences de formation des granophyres du CLD à partir d'un magma felsique issue de la différenciation du CLD. Les zonations observées dans les feldspaths et les inclusions de feldspaths dans des grains de quartz magmatiques confirment que ces granophyres correspondent à un magma différencié. En revanche, si ces unités étaient formées par l'assimilation des rhyolites encaissantes par le magma du CLD, la présence de xénocristaux et de figure de résorption, indiquant la digestion de minéraux, aurait dû être observés au microscope, or aucune de ces indications de contamination n'a été observée. De plus, le matériel de fusion étant très proche de la surface, il se serait cristallisé rapidement sans avoir le temps de former des phénocristaux à zonation oscillatoire et à texture perthitique qui sont observés dans les granophyres.

L'hypothèse de formation par différenciation se justifie aussi par la présence d'agrégats à texture granophyrique dans ces unités. En effet, la nucléation de ces agrégats se fait à partir des minéraux magmatiques de quartz ou de feldspath, qu'ils utilisent pour se développer. Les agrégats à texture granophyrique représentent alors la dernière phase minérale primaire à s'être formée. Cela montre une fois de plus le caractère évolutif du magma des granophyres du CLD. Cette texture granophyrique indique aussi que les unités de granophyres du CLD sont formées par un magma hydraté, qui s'est cristallisé proche de la surface. En effet, la formation de cette texture est interprétée comme le résultat d'une cristallisation à l'eutectique d'un magma silicaté riche en eau qui a subi un refroidissement rapide (Dunham, 1965 ; Barker, 1970 ; Chattopadhyay, 1990).

La présence d'eau dans le magma des granophyres du CLD a été confirmée au microscope, par la présence relativement abondante de minéraux perthitiques, qui souvent se développent à partir de phénocristaux de plagioclase zonés. Ces perthites correspondent au produit d'une exsolution d'albite dans de l'orthose, due à un remplacement par métasomatisme (Putnis et Prent 2017). D'après Parsons et al. (2015), ces minéraux résultent de l'infiltration tardive de fluide aqueux, qui conduit à un remplacement par mécanisme de dissolution-solution. La présence de perthites dans les granophyres du CLD est, par conséquent, l'évidence de l'infiltration de fluide aqueux, possiblement de l'eau de mer, qui a hydraté et déstabilisé le magma à la fin de sa cristallisation. Cela pourrait donc expliquer l'enrichissement important en sodium (>5%poids) de ces unités (Annexe 1), qui proviendrait de l'infiltration de l'eau de mer, possiblement à partir de failles synvolcaniques.

Les examens au microscope des rhyolites porphyriques de la Formation de Waconichi ont montré que celles-ci présentent les mêmes caractéristiques minéralogiques et texturales que les granophyres qu'elles encaissent (Figure 3.8). Les rhyolites de la Formation de Waconichi, qui se distinguent par leur texture porphyrique, contiennent, des agrégats à texture granophyrique. Cette similarité entre les caractéristiques pétrographiques peut s'expliquer par la possibilité que ces deux unités proviennent du même magma différencié du CLD.

6.2.3 Évidences chimiques

Le diagramme de classification de Streckeisen (1977) définit les granophyres du CLD comme des « Granites à feldspaths alcalins » (Figure 4.1a). Toutefois, les caractéristiques minéralogiques indiquent que ces roches pourraient être définies plutôt comme des « Tonalites ». Le diagramme de Streckeisen (1977) n'est probablement pas approprié pour classer des roches comme les granophyres surtout que ces unités ont enregistré l'altération hydrothermale des systèmes minéralisateurs de la région (Figures 4.7 et 4.8). L'ensemble des granophyres de la zone d'étude ont une affinité tholéitique, à l'exception de trois échantillons, dont deux sont transitionnel et un comme calco-alcalin (Figure 4.1c). Ces échantillons, qui se démarquent des autres, se caractérisent par leur forte altération hydrothermale (Figures 4.7 et 4.8), ce qui pourrait expliquer leur singularité.

Le diagramme d'éléments immobiles de Winchester et Floyd (1977) regroupe les granophyres et les rhyolites de la Formation de Waconichi dans le champ « Rhyolite » (Figure 4.6a). L'affinité de ces rhyolites est tholéitique à transitionnelle comme les granophyres, et les ratios Th/Yb et Zr/Y sont identiques pour ces unités (Figure 4.6b). Cela indique qu'il existe une similarité géochimique entre ces unités. Les granophyres et les

rhyolites qui les encaissent se caractérisent tous par des profils multiéléments et des spectres de terres rares identiques, définissant un même degré de fractionnement faible et les mêmes anomalies négatives en Ti et Eu (Figure 4.6c et 4.6d).

Une telle similarité géochimique ne peut s'expliquer que par l'existence de lien génétique magmatique entre ces unités. En conséquence, les granophyres du CLD et leur encaissant rhyolitique de la Formation de Waconichi sont donc co-magmatiques. Cependant, il est interprété que les granophyres représentent les équivalents intrusifs des rhyolites qui les encaissent.

Cette hypothèse est appuyée par la similarité du contenu en éléments traces incompatibles et de terres rares des unités mafiques du CLD, et des granophyres et les rhyolites encaissantes (Figure 4.6). En effet, la comparaison chimique de ces unités a montré qu'elles sont toutes caractérisées par des patrons identiques mais avec des enrichissements différents en éléments incompatibles et en terres rares. Cet enrichissement en éléments incompatibles se fait progressivement de la partie la plus mafique du CLD (l'anorthosite) jusqu'à la partie felsique, à l'occurrence, les granophyres, qui sont chimiquement identiques aux rhyolites porphyriques (Figure 4.6). La similarité entre les différents patrons comparés indique que toutes ces unités se sont formées à partir d'un même magma tholéitique en cours de différenciation, et que ce processus de différenciation a eu pour effet l'enrichissement progressif en éléments incompatibles et en terres rares, de la phase mafique à la phase felsique, ayant formé les granophyres et les rhyolites qui les encaissent.

6.2.4 Modélisation géochimique

La discussion de cette section porte sur la possibilité de former les granophyres du CLD par un processus d'assimilation des rhyolites de la Formation de Waconichi. Pour ce faire, une modélisation géochimique a été réalisée, qui se base sur l'équation n°3 de DePaolo (1981). Cette méthode consiste à une série d'équations qui peuvent être utilisées pour modéliser des phénomènes de contamination et de mélange au cours de l'évolution d'un magma. L'équation n°3 de DePaolo (1981) s'applique pour les cas simple de mélange de magma. Pour la réalisation de cette modélisation, il faut avoir les concentrations élémentaires de magma initial, c'est-à-dire la partie mafique du CLD, et de l'assimilant qui correspond aux rhyolites porphyriques. L'équation utilisée pour les calculs de ce modèle est présentée ci-dessous. Les résultats des calculs sont disponibles à l'annexe 3.

$$C_m = C_i \cdot (1-X) + C_a \cdot X$$

C_m : Concentration de l'élément dans le magma mélangé

C_i : Concentration de l'élément dans le magma initial

C_a : Concentration de l'élément dans le matériel assimilé

X : % du degré de contamination

Les calculs ont été réalisés de manière itérative pour faire varier le taux de contamination, afin de déterminer quelle quantité de rhyolite le magma mafique du CLD devrait assimiler pour former des roches ayant une chimie identique à celle des granophyres. Les résultats des calculs ont été représentés dans un diagramme multiéléments et un spectre de terres rares (Figure 6.1). L'interprétation des résultats de cette modélisation indique que, pour former les granophyres du CLD par assimilation des rhyolites qui les encaissent, il faudrait mélanger 95% du volume de ces rhyolites avec 5% du volume du matériel mafique du CLD. Or, selon les relations de terrain, le volume du matériel mafique disponible, à l'occurrence la ferrodiorite, est supérieur à 5%. De plus, il est difficile de faire fondre 95% de rhyolite par 5% de ferrodiorite. En conséquence, il n'est pas possible dans une telle situation de former les granophyres par l'assimilation des rhyolites par le magma mafique du CLD.

En conclusion, d'après les observations de terrain et en laboratoire, il a été démontré que la seule possibilité envisageable et confirmée pour la formation des granophyres du CLD est un processus de différenciation du magma du CLD, et que les rhyolites de la Formation de Waconichi qui les encaissent représentent leurs équivalents extrusifs. Par conséquent, l'hypothèse de formation des granophyres du CLD par fusion et assimilation des rhyolites encaissantes est écartée.

6.3 Minéralisations dans les granophyres du CLD

Le CLD est l'hôte des gisements filoniens à Cu-Au qui ont été exploités dans le camp minier central par 16 mines qui ont produit, de 1955 à 2008, 944 655 t Cu, 110,1 t Au et 35,7 t Ag (Leclerc et al. 2017). L'ensemble de ces dépôts était encaissé par la zone anorthositique du CLD. Des dépôts économiques de Fe-Ti-V sont aussi présents dans la partie litée du CLD (Leclerc et al. 2017). Cela a conduit à une forte concentration de l'exploration minérale sur ces unités roches du CLD. Cependant, les granophyres, qui occupent les parties sommitales du CLD, ont été marginalisées alors que des indices minéralisés à Cu-Au à teneurs non négligeables sont reconnus dans ces unités (Figures 2.3 à 2.6).

Cette section discute de la caractérisation des minéralisations encaissées par les granophyres du CLD. Les objectifs sont (1) de déterminer les différents types de minéralisations, (2) d'établir leur relation avec leur encaissant, et (3) de définir s'il existe un lien génétique avec les systèmes minéralisateurs connus dans la région.

6.3.1 Typologie des minéralisations et relation avec l'encaissant

L'étude des quatre indices minéralisés présents dans la zone d'étude a permis de déterminer que les granophyres encaissent quatre principaux styles de minéralisations. Il s'agit (1) des filons à sulfures massifs à semi-massifs des indices Ramsey et GRH, (2) de la veine rubanée à sulfures de l'indice AXE, (3) de la veine de cisaillement à quartz fumé-sulfures de l'indice Golden Moon, et (4) des veines de quartz-carbonates±magnétites orientées N-S et E-O qui sont présentes sur tous les indices étudiés. Ces dernières ne contiennent pas de minéralisations en sulfures et les relations de recoupement indiquent qu'elles sont toutes précoces car elles sont recoupées par les veines riches en sulfures (Figures 2.3 à 2.6).

Les caractéristiques et associations minéralogiques et texturales de chacune de ces minéralisations examinées au microscope, ont permis d'établir des similarités pétrographiques entre les indices et de définir deux principaux types de minéralisations dans la zone d'étude. Les indices Ramsey et GRH se caractérisent par la présence de filons sulfurés auxquels peuvent être associés localement du quartz et des carbonates. Les phases métalliques de ces filons sont constituées d'une abondance (>60%) de pyrites-chalcopryrite-sphalérite±covelitte, alors que les minéraux de gangue sont constitués de quartz-séricite-chlorite-carbonates±feldspaths. Les indices AXE et Golden Moon se distinguent des deux précédents par leur style de minéralisation sous forme de veine de quartz à faible pendage, qui peut être rubanée ou en cisaillement. Ces deux indices se démarquent aussi d'un point de vue pétrographique par leur contenu important en minéraux de gangue constitués de quartz-carbonate-séricite, et par leur faible proportion en sulfures constituées de pyrites-chalcopryrites-sphalérite.

Ces observations indiquent qu'il existe deux types de minéralisations qui sont encaissées par les granophyres dans la zone d'étude : les filons à sulfures massifs à semi-massifs et les veines de quartz en cisaillement qui peuvent être localement rubanées.

La présence de deux types de minéralisations encaissées par les granophyres a été confirmée par le contenu en éléments traces des pyrites provenant des différents indices minéralisés de la zone d'étude. La distinction de ces deux familles de minéralisations a été possible grâce à l'utilisation des diagrammes de discriminations de Genna et Gaboury (2015) et Augustin et Gaboury (2019) (Figures 5.10 et 5.11).

6.3.2 Liens avec les systèmes minéralisateurs de la région

La comparaison des signatures en éléments traces des pyrites des quatre décapages de la zone d'étude avec celles de différents dépôts ou anciennes mines de la région de Chibougamau, a permis de mettre en évidence des liens entre ces minéralisations. Les diagrammes de discrimination de Genna et Gaboury (2015) et de Augustin et Gaboury (2019) ont démontré que les minéralisations des indices Ramsey et GRH s'apparentent plus aux gisements Copper Rand, Grand-Roy et Devlin, qui sont interprétés comme des systèmes magmato-hydrothermaux liés à la mise en place du pluton de Chibougamau (Pilote et Guha, 2006 ; Leclerc et al. 2017). Les pyrites des indices AXE et Golden Moon, présentent des signatures géochimiques similaires à celles des pyrites de l'ancienne mine Norbeau qui est interprétée comme un système de type orogénique (Dubé 1990 ; Pilote et Guha, 2006).

Les relations de terrain confirment aussi ces observations. Les filons à Cu-Au, qui ont été exploités dans le camp minier de Chibougamau, ont des caractéristiques similaires aux minéralisations des indices Ramsey et GRH. A la mine Cooper Rand, les zones minéralisées orientées (120°/65°) se superposent à des veines d'ankérite-sidérite-quartz±magnétite±sulfures (Pilote et Guha 2006 ; Leclerc et al. 2017). Cette relation a été observée sur les décapages des indices Ramsey et GRH, où les minéralisations se situent dans des filons sulfurés orientés E-O avec un pendage de 65° vers le S, et qui recoupent des veines de quartz-ankérite-sidérite.

Sur les décapages des indices AXE et Golden Moon, les veines portant les minéralisations se trouvent dans des zones de cisaillement orientées E-O, de faible pendage vers le sud et à mouvement vertical. Des veines en extension sont associées aux veines de cisaillement. La paragenèse minéralogique des veines de cisaillement est constituée de quartz fumé-carbonate-sulfures et un halo d'altération en carbonate-séricite±chlorite est associé à

ces veines. Il s'agit là, d'autant de caractéristiques structurale et minéralogique qui sont fréquentes dans les systèmes orogéniques (Groves et al. 1998 ; Groves et al. 2003 ; Hart et Goldfarb 2005 ; Tomkins 2013 ; Gaboury 2019). Les systèmes orogéniques de la région de Chibougamau présentent les mêmes caractéristiques que ces deux indices. La veine McKenzie, orientée E-O, est inclinée vers le sud comme la veine de cisaillement de l'indice Golden Moon, dont elle partage la même paragenèse minérale constituée de pyrites-chalcopryrite-±sphalérite dans une gangue de quartz-carbonates-séricite. Les veines d'extension associées à la veine de cisaillement de l'indice Golden Moon sont identiques à celles de la mine Norbeau, où elles sont subhorizontales et constituées de quartz-carbonates (Dubé 1990 ; Leclerc et al. 2012).

Les caractéristiques de terrain confirment l'existence de liens génétiques entre les indices Ramsey et GRH et les systèmes magmato-hydrothermaux de la région ; et entre les indices Golden Moon et AXE et les systèmes orogéniques associés aux zones de cisaillement E-O de la région de Chibougamau (Leclerc et al. 2012). Ces constats démontrent que deux épisodes de minéralisations épigénétiques distincts ont été enregistrés par les granophyres du CLD. Il s'agit d'un épisode précoce, associé au système magmato-hydrothermal du pluton de Chibougamau, ayant formé l'ancien camp minier à Cu-Au et d'un épisode tardif qui est relié aux systèmes orogéniques de la région.

Par conséquent, les granophyres du CLD n'ont pas de lien génétique direct avec les minéralisations qu'ils encaissent. Il s'agit en réalité de corps intrusifs qui, du fait de leur comportement rhéologique, ont des facilités à se fracturer et à encaisser des minéralisations épigénétiques. L'abondance des fractures sur les différents décapages et affleurements visités témoignent du comportement cassant des unités de granophyres. Ainsi, les granophyres du

CLD peuvent être considérés comme des unités qui sont potentiellement favorables pour encaisser des minéralisations d'origine hydrothermale.

6.4 Modèle évolutif pour la formation des granophyres du CLD.

Les derniers travaux qui ont été réalisés sur les granophyres du CLD ont interprété ces unités comme des produits de l'assimilation des rhyolites de la Formation de Waconichi par le magma du CLD (Alfaro 1990 ; Daigneault et Allard, 1990). La caractérisation pétrographique et chimique des granophyres du CLD, ainsi qu'une modélisation géochimique, ont révélé que ces unités ont été formées par la différenciation du CLD et non par la fusion et assimilation des rhyolites encaissantes par le magma du CLD.

Suite aux observations des évidences qui suggèrent une formation des granophyres par différenciation du CLD, un modèle évolutif en 4 étapes est établi pour expliquer la mise en place du CLD et la formation des granophyres. Le CLD est une intrusion subvolcanique litée qui est interprétée comme la chambre magmatique à partir de laquelle sont issues les formations d'Obatogamau et de Waconichi dans lesquelles le CLD s'est mis en place autour de 2728 Ma (Bédard et al. 2009 ; Leclerc et al. 2011 ; Leclerc et al. 2017). Le processus de formation des granophyres par différenciation du CLD est présenté dans le modèle évolutif de la figure 6.2.

Ce processus a débuté avec la mise en place du CLD dans la Formation d'Obatogamau (Figure 6.1a), qui a été extrait initialement de la chambre magmatique autour de 2730 Ma (Mortensen 1993 ; Bédard et al. 2009 ; Polat et al. 2012). Le CLD, composé d'un magma mafique d'affinité tholéitique (Figures 4.2b à 4.2d) commence à se différencier par cristallisation fractionnée.

Ensuite ce magma tholéitique augmente de volume par injections répétitives de magma et il subit une différenciation extrême en suivant la suite de fractionnement de Fenner (1929). Ce mode de différenciation a été documenté pour plusieurs intrusions litées de grand volume comme celles du Skaergaard (Wagner et Deer 1939; McBirney 1995) et du Bushveld (Walraven 1985; Mathez et al. 2013). La différenciation poussée du CLD a conduit à un enrichissement important du magma en Fe, qui dans ses dernières phases de différenciation produit un magma felsique (Figure 6.2b).

Le CLD se met en place proche de la surface, une partie du magma felsique est extraite de la chambre pour former les rhyolites de la Formation de Waconichi autour de 2728 Ma (Figure 6.2c) (Mortensen 1993; Leclerc et al. 2011). Après l'épanchement de ces rhyolites, un système hydrothermale se forme par circulation d'eau de mer chauffée par le CLD (Figure 6.2c). Les cellules de convection lessivent les métaux des basaltes de la Formation de l'Obatogamau qui sont concentrés sous forme de lentilles de SMV dans les rhyolites de la Formation de Waconichi (Figure 6.2c).

A la fin de l'activité volcanique, qui a conduit à la formation des rhyolites de la Formation de Waconichi, le magma felsique occupant le sommet du CLD continue de sortir de la chambre magmatique sous forme d'intrusive pour former des granophyres qui s'injecte dans les rhyolites. Ces granophyres se refroidissent rapidement à cause de la proximité à la surface et la circulation de l'eau de mer. Ce refroidissement rapide des granophyres et la circulation de l'eau de mer est aussi responsable de la formation des textures granophyriques et perthitiques observées dans les granophyres (Figures 3.10c à 3.10h).

FIGURES DU CHAPITRE VI

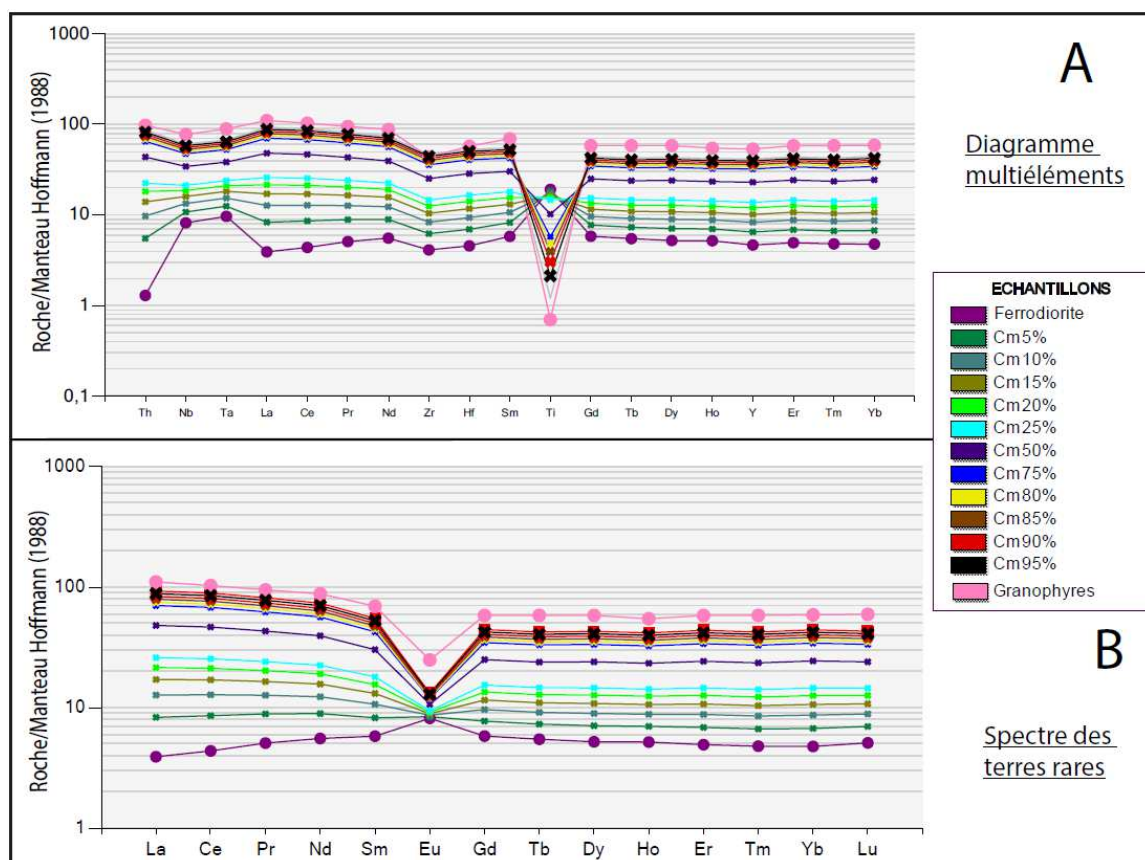


Figure 6.1 : Diagrammes représentant les résultats de la modélisation selon DePaolo (1981). **a)** Diagrammes multiéléments. **b)** Spectres des terres rares. Cm = composition élémentaire du mélange. Les pourcentages représentent les taux d'assimilation.

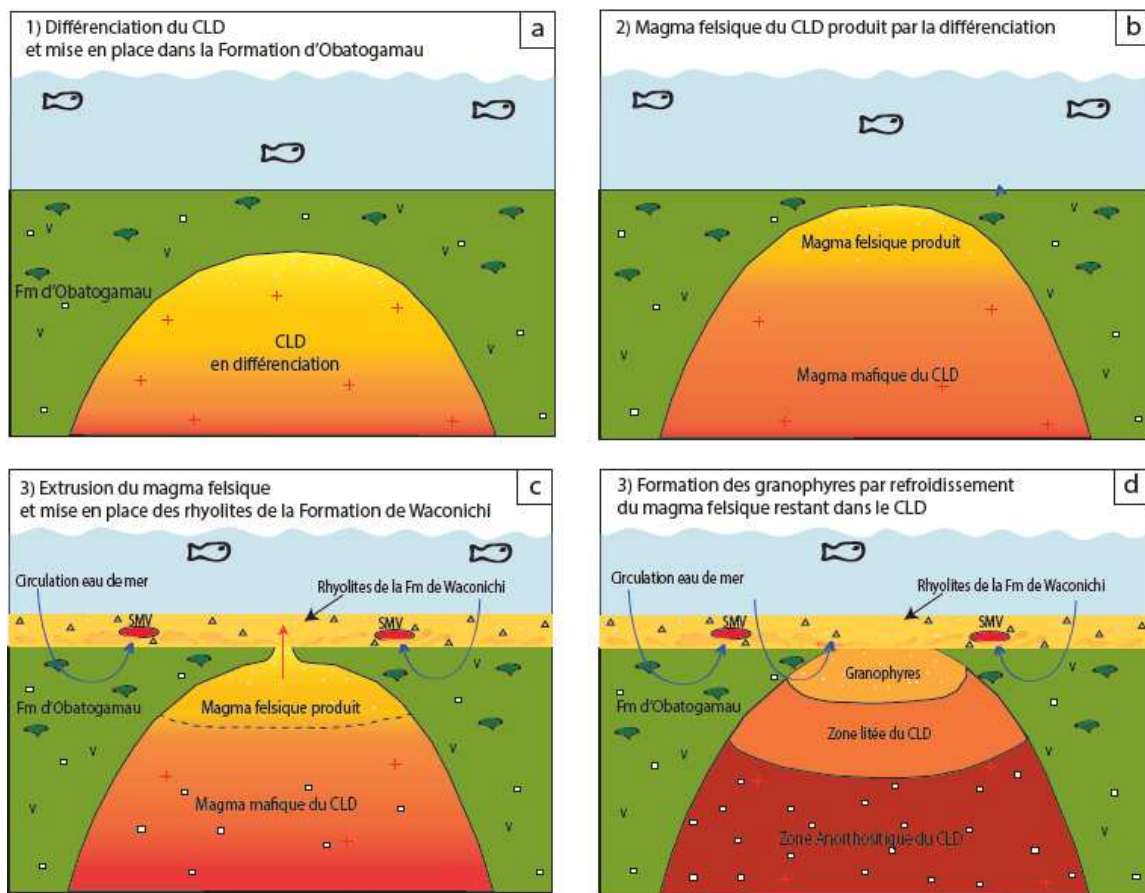


Figure 6.2 : Modèle évolutif proposé pour la formation des granophyres du CLD. **a)** Mise en place du CLD dans la Formation de Waconichi et début de différenciation du magma de l'intrusion. **b)** Le magma du CLD subit une différenciation poussée, s'enrichit en fer et finit par produire un magma felsique au sommet de la chambre. **c)** Une partie du magma felsique générée par la différenciation extrême est extraite de la chambre pour former les rhyolites de la Formation de Waconichi. Le système hydrothermal, créé par la circulation de l'eau de mer et la chaleur de la chambre magmatique, permet de former des SMV dans ces rhyolites. L'eau de mer a possiblement contaminé le magma pour l'enrichir en Na vers les derniers stades de la cristallisation. **d)** A la fin de l'activité volcanique ayant formée les rhyolites, le reste du magma felsique se cristallise rapidement pour former les granophyres au sommet du CLD.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

Les granophyres correspondent à l'ensemble des unités felsiques qui occupent la partie supérieure de l'intrusion litée du CLD. La caractérisation pétrographique et géochimique de ces unités ainsi que les relations de terrain ont permis d'identifier l'existence de deux types de granophyres dans la zone d'étude, qui se situe sur le flanc nord du CLD. Il s'agit du granophyre à grains grossiers qui est le plus abondant, et le granophyre à grains fins qui s'est mise en place tardivement par injections dans le précédent. La distinction entre ces deux unités est essentiellement basée sur la granulométrie et les proportions minérales.

La caractérisation de ces granophyres a révélé que l'origine de la formation de ces unités est liée au processus de différenciation extrême du magma du CLD, dont ils constituent la partie felsique intrusive. Par conséquent, ces unités n'ont pas été formées par la fusion et l'assimilation des rhyolites encaissantes de la Formation de Waconichi comme cela a été suggéré par les travaux qui datent des années 90.

Par ailleurs, comme cela a été décrit dans le modèle évolutif proposé pour la formation des granophyres du CLD, ces rhyolites correspondent aux équivalents extrusifs des granophyres, car elles partagent les mêmes caractéristiques minéralogiques que les granophyres. Les similarités chimiques, tant en termes d'affinité qu'en termes de contenu en éléments traces incompatibles, confirment que ces unités sont co-magmatiques.

Le CLD correspond alors à une intrusion subvolcanique dont le magma a subi une différenciation poussée, qui a conduit à la formation d'un magma felsique au sommet de l'intrusion, à partir duquel se sont formés les granophyres et leurs équivalents rhyolitiques qui les encaissent.

Les similarités pétrographiques et les signatures en éléments traces des pyrites des indices minéralisés encaissés par les granophyres de la zone d'étude ont permis de définir deux types de minéralisations dans cette zone. Les minéralisations de type filonien observées sur les indices Ramsey et GRH, qui montrent des affinités génétiques avec les systèmes magmato-hydrothermaux de la région, et les minéralisations sous forme de veine de quartz rubanée et en cisaillement qui correspondent à celles des indices AXE et Golden Moon qui ont des affinités génétiques avec les systèmes de type orogénique de la région de Chibougamau.

Cependant, les granophyres du CLD n'ont pas de lien génétique direct avec ces minéralisations. Ces unités, du fait de leur forte compétence, sont plus favorables à se fracturer et à encaisser des minéralisations épigénétiques comme ce qui est observé dans la zone d'étude. La présence de différents indices minéralisés dans les granophyres, qui ont des affinités avec certains systèmes minéralisateurs connus de la région de Chibougamau, démontrent l'existence d'un potentiel minéral dans ces unités. Celles-ci ne devraient pas être marginalisées par les programmes d'exploration minérale dans la région de Chibougamau.

Références:

- Alfaro, M.A. 1990. Origin of the granophyres within the Dore Lake complex, Chibougamau, Quebec, Canada, University of Georgia.
- Allard, G.O. 1976. The Doré Lake Complex and its importance to Chibougamau geology and metallogeny. Ministère des richesses naturelles.
- Augustin, J., et Gaboury, D. 2018. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso-Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. *Ore Geology Reviews*.
- Barker, D.S. 1970. Compositions of Granophyre, Myrmekite, and Graphic Granite *Geological Society of America*(81): 3339-3350 [cité le November 1970].
- Barton Jr, P., et Bethke, P.M. 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: pathology and epidemiology. *American Mineralogist* **72**(5-6): 451-467.
- Bédard, J.H., Leclerc, F., Harris, L.B., et Goulet, N. 2009. Intra-sill magmatic evolution in the Cummings Complex, Abitibi greenstone belt: Tholeiitic to calc-alkaline magmatism recorded in an Archaean subvolcanic conduit system. *Lithos* **111**(1-2): 47-71.
- Bowen, N.L. 1956. The evolution of the igneous rocks. Dover Publications.
- Campbell, I. 1996. Fluid dynamic processes in basaltic magma chambers. *Dans Developments in Petrology*. Elsevier. pp. 45-76.
- Caty, J. 1975. Géologie de la demie ouest du canton de Richardson. Ministère des Richesses naturelles, Québec, DP-342.
- Cawthorn, R.G., Barnes, S.J., Ballhaus, C., et Malitch, K.N. 2005. Platinum-group element, chromium, and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks. *Economic Geology* **100**: 215-249.
- Cawthorn, R.G., et McCarthy, T. 1985. Incompatible trace element behavior in the Bushveld Complex. *Economic Geology* **80**(4): 1016-1026.
- Charlier, B., Namur, O., et Grove, T.L. 2013. Compositional and kinetic controls on liquid immiscibility in ferrobalt-rhyolite volcanic and plutonic series. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **113**: 79-93.
- Charlier, B., Namur, O., Toplis, M.J., Schiano, P., Cluzel, N., Higgins, M.D., et Auwera, J.V. 2011. Large-scale silicate liquid immiscibility during differentiation of tholeiitic basalt to granite and the origin of the Daly gap. *Geology* **39**(10): 907-910.
- Clairat, R., Gaboury, D., et Leclerc, F. 2017. Potentiel en minéralisations de type Sulfures Massifs Volcanogènes (SMV) dans le district de Chibougamau-Chapais, Sous-province géologique de l'Abitibi (Québec). Ministère des Ressources Naturelles et de l'Energie
- Czamanske, G., Zientek, M., et Manning, C. 1991. Low-K granophyres of the Stillwater complex, Montana. *American Mineralogist* **76**: 1646-1661.
- Daigneault, R., et Allard, G. 1990. Le Complexe du Lac Doré et son environnement géologique, région de Chibougamau-Sous-Province de l'Abitibi. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. MM-89-03.
- Deegan, F.M. 2010. Processes of Magma-crust Interaction: Insights from Geochemistry and Experimental Petrology, *Acta Universitatis Upsaliensis*.

- DePaolo, D.J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and planetary science letters* **53**(2): 189-202.
- Dubé, B. 1990. Métallogénie aurifère du filon-couche de Bourbeau: région de Chibougamau, Quebec. Université du Québec à Chicoutimi.
- Dunham, A.C. 1965. The Nature and Origin of the Groundmass Textures in Felsites and Granophyres from Rhum, Inverness-shire. *Geological Magazine* **102**(1): 8-23. doi: 10.1017/S0016756800053838.
- Fenner, C.N. 1929. The crystallization of basalts. *American Journal of Science*(105): 225-253.
- Fischer, L.A., Wang, M., Charlier, B., Namur, O., Roberts, R.J., Veksler, I.V., Cawthorn, R.G., et Holtz, F. 2016. Immiscible iron-and silica-rich liquids in the Upper Zone of the Bushveld Complex. *Earth and Planetary Science Letters* **443**: 108-117.
- Fontboté, L., Kouzmanov, K., Chiaradia, M., et Pokrovski, G.S. 2017. Sulfide minerals in hydrothermal deposits. *Elements* **13**(2): 97-103.
- Gaboury, D. 2019. Parameters for the formation of orogenic gold deposits. *Applied Earth Science*: 1-10. doi: 10.1080/25726838.2019.1583310.
- Genna, D., et Gaboury, D. 2015. Deciphering the hydrothermal evolution of a VMS system by LA-ICP-MS using trace elements in pyrite: An example from the Bracemac-McLeod deposits, Abitibi, Canada, and implications for exploration. *Economic Geology* **110**(8): 2087-2108.
- Godel, B. 2015. Platinum-group element deposits in layered intrusions: recent advances in the understanding of the ore forming processes. *Dans Layered Intrusions*. Springer. pp. 379-432.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., et Robert, F. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore geology reviews* **13**(1-5): 7-27.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F., et Hart, C.J. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic geology* **98**(1): 1-29.
- Hart, C., et Goldfarb, R. 2005. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems. *Sous la direction de. Dans New Zealand Minerals Conference Proceedings*, pp. 125-133.
- Hirschmann, M. 1992. Origin of the Transgressive granophyres from the Layered Series of the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **52**(1): 185-207. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(92\)90140-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(92)90140-9).
- Hofmann, A.W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* **90**(3): 297-314.
- Huppert, H.E., Stephen, R., et Sparks, J. 1985. Cooling and contamination of mafic and ultramafic magmas during ascent through continental crust. *Earth and Planetary Science Letters* **74**(4): 371-386.
- Jakobsen, J.K., Veksler, I., Tegner, C., et Brooks, C.K. 2005. Immiscible iron-and silica-rich melts in basalt petrogenesis documented in the Skaergaard intrusion. *Geology* **33**(11): 885-888.

- Kays, M., McBirney, A., et Goles, G. 1981. Xenoliths of gneisses and the conformable, clot-like granophyres in the marginal border group, Skaergaard intrusion, East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **76**(3): 265-284.
- Lapallo, C.M. 1988. Petrographic and geochemical relations between the rocks on the north and south limbs of the Chibougamau Anticline: assimilation of roof rocks, crystallization and residual liquid compositions in the Dore Lake Complex, Quebec, Canada, University of Georgia.
- Large, R.R., Hollit, C., Thomas, H., Foster, J., Danyushevsky, L., Scott, R., Gilbert, S., Meffre, S., Bull, S., Maslennikov, V., Emsbo, P., et Singh, B. 2009. Gold and Trace Element Zonation in Pyrite Using a Laser Imaging Technique: Implications for the Timing of Gold in Orogenic and Carlin-Style Sediment-Hosted Deposits. *Economic Geology* **104**(5): 635-668. doi: 10.2113/gsecongeo.104.5.635.
- Leclerc, F., Bédard, J., Harris, L., Goulet, N., Houle, P., et Roy, P. 2008. Nouvelles subdivisions de la Formation de Gilman, Groupe de Roy, région de Chibougamau, sous-province de l'Abitibi, Québec: résultats préliminaires. *Recherches en cours, Commission géologique du Canada* **7**: 20.
- Leclerc, F., Bédard, J.H., Harris, L.B., McNicoll, V.J., Goulet, N., Roy, P., et Houle, P. 2011. Tholeiitic to calc-alkaline cyclic volcanism in the Roy Group, Chibougamau area, Abitibi Greenstone Belt—revised stratigraphy and implications for VHMS exploration. *Geological Survey of Canada Contribution* 20100254. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune Contribution 8439-2010-2011-17. *Canadian Journal of Earth Sciences* **48**(3): 661-694.
- Leclerc, F., Harris, L.B., Bédard, J.H., van Breemen, O., et Goulet, N. 2012. Structural and Stratigraphic Controls on Magmatic, Volcanogenic, and Shear Zone-Hosted Mineralization in the Chapais-Chibougamau Mining Camp, Northeastern Abitibi, Canada (.). *Economic Geology* **107**(5): 963-989.
- Leclerc, F., Roy, P., Houle, P., Pilote, P., Bédard, J.H., Harris, L.B., McNicoll, V., Van Breemen, O., David, J., et Goulet, N. 2017. Géologie de la région de Chibougamau. Ministère de l'Énergie et Ressources naturelles du Québec.
- Lee, C. 1996. A review of mineralization in the Bushveld Complex and some other layered intrusions. *Dans Developments in Petrology*. Elsevier. pp. 103-145.
- Lefebvre, C. 1991. Étude de la genèse des pépérites et de leur contexte volcano-sédimentaire, Formation de Blondeau, Chibougamau, Québec. Université du Québec à Chicoutimi.
- Maier, W.D., Barnes, S.-J., et Pellet, T. 1996. The economic significance of the Bell River Complex, Abitibi subprovince, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences* **33**(7): 967-980.
- Maier, W.D., et Groves, D.I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni–Cu deposits. *Mineralium Deposita* **46**(8): 841-857. doi: 10.1007/s00126-011-0339-6.
- Mathez, E., VanTongeren, J., et Schweitzer, J. 2013. On the relationships between the Bushveld Complex and its felsic roof rocks, part 1: petrogenesis of Rooiberg and related felsites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **166**(2): 435-449.
- McBirney, A. 1995. Mechanisms of differentiation in the Skaergaard Intrusion. *Journal of the Geological Society* **152**(3): 421-435.
- McBirney, A.R., et Naslund, H. 1990. The differentiation of the Skaergaard intrusion. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **104**(2): 235-240.

- Mercier-Langevin, P., Gibson, H.L., Hannington, M.D., Goutier, J., Monecke, T., Dubé, B., et Houlié, M.G. 2014. A special issue on Archean magmatism, volcanism, and ore deposits: part 2. Volcanogenic massive sulfide deposits preface. *Economic Geology* **109**(1): 1-9.
- Middlemost, E.A. 1985. *An Introduction to Igneous petrology, Magma and magmatic Rocks*. Longmans, Ed.
- Midra, R. 1989. *Géochimie des laves de la formation obatogamau:(bande sud de la ceinture archéenne Chibougamau-Matagami): Québec, Canada. Université du Québec à Chicoutimi.*
- Miller, J., et Ripley, E. 1996. Layered intrusions of the Duluth complex, Minnesota, USA. *Dans Developments in Petrology*. Elsevier. pp. 257-301.
- Mortensen, J. 1993. U–Pb geochronology of the eastern Abitibi subprovince. Part 1: Chibougamau–Matagami–Joutel region. *Canadian Journal of Earth Sciences* **30**(1): 11-28.
- Namur, O., Abily, B., Boudreau, A.E., Blanchette, F., Bush, J.W., Ceuleneer, G., Charlier, B., Donaldson, C.H., Duchesne, J.-C., et Higgins, M.D. 2015. Igneous layering in basaltic magma chambers. *Dans Layered Intrusions*. Springer. pp. 75-152.
- Naslund, H., et McBirney, A. 1996. Mechanisms of formation of igneous layering. *Dans Developments in petrology*. Elsevier. pp. 1-43.
- O'Driscoll, B., et VanTongeren, J.A. 2017. Layered Intrusions: From Petrological Paradigms to Precious Metal Repositories. *Elements* **13**(6): 383-389. doi: 10.2138/gselements.13.6.383.
- Parsons, I., Fitz Gerald, J.D., et Lee, M.R. 2015. Routine characterization and interpretation of complex alkali feldspar intergrowths. *American Mineralogist* **100**(5-6): 1277-1303.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., et Hergt, J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. [10.1039/C1JA10172B]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **26**(12): 2508-2518. doi: 10.1039/C1JA10172B.
- Pearce, J.A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* **100**(1-4): 14-48.
- Pilote, P., et Guha, J. 2006. Partie B—Métallogénie de l'extrémité est de la Sous-province de l'Abitibi. Le camp minier de Chibougamau et le parautochtone Grenvillien: métallogénie, métamorphisme et aspects structuraux: Geological Association of Canada, livret-guide d'excursion B **1**: 29-46.
- Pirajno, F. 2007. Mantle plumes, associated intraplate tectono-magmatic processes and ore systems.
- Polat, A., Frei, R., Longstaffe, F.J., et Woods, R. 2018. Petrogenetic and geodynamic origin of the Neoarchean Doré Lake Complex, Abitibi subprovince, Superior Province, Canada. *International Journal of Earth Sciences* **107**(3): 811-843.
- Putnis, A., et Prent, A. 2017. Variable diffusion rates during exsolution coarsening in the presence of fluids. *Sous la direction de. Dans EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 11177.
- Reich, M., Deditius, A., Chrysosoulis, S., Li, J.-W., Ma, C.-Q., Parada, M.A., Barra, F., et Mittermayr, F. 2013. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a

- porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **104**: 42-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.006>.
- Ross, P.-S., et Bédard, J.H. 2009. Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Canadian Journal of Earth Sciences* **46**(11): 823-839.
- Sansfançon, R. 2017. Rapport du programme de prospection 2016. Propriété Golden Moon.
- Scoates, J.S., et Wall, C.J. 2015. Geochronology of layered intrusions. *Dans Layered intrusions*. Springer. pp. 3-74.
- Strauss, C. 1947. Granitisation and rheomorphism associated with the Bushveld granite area near the Leeuwpoort tin mine. *South African Journal of Geology* **50**(Transactions 1947): 161-170.
- Streckeisen, A.L. 1967. Classification and nomenclature of igneous rocks. *N. Jb. Miner.* **107**: 144-240.
- Taner, M.F., Ercit, T.S., et Gault, R.A. 1998. Vanadium-bearing magnetite from the Matagami and Chibougamau mining districts, Abitibi, Quebec, Canada. *Exploration and Mining Geology* **7**(4): 299-311.
- Thomas, R., et Davidson, P. 2016. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite/Lusatia. *Lithos* **260**: 225-241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.05.015>.
- Thurston, P., Ayer, J., Goutier, J., et Hamilton, M. 2008. Depositional gaps in Abitibi greenstone belt stratigraphy: A key to exploration for syngenetic mineralization. *Economic Geology* **103**(6): 1097-1134.
- Tomkins, A.G. 2013. On the source of orogenic gold. *Geology* **41**(12): 1255-1256.
- Tremblay, D. 2014. GM68438: Rapport de travaux d'exploration simplifiée. Ministère de l'Energie et des Ressources Naturelles. . 52.
- Trepanier, S. 2010. Lithomodeleur - Logiciel de traitement de la lithogéochimie phase 2 Consorem.
- Trépanier, S., Mathieu, L., et Daigneault, R. 2015. CONSONORM_LG: new normative minerals and alteration indexes for low-grade metamorphic rocks. *Economic Geology* **110**(8): 2127-2138.
- Trépanier, S., Mathieu, L., Daigneault, R., et Faure, S. 2016. Precursors predicted by artificial neural networks for mass balance calculations: Quantifying hydrothermal alteration in volcanic rocks. *Computers & Geosciences* **89**: 32-43.
- VanTongeren, J., et Mathez, E. 2012. Large-scale liquid immiscibility at the top of the Bushveld Complex, South Africa. *Geology* **40**(6): 491-494.
- Veksler, I.V., et Charlier, B. 2015. Silicate liquid immiscibility in layered intrusions. *Dans Layered intrusions*. Springer. pp. 229-258.
- Von Gruenewaldt, G. 1968. The Rooiberg felsite north of Middelburg and its relation to the layered sequence of the Bushveld Complex. *South African Journal of Geology* **71**(Transactions 1968, Part 2): 153-172.
- Wager, L., Brown, G., et Wadsworth, W. 1960. Types of igneous cumulates. *Journal of Petrology* **1**(1): 73-85.
- Wager, L.R., et Brown, G.M. 1967. Layered igneous rocks. WH Freeman.
- Wagner, L., et Deer, R. 1939. The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuaq, east Greenland. *Medd. om Gronland*.
- Walraven, F. 1985. Genetic Aspects of the Granophyric Rocks of the Bushveld Complex *Economic Geology*(80): 1166-1180 [cité].

- Walraven, F. 1987. Textural, geochemical and genetic aspects of the granophyric rocks of the Bushveld Complex.
- Winchester, J.A., et Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology* **20**: 325-343.

Annexes

Annexe 1 : Analyses lithogéochimiques

Échantillons	Noms de roches	Unités	UTME	UTMN	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	Cr2O3	TiO2	MnO	P2O5	SrO	BaO	LOI	Total
A006A1	Anorthosite	CLD	538415	5519805	42,6	22,7	8,51	10,7	7,97	0,84	0,01	-0,002	0,04	0,1	0,01	0,02	-0,01	6,22	99,72
C086B1	Andésite	Waconichi	535502	5523453	49,6	14,25	14,95	5,64	3,61	3,81	0,22	0,01	0,56	0,16	0,13	0,01	0,01	6,34	99,3
C017A1	Diorite	CLD	541579	5520848	70,3	15,1	4,94	3,71	0,49	4,77	0,08	-0,002	0,3	0,08	0,03	0,02	0,01	0,96	100,79
C087B1	Dyke d'aplite	CLD	540689	5523759	78,5	11,4	3,05	0,64	0,17	3,78	1,73	0,003	0,09	0,04	0,02	-0,01	0,03	2,31	101,76
C081D1	Dyke felsique	CLD	535587	5522617	79,4	12,1	0,92	0,64	0,08	5,24	1,11	0,002	0,07	0,01	-0,01	-0,01	0,03	1,07	100,67
C081C1	Dyke mafique	P Chiboug	535609	5522609	51,9	14,6	10,7	5,71	3,6	2,86	2,11	0,009	1,03	0,08	0,25	0,01	0,03	6,85	99,74
C107D1	Dyke mafique	P Chiboug	540955	5523964	52,5	15,1	8,51	5,53	3,84	2,02	2,72	0,008	0,87	0,07	0,24	0,01	0,04	7,39	98,85
C015A1	Ferrodiorite	CLD	541440	5520326	43,1	10,95	25,2	9,49	4,5	1,78	0,2	-0,002	3,63	0,36	0,18	0,01	-0,01	0,47	99,87
C016A1	Ferrodiorite	CLD	541548	5520798	35,7	9,96	32,2	8,2	4,72	0,34	0,15	-0,002	5,41	0,42	0,27	0,01	-0,01	2,21	99,59
C018C1	Ferrodiorite	CLD	541560	5521499	46	11,8	20,9	9,93	5,82	1,92	0,17	0,018	1,19	0,32	0,12	0,02	0,01	0,54	98,76
A009A1	Granophyre	CLD	540570	5523828	78	10,65	3,54	0,49	0,02	4,38	1,67	0,002	0,15	0,02	0,02	-0,01	0,06	1,21	100,21
A011A1	Granophyre	CLD	540995	5524019	76,5	10,7	4,24	1,66	0,15	6,27	0,1	0,002	0,12	0,03	0,05	0,02	0,03	1,69	101,56
C070A1	Granophyre	CLD	535640	5522659	77,5	10,85	2,01	0,21	0,04	4,49	2,15	0,002	0,13	0,02	0,02	-0,01	0,05	0,76	98,23
C081A3	Granophyre	CLD	535611	5522619	79,4	11,35	2,13	0,8	0,11	4,57	2,39	0,004	0,13	0,01	0,01	-0,01	0,05	1,04	101,99
C081A4	Granophyre	CLD	535629	5522618	77,1	10,95	0,89	1,38	0,08	5,15	0,85	0,003	0,12	0,01	0,01	-0,01	0,02	1,71	98,27
C086A1	Granophyre	CLD	535502	5523453	79,5	11,45	2	0,63	0,35	5,95	0,13	0,002	0,12	0,02	0,02	0,01	0,02	0,91	101,11
C087A1	Granophyre	CLD	540657	5523762	76	10,65	3,53	0,82	0,03	4,67	0,97	0,002	0,11	0,02	0,01	-0,01	0,05	2,37	99,23
C087A2	Granophyre	CLD	540676	5523764	76,4	10,8	3,18	1,75	0,03	4,36	1,93	-0,002	0,11	0,03	0,01	-0,01	0,06	2,91	101,57
C107A1	Granophyre	CLD	540943	5523980	77,4	10,65	3,55	1,33	0,05	4,63	1	0,002	0,13	0,03	0,01	-0,01	0,03	2,78	101,59
C107A2	Granophyre	CLD	540943	5523988	76,5	10,65	3,84	1,01	0,02	5,11	0,7	0,002	0,14	0,03	0,02	-0,01	0,03	1,74	99,79
C107A3	Granophyre	CLD	540970	5523985	75,5	10,5	3,98	1,45	0,05	4,78	0,91	0,002	0,13	0,04	0,02	-0,01	0,01	3,07	100,44
C108A1	Granophyre	CLD	541019	5523965	76,7	10,55	3,25	1,28	0,02	4,34	2,09	0,002	0,13	0,02	0,01	-0,01	0,05	1,32	99,76
C107C1	Granophyre	CLD	540955	5523977	76,8	10,8	3,15	1,15	0,07	4,17	1,33	0,002	0,11	0,03	0,01	0,01	0,04	2,31	99,98
C107B1	Granophyre fin	CLD	540956	5523979	75,1	10,75	2,53	2,33	0,08	3,24	1,79	0,002	0,11	0,04	0,02	0,01	0,03	2,98	99,01
C108B1	Granophyre fin	CLD	541026	5523961	78,4	11,55	3,07	0,7	0,01	4,69	2,54	0,002	0,13	0,02	-0,01	-0,01	0,07	0,65	101,83
C077A1	Mélanogranophyre	CLD	540350	5524473	71,4	11	9,82	0,78	1,19	1,11	1,07	0,003	0,37	0,1	0,06	-0,01	0,01	2,91	99,82
C078A1	Mélanogranophyre	CLD	540286	5524265	73,5	11,1	7,93	0,42	0,75	3,82	0,23	-0,002	0,32	0,03	0,04	-0,01	-0,01	1,68	99,82
C071A1	Rhyolite QFP	Waconichi	537245	5524468	76,8	10,95	1,02	1,55	0,15	4,74	1,06	0,003	0,2	0,01	0,03	-0,01	0,03	1,84	98,38
C072A1	Rhyolite QFP	Waconichi	537129	5524322	73	10,8	8,51	0,16	3,07	1,04	0,99	-0,002	0,31	0,06	0,04	-0,01	0,01	2,94	100,93
C073A1	Rhyolite QFP	Waconichi	537130	5524324	76,5	12,85	1,53	1,67	0,27	1,21	3,16	0,003	0,22	0,02	0,03	-0,01	0,07	3,07	100,6
C081B1	Rhyolite QFP	Waconichi	535631	5522614	76,7	11,15	2,28	0,63	0,13	4,76	0,95	0,002	0,18	0,01	0,02	-0,01	0,03	1,17	98,01
C081B3	Rhyolite QFP	Waconichi	535637	5522606	77,2	11,45	2,05	1,14	0,12	5,33	0,78	0,003	0,17	0,02	0,02	0,01	0,04	1,29	99,62

CLD=Complexe du Lac Doré; Waconichi= Formation de Waconichi, P Chiboug=Pluton de Chibougamau. NB : Tous ces éléments sont exprimés en % poids.

Échantillons	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm
A006A1	4,3	1	20	0,03	0,14	0,05	0,22	21,3	0,07	-5	-0,2	0,02	0,5	0,01	0,2	0,6	0,12	0,3	0,1	-1	145	0,1	0,01	-0,05	0,01
C086B1	98,2	103,5	70	0,34	22,5	14,9	3,7	24,9	20	-5	4,2	4,97	37,9	2,56	36,2	71,4	15,35	6,7	19,05	7	111,5	0,8	3,38	0,59	2,33
C017A1	120	13,5	20	0,27	0,87	0,77	1,77	22,2	1,04	-5	8,3	0,2	7,1	0,21	3,2	6,4	1,56	1,1	1,25	-1	152,5	0,3	0,13	0,08	0,13
C087B1	230	89,6	30	0,26	25,6	18,7	2,16	29,8	20,2	-5	22,4	5,64	36,5	3,42	75,5	63	12,9	38,8	18,05	6	23,9	5,2	3,75	8,83	3,26
C081D1	277	13,9	20	0,07	12,1	12,35	0,47	26,1	4,72	-5	28,5	3,04	5,6	3,04	120,5	10,9	2,23	21,8	3,78	1	36,2	8,2	1,47	8,64	2,37
C081C1	218	19,4	70	1,09	5,11	3,1	0,95	17,7	4,56	-5	3,4	1,07	7,3	0,58	5,1	13,9	2,96	40,5	3,77	17	77	0,5	0,8	0,96	0,48
C107D1	369	34,1	60	0,63	2,59	1,63	1,05	17,1	3,29	-5	2,8	0,58	14,1	0,28	4,2	19,2	4,5	64,8	3,77	5	123	0,4	0,42	1,63	0,23
C015A1	31,9	8	10	0,41	3,67	2,42	1,29	19,6	3,5	-5	1,3	0,84	2,7	0,37	6,1	7,4	1,4	2,4	2,54	2	120	0,4	0,65	0,14	0,35
C016A1	20,3	7,3	10	0,85	3,21	1,84	1,08	20,4	2,95	-5	1,5	0,69	2,5	0,31	7,3	6,9	1,34	3,4	2,27	1	117,5	0,5	0,47	0,09	0,28
C018C1	52,2	5,4	140	0,07	2,94	1,81	1,14	16,7	2,36	-5	0,8	0,65	1,9	0,28	1,5	5,2	0,89	2,5	1,81	3	149,5	0,1	0,4	0,08	0,28
A009A1	553	131,5	20	0,34	34,8	23,8	3,17	28,8	27,7	-5	16	7,72	49,9	3,43	47,2	85,1	18,35	28,1	22,7	11	38,7	2,7	4,79	6,59	3,64
A011A1	265	175,5	20	0,11	33,9	21,8	4,19	28,1	29,5	-5	17,7	7,08	72,9	3,3	59,5	108	23,9	2,2	27,1	4	165,5	3,6	4,87	7,08	3,13
C070A1	484	80,6	20	0,14	21,6	18,7	0,87	21,2	13,15	-5	11,7	5,29	30,9	3,13	42,2	48,1	11,05	21	11,65	2	28,2	2,7	2,62	7,47	3
C081A3	454	174,5	20	0,12	34,6	22,6	1,5	21,6	27,9	-5	13,1	7,43	68,1	3,28	42,1	106,5	23,9	22	27,1	1	35	2,7	4,9	8,67	3,42
C081A4	221	170,5	30	0,06	31,2	21,4	1,97	19,1	27,3	-5	13	6,72	68,5	3,2	56	101,5	22,9	15,2	25,6	1	40,6	3	4,78	9,67	3,13
C086A1	145	128,5	30	0,07	31,6	21,8	4,43	28,4	28,8	-5	20,7	6,53	53,2	3,76	15,8	85,6	18,05	3,4	23,3	1	101,5	2,4	5,11	9,05	3,61
C087A1	460	252	20	0,14	45	27,6	4,72	29,1	38,1	-5	15,3	9,13	104,5	4,41	57,4	156	35	18,1	35,2	3	40,3	3,7	6,79	8,27	4,32
C087A2	485	341	20	0,11	56,3	33,2	5,44	29,8	48,1	-5	12,2	11,15	146,5	4,98	56,1	204	46	26,7	46,4	4	41,7	3,7	8,84	9,57	5,08
C107A1	274	192	20	0,1	38,8	23,5	4,62	29	33,8	-5	15,3	7,8	78,3	3,61	47,8	121,5	26,7	20,2	30,1	11	39,9	3	5,92	7,64	3,72
C107A2	261	140,5	30	0,11	34,1	21,4	3,75	26,9	27,7	-5	14,2	7,15	58,2	3,57	41,7	91	19,55	14,1	24,6	6	44,5	2,7	5,39	6,3	3,42
C107A3	131,5	82,5	20	0,12	36,7	22,5	3,67	26,2	28,7	-5	12,8	7,43	31,2	3,29	37,4	70,4	13,2	22,3	23,7	7	41,5	2,4	5,46	6,18	3,49
C108A1	435	144	20	0,05	34,8	22,2	3,49	26,4	26,5	-5	18,4	7,19	60,6	3,83	53,6	90,9	20,3	26,8	24,4	6	28,6	3,4	5,14	6,73	3,45
C107C1	338	104,5	30	0,15	30,7	21,2	3	29,1	21,3	-5	15,8	6,41	42,8	3,56	46,1	68,7	14,85	26,9	18,5	8	45,5	3,1	3,96	6,57	3,36
C107B1	274	125	20	0,28	38,5	25,7	3,42	28	28,1	-5	15,5	8,37	54,6	4,05	46	80,6	17,4	41,4	22,5	4	46,6	3,2	5,56	8,17	4,05
C108B1	626	196	20	0,01	46,6	30,7	5,31	30,1	34,9	-5	15,6	9,48	80,6	4,56	59,7	127	27,5	34,6	33,8	5	30,8	3,9	6,85	9,39	4,58
C077A1	110	79,9	20	0,61	19,5	12,8	3,97	27	17	-5	13,4	4,4	34,3	2,08	21,6	52,9	11,2	20	14,15	2	32,5	1,4	3,11	3,41	2
C078A1	27,7	77,3	20	0,29	20,2	14,2	3,72	27,5	15,7	-5	28,7	4,62	32,1	2,26	24,7	49	10,55	4,5	13,6	4	17,3	1,5	3,07	3,27	2,14
C071A1	286	70,6	20	0,72	20,5	14,2	1,08	18,7	13,95	-5	12,6	4,54	27,1	2,24	33,7	43,4	9,69	27,2	12,1	3	34,9	2,1	2,63	6,51	2,12
C072A1	113,5	108	10	0,64	21,2	14,9	2,91	25,3	17,55	-5	22,6	5,01	39,6	2,49	24,4	71,4	15,6	16,9	17,65	2	9	1,7	3,08	4,14	2,36
C073A1	652	129,5	30	1,46	39,4	26,6	1,45	24	28,6	-5	11,3	8,62	55,7	3,71	45,2	80	18,25	84	20,1	5	55,5	2,6	5,75	7,46	3,84
C081B1	241	260	20	0,12	29,2	17,25	2,32	19,2	31,9	-5	9,7	5,67	102,5	2,28	35,8	155	35,4	20,8	35,6	2	33,2	2,4	4,72	8,03	2,38
C081B3	344	128,5	30	0,12	23,3	15,95	1,61	20	19,05	-5	12,7	5,09	52,3	2,65	43,6	77,3	17,3	12,6	18,15	2	49,8	2,7	3,28	8,11	2,6

NB : Tous ces éléments sont exprimés en (ppm).

Échantillons	U	V	W	Y	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Zn	As	Bi	Hg	In	Re	Sb	Se	Te	Tl	C	S	Cl	F	H2O+
A006A1	-0,05	10	-1	0,8	0,08	2	-0,5	-0,5	53	9	10	-1	195	-2	2	59	17,6	0,08	-0,005	-0,005	0,001	0,07	-0,2	0,01	-0,02	0,37	-0,01	150	110	6,09
C086B1	0,19	91	1	154,5	15,8	168	-0,5	-0,5	9	-1	30	-1	46	3	14	139	0,3	0,01	-0,005	0,731	0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,88	-0,01	-50	10750	4,2
C017A1	0,06	21	1	6,1	1,01	329	-0,5	-0,5	5	13	10	2	6	-2	9	45	0,3	0,01	-0,005	-0,005	0,001	-0,05	0,3	0,02	-0,02	0,04	0,08	210	100	1,01
C087B1	2,1	-5	1	143,5	22,4	542	-0,5	-0,5	2	11	-10	1	2	2	-1	25	0,7	0,04	-0,005	0,02	0,001	-0,05	-0,2	0,01	-0,02	0,49	0,01	190	990	0,66
C081D1	3,61	-5	1	59,7	17,8	495	-0,5	0,9	3	82	-10	1	-1	5	1	159	3,5	0,06	0,009	0,068	-0,001	-0,05	0,3	-0,01	-0,02	0,15	0,07	180	310	0,28
C081C1	0,35	131	1	32	3,3	134	-0,5	-0,5	21	71	20	1	32	2	22	105	0,5	0,03	0,006	0,044	-0,001	-0,05	0,2	0,01	0,07	1,18	0,01	160	2340	3,37
C107D1	0,37	144	1	15,9	1,54	123	-0,5	-0,5	21	1	30	1	34	3	19	129	0,4	0,01	-0,005	0,021	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	1,18	-0,01	130	1760	3,51
C015A1	0,05	49	1	21,5	2,15	41	-0,5	1	57	92	-10	1	5	10	69	174	64,8	0,94	-0,005	0,015	-0,001	1,2	0,8	0,01	-0,02	0,03	0,21	800	120	1,59
C016A1	-0,05	161	1	17,5	1,91	47	-0,5	1,3	73	163	10	1	12	6	38	217	0,4	0,02	-0,005	0,02	0,001	-0,05	0,7	0,03	0,02	0,04	0,34	370	200	4,61
C018C1	0,06	185	-1	15,2	1,78	30	-0,5	0,9	47	66	10	1	49	19	60	188	250	0,34	0,014	0,02	0,001	2,83	0,3	0,05	0,03	0,09	0,09	1710	100	2,11
A009A1	1,44	-5	1	199	23,8	487	-0,5	-0,5	2	8	-10	2	1	-2	1	28	0,4	0,01	0,005	0,027	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,1	0,01	420	890	0,91
A011A1	1,6	9	1	197	21,8	483	-0,5	-0,5	3	71	-10	2	3	4	1	11	2,8	0,11	0,005	0,04	-0,001	0,1	0,3	0,01	-0,02	0,43	0,05	320	100	0,24
C070A1	1,46	-5	1	137,5	20,9	303	-0,5	-0,5	1	7	-10	1	-1	-2	3	16	9,6	0,01	-0,005	0,02	-0,001	0,35	-0,2	-0,01	-0,02	0,05	-0,01	460	600	0,47
C081A3	1,68	-5	-1	198,5	23,1	324	-0,5	-0,5	-1	3	-10	2	2	-2	3	14	0,8	-0,01	-0,005	0,018	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,11	-0,01	570	1500	0,53
C081A4	2,06	-5	2	182	21,2	332	-0,5	-0,5	1	48	-10	2	2	-2	3	12	1	0,01	0,006	0,011	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,33	0,03	280	370	0,38
C086A1	1,26	-5	1	175,5	23,7	548	-0,5	-0,5	2	1	-10	1	4	-2	1	22	0,5	0,01	-0,005	0,053	-0,001	-0,05	0,2	-0,01	-0,02	0,11	0,01	380	240	0,68
C087A1	2,18	-5	3	247	27	408	-0,5	9,8	3	38	-10	2	2	6	-1	824	3,5	0,55	0,005	0,036	-0,001	-0,05	-0,2	0,02	-0,02	0,58	0,09	260	770	0,32
C087A2	2,08	-5	2	303	30,9	309	-0,5	-0,5	2	13	-10	1	4	5	1	17	1,7	0,03	-0,005	0,022	0,001	-0,05	-0,2	0,02	-0,02	0,74	0,03	280	590	0,27
C107A1	1,66	-5	2	210	22,9	445	-0,5	-0,5	2	7	-10	1	3	6	1	24	1,8	0,01	-0,005	0,032	0,001	-0,05	-0,2	0,01	-0,02	0,69	0,04	270	850	0,36
C107A2	1,52	-5	1	193,5	21,6	433	-0,5	-0,5	1	7	-10	1	1	6	1	33	1	0,02	-0,005	0,089	-0,001	-0,05	0,3	0,01	-0,02	0,45	0,04	360	1450	0,33
C107A3	1,39	-5	2	201	21,6	363	-0,5	-0,5	2	33	-10	2	1	4	1	32	14	0,03	-0,005	0,045	-0,001	-0,05	0,3	0,02	0,02	0,76	0,1	350	1460	0,42
C108A1	1,6	-5	1	198	23,6	560	-0,5	-0,5	1	6	10	2	1	5	1	26	0,9	0,01	-0,005	0,063	0,001	-0,05	0,3	0,01	-0,02	0,21	-0,01	430	2010	0,42
C107C1	1,72	-5	1	181,5	23,1	409	-0,5	-0,5	4	4	-10	3	-1	5	-1	29	2,1	0,01	-0,005	0,037	-0,001	-0,05	0,3	-0,01	-0,02	0,41	0,02	150	1130	0,71
C107B1	2	-5	2	224	25,6	435	-0,5	-0,5	4	21	-10	2	-1	4	-1	31	7,7	0,03	-0,005	0,021	-0,001	-0,05	0,4	-0,01	0,02	0,55	0,14	190	1280	1,01
C108B1	1,95	-5	1	263	29,8	418	-0,5	-0,5	1	8	-10	2	1	3	-1	18	1	0,01	-0,005	0,11	0,001	-0,05	0,2	-0,01	-0,02	0,06	-0,01	350	1640	0,38
C077A1	0,94	-5	1	120,5	13,25	485	-0,5	-0,5	4	1	20	2	1	-2	7	167	-0,1	-0,01	-0,005	0,094	0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,19	-0,01	180	490	3,23
C078A1	1,07	-5	1	121	14,8	1330	-0,5	-0,5	3	11	10	1	1	-2	4	58	4	0,03	-0,005	0,091	-0,001	-0,05	-0,2	0,01	-0,02	0,08	-0,01	290	610	1,8
C071A1	1,12	-5	1	117	14,55	365	-0,5	-0,5	1	4	10	1	-1	-2	4	13	0,2	0,01	-0,005	0,015	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,36	0,01	120	320	0,34
C072A1	0,98	-5	1	137,5	15,8	946	-0,5	-0,5	4	2	30	2	2	-2	3	168	0,2	0,01	-0,005	0,027	-0,001	-0,05	0,2	-0,01	-0,02	0,05	-0,01	270	890	3,54
C073A1	1,86	11	1	247	25,1	292	-0,5	-0,5	2	3	10	1	6	5	5	26	0,3	0,01	-0,005	0,029	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,4	0,01	90	1080	2,93
C081B1	1,63	-5	1	155,5	16,3	268	-0,5	-0,5	7	86	-10	2	7	8	4	77	5	0,07	-0,005	0,025	-0,001	0,8	0,3	0,03	-0,02	0,15	0,15	200	320	0,67
C081B3	1,59	-5	-1	139	17,55	331	-0,5	-0,5	1	4	-10	2	2	-2	4	20	0,7	0,01	0,008	0,032	-0,001	-0,05	-0,2	-0,01	-0,02	0,2	-0,01	300	1440	0,31

NB : Tous ces éléments sont exprimés en (ppm), à l'exception du S, C, F et H2O+ qui sont en %.

Annexe 2 : Analyses de pyrites utilisées pour la caractérisation des minéralisations de la zone d'étude et celles utilisées pour des fins de comparaison.

Échantillons	Indices/dépôts	As (ppm)	Se (ppm)	Ag (ppm)	Sb (ppm)	Tl (ppm)	Bi (ppm)	Se/Tl	As/Ag	Sb/Bi	Source
C081VS1-1A,d	Ramsey	1,53	47,90	0,17	0,02	0,0003	1,0800	165172,4138	8,9474	0,0199	Cette étude
C081VS1-1A,d	Ramsey	28,30	21,20	20,00	0,08	0,0013	5,1000	16307,6923	1,4150	0,0159	Cette étude
C081VS1-1B,d	Ramsey	4,40	14,80	0,65	0,34	0,0380	2,0600	389,4737	6,7692	0,1650	Cette étude
C081VS1-1C,d	Ramsey	17,00	14,80	1,01	0,01	0,0014	0,4500	10496,4539	16,8317	0,0200	Cette étude
C081VS1-1D,d	Ramsey	9,20	10,80	0,14		0,0013	0,1240	8120,3008	0,0000	0,0000	Cette étude
C081VS1-1E,d	Ramsey	15,80	13,70	0,15	0,00	0,0020	0,0780	6884,4221	108,2192	0,0346	Cette étude
C081VS1-1F,d	Ramsey	1,37	41,90	0,40	0,04	0,0109	3,1000	3844,0367	3,4250	0,0126	Cette étude
C081VS1-2A,d	Ramsey	61,00	29,90	0,10	0,00	0,0019	0,3600	15736,8421	628,8660	0,0042	Cette étude
C081VS1-2B,d	Ramsey	0,07	56,80	0,08		0,0009	0,0042	62417,5824	0,0000	0,0000	Cette étude
C081VS1-2C,d	Ramsey	18,00	18,40	0,16	0,02	0,0024	0,3300	7666,6667	109,7561	0,0485	Cette étude
C081VS1-2D,d	Ramsey	39,00	7,10	3,30	0,31	0,0029	7,0000	2448,2759	11,8182	0,0443	Cette étude
C081VS1-3B,d	Ramsey	16,00	14,90	2,32	3,30	0,0720	39,0000	206,9444	6,8966	0,0846	Cette étude
C081VS1-3C,d	Ramsey	33,00	34,70	11,90	0,09	0,0136	4,4000	2551,4706	2,7731	0,0207	Cette étude
C087VS1-1A,d	GRH	59,00	19,30	1,60	0,06	0,0007	1,0700	26805,5556	36,8750	0,0589	Cette étude
C087VS1-1B,d	GRH	551,00	12,90	0,79	0,12	0,0008	22,4000	16125,0000	697,4684	0,0053	Cette étude
C087VS1-1C,d	GRH	1200,00	24,70	18,00	0,26	0,0044	14,4000	5613,6364	66,6667	0,0181	Cette étude
C087VS1-3A,d	GRH	21,00	16,80	0,15	0,12	0,0029	9,4000	5793,1034	140,0000	0,0128	Cette étude
C087VS1-3B,d	GRH	57,00	28,20	9,00	0,83	0,0061	30,0000	4622,9508	6,3333	0,0277	Cette étude
C087VS1-3C,d	GRH	25,00	29,40	6,90	2,68	0,0044	42,0000	6681,8182	3,6232	0,0638	Cette étude
C087VS1-3D,d	GRH	69,00	31,60	2,03	3,40	0,0035	102,0000	9028,5714	33,9901	0,0333	Cette étude
C107VS1-1A,d	AXE	3440,00	3,70	6,00	2,99	0,0030	1,0700	1233,3333	573,3333	2,7944	Cette étude
C107VS1-1B,d	AXE	530,00	7,90	6,80	1,43	0,0023	1,9900	3434,7826	77,9412	0,7186	Cette étude
C107VS1-1C1,d	AXE	910,00	4,40	7,77	3,77	0,0042	1,7000	1047,6190	117,1171	2,2176	Cette étude
C107VS1-1C2,d	AXE	301,00	2,50	11,00	2,30	0,0012	2,5400	2083,3333	27,3636	0,9055	Cette étude
C107VS1-1D,d	AXE	1480,00	9,10	6,80	1,87	0,0009	0,9300	10111,1111	217,6471	2,0108	Cette étude
C107VS1-1E,d	AXE	5100,00	11,00	4,60	1,32	0,0010	2,1400	11000,0000	1108,6957	0,6168	Cette étude
C107VS1-2A,d	AXE	2760,00	16,20	5,30	2,13	0,0048	1,6200	3375,0000	520,7547	1,3148	Cette étude
C107VS1-2B,d	AXE	1690,00	8,20	1,01	0,67	0,0006	2,0300	13666,6667	1673,2673	0,3300	Cette étude
C107VS1-2C,d	AXE	2350,00	9,90	4,80	2,20	0,0012	1,7600	8250,0000	489,5833	1,2500	Cette étude
C107VS1-2D,d	AXE	350,00	18,00	8,10	4,90	0,0017	1,5400	10588,2353	43,2099	3,1818	Cette étude
C107VS1-3A,d	AXE	610,00	3,30	9,40	1,19	0,0043	1,2300	767,4419	64,8936	0,9675	Cette étude
C107VS1-3ABd,d	AXE	1540,00	4,80	5,89	0,93	0,0031	0,9800	1548,3871	261,4601	0,9490	Cette étude
C107VS1-3Cd,d	AXE	760,00	13,40	16,00	3,05	0,0055	5,6300	2436,3636	47,5000	0,5417	Cette étude
C107VS1-5Ad,d	AXE	3690,00	1,48	0,23	0,62	0,0013	6,1000	1138,4615	16043,4783	0,1016	Cette étude
C108VS1-1A,d	Golden Moon	3360,00	20,60	0,08	0,04	0,0031	0,2600	6645,1613	43636,3636	0,1615	Cette étude

C108VS1-1B,d	Golden Moon	2730,00	19,70	0,05	0,08	0,0032	2,6400	6156,2500	59347,8261	0,0292	Cette étude
C108VS1-1C,d	Golden Moon	2140,00	13,90	0,06	0,09	0,0070	1,5500	1985,7143	36896,5517	0,0555	Cette étude
C108VS1-1D,d	Golden Moon	2400,00	10,90	0,06	0,10	0,0068	1,3000	1602,9412	40000,0000	0,0731	Cette étude
C108VS1-2A,d	Golden Moon	1350,00	66,30	4,40	0,34	0,0010	12,9000	65643,5644	306,8182	0,0266	Cette étude
C108VS1-2B,d	Golden Moon	1580,00	10,70	6,90	0,50	0,0020	200,0000	5350,0000	228,9855	0,0025	Cette étude
C108VS1-2C,d	Golden Moon	3240,00	25,60	0,62	0,08	0,0020	1,5000	12800,0000	5225,8065	0,0540	Cette étude
C108VS1-2D,d	Golden Moon	2450,00	8,60	0,56	0,11	0,0012	5,4000	7166,6667	4375,0000	0,0206	Cette étude
C108VS1-2E,d	Golden Moon	3430,00	12,90	2,30	0,17	0,0027	19,0000	4777,7778	1491,3043	0,0089	Cette étude
C108VS1-3A,d	Golden Moon	666000,00	61,90	0,94	133,00	0,0118	23,6000	5245,7627	708510,6383	5,6356	Cette étude
C108VS1-3B,d	Golden Moon	6060,00	27,50	1,50	0,41	0,0029	7,1000	9482,7586	4040,0000	0,0577	Cette étude
C108VS1-3C,d	Golden Moon	3670,00	22,60	2,90	0,22	0,0006	15,5000	40357,1429	1265,5172	0,0142	Cette étude
C108VS1-3D,d	Golden Moon	1924,00	9,80	0,16	0,06	0,0007	2,7800	14626,8657	11731,7073	0,0227	Cette étude
C108VS1-3E,d	Golden Moon	1760,00	5,70	0,09	0,04	0,0005	0,7900	12391,3043	19555,5556	0,0544	Cette étude
C108VS1-4A,d	Golden Moon	2940,00	20,20	0,88	1,05	0,0038	47,0000	5315,7895	3340,9091	0,0223	Cette étude
C108VS1-4B,d	Golden Moon	2200,00	32,80	1,30	0,12	0,0034	12,1000	9647,0588	1692,3077	0,0098	Cette étude
C108VS1-4C,d	Golden Moon	2710,00	19,90	0,23	0,21	0,0043	11,9000	4627,9070	11782,6087	0,0178	Cette étude
C108VS1-4D,d	Golden Moon	2350,00	10,30	0,32	0,15	0,0012	3,0000	8803,4188	7343,7500	0,0513	Cette étude
C108VS1-4E,d	Golden Moon	2530,00	12,40	2,40	3,20	0,0300	27,0000	413,3333	1054,1667	0,1185	Cette étude
CP1-1A,d	Copper Rand	93,00	6,40	0,10	0,07	0,0027	0,3700	2370,3704	978,9474	0,2000	Cette étude
CP1-1B,d	Copper Rand	148,00	10,70	0,04	0,13	0,0067	0,3620	1597,0149	4111,1111	0,3564	Cette étude
CP1-1C,d	Copper Rand	200,00	2,25	0,12	0,32	0,0055	0,5700	409,0909	1694,9153	0,5579	Cette étude
CP1-1D,d	Copper Rand	44,00	0,91	0,15	0,08	0,0044	0,1360	206,8182	287,5817	0,5662	Cette étude
CP1-1E,d	Copper Rand	44,00	14,00	0,01	0,00	0,0015	0,0230	9333,3333	5238,0952	0,1739	Cette étude
CP1-1F,d	Copper Rand	32,00	5,80	0,00	0,01	0,0025	0,0032	2320,0000	17777,7778	3,4375	Cette étude
CP1-2A,d	Copper Rand	72,00	5,49	0,05	0,10	0,0021	0,1280	2614,2857	1358,4906	0,7578	Cette étude
CP1-2B,d	Copper Rand	26,90	6,45	0,01	0,02	0,0009	0,0018	7166,6667	3842,8571	12,2222	Cette étude
CP1-2C,d	Copper Rand	91,00	23,30	0,11	0,20	0,0007	1,2400	33285,7143	812,5000	0,1589	Cette étude
CP1-2D,d	Copper Rand	46,00	1,14	0,09	0,16	0,0027	0,3230	422,2222	489,3617	0,5015	Cette étude
CP1-2E,d	Copper Rand	433,00	5,90	0,17	0,45	0,0059	1,3400	1000,0000	2502,8902	0,3358	Cette étude
CP1-2F,d	Copper Rand	800,00	5,30	0,16	0,18	0,0032	0,7500	1656,2500	5031,4465	0,2413	Cette étude
CP1-3A,d	Copper Rand	8,10	15,70	0,06	0,03	0,0019	0,0710	8263,1579	144,6429	0,3521	Cette étude
CP1-3B,d	Copper Rand	147,00	7,00	0,01	0,06	0,0018	0,0820	3888,8889	14134,6154	0,6951	Cette étude
CP1-3C,d	Copper Rand	233,00	9,70	0,53	0,40	0,0044	1,7200	2204,5455	439,6226	0,2326	Cette étude
CP1-3D,d	Copper Rand	680,00	9,70	1,90	0,16	0,0740	2,0300	131,0811	357,8947	0,0798	Cette étude
CP1-3E,d	Copper Rand	166,00	14,30	0,07	0,09	-0,0003	0,4700		2515,1515	0,2000	Cette étude
CP1-3F,d	Copper Rand	393,00	6,90	2,14	4,12	0,0159	30,8000	433,9623	183,6449	0,1338	Cette étude
CP1-3G,d	Copper Rand	125,00	6,33	3,01	0,13	0,2030	1,0200	31,1823	41,5282	0,1314	Cette étude
CP1-3H,d	Copper Rand	570,00	8,20	0,48	0,08	0,0114	0,6640	719,2982	1187,5000	0,1145	Cette étude
CP1-3I,d	Copper Rand	830,00	13,20	0,34	0,37	0,0011	2,8000	12000,0000	2441,1765	0,1321	Cette étude

DV2-1A,d	Devlin	-13,80	32,20	0,01	0,00	0,0002	0,0072	189411,7647	0,0000	0,0000	Cette étude
DV2-1B,d	Devlin	-0,70	62,80	0,05	0,00	0,0006	0,0480	98125,0000	0,0000	0,0000	Cette étude
DV2-1C,d	Devlin	-1,30	17,70	0,27	0,01	0,0014	0,0860	12642,8571	0,0000	0,0000	Cette étude
DV2-1D,d	Devlin	-1,27	16,00	0,13	0,01	0,0005	0,0750	31372,5490	0,0000	0,0000	Cette étude
DV2-2A,d	Devlin	1,70	22,60	0,01	0,01	0,0002	0,0114	113000,0000	124,0876	1,2982	Cette étude
DV2-2B,d	Devlin	4,80	9,90	0,34	0,00	0,0018	0,2190	5500,0000	14,2433	0,0137	Cette étude
DV2-2C,d	Devlin	17,00	24,80	0,80	0,01	0,0003	0,0330	82666,6667	21,2500	0,3212	Cette étude
DV2-2D,d	Devlin	3,60	27,20	0,05	0,01	0,0006	0,0750	45333,3333	76,5957	0,1333	Cette étude
GR4-1A,d	Grand Roy	1,90	12,60	0,02	0,02	0,0019	0,2000	6631,5789	125,8278	0,1100	Cette étude
GR4-1B,d	Grand Roy	2,23	8,30	0,16	0,05	0,0020	2,1400	4150,0000	14,2038	0,0220	Cette étude
GR4-1C,d	Grand Roy	2,97	8,30	0,03	0,01	0,0003	0,1600	27666,6667	92,8125	0,0563	Cette étude
GR4-1D,d	Grand Roy	1,61	4,80	0,01	0,01	0,0022	0,0269	2181,8182	236,7647	0,2974	Cette étude
GR4-1E,d	Grand Roy	3,70	36,00	0,03	0,02	-0,0004	0,6700		148,0000	0,0239	Cette étude
GR4-1F,d	Grand Roy	6,10	32,90	1,40	0,08	0,0016	7,3000	20562,5000	4,3571	0,0114	Cette étude
GR4-1G,d	Grand Roy	3,50	8,10	0,13	0,02	-0,0001	0,7800		27,5591	0,0192	Cette étude
GR4-2A,d	Grand Roy	1,59	22,50	0,19	0,02	0,0010	7,1000	22500,0000	8,3246	0,0031	Cette étude
GR4-2B,d	Grand Roy	3,60	29,70	0,03	0,00	0,0011	0,1330	27000,0000	116,1290	0,0218	Cette étude
GR4-2C,d	Grand Roy	14,90	16,00	0,45	0,04	0,0030	2,3000	5333,3333	33,1111	0,0157	Cette étude
GR4-2D,d	Grand Roy	27,00	13,20	0,29	0,00	0,0010	1,7100	13200,0000	93,1034	0,0029	Cette étude
GR4-2E,d	Grand Roy	2,30	15,70	0,49	0,00	0,0023	2,8000	6826,0870	4,6939	0,0014	Cette étude
GR4-2F,d	Grand Roy	1,01	23,50	0,00	0,00	0,0000	0,2300		214,8936	0,0174	Cette étude
GR4-3A,d	Grand Roy	14,70	36,80	0,03	0,14	0,0059	1,0500	6237,2881	490,0000	0,1314	Cette étude
GR4-3B,d	Grand Roy	2,50	30,20	0,33	-0,01	0,0003	1,7400	100666,6667	0,0000	0,0000	Cette étude
GR4-3C,d	Grand Roy	22,70	32,30	1,19	0,11	0,0059	7,7000	5474,5763	19,0756	0,0148	Cette étude
GR4-3D,d	Grand Roy	5,20	21,40	0,33	0,01	0,0026	0,8200	8230,7692	15,7576	0,0146	Cette étude
NB3-1A,d	Norbeau	20700,00	1,21	1,25	117,00	0,0085	1,9700	142,3529	16560,0000	59,3909	Cette étude
NB3-1B,d	Norbeau	28000,00	0,79	0,54	210,00	0,0014	1,0000	564,2857	51851,8519	210,0000	Cette étude
NB3-1C,d	Norbeau	1442,00	0,34	0,03	0,12	0,0012	0,0430	290,5983	49724,1379	2,8605	Cette étude
NB3-1D,d	Norbeau	1860,00	1,34	1,30	0,31	0,0000	0,1500		1430,7692	2,0667	Cette étude
NB3-2A,d	Norbeau	1860,00	0,04	0,21	0,06	0,0000	0,3800	2000,0000	8857,1429	0,1500	Cette étude
NB3-2B,d	Norbeau	1460,00	0,24	0,80	0,35	0,0003	1,3500	800,0000	1825,0000	0,2593	Cette étude
NB3-2C,d	Norbeau	2890,00	0,35	0,06	0,13	0,0010	0,0420	343,1373	52545,4545	3,1905	Cette étude
NB3-3A,d	Norbeau	2060,00	0,88	1,04	0,59	0,0016	1,6000	550,0000	1980,7692	0,3688	Cette étude
NB3-3B,d	Norbeau	866000,00	-1,10	3,90	7200,00	0,0330	82,0000		222051,2821	87,8049	Cette étude
146-1.	Lemoine	0,05	5,53	0,49	0,11	1,9318	0,2328	102,2093	0,1094	0,4800	Clairet et Gaboury (2017)
146-2.	Lemoine	0,09	14,37	1,77	0,27	3,4633	0,1397	2,8627	0,0503	1,9133	Clairet et Gaboury (2017)
146-3.	Lemoine	100,55	5,18	0,51	0,43	0,0573	8,7049	9,3204	198,1651	0,0497	Clairet et Gaboury (2017)
146-4.	Lemoine	107,07	4,47	2,20	1,32	0,4795	23,5543	90,4065	48,7288	0,0561	Clairet et Gaboury (2017)
146-5.	Lemoine	71,08	4,09	1,14	0,28	0,0400	10,1014	4,1505	62,5820	0,0279	Clairet et Gaboury (2017)

147-1.	Lemoine	60,52	78,67	2,14	0,62	0,0479	8,2394	1640,7767	28,2609	0,0751	Clairet et Gaboury (2017)
147-2.	Lemoine	273,25	170,37	20,39	10,38	0,0656	65,6355	142,2893	13,4018	0,1582	Clairet et Gaboury (2017)
147-3.	Lemoine	148,59	41,66	28,54	41,43	0,2928	383,1065	64,9142	5,2072	0,1081	Clairet et Gaboury (2017)
147-4.	Lemoine	129,73	28,16	24,58	44,87	0,4338	377,9860	18686,2745	5,2784	0,1187	Clairet et Gaboury (2017)
147-5.	Lemoine	224,37	44,36	0,36	0,27	0,0024	22,8095	256,8579	617,9487	0,0118	Clairet et Gaboury (2017)
147-6.	Lemoine	163,58	95,89	81,00	38,73	0,3733	453,8625	2595,7447	2,0195	0,0853	Clairet et Gaboury (2017)
13-1.	Scott	66,47	1,35	0,39	2,33	0,1769	0,0122	16,9869	170,0000	190,1141	Clairet et Gaboury (2017)
13-2.	Scott	25,42	2,20	1,91	3,17	0,3352	0,0945	3,0075	13,3171	33,5468	Clairet et Gaboury (2017)
13-3.	Scott	2,30	4,22	0,14	0,40	0,0223	0,0062	26,1017	16,2295	63,9098	Clairet et Gaboury (2017)
13-4.	Scott	87,98	1,27	1,01	0,67	0,0219	0,0428	47,8022	86,6972	15,5435	Clairet et Gaboury (2017)
14-2.	Scott	118,56	1,81	0,66	0,74	0,1066	0,6331	10,6545	179,3662	1,1765	Clairet et Gaboury (2017)
14-2B.	Scott	56,19	1,86	1,37	1,30	0,6191	0,3817	7,6316	41,0544	3,4146	Clairet et Gaboury (2017)
14-3.	Scott	52,60	1,43	1,25	0,43	0,0549	0,2118	6,5556	42,0074	2,0440	Clairet et Gaboury (2017)
14-4.	Scott	48,83	2,02	0,17	0,14	0,0424	0,0540	188,9583	291,3889	2,6034	Clairet et Gaboury (2017)
14-5.	Scott	63,49	1,89	0,24	0,51	0,1778	0,0908	57,8723	267,4510	5,6410	Clairet et Gaboury (2017)
16-1-1.	Scott	215,99	8,41	0,49	1,35	0,5958	0,4655	14,1172	441,9048	2,8900	Clairet et Gaboury (2017)
16-1-2.	Scott	10,85	3,83	0,41	1,00	0,2514	0,1592	15,2222	26,4773	6,2865	Clairet et Gaboury (2017)
16-1-3.	Scott	59,12	4,36	1,08	4,32	1,3546	0,4376	3,2165	54,9784	9,8723	Clairet et Gaboury (2017)
16-1-4.	Scott	36,22	3,96	0,09	0,62	0,1815	0,0293	21,8205	385,1485	21,2698	Clairet et Gaboury (2017)
16-2-1.	Scott	1,37	4,55	0,18	0,11	0,0698	0,0126	65,2000	7,7368	8,8889	Clairet et Gaboury (2017)
16-2-2.	Scott	4,47	4,16	23,28	0,08	0,0456	0,0135	91,1224	0,1920	5,9310	Clairet et Gaboury (2017)
16-2-3.	Scott	7,82	4,29	0,06	0,10	0,0251	0,0405	170,7407	121,7391	2,4943	Clairet et Gaboury (2017)
17-1.	Scott	380,78	1,34	0,67	0,56	0,0018	0,0163	755,2632	572,0280	34,2857	Clairet et Gaboury (2017)
17-2.	Scott	0,03	2,89	5,91	28,95	2,2297	0,0016	1,2965	0,0045	18294,1176	Clairet et Gaboury (2017)
17-3.	Scott	162,93	1,57	0,07	0,17	0,0573	0,0126	27,3984	2380,9524	13,7037	Clairet et Gaboury (2017)
18-1.	Scott	61,45	22,02	0,34	0,91	0,1080	1,4337	203,8793	179,1045	0,6364	Clairet et Gaboury (2017)
18-2.	Scott	49,34	21,74	0,46	0,54	0,0205	0,6610	1061,3636	108,1633	0,8099	Clairet et Gaboury (2017)
18-3.	Scott	805,32	47,67	1,01	0,85	0,0447	2,6999	1066,6667	793,5780	0,3155	Clairet et Gaboury (2017)
18-4.	Scott	40,50	27,00	0,28	0,62	0,0321	0,5027	840,5797	145,0000	1,2407	Clairet et Gaboury (2017)
19-2.	Scott	432,92	126,15	6,94	1,32	0,1713	44,9208	736,4130	62,4161	0,0293	Clairet et Gaboury (2017)
19-3.	Scott	68,89	113,12	5,40	0,94	0,0847	21,1337	1335,1648	12,7586	0,0445	Clairet et Gaboury (2017)
19-4.	Scott	243,46	105,20	10,61	1,91	0,1089	48,0862	965,8120	22,9386	0,0397	Clairet et Gaboury (2017)
20-1.	Scott	679,63	24,95	0,53	0,50	0,0474	13,6857	526,0059	1292,0354	0,0364	Clairet et Gaboury (2017)
20-2.	Scott	39,10	23,70	2,11	0,15	0,1178	2,6301	201,2648	18,5430	0,0577	Clairet et Gaboury (2017)
20-3.	Scott	37,24	22,79	2,07	0,14	0,1099	4,4083	207,4576	17,9775	0,0307	Clairet et Gaboury (2017)

Annexe 3: Résultats des données de la modélisation géochimique de l'assimilation des rhyolites par le magma du CLD.

Echantillons	Ferrodiorite	Rhyolites	Granophyres	Cm5%	Cm10%	Cm15%	Cm20%	Cm25%	Cm50%	Cm75%	Cm80%	Cm85%	Cm90%	Cm95%
SiO ₂	41,600	76,040	77,120	43,322	45,044	46,766	48,488	50,210	58,820	67,430	69,152	70,874	72,596	74,318
Al ₂ O ₃	10,903	11,440	10,857	10,930	10,957	10,984	11,011	11,038	11,172	11,306	11,333	11,360	11,386	11,413
Fe ₂ O ₃	26,100	3,078	2,993	24,949	23,798	22,647	21,496	20,345	14,589	8,834	7,682	6,531	5,380	4,229
CaO	9,207	1,030	1,133	8,798	8,389	7,980	7,571	7,163	5,118	3,074	2,665	2,257	1,848	1,439
MgO	5,013	0,748	0,074	4,800	4,587	4,374	4,160	3,947	2,881	1,814	1,601	1,388	1,175	0,961
Na ₂ O	1,347	3,416	4,720	1,450	1,554	1,657	1,761	1,864	2,381	2,899	3,002	3,106	3,209	3,313
K ₂ O	0,173	1,388	1,370	0,234	0,295	0,356	0,416	0,477	0,781	1,084	1,145	1,206	1,267	1,327
Cr ₂ O ₃	0,005	0,002	0,002	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
TiO ₂	3,410	0,216	0,125	3,250	3,091	2,931	2,771	2,612	1,813	1,015	0,855	0,695	0,535	0,376
MnO	0,367	0,024	0,025	0,350	0,332	0,315	0,298	0,281	0,195	0,110	0,093	0,075	0,058	0,041
P ₂ O ₅	0,190	0,028	0,015	0,182	0,174	0,166	0,158	0,150	0,109	0,069	0,060	0,052	0,044	0,036
SrO	0,013	-0,006	-0,004	0,012	0,011	0,010	0,009	0,009	0,004	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	-0,005
BaO	-0,003	0,036	0,040	-0,001	0,001	0,003	0,005	0,007	0,016	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034
LOI	1,073	2,062	1,830	1,123	1,172	1,222	1,271	1,321	1,568	1,815	1,864	1,914	1,963	2,013
Total	99,407	99,508	100,305	99,412	99,417	99,422	99,427	99,432	99,457	99,483	99,488	99,493	99,498	99,503
Ba	34,800	327,300	360,433	49,425	64,050	78,675	93,300	107,925	181,050	254,175	268,800	283,425	298,050	312,675
Ce	6,900	139,320	162,573	13,521	20,142	26,763	33,384	40,005	73,110	106,215	112,836	119,457	126,078	132,699
Cr	53,333	22,000	22,667	51,767	50,200	48,633	47,067	45,500	37,667	29,833	28,267	26,700	25,133	23,567
Cs	0,443	0,612	0,127	0,452	0,460	0,469	0,477	0,486	0,528	0,570	0,578	0,587	0,595	0,604
Dy	3,273	26,720	36,613	4,446	5,618	6,790	7,963	9,135	14,997	20,858	22,031	23,203	24,375	25,548
Er	2,023	17,780	23,873	2,811	3,599	4,387	5,175	5,963	9,902	13,841	14,629	15,417	16,204	16,992
Eu	1,170	1,874	3,570	1,205	1,240	1,276	1,311	1,346	1,522	1,698	1,733	1,768	1,804	1,839
Ga	18,900	21,440	26,787	19,027	19,154	19,281	19,408	19,535	20,170	20,805	20,932	21,059	21,186	21,313
Gd	2,937	22,210	29,437	3,900	4,864	5,828	6,791	7,755	12,573	17,392	18,355	19,319	20,283	21,246
Ge	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000	-5,000
Hf	1,200	13,780	15,153	1,829	2,458	3,087	3,716	4,345	7,490	10,635	11,264	11,893	12,522	13,151
Ho	0,727	5,786	7,659	0,980	1,233	1,486	1,739	1,992	3,256	4,521	4,774	5,027	5,280	5,533
La	2,367	55,440	66,720	5,020	7,674	10,328	12,981	15,635	28,903	42,172	44,825	47,479	50,133	52,786
Lu	0,320	2,674	3,731	0,438	0,555	0,673	0,791	0,909	1,497	2,086	2,203	2,321	2,439	2,556
Nb	4,967	36,540	47,240	6,545	8,124	9,703	11,281	12,860	20,753	28,647	30,225	31,804	33,383	34,961
Nd	6,500	85,420	102,993	10,446	14,392	18,338	22,284	26,230	45,960	65,690	69,636	73,582	77,528	81,474
Pr	1,210	19,248	22,577	2,112	3,014	3,916	4,818	5,720	10,229	14,739	15,640	16,542	17,444	18,346
Rb	2,767	32,300	21,533	4,243	5,720	7,197	8,673	10,150	17,533	24,917	26,393	27,870	29,347	30,823
Sm	2,207	20,720	26,443	3,132	4,058	4,984	5,909	6,835	11,463	16,092	17,017	17,943	18,869	19,794
Sn	2,000	2,800	4,933	2,040	2,080	2,120	2,160	2,200	2,400	2,600	2,640	2,680	2,720	2,760

Sr	129,000	36,480	51,260	124,374	119,748	115,122	110,496	105,870	82,740	59,610	54,984	50,358	45,732	41,106
Ta	0,333	2,300	3,080	0,432	0,530	0,628	0,727	0,825	1,317	1,808	1,907	2,005	2,103	2,202
Tb	0,507	3,892	5,399	0,676	0,845	1,014	1,184	1,353	2,199	3,046	3,215	3,384	3,553	3,723
Th	0,103	6,850	7,823	0,441	0,778	1,115	1,453	1,790	3,477	5,163	5,501	5,838	6,175	6,513
Tm	0,303	2,660	3,693	0,421	0,539	0,657	0,775	0,893	1,482	2,071	2,189	2,307	2,424	2,542
U	0,020	1,436	1,707	0,091	0,162	0,232	0,303	0,374	0,728	1,082	1,153	1,224	1,294	1,365
V	131,667	-1,800	-4,067	124,993	118,320	111,647	104,973	98,300	64,933	31,567	24,893	18,220	11,547	4,873
W	0,333	0,600	1,333	0,347	0,360	0,373	0,387	0,400	0,467	0,533	0,547	0,560	0,573	0,587
Y	18,067	159,200	207,367	25,123	32,180	39,237	46,293	53,350	88,633	123,917	130,973	138,030	145,087	152,143
Yb	1,947	17,860	24,040	2,742	3,538	4,334	5,129	5,925	9,903	13,882	14,677	15,473	16,269	17,064
Zr	39,333	440,400	417,133	59,387	79,440	99,493	119,547	139,600	239,867	340,133	360,187	380,240	400,293	420,347
Ag	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,5	-0,500
Cd	1,067	-0,500	0,187	0,988	0,910	0,832	0,753	0,675	0,283	-0,108	-0,187	-0,265	-0,3433	-0,422
Co	59,000	3,000	1,867	56,200	53,400	50,600	47,800	45,000	31,000	17,000	14,200	11,400	8,6	5,800
Cu	107,000	19,800	18,333	102,640	98,280	93,920	89,560	85,200	63,400	41,600	37,240	32,880	28,52	24,160
Li	3,333	6,000	-8,667	3,467	3,600	3,733	3,867	4,000	4,667	5,333	5,467	5,600	5,7333	5,867
Mo	1,000	1,600	1,733	1,030	1,060	1,090	1,120	1,150	1,300	1,450	1,480	1,510	1,54	1,570
Ni	22,000	3,200	1,467	21,060	20,120	19,180	18,240	17,300	12,600	7,900	6,960	6,020	5,08	4,140
Pb	11,667	1,400	2,533	11,153	10,640	10,127	9,613	9,100	6,533	3,967	3,453	2,940	2,4267	1,913
Sc	55,667	4,000	0,867	53,083	50,500	47,917	45,333	42,750	29,833	16,917	14,333	11,750	9,1667	6,583
Zn	193,000	60,800	75,800	186,390	179,780	173,170	166,560	159,950	126,900	93,850	87,240	80,630	74,02	67,410
As	105,067	1,280	3,253	99,877	94,688	89,499	84,309	79,120	53,173	27,227	22,037	16,848	11,659	6,469
Bi	0,433	0,022	0,056	0,413	0,392	0,372	0,351	0,331	0,228	0,125	0,104	0,084	0,0631	0,043
Hg	0,001	-0,002	-0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
In	0,018	0,026	0,042	0,019	0,019	0,019	0,020	0,020	0,022	0,024	0,024	0,025	0,0249	0,025
Re	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,001
Sb	1,327	0,120	-0,013	1,266	1,206	1,146	1,085	1,025	0,723	0,422	0,361	0,301	0,2407	0,180
Se	0,600	-0,020	0,060	0,569	0,538	0,507	0,476	0,445	0,290	0,135	0,104	0,073	0,042	0,011
Te	0,030	-0,002	0,001	0,028	0,027	0,025	0,024	0,022	0,014	0,006	0,004	0,003	0,0012	0,000
Tl	0,010	-0,020	-0,015	0,009	0,007	0,006	0,004	0,003	-0,005	-0,013	-0,014	-0,016	-0,017	-0,019
C	0,053	0,232	0,372	0,062	0,071	0,080	0,089	0,098	0,143	0,187	0,196	0,205	0,2141	0,223
S	0,213	0,030	0,035	0,204	0,195	0,186	0,177	0,168	0,122	0,076	0,067	0,058	0,0483	0,039
Cl	960,000	196,000	338,000	921,800	883,600	845,400	807,200	769,000	578,000	387,000	348,800	310,600	272,4	234,200
F	140,000	810,000	992,000	173,500	207,000	240,500	274,000	307,500	475,000	642,500	676,000	709,500	743	776,500
H2O PLUS	2,770	1,558	0,495	2,709	2,649	2,588	2,528	2,467	2,164	1,861	1,800	1,740	1,6792	1,619

Annexe 4 : Résumé et poster pour le congrès Québec Mines 2018

METAL EARTH à Chibougamau : Origine des granophyres du Complexe du Lac Doré (CLD) et minéralisations associées, région de Chibougamau, Abitibi (Québec)

Youssef Ahmadou¹, Lucie. Mathieu¹ et Damien. Gaboury¹

¹Centre d'Études sur les Ressources Minérales, Département des Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi.

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la campagne de cartographie du transect sismique réalisé par le projet *Metal Earth*, dans la région de Chibougamau. Elle vise à déterminer l'origine du sodagranophyre du complexe du Lac Doré (CLD), la nature de son contact avec son encaissant volcanique et la relation entre les minéralisations qu'il renferme et les systèmes hydrothermaux de la région de Chibougamau.

Les granophyres sont des roches felsiques généralement observées dans les parties sommitales des intrusions litées mafiques de gros volume, au-dessus des niveaux lités riches en Fe, Ti et V. L'origine de ces unités felsiques est débattue.

Le CLD, localisé dans la région de Chibougamau, est une intrusion litée de gros volume (7-8 km d'épaisseur, 53 km de long) qui comprend dans sa partie supérieure, une zone de granophyre connue sous le nom de « sodagranophyre » à cause de sa teneur élevée en Na₂O et son contenu faible en K₂O. Il s'agit d'une tonalite massive à quartz + albite ± magnétite, qui encaisse des minéralisations à Cu-Au qui prennent la forme de fractures riches en sulfures et de veines de quartz ± carbonate ± pyrite ± magnétite.

Le processus de formation du sodagranophyre pourrait correspondre : 1) à un magma différencié; 2) à un magma contaminé par les roches volcaniques felsiques encaissant le CLD, ou 3) au produit de la fusion in-situ des roches encaissantes. La documentation de l'origine du sodagranophyre du CLD permettra d'évaluer comment et à quel moment il se forme, et permettra de replacer cette unité dans l'histoire métallogénique de la région de Chibougamau.

Ce poster présente les premiers résultats obtenus à la suite des travaux de terrain réalisés au cours de l'été 2018. La cartographie de détail de 4 décapages dans deux secteurs minéralisés (Ramsey et Golden Moon) a permis de documenter des variations texturales et minéralogiques importantes au sein du sodagranophyre (présence d'un faciès à grain grossier riche en quartz et d'un faciès à grain fin plus riche en feldspaths). Dans le secteur de Ramsay, le faciès à grain grossier est en contact franc avec une rhyolite porphyrique de la formation de Waconichi. Au moins quatre styles de minéralisations ont été observées : 1) fracture sulfurée; 2) veine rubanée de quartz ± carbonate ± pyrite ± chalcopryrite; 3) veine de quartz fumé ± carbonate ± pyrite ± chalcopryrite et 4) veine de quartz ± carbonate ± magnétite. Ces minéralisations s'accompagnent de halos d'altération à carbonate, chlorite et mica blancs.