

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

DOMINIQUE GENNA

CARACTÉRISATION DES ALTÉRATIONS ET DES MINÉRALISATIONS
VOLCANOGÈNES DU COMPLEXE VOLCANIQUE DU CAP D'OURS,
ROUYN-NORANDA, QUÉBEC

DÉCEMBRE 2009



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Le complexe rhyolitique du Cap d'Ours est situé en plein cœur de la ville de Rouyn-Noranda, dans le Groupe du Blake River (GBR) en Abitibi. Le GBR est récemment interprété comme étant un complexe de caldeiras imbriquées et séquentielles. Dans ce modèle, le Cap d'Ours est un secteur clé puisqu'il constitue la marge de l'une de ces caldeiras : la caldeira de New Senator. La faille synvolcanique de Glenwood, constitue la limite Est de ce complexe volcanique et aurait servi de conduit magmatique et hydrothermal. Les affleurements étudiés sont constitués en grande majorité de rhyolites fragmentaires, et la genèse de ces brèches reste problématique. La proximité de la mine Horne, située à seulement 2 km au Nord, renforce l'intérêt de la zone d'étude car le gisement pourrait être associée à la caldeira de New Senator.

Le but de cette étude est donc de comprendre l'environnement volcanique et de caractériser les altérations et les minéralisations en bordure d'une faille synvolcanique majeure. La cartographie de détail réalisée permet d'interpréter les brèches du Cap d'Ours comme étant d'origine autoclastique, et associées à la mise en place d'un complexe felsique sous-marins de dômes et de coulées. La géométrie des faciès lobés indique que le Cap d'Ours ne correspond qu'à la partie orientale de l'édifice, le centre d'émission étant localisé à l'Ouest du secteur d'étude. Ce centre d'émission est constitué d'une multitude de dykes, de composition variable, orientés en direction de la mine Horne. Les structures synvolcaniques, matérialisées par des dykes, sont omniprésentes dans le secteur. Le centre d'émission du complexe pourrait représenter une faille synvolcanique majeure, utilisée pour la mise place du complexe felsique, mais qui aurait aussi pu servir de conduit d'alimentation pour les minéralisations de la mine Horne. Des dykes felsiques à phénocristaux de quartz et feldspath (PQF) recoupent le complexe felsique du Cap d'Ours et semblent, eux aussi, emprunter des zones de faiblesses synvolcaniques.

L'étude des altérations, basée sur une nouvelle méthodologie développée au cours de ce projet, met en évidence deux épisodes d'altérations superposés et distincts. Le premier se caractérise par une zonalité latérale, avec une silicification à proximité du centre d'émission et une altération en chlorite-séricite plus distale. Le deuxième épisode se traduit, sur le terrain, par une zonalité verticale cette fois ci, et est représentée par la séricitisation des PQF. La zonalité latérale est typique de

l'altération d'un dôme felsique par l'eau de mer. Par contre, la zonalité verticale est clairement associée à un épisode hydrothermal d'intensité relativement faible.

La minéralisation, uniquement constituée de fine pyrite, est localisée de part et d'autre des PQF. Ce lien spatial de proximité suggère donc que ces dykes et les structures synvolcaniques qu'ils incarnent ont contrôlé l'épisode minéralisateur. L'étude pétrographique et la signature en éléments traces des pyrites mesurée au La-ICP-MS soutiennent cette hypothèse. Trois groupes de pyrites sont discriminés : 1) des pyrites volcanogènes, riche en métaux, spatialement associées au PQF, 2) des pyrites métamorphiques sans métaux, réparties sur tout le secteur, et 3) des pyrites volcanogènes recristallisées et localisées à proximité du centre d'émission du complexe felsique. Ces dernières pourraient être associées à un autre système hydrothermal qui aurait pu alimenter la mine Horne. La similarité du contenu métallique entre les pyrites volcanogènes du secteur d'étude et celle de la mine Horne suggère un lien entre les deux systèmes minéralisateurs.

Le modèle évolutif proposé pour expliquer la mise en place du Cap d'Ours et les altérations hydrothermales met l'emphase sur l'importance des structures synvolcaniques qui sont omniprésentes dans le secteur. Le facteur temps a lui aussi un rôle primordial. Le complexe felsique ayant été rapidement recouvert par des laves mafiques, seule une cellule hydrothermale de faible durée et donc de faible intensité a pu se développer, ne permettant pas la mise en place de minéralisations économiques malgré la combinaison de tous les facteurs nécessaires, à savoir, la perméabilité structurale fournie par les structures synvolcaniques, l'apport illimité d'eau de mer et une chambre magmatique proche comme source de chaleur.

REMERCIEMENTS

Mes tous premiers remerciements s'adressent à Damien Gaboury pour m'avoir proposé ce projet et avoir su me guider tout au long des travaux. Son enthousiasme, sa confiance et sa disponibilité ont grandement contribué à mon engagement dans ce projet et dans le suivant... Je suis également reconnaissant envers Réal Daigneault pour ses commentaires et son aide précieuse, Stéphane Faure pour la pertinence de ses remarques, ainsi que Wulf Mueller pour ses conseils et son assistance sur le terrain. Toute mon appréciation va envers Michel Jébrak pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Le CONSOREM mérite aussi mes sincères remerciements pour avoir initié et supporté financièrement le projet. La compagnie Visible Gold Mines est aussi remerciée pour avoir autorisé la réalisation de cette étude sur leurs propriétés. Je remercie également Lyndsay Moore pour ses commentaires et nos discussions constructives, ainsi que Levin Castillo et Jakrapun Khamboonruang pour leur soutien technique et moral au cours de l'été 2008. Toute ma reconnaissance va envers Dany Savard et Paul Bédart du LabMater de l'UQAC pour leurs conseils analytiques et leur patience. Le support logistique et la disponibilité de Denis Côté, Claude Dallaire, et Agathe Tremblay a été des plus apprécié.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Nadège Tollari pour la relecture du mémoire et son soutien depuis mon tout premier jour au Québec.

De manière plus indirecte, mais tout aussi essentielle, je remercie mes amis Jimmy Laliberté, Thomas Roger, Alain Mignault, Joy Sauvade, Stéphanie Lavaure, Nicolas Vinet, la famille Girard-Gagnon, Marjorie Simard, Fabien Solgadi, Carlos Oré, Alexandre Aubin, Sébastien Vigneau, Sarah Dare, Jérôme Augustin, Samuel Morfin, et tous les autres que je ne cite pas, mais que je n'oublie pas.

Finalement, je dédie ce mémoire à mes parents et ma famille sans qui je n'aurais jamais pu traverser l'Atlantique, et qui, même à distance, m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xiii

CHAPITRE I – INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.1.1 Association SMV et caldeiras sous-marines.....	1
1.1.2 Association SMV- caldeiras sous-marines au sein du Blake River.....	5
1.2 CADRE DE L'ÉTUDE.....	14
1.3 OBJECTIFS.....	14
1.4 MÉTHODOLOGIE.....	15
1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	17

CHAPITRE II – GÉOLOGIE LOCALE : VOLCANOLOGIE, PÉTROGRAPHIE ET GÉOCHIMIE

2.1 INTRODUCTION.....	18
2.2 HISTORIQUE DES TRAVAUX.....	20

2.3 DESCRIPTION MÉGASCOPIQUE ET PÉTROGRAPHIQUE DES FACIÈS...	25
2.3.1 Rhyolites lobées.....	27
2.3.2 Rhyolites bréchiques.....	29
2.3.3 Intrusions de porphyre rhyolitique (PQF).....	32
2.3.4 Les dykes mafiques.....	36
2.4 CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES.....	36
2.4.1 Méthodologie.....	36
2.4.2 Résultats.....	37
2.5 INTÉGRATION DANS UN MODÈLE EFFUSIF.....	39

CHAPITRE III – GÉOLOGIE STRUCTURALE

3.1 INTRODUCTION.....	43
3.2 ÉLÉMENTS STRUCTURAUX.....	43
3.3 ANISOTROPIE PLANAIRE DE LA DÉFORMATION DUCTILE.....	47
3.4 STRUCTURES SYNVOLCANIQUES.....	52
3.5 INTÉGRATION DES OBSERVATIONS.....	56

CHAPITRE IV – ALTÉRATIONS HYDROTHERMALES

4.1 INTRODUCTION.....	57
4.2 MÉTHODOLOGIE.....	59
4.3 RÉSULTATS.....	65
4.3.1 Validité de la méthode.....	65
4.3.2 Représentativité des données.....	68
4.3.3 Répartition spatiale des altérations.....	72
4.4 INTERPRÉTATION.....	76
4.5 DISCUSSION DE LA MÉTHODE.....	77

CHAPITRE V – MINÉRALISATIONS

5.1 INTRODUCTION.....	80
5.2 CARACTÉRISTIQUES MÉGASCOPIQUES ET RÉPARTITION SPATIALE... ..	80
5.3 SIGNATURE EN ÉLÉMENTS TRACES DES PYRITES (LA-ICP-MS).....	87
5.3.1 Méthodologie.....	87
5.3.2 Résultats.....	89
5.4 DISCUSSION.....	96
5.5 BILAN.....	105

CHAPITRE VI – INTÉGRATION DES RÉSULTATS

6.1 INTRODUCTION.....	106
6.2 ALTÉRATION VERSUS DÉFORMATION.....	106
6.3 MODÈLE GÉNÉRAL ÉVOLUTIF DE LA MISE EN PLACE DU COMPLEXE VOLCANIQUE DU CAP D'OURS.....	108
6.4 FACTEURS DE CONTRÔLE.....	112

CHAPITRE VII – CONCLUSIONS

7.1 INTRODUCTION.....	119
7.2 ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE.....	120
7.3 STRUCTURES SYNVOLCANIQUES.....	121
7.4 CARACTÉRISATION DES ALTÉRATIONS.....	122
7.5 CARACTÉRISATION DES MINÉRALISATIONS ET COMPARAISON DE LA SIGNATURE GÉOCHIMIQUE DES PYRITES DU CAP D'OURS AVEC CELLES DE LA MINE HORNE.....	123

7.6 MODÈLE ÉVOLUTIF DE LA MISE EN PLACE ET DE L'HISTOIRE HYDROTHERMALE DU CAP D'OURS.....	125
7.7 CONTRIBUTIONS.....	125
RÉFÉRENCES.....	127
ANNEXE 1 – LISTE DES ÉCHANTILLONS.....	136
ANNEXE 2 – DONNÉES LITHOGÉOCHIMIQUES BRUTES.....	138
ANNEXE 3 – LISTE DES STATIONS DE MESURE STRUCTURALE.....	142
ANNEXE 4 – LE MICRO-XRF.....	147
ANNEXE 5 – ANALYSE DES PYRITES AU LA-ICP-MS.....	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1	État des connaissances sur les caldeiras sous-marines et leurs liens avec des minéralisations de type SMV.....	3
Figure 2	Position des édifices felsiques associés aux marges de caldeiras.....	4
Figure 3	Ceinture volcanique de l'Abitibi et localisation du Groupe du Blake River.....	7
Figure 4	Cartes géologiques du Groupe du Blake River.....	8
Figure 5	Modèle de mise en place du Blake River.....	9
Figure 6	Coupe géologique du Chaudron de Noranda et position stratigraphique problématique de la mine Horne.....	6
Figure 7	Carte géologique de la portion Sud-Est de la caldeira de New-Senator.....	19
Figure 8	Première cartographie réalisée sur le Cap d'Ours.....	22
Figure 9	Cartographie interprétative du complexe du Cap d'Ours selon Tassé et al. (1982).....	23
Figure 10	Cartographie détaillée du complexe volcanique du Cap d'Ours.....	26
Figure 11	Les rhyolites lobées.....	28
Figure 12	Aspect bréchique typique de la rhyolite du Cap d'Ours.....	30
Figure 13	Microphotographies des faciès de rhyolite bréchique.....	31
Figure 14	Différents faciès bréchiques reconnus sur le Cap d'Ours.....	33
Figure 15	Le porphyre à Quartz et Feldspaths (PQF).....	34
Figure 16	Diagrammes multiéléments des différents faciès felsiques du Cap d'Ours.....	38
Figure 17	Carte interprétative du Cap d'Ours.....	42
Figure 18	Éléments de déformation observés.....	45
Figure 19	Mesures de schistosité.....	46
Figure 20	Veines de quartz-carbonate-chlorite.....	48
Figure 21	Carte de l'anisotropie de la déformation.....	51
Figure 22	Interprétation d'une faille synvolcanique.....	53
Figure 23	Veines de quartz-dolomite-épidote à caractère synvolcanique	55
Figure 24	Altérations typiques: chloritisation et sérichtisation.....	60
Figure 25	Répartition spatiale des échantillons.....	62
Figure 26	Exemple de cartographie d'éléments au micro-XRF.....	64

Figure 27	Diagrammes de comparaison entre les méthodes micro-XRF et XRF.....	66
Figure 28	Représentativité des données micro-XRF.....	70
Figure 29	Répartition spatiale des altérations.....	74
Figure 30	Aspect mégascopique de la minéralisation.....	82
Figure 31	Répartition des zones minéralisées.....	83
Figure 32	Zones minéralisées principales.....	84
Figure 33	Microphotographies des différentes textures de pyrites.....	86
Figure 34	Répartition spatiale des différents groupes de pyrite	90
Figure 35	Représentation statistique de la signature des pyrites.....	92
Figure 36	Comparaison des trois types de signatures de pyrites sur le Cap d'Ours	95
Figure 37	Spectres d'analyse La-ICP-MS du cuivre dans une pyrite.....	98
Figure 38	Signatures en éléments traces des pyrites de la mine Horne..	103
Figure 39	Comparaison des signatures en éléments traces de pyrites de la mine Horne et du Cap d'Ours.....	104
Figure 40	Reconstruction de l'architecture volcanique d'Amulet-Millenbach.....	109
Figure 41	Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.....	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1	Échelle d'estimation visuelle de l'intensité de la déformation.	50
Tableau 4-1	Limites de détection calculées pour le Micro-XRF.....	59
Tableau 4-2	Paramètres d'analyses Micro-XRF.....	63
Tableau 4-3	Différence entre les analyses micro-XRF et XRF.....	69
Tableau 4-4	Composition des fragments analysés au micro-XRF.....	71
Tableau 5-1	Composition en éléments traces du PS-1.....	88
Tableau 5-2	Statistiques des résultats obtenus sur les pyrites du Cap d'Ours analysées au La-ICP-MS.....	91
Tableau 5-3	Statistiques des résultats obtenus sur les pyrites de la mine Horne analysées au La-ICP-MS.....	102

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Liste des échantillons.....	136
Annexe 2	Données lithogéochimiques brutes.....	138
Annexe 3	Liste des stations de mesures structurales.....	142
Annexe 4	Le micro-XRF.....	147
Annexe 5	Analyses des pyrites au La-ICP-MS.....	156

LISTE DES ABRÉVIATIONS

GBR	groupe du Blake River
ZVN	zone volcanique Nord
ZVS	zone volcanique Sud
PDM	Porcupine-Destor-Manneville
CLL	Cadillac-Larder-Lake
PQF	rhyolite porphyrique à quartz et feldspath
SMV	sulfure massif volcanogène
PAF	Perte au feu
E-O	Est-Ouest
N-S	Nord-Sud
g/t	grammes par tonne
Mt	millions de tonnes
Ma	millions d'années
XRF	fluorescence X
micro-XRF	micro-fluorescence X
ICP-MS	inductively coupled plasma mass spectrometry
LA	laser ablation
LN	lumière naturelle
LP	lumière polarisée
LR	lumière réfléchie
Cpy	chalcopyrite
Py	pyrite
Sph	sphalérite

À Maurice Pineau et Salvatore Genna

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE

1.1.1 Association SMV et caldeiras sous-marines

Les gisements de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) sont des gisements de minerai massif polymétallique (Cu, Zn, Pb, Au, Ag) dont les processus de mise en place sont bien documentés (Franklin et al. 1981; Herzig et Hannington 1995; Ohmoto, 1996; Gibson et al., 1999; Franklin, 2005). Ce type de minéralisation se forme en contexte sous-marin extensif. Il résulte de la circulation d'eau de mer au travers d'un empilement volcanique et/ou sédimentaire. La minéralisation est contrôlée par trois principaux facteurs : (1) un apport illimité en eau, (2) une perméabilité structurale permettant la circulation de fluide, et (3) une source de chaleur sous jacente qui va permettre la convection de ces fluides.

Les relations génétiques entre les SMV et avec des caldeiras sous-marines sont mises en évidence depuis la fin des années 1970 (Ohmoto, 1978; Urabe et al., 1987). Les exemples sont nombreux, aussi bien pour des caldeiras modernes comme la caldeira de Myojin Knoll au Japon, où un gisement de 9 Mt @ 5,6% Cu, 1197 g/t Au, et 18,4 g/t Ag est actuellement en train de croître (Iisaza et al. 1999; Fiske et al. 2001), ou comme le volcan Brothers, en Nouvelle-Zélande (De Ronde et al. 2005), que pour des caldeiras beaucoup plus anciennes comme Hunter Mine ou Normétal en Abitibi (Mueller et al., 2002, 2008). Les connaissances sur les caldeiras ont énormément évolué au cours de la dernière décennie (Lipman, 1997; Cole et al., 2005; Acocella, 2007; Mueller et al., 2009) en particulier en ce qui concerne la dynamique de leurs formations (Acocella et al., 2000; Roche et al., 2000; figure 1A) et l'importance de leurs marges qui constituent des zones perméables idéales pour permettre la circulation de fluides hydrothermaux par l'intermédiaire de failles synvolcaniques (Rytuba, 1994; Geshi et al., 2002; Stix et al., 2003; figure 1B,C). Les zones de bordure de caldeiras sont donc les zones clés dans la mise en place de minéralisations de type SMV. De plus, outre la possibilité de conduits hydrothermaux, les structures synvolcaniques associées à la subsidence constituent des zones de faiblesses réutilisées comme conduit magmatique pour alimenter de petits dômes volcaniques à la surface (Gibson, 2005; Cole et al., 2005; figure 2).

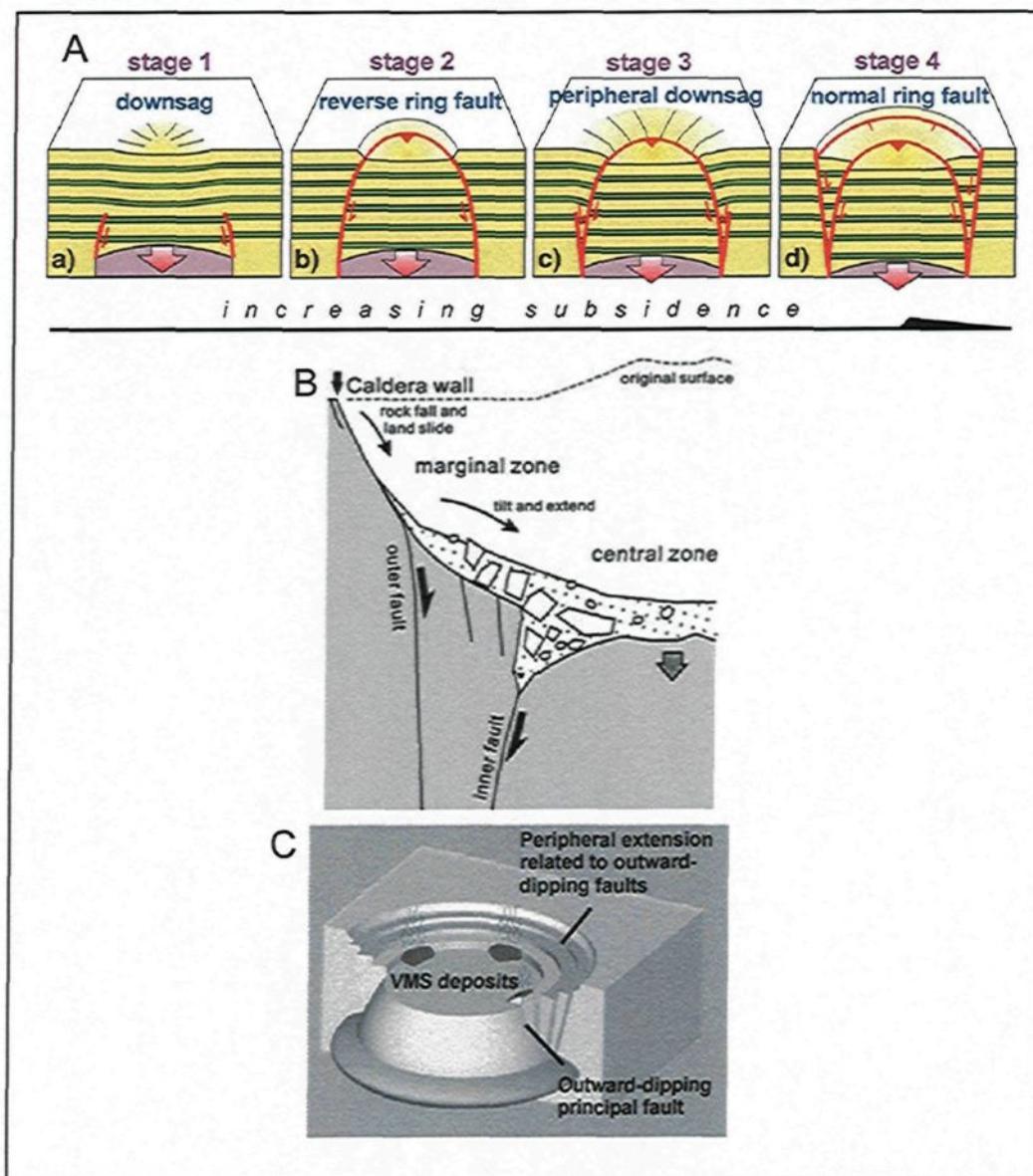


Figure 1 : État des connaissances sur les caldeiras en ce qui concerne leurs marges et leurs liens avec des minéralisations de type SMV. A – Évolution structurale temporelle lors de la subsidence d'une caldeira (Acocella, 2007). B – Modèle de Geshi et al. (2002) : marge de caldeira, zone de brèche poreuse et perméable, basculement de blocs et glissement de terrains. C – Modèle de Stix et al. (2003) : mise en place des minéralisations à l'intersection entre le réseau de faille interne et le plancher de la caldeira.

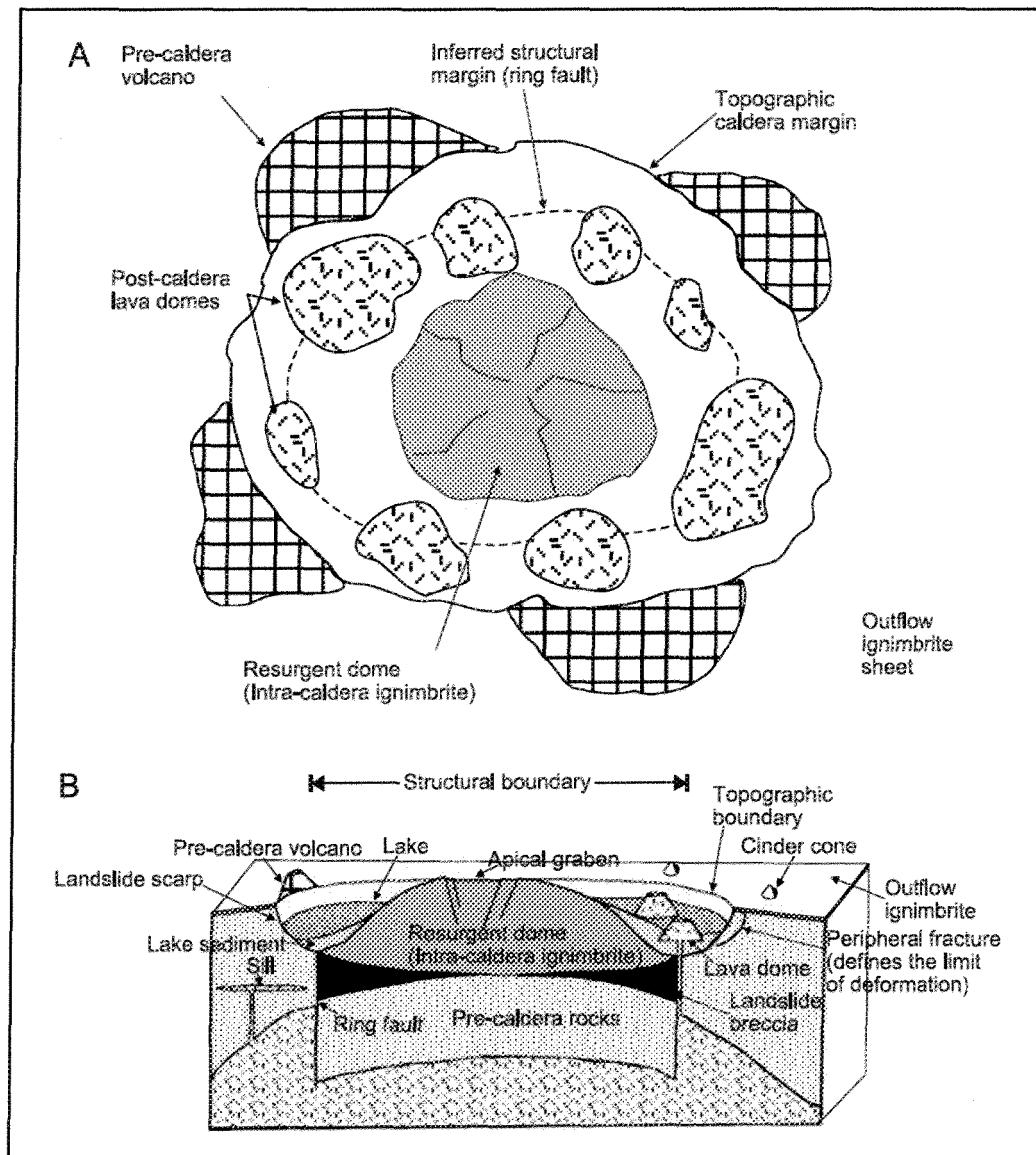


Figure 2 : Position de différents petits édifices felsiques associés aux marges de caldeiras (Cole et al., 2005). A – Vue en plan. B – Vue en coupe schématique.

La présence éventuelle de ces petits édifices felsiques dans les marges de caldeiras constitue un intérêt économique supplémentaire et non-négligeable puisque leur association avec des SMV est bien documentée (McPhie et al., 1992, Franklin et al., 2005; Mercier-Langevin et al., 2007).

Les caldeiras sous-marines sont donc considérées comme des environnements très favorables en ce qui concerne la mise en place de gisements SMV. L'eau de mer constitue une source illimitée de fluide et la chambre magmatique sous la caldeira représente le moteur thermique qui permet la circulation des fluides hydrothermaux par l'intermédiaire des failles synvolcaniques perméables.

1.1.2 Association SMV- caldeiras sous-marines au sein du Blake River

Le Groupe de Blake River (GBR) est situé au sein de la Sous-province de l'Abitibi (Canada). Avec plus de 80 gisements de SMV, l'Abitibi représente l'une des plus prolifiques ceintures de roches vertes au monde en ce qui concerne les minéralisations volcanogènes (Rodney et al., 2002; Franklin et al., 2005). Elle est constituée de séquences volcano-sédimentaires linéaires, d'orientation Est-Ouest, perforées par des plutons synvolcaniques à post-tectoniques. Globalement, l'Abitibi est interprétée comme le résultat d'accrétion de terrains volcaniques

différents, formés en contexte de supra-subduction, et datés entre 2735 et 2670 Ma (Mueller et al., 1996, 2009; Daigneault et al., 2004). La ceinture de l’Abitibi est divisée en deux zones, la Zone Volcanique Nord (ZVN) et la Zone Volcanique Sud (ZVS) (Chown et al., 1992). Ces zones sont séparées par deux grands couloirs de déformation, eux aussi d’orientation Est-Ouest : la faille de Porcupine-Destor-Manneville (PDM) qui sépare les ZVN et ZVS, et la faille de Cadillac-Larder Lake (CLL) qui constitue la bordure Sud de la ZVS.

Le GBR occupe la portion ouest de la Zone Volcanique Sud du Québec. Selon Pearson et Daigneault (2009), ce groupe est un complexe de caldeiras imbriquées sous-marines auxquelles sont associées des minéralisations volcanogènes. Le GBR est caractérisé par une séquence volcanique âgée de 2706 à 2696 Ma (Corfu, 1993; Mortensen, 1993a,b) étendue sur une surface de près de 3000 km². La séquence volcanique est constituée en majorité de roches mafiques avec plusieurs centres volcaniques felsiques (Dimroth et al., 1982; Gélinas et Ludden, 1984; Hannington et al., 2003). Le modèle de caldeiras proposé repose sur plusieurs observations : (1) un réseau de dykes mafiques annulaires et radiaux, (2) la géométrie en dôme de la structure, (3) la distribution des roches volcanoclastiques (figure 4A), (4) la distribution annulaire des failles (figure 4B) et (5) un modèle d’altération hydrothermale de type carbonate.

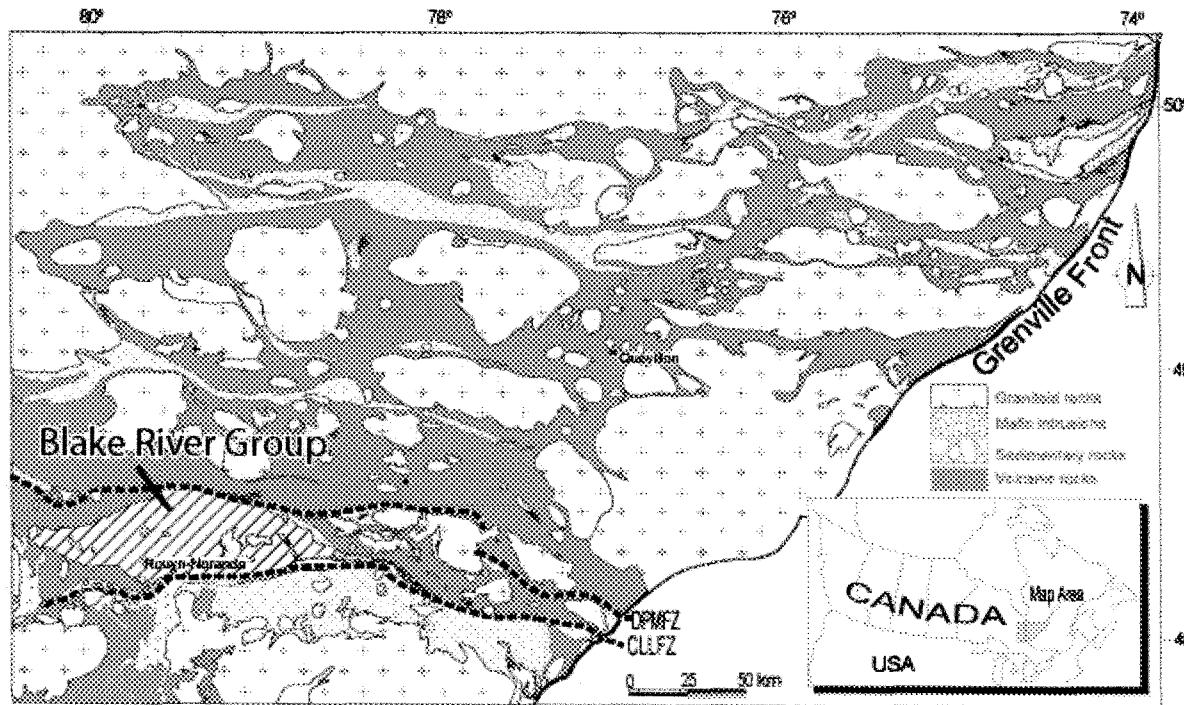


Figure 3 : Ceinture volcanique de l'Abitibi et localisation du Groupe de Blake River (modifiée de Daigneault et al., 2004). DPMFZ : Zone de Faille de Destor-Porcupine Manneville. CLLFZ : Zone de Faille de Cadillac-Larder Lake.

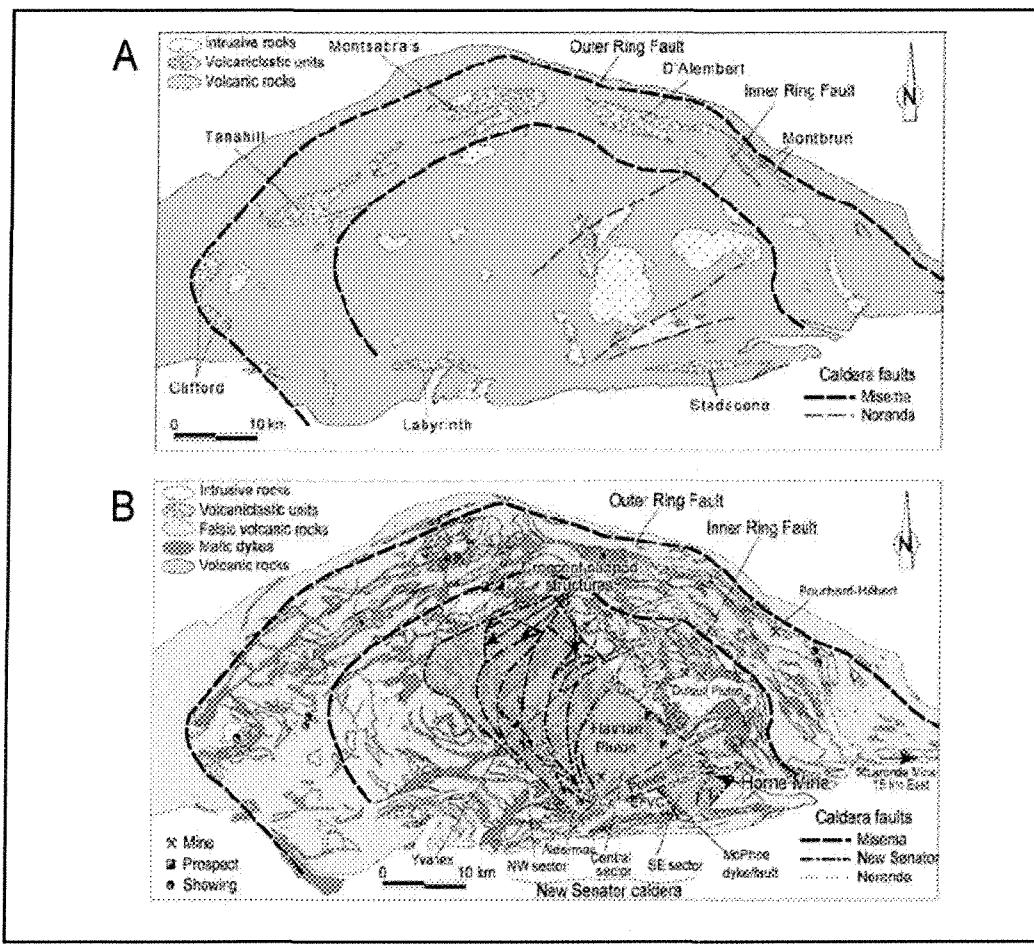


Figure 4 : Cartes géologiques du Groupe de Blake River modifiées de Pearson et Daigneault, 2009. A- Distribution des unités volcanoclastiques. B- Structure du complexe de caldeiras imbriquées et répartition annulaire des failles et des dykes.

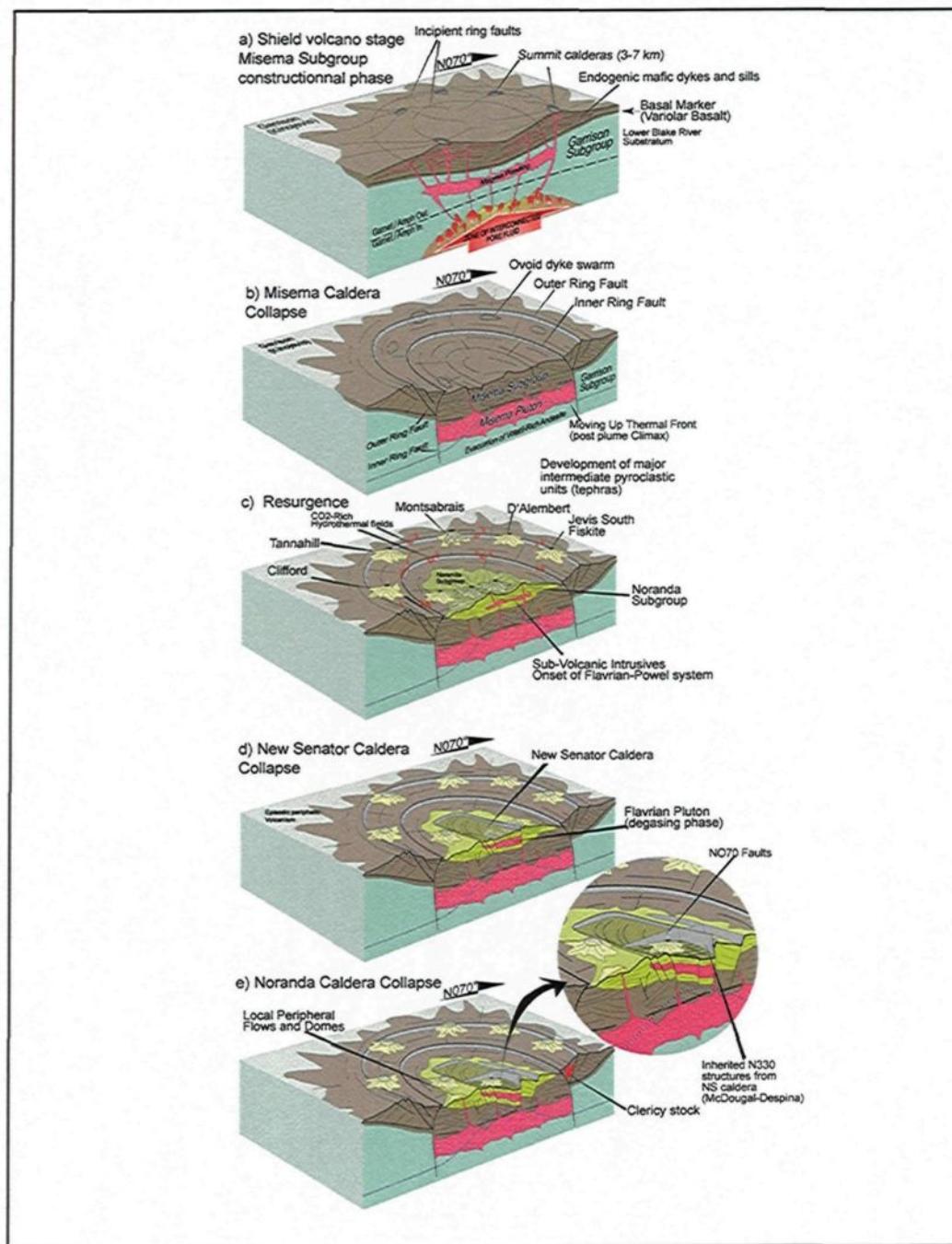


Figure 5 : Modèle d'évolution et de mise en place du GBR (Pearson et Daigneault 2009).

Toutes ces données ont permis d'établir un modèle d'évolution du GBR en cinq étapes, dans lequel on observe la mise en place de trois caldeiras imbriquées : les caldeiras de Misema, New-Senator et Noranda (figures 4 et 5). Cet immense complexe volcanique totalise 33 gisements de sulfures massifs connus, pour un tonnage cumulatif de 125 Mt de mineraux (Pearson et Daigneault, 2009).

La caldeira de Noranda, ou le "Chaudron de Noranda" (figure 6) est connue depuis les années 1970 (De Rosen-Spence, 1976; Dimroth et al., 1982; Gibson et Watkinson, 1990) et constitue la zone la mieux documentée et exposée du Blake River. Elle est caractérisée par une séquence bimodale qui est l'hôte des 13 gisements constituant la séquence des mines du district minier de Noranda (Gibson et Watkinson, 1990). Les plus importants gisements se présentent dans la zone de marge de la caldeira, et certains d'entre eux sont associés à des complexes felsiques le long de failles synvolcaniques majeures (Gibson et Galley, 2007).

La mine Horne a été le plus gros producteur de cuivre et d'or du district: 54 Mt avec des teneurs exceptionnelles combinées en or de 6,1 g/t et en cuivre de 2,2% (Barrett et al., 1991), ce qui en fait le plus gros producteur d'or de sa catégorie dans le monde (Dubé et al., 2007). Cependant, sa position

stratigraphique reste toujours mal comprise au sein du Blake River (figure 6), et son association avec la caldeira de Noranda est encore vivement débattue. En effet, il est nécessaire de préciser que le modèle ne fait pas l'unanimité au sein de la communauté scientifique qui travaille dans le GBR, mais aucun modèle alternatif n'est publié à ce jour.

Le modèle de caldeiras imbriquées (Pearson et Daigneault, 2009) a pour intérêt d'ouvrir de nouvelles zones pour l'exploration minière au sein du GBR. Il cible en particulier les marges des caldeiras de Misema et de New-Senator, encore peu documentées et où la circulation de fluides, par l'intermédiaire de failles synvolcaniques associées à l'effondrement de ces caldeiras, aurait pu conduire à la mise en place de minéralisations économiques.

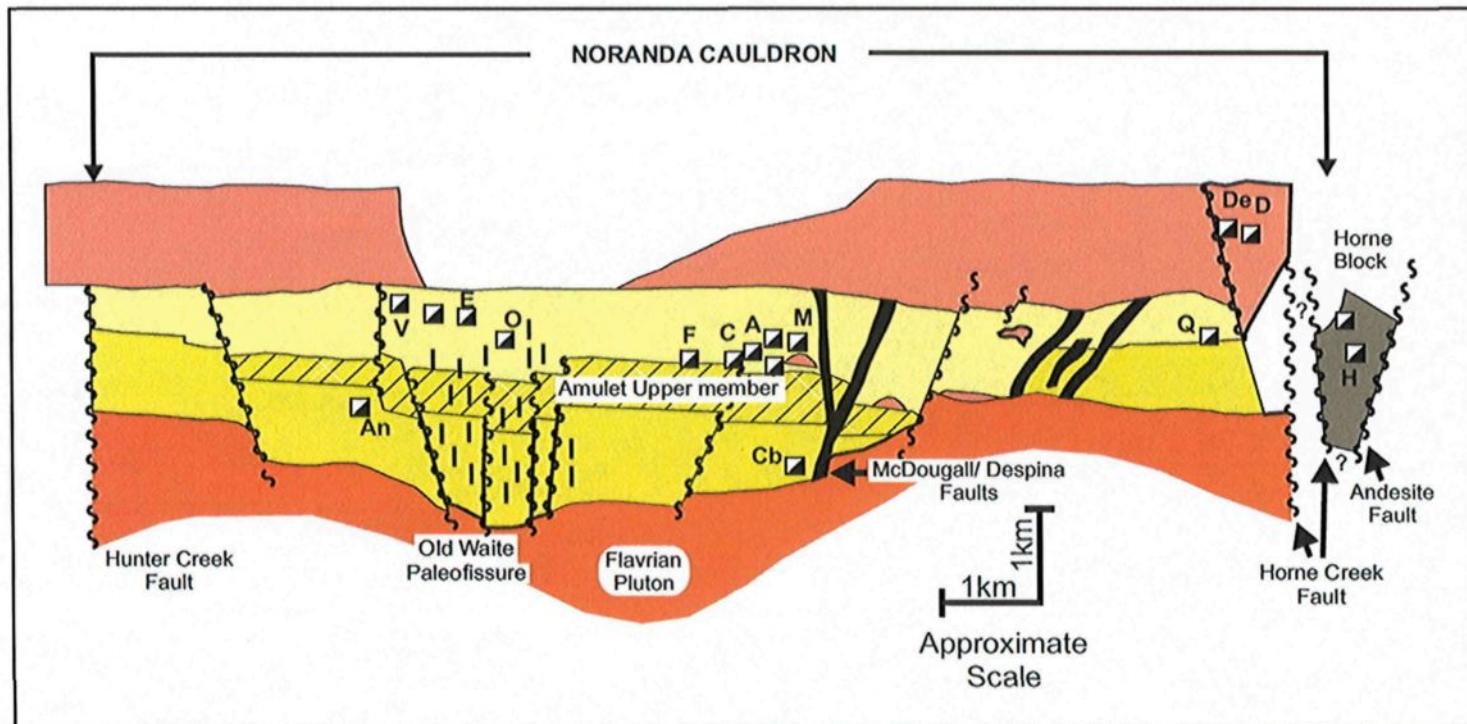


Figure 6: Coupe géologique Nord-Sud du Chaudron de Noranda, avec les SMV, et position stratigraphique problématique de la mine Horne. (Modifiée de Gibson, 2005).

Le Cap d'Ours, anciennement connu sous le nom de « Rhyolite de Glenwood » (Wilson, 1941) est la zone ciblée pour la présente étude. Il correspond dans le modèle de Pearson et Daigneault (2009) à la marge Sud-Est de la caldeira de New Senator. La faille synvolcanique de Glenwood, constitue la limite Est de ce complexe volcanique et aurait servi de conduit magmatique et hydrothermal. L'observation de minéralisations et d'évidences d'hydrothermalisme sur le terrain vient appuyer cette hypothèse. Les affleurements sont essentiellement constitués d'un ensemble de brèches volcaniques de composition rhyolitique, sans stratification cohérente, sur près de 500 m². Une telle accumulation de roches fragmentaires est unique dans le secteur, et leurs provenances restent problématiques. Trois processus de fragmentation pourraient expliquer leurs genèses : (1) un épisode pyroclastique (Tassé et al., 1982), (2) un épisode autoclastique relié à la mise en place d'un complexe felsique sous-marin, ou (3) un glissement gravitaire associé à l'effondrement de la caldeira de New Senator, et donc postérieur à la mise en place de l'empilement volcanique.

La proximité de la mine Horne, située à 2 km au Nord, renforce l'intérêt de la zone d'étude. Le modèle de Pearson et Daigneault (2009) apporte une vision nouvelle pour expliquer la formation de ce gisement puisque celui-ci pourrait être lié génétiquement à la caldeira de New-Senator.

1.2 CADRE DE L'ÉTUDE

Les travaux sur le Cap d'Ours sont à l'initiative du Consortium de Recherche en Exploration Minérale (CONSOREM). Ils s'intègrent dans un projet de plus grande envergure visant à mieux comprendre la caldeira de New Senator, par l'étude de la volcanologie physique, des altérations, des minéralisations et des structures synvolcaniques. Deux autres projets viennent appuyer cette étude: la maîtrise de David Paquin (UQAM) qui se concentre sur la faille synvolcanique de Glenwood, à l'Est de notre secteur, et le doctorat de Lyndsay Moore (UQAC), d'échelle plus régionale, qui documente les processus de volcanologie physique dans le secteur Sud-Est de New Senator.

1.3 OBJECTIFS

Ce projet est construit autour d'un objectif principal : documenter la distribution des altérations et des minéralisations volcanogènes sur le Cap d'Ours. Cet objectif permettra tout d'abord de comprendre les processus à l'origine de la mise en place du complexe felsique. Le lien possible entre les minéralisations de la mine Horne et celles du Cap d'Ours sera ensuite testé. Finalement, nous verrons s'il est possible d'intégrer ces résultats dans le modèle de caldeiras imbriquées et séquentielles de Pearson et Daigneault (2009).

Afin d'atteindre ce but, cinq objectifs secondaires ont été définis :

- 1) identification des lithologies, des faciès volcaniques et reconstruction de l'environnement de formation (en collaboration avec L. Moore);
- 2) identification des structures synvolcaniques;
- 3) caractérisation des altérations;
- 4) caractérisation des minéralisations et comparaison de la signature géochimique des pyrites du Cap d'Ours avec celles de la mine Horne;
- 5) proposition d'un modèle évolutif expliquant la mise en place et l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours;

1.4 MÉTHODOLOGIE

Afin d'atteindre nos objectifs, les travaux ont été divisés en deux parties : les travaux de terrain et les travaux de laboratoire. Les travaux de terrain ont été réalisés, en collaboration avec L. Moore lors de l'été 2008. Ils ont principalement consisté en une cartographie détaillée de la zone d'étude, au 1:200, à l'aide d'un DGPS (précision décimétrique), incluant un levé des structures et de leur relation mutuelle, des lithologies, des faciès volcaniques, des altérations et des minéralisations. Un échantillonnage régulier (tous les 50m) et un échantillonnage des différentes zones minéralisées a aussi été effectué, ce qui a permis la récolte de 68 échantillons (annexe 1).

Les travaux de laboratoire reposent sur une étude pétrographique et géochimique. La majorité des analyses ont été conduites au LabMater de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Seules les analyses lithogéochimiques, par fluorescence-X, des différents faciès ont été réalisées par le laboratoire ALS Chemex de Val-d'Or.

L'étude des altérations en contexte de faciès bréchique a nécessité le développement d'une nouvelle méthodologie basée sur le micro-XRF. Celle-ci ne sera détaillée qu'au chapitre IV, puisqu'elle représente une partie importante de la contribution scientifique de ce projet.

La minéralisation a fait l'objet d'une étude pétrographique. Afin de caractériser au mieux une possible zonalité dans la distribution spatiale de la minéralisation, et de déterminer si celles-ci font partie d'un même ou de plusieurs épisodes minéralisateurs, les signatures en éléments traces des pyrites ont été établies grâce au La-ICP-MS (*Laser-Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) de l'UQAC. Des échantillons de la mine Horne ont eux aussi été analysés dans le but d'établir une comparaison géochimique qui permettrait de mettre en évidence un lien génétique éventuel avec les pyrites du Cap d'Ours.

1.5 STRUCTURE DU MÉMOIRE

Dans le deuxième chapitre, les caractéristiques mégascopiques, pétrographiques et géochimiques des différents faciès seront étudiées. Ces éléments conduiront à la nouvelle interprétation concernant la mise en place du Cap d'Ours. Au chapitre III, les différents éléments structuraux seront décrits très brièvement, et l'accent sera porté sur les différentes structures synvolcaniques observées sur le terrain. Le quatrième chapitre sera consacré à la caractérisation des altérations. La nouvelle méthodologie développée au cours de ce projet sera détaillée, de même que ses avantages, et ses limites, mais surtout les résultats obtenus en ce qui concerne la distribution spatiale des altérations. Le chapitre V, portera sur l'étude des facteurs de contrôle de la minéralisation ainsi que la signature en éléments traces des pyrites. La répartition spatiale des secteurs minéralisés sera regardée de près, et un lien génétique avec la mine Horne sera testé. Le chapitre VI permettra d'intégrer et de discuter des résultats dans un modèle métallogénique évolutif. Finalement, le septième et dernier chapitre sera consacré aux principales conclusions du projet.

CHAPITRE II

GÉOLOGIE LOCALE : VOLCANOLOGIE, PÉTROGRAPHIE ET GÉOCHIMIE

2.1 INTRODUCTION

Le complexe du Cap d'Ours est situé au centre-sud de la ville de Rouyn-Noranda et il correspond à la marge Sud-Est de la caldeira de New Senator (figure 7). Les affleurements présents sont continus sur près de 750 m E-W et 350 m N-S. Ils constituent la zone orientale de la Rhyolite de Glenwood et la faille synvolcanique du même nom limite le complexe à l'Est. Cette faille illustre aujourd'hui un exemple exceptionnel de transition entre des dykes mafiques nourriciers et leurs équivalents effusifs : des laves mafiques coussinées recouvrant le secteur d'étude. La géométrie de ces faciès permet de penser que le bloc contenant le Cap d'Ours est complètement basculé vers le Nord, ce qui nous permet d'observer une vue en coupe de la séquence volcanique. La préservation des phénomènes volcaniques est exceptionnelle.

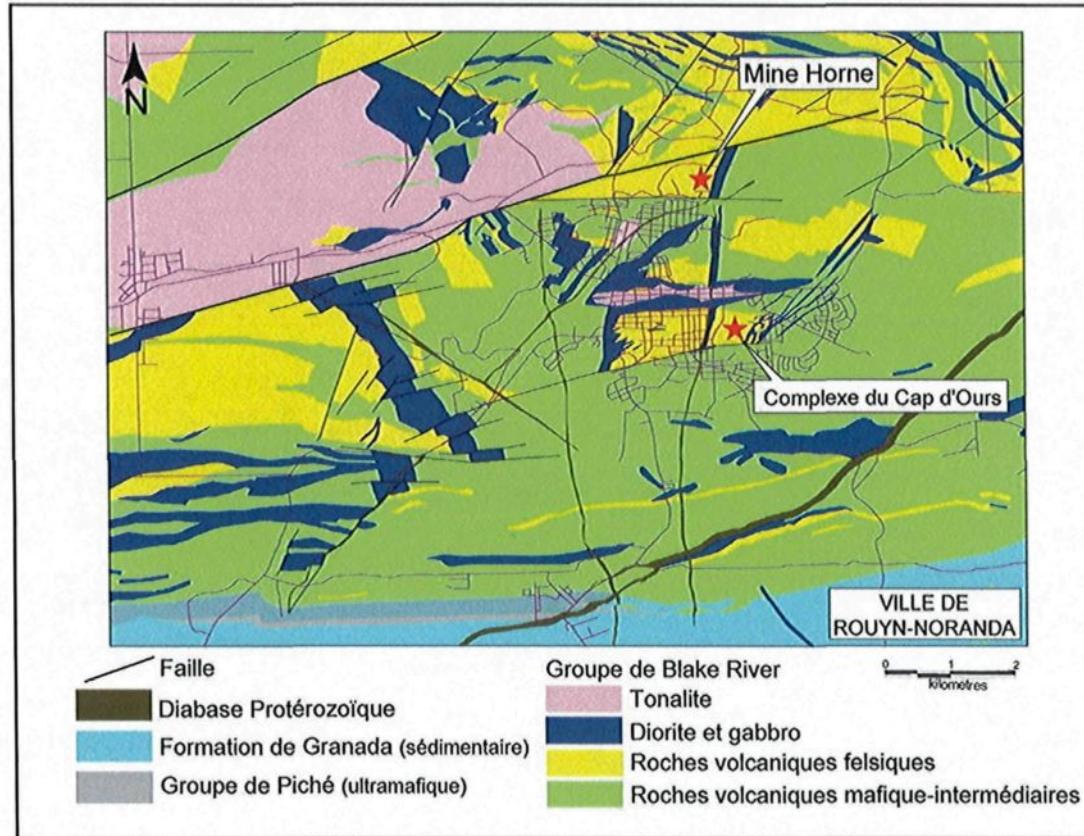


Figure 7 : Carte géologique de la portion Sud-Est de la caldeira de New-Senator. Région de Rouyn-Noranda.
Modifiée de données SIGEOM et de données CONSOREM.

En effet, le métamorphisme régional autour de Rouyn-Noranda est relativement faible puisque il se situe entre prehnite-pumpellyite et schiste vert inférieur (Powell et al., 1995). En ce qui concerne la déformation, elle est assez importante (linéation d'étirement), mais comme les observations sont réalisées en plan et donc perpendiculaires à la linéation, les relations primaires sont bien préservées.

Le Cap d'Ours se divise en deux secteurs, Est et Ouest, séparés par une zone de dépôts meubles. Les faciès volcaniques sont majoritairement constitués de rhyolites fragmentaires monogéniques (70%). Des intrusions de porphyre rhyolitique à quartz et feldspath (PQF) et de diorite forment environ 30% de l'affleurement (Tassé et al., 1982). L'environnement de formation de la séquence volcanique est sous-marin et la polarité est vers le Nord, comme l'indiquent des laves andésitiques coussinées au N-E (De Rosen-Spence, 1976; Paquin et al., 2007) et au S-E de la zone d'étude (Wilson, 1941).

2.2 HISTORIQUE DES TRAVAUX

Localisé en plein centre ville de Rouyn-Noranda, le secteur a fait l'objet de nombreux travaux. La première étude remonte à l'année 1929 où la compagnie "Glenwood Mining Syndicate" implante un puits de 15 m de profondeur, sur une veine de quartz de 10 à 15 cm, qui révèle quelques teneurs aurifères (0,2 g/t). Dès

lors, la minéralisation est considérée comme étant associée à la déformation (type veine) et la stratégie d'exploration qui suivit fut basée sur cette hypothèse. Une première cartographie détaillée est réalisée en 1933 (figure 8 : Butterfield, 1933) accompagnée d'une campagne de forage de cinq trous qui donne des valeurs intéressantes jusqu'à 16,00 g/t sur 5 pieds (1.52 m). En 1941, une nouvelle campagne de forage est effectuée, mais elle ne permet pas de retrouver les teneurs trouvées en 1933, et les travaux sont abandonnés.

De 1981 à 1984, les "*Explorateurs du Nord Québécois*" relancent l'exploration sur le secteur et réalisent une deuxième cartographie accompagnée d'un deuxième programme de forage de 15 trous, toujours dans l'optique d'une minéralisation de type veine, mais toutes les teneurs enregistrées sont inférieures à 0,5 g/t (Barrette, 1981, 1982; Cregheur, 1982; Richard et Gaucher, 1984). Le projet est une nouvelle fois abandonné.

Les premiers travaux académiques sur le Cap d'Ours datent de 1978 avec la réalisation des travaux de maîtrise de N. Gauthier, publiés par Tassé et al. (1982). Une cartographie détaillée est une nouvelle fois réalisée (figure 9) et mène à interpréter le complexe du Cap d'Ours comme une zone d'accumulation de volcanoclastites rhyolitiques à dominance pyroclastique où la matrice serait de composition basaltique. Plusieurs processus de fragmentation sont évoqués pour interpréter la mise en place de ces brèches.

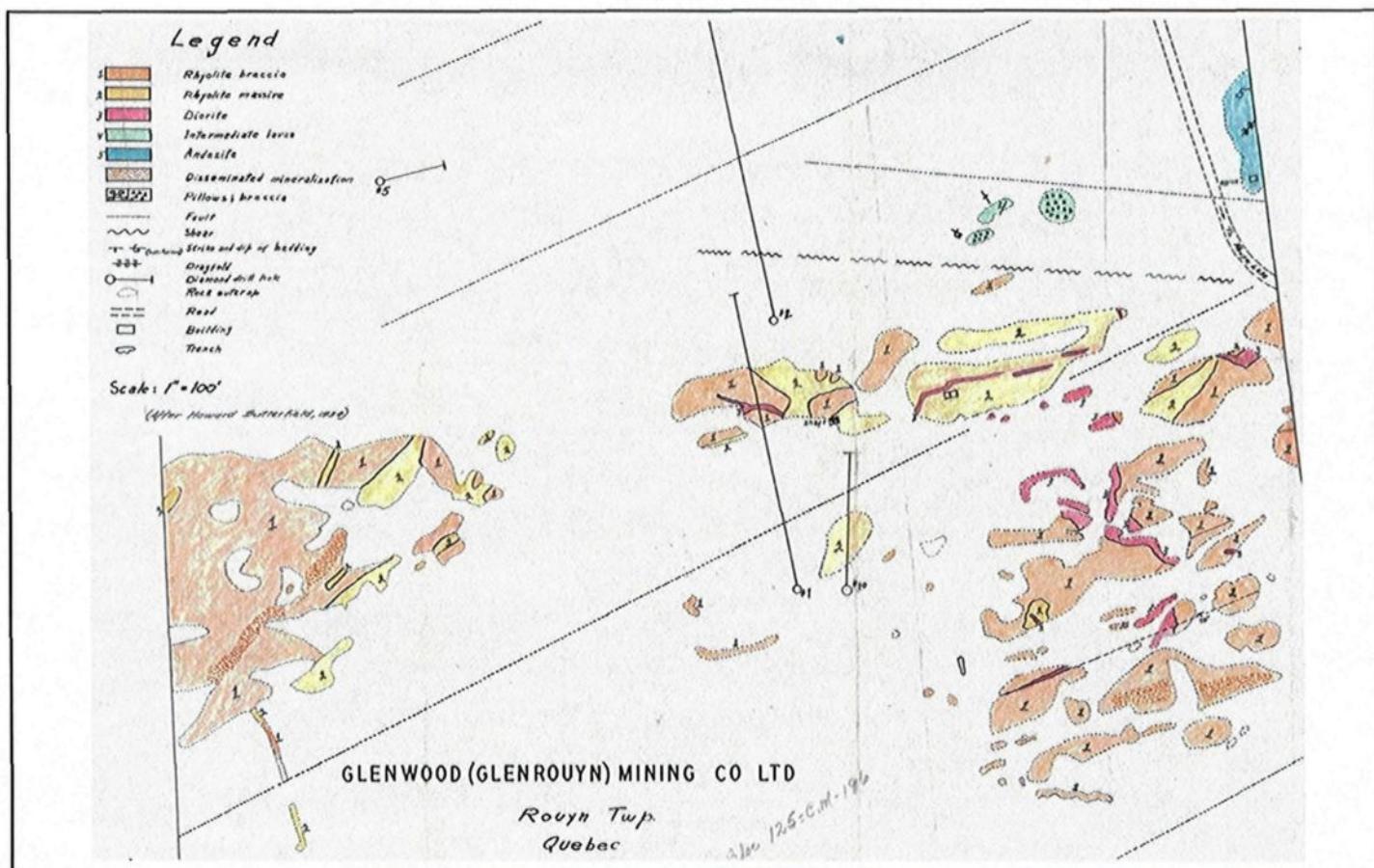


Figure 8 : Première cartographie réalisées sur le Cap d'Ours, d'après Butterfield (1933).

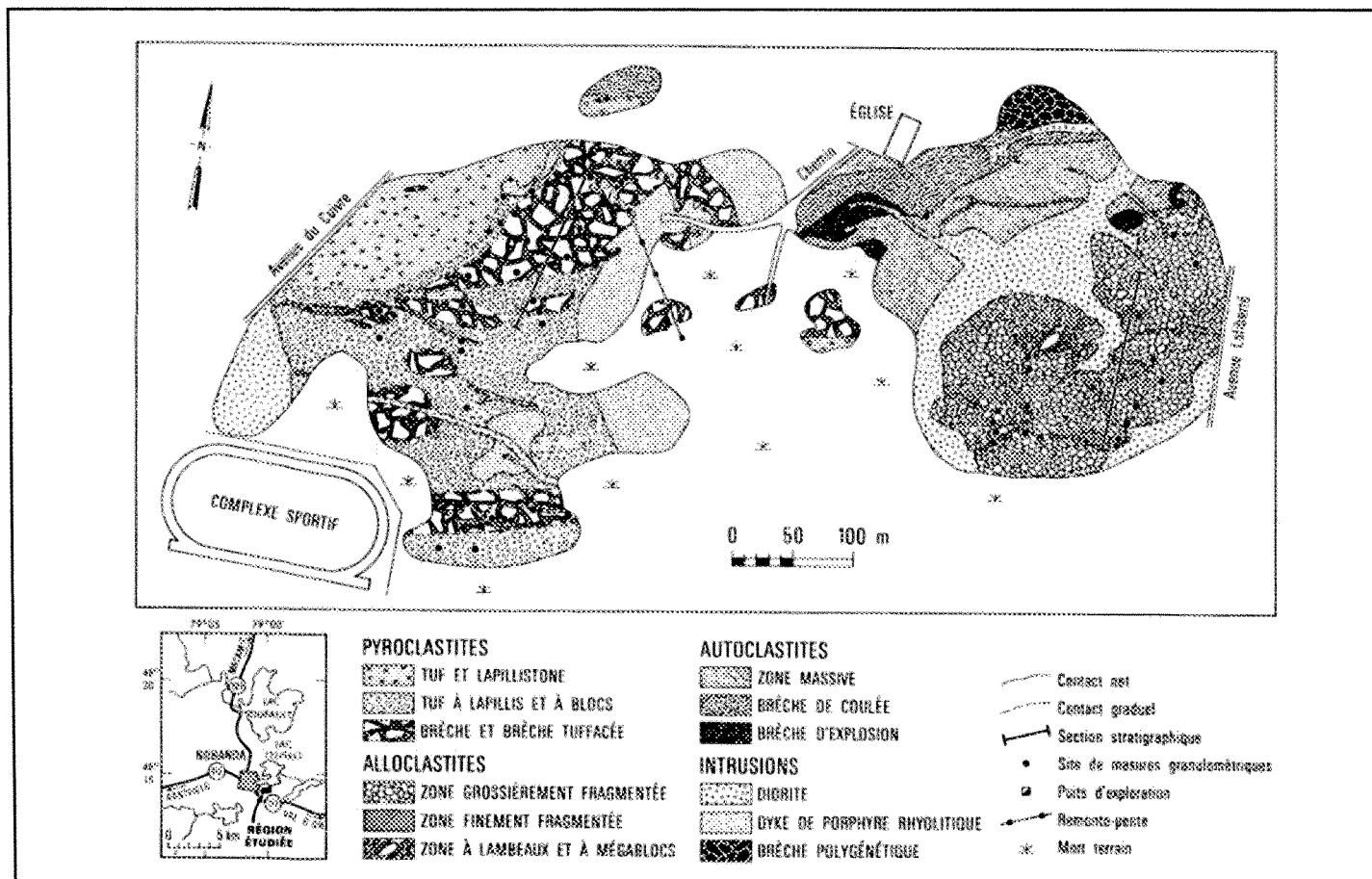


Figure 9 : Cartographie interprétative du complexe du Cap d'Ours. Tassé et al. (1982)

Cependant, les connaissances sur les processus de volcanologie sous-marines de ces dernières décennies et en particulier les travaux De Rosen-Spence et al. (1980) sur la capacité d'écoulement de laves felsiques sous-marines, ainsi que les travaux de Allen (1988) en ce qui concerne les fausses textures pyroclastiques, remettent en cause les interprétations faites sur le complexe du Cap d'Ours par Gauthier (1980) et Tassé et al. (1982). En effet, De Rosen-Spence et al., (1980) sont parmi les premiers à mettre en évidence que les roches felsiques peuvent former des coulées sous-marines en dépit de leurs viscosités élevées et que ces coulées possèdent des variations latérales de faciès proches de celle des coulées mafiques.

En ce qui concerne les travaux de Allen (1988), ils démontrent que certaines textures interprétées comme pyroclastiques sont en fait une combinaison de fractures perlitiques, d'altération hydrothermale et de déformation. Ces textures trompeuses résultent donc d'un processus de fragmentation autoclastique plutôt que pyroclastique ce qui a de grandes implications en ce qui concerne la mise en place de ces dépôts.

Par ailleurs, l'hypothèse de mélange de magma felsique-mafique, avancée par Tassé et al. (1982), était un argument majeur contre un modèle de mise en place autoclastique du complexe, puisque, dans ce cas là, la composition devrait

être homogène. Cependant, cette interprétation est largement contestable. En effet, elle est basée sur des analyses en éléments majeurs, qui ne reflètent pas la composition initiale des roches, puisque celles-ci ont subi une altération hydrothermale, en particulier la matrice plus poreuse. Des analyses d'éléments traces, beaucoup plus réfractaires à l'altération, devraient donc apporter des réponses.

Aujourd'hui, c'est la compagnie "*Visible Gold*" qui travaille le secteur, toujours dans l'optique de minéralisations orogéniques. Dans le cadre de cette étude, l'emphase sera portée sur les processus volcanogènes. Afin de mieux comprendre l'environnement volcanique une nouvelle cartographie de détails à l'échelle 1:200 (figure 10) a été réalisée durant l'été 2008, en collaboration avec L. Moore (Ph.D. UQAC)

2.3 DESCRIPTION MÉGASCOPIQUE ET PÉTROGRAPHIQUE DES FACIÈS

L'identification des lithologies et des faciès volcaniques représente une étape indispensable dans la compréhension et la reconstruction du paléo-environnement. La mise en place de l'édifice volcanique et l'hydrothermalisme sont étroitement liés. Afin de bien comprendre l'environnement de formation, chacun des faciès identifiés sur le terrain, sera décrit macro et microscopiquement.

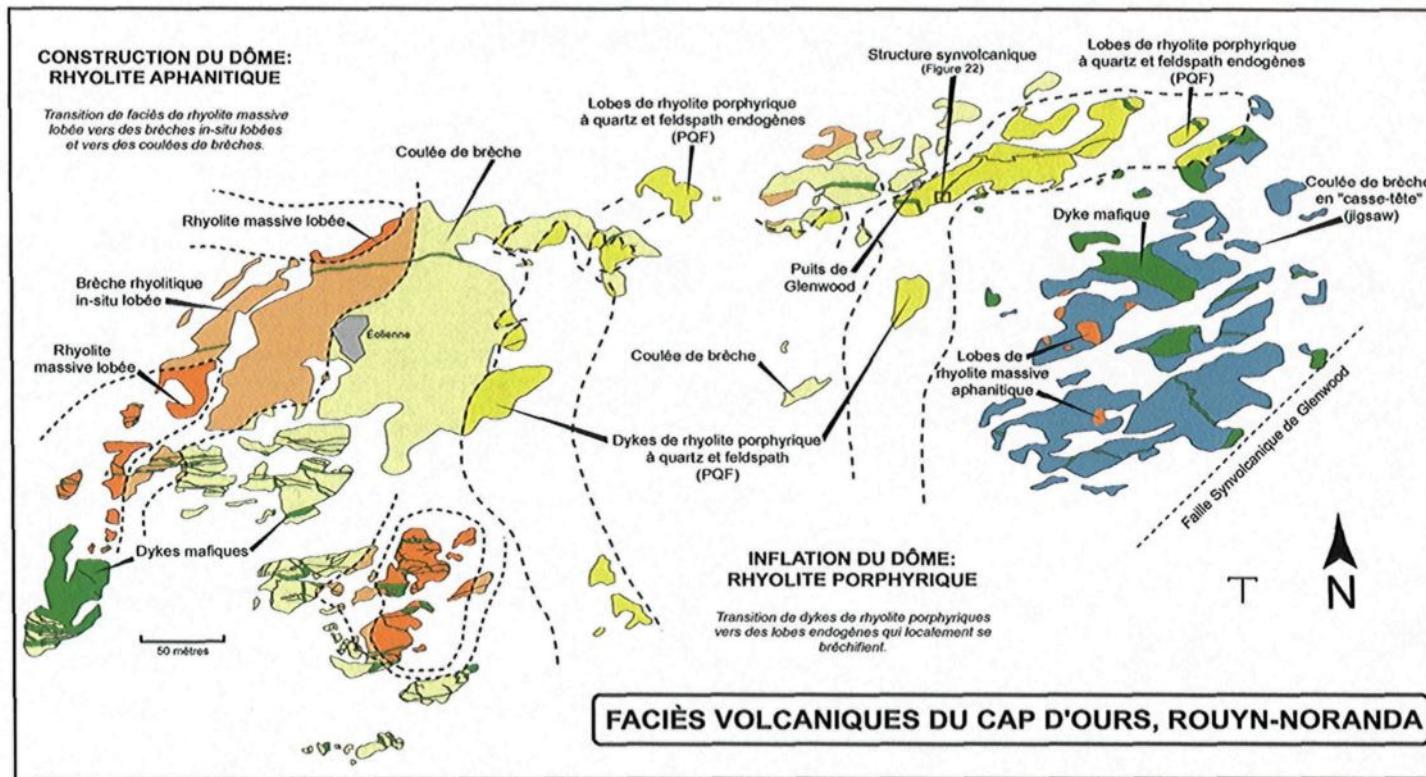


Figure 10 : Cartographie détaillée du complexe volcanique du Cap d'Ours. Position des différents faciès volcaniques identifiés. Genna D., Moore L. et Mueller W., 2008

Pour ce faire, cinquante-huit lames minces de 30 µm ont été réalisées pour l'étude pétrographique, et celles-ci ont été réutilisées pour les analyses chimiques des altérations (chapitre IV). Les lames minces ont été taillées de manière à observer une section horizontale, donc perpendiculaire à la schistosité et à la linéation d'étirement subverticale.

La grande majorité des faciès sur le complexe volcanique du Cap d'Ours sont des rhyolites fragmentaires. On observe une évolution latérale progressive des faciès d'Ouest en Est. On passe ainsi de rhyolites massives lobées à l'Ouest, vers des brèches rhyolitiques in-situ lobées, puis des coulées de brèches et enfin des brèches en « casse-tête » qui constituent la quasi-totalité du secteur Est.

2.3.1 Rhyolites lobées

Le faciès de rhyolite lobée apparaît comme massif. Il est aphanitique, de couleur blanc jaunâtre et aucun fragment n'est visible (figure 11). Sur le terrain, la majorité de ce faciès se localise complètement à l'Ouest. Sa géométrie et les textures d'écoulement laminaire métrique qui y sont visibles suggèrent qu'il s'agit de lobes de rhyolites (figure 11A). L'orientation de ces lobes ainsi que la direction de l'écoulement laminaire indique une direction d'épanchement des laves vers l'Est. L'étude microscopique révèle une texture microlitique aphanitique constituée majoritairement de quartz et feldspath ± chlorite, séricite et epidote et de quelques agrégats de carbonates répartis aléatoirement (figure 11C,D).

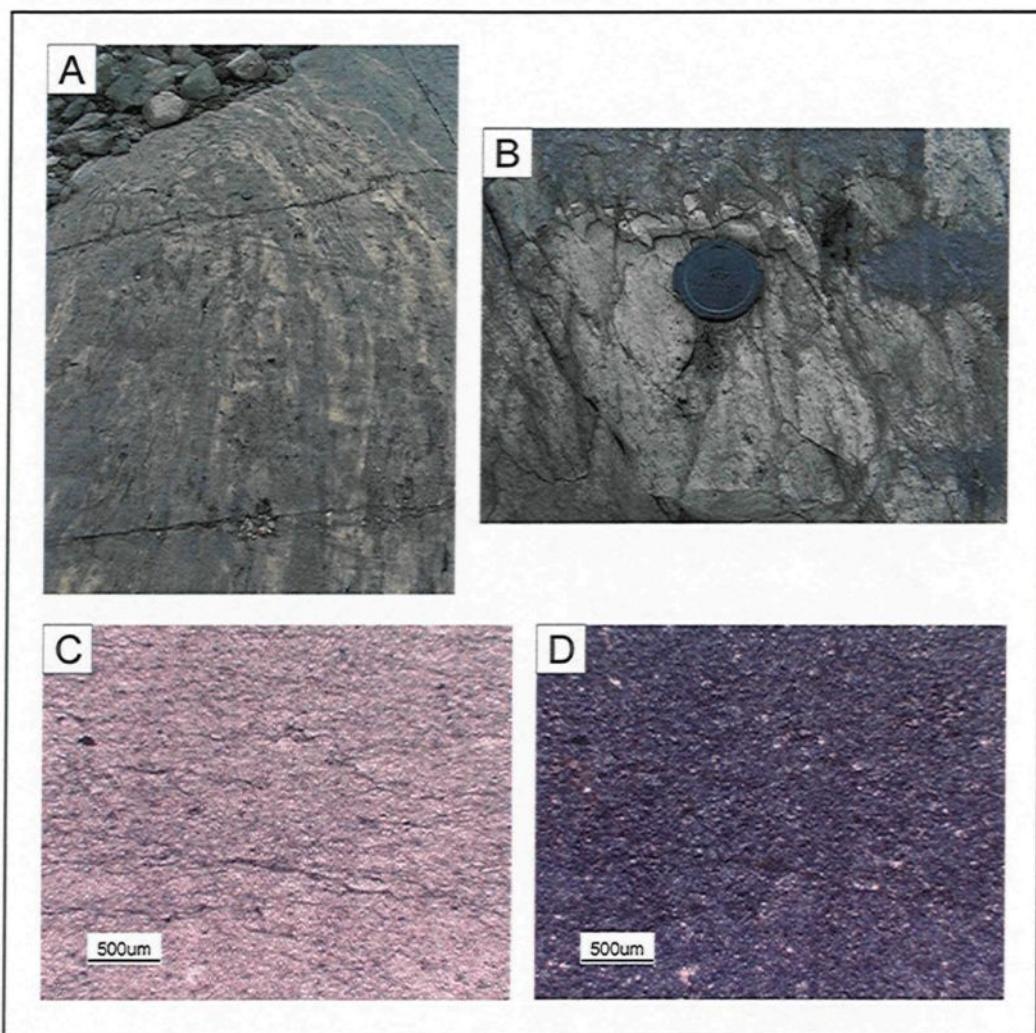


Figure 11 : Rhyolites lobées. A – Figure d’écoulement laminaire. B – Aspect massif du faciès lobé. Capuchon d’appareil photo : 3,5 cm pour échelle. C – Microphotographie du faciès de rhyolite lobé (DG-40) – Lumière naturelle (LN). D – Microphotographie du faciès de rhyolite lobée (DG-40) – Lumière polarisée (LP).

2.3.2 Rhyolites bréchiques

Les brèches rhyolitiques constituent la grande majorité des faciès observés sur le terrain. Les fragments sont monogéniques, de composition rhyolitique, et aphanitiques. De couleur blanc jaunâtre et avec un relief positif, ils forment un contraste net avec la matrice grise verdâtre (figure 12). Ils atteignent jusqu'à 50 cm de longueur et présentent communément un allongement préférentiel parallèle à la linéation d'étirement observée dans la matrice. Quelques fragments accidentels de composition plus mafiques sont observés à la base du secteur Est (Gauthier, 1980) et semblent avoir été arrachés lors de la mise en place des rhyolites. Contrairement aux travaux de Tassé et al., (1982), qui interprètent des zones pyroclastiques sur le terrain, aucune stratification primaire n'a été reconnue.

En lames minces, les fragments de rhyolite sont constitués de fines lattes d'albite et de quartz au travers desquels sont dispersés quelques minéraux d'altérations : séricite, chlorite et carbonates (figure 13A). Dans cette mésostase quartzo-feldspathique baignent de rares phénocristaux de quartz et de plagioclases (albites) altérés en séricite, quartz et carbonate. Les minéraux composants la matrice sont microlithiques. On y retrouve, du quartz, du feldspath, de la séricite, de la chlorite, de la calcite, un peu d'épidote, et parfois des fragments de phénocristaux de feldspath (figure 13B).

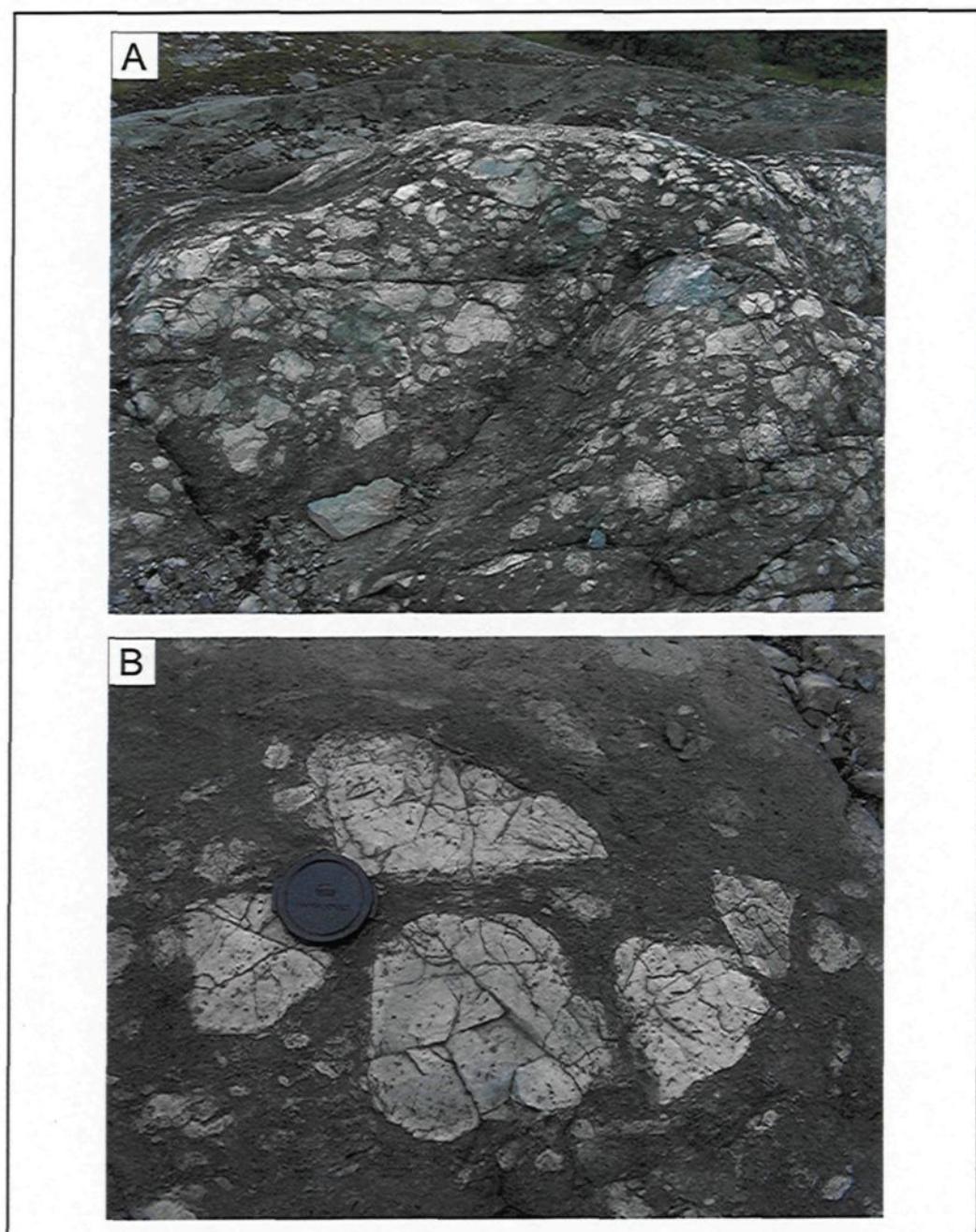


Figure 12 : Aspect bréchique typique de la rhyolite du Cap d'Ours. A – Vue d'ensemble. B – Détail de la forme des fragments. Capuchon d'appareil photo : 3,5 cm pour échelle.

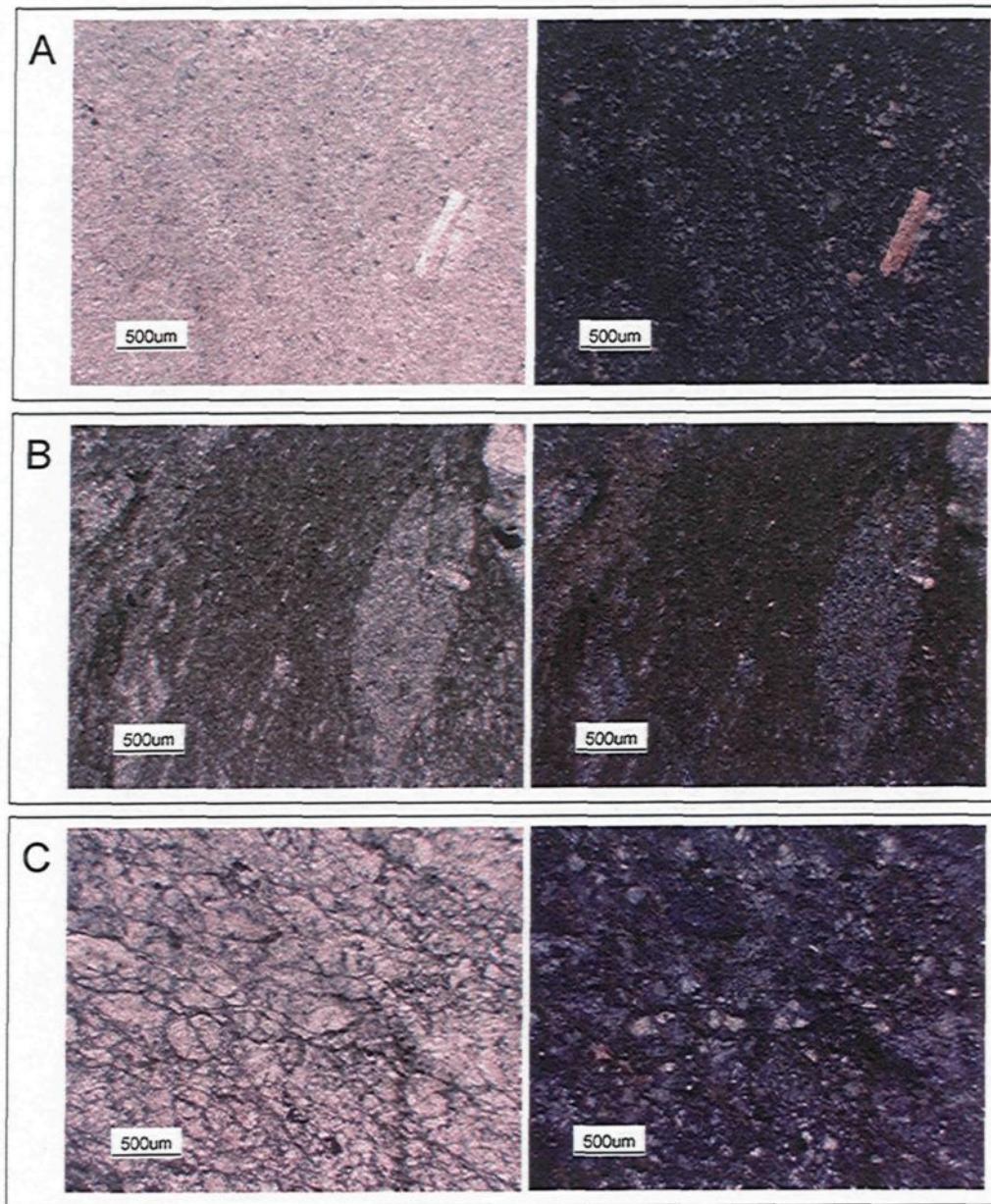


Figure 13 : Microphotographies des textures visibles dans les faciès bréchiques de rhyolites. Lumière naturelle (LN) à droite et lumière polarisée (LP) à gauche. A – Fragment (lame DG-1). B – Matrice riche en chlorite et fragment (lame DG-6). C – Texture perlitique dans une matrice silicifiée (lame DG-49).

Les textures perlitiques sont bien préservées et omniprésentes dans la matrice (figure 13C) en particulier dans le secteur Ouest. La présence de telles textures indique que la matrice de cette rhyolite était vitreuse à l'origine (McPhie et al. 1993).

Les mêmes assemblages minéralogiques se retrouvent dans les secteurs Est et Ouest, cependant, les brèches ne sont pas toutes semblables. Un faciès de brèches rhyolitiques in-situ lobées enveloppe les rhyolites massive-lobées dans le secteur Ouest. Ces brèches seront considérées comme des micro-brèches, puisque la taille des fragments est beaucoup plus petite qu'ailleurs (figure 14A). Latéralement, vers l'Est, ces micro-brèches deviennent des coulées de brèches. La taille des fragments est beaucoup plus importante (figure 14B). Dans le secteur Est, les brèches sont de type "Jigsaw" (en casse-tête). La quantité de matrice est moindre et les fragments sont presque jointifs (figure 14C).

2.3.3 Intrusion de porphyre rhyolitique (PQF)

Un porphyre rhyolitique (PQF) (figure 15A) recoupe les brèches, au centre du complexe, sous forme d'un réseau de dykes orientés SW-NE, subparallèle à la faille de Glenwood. Ces dykes massifs deviennent des lobes de rhyolite qui semblent alimenter des coulées de brèches dans la partie supérieure de la séquence.

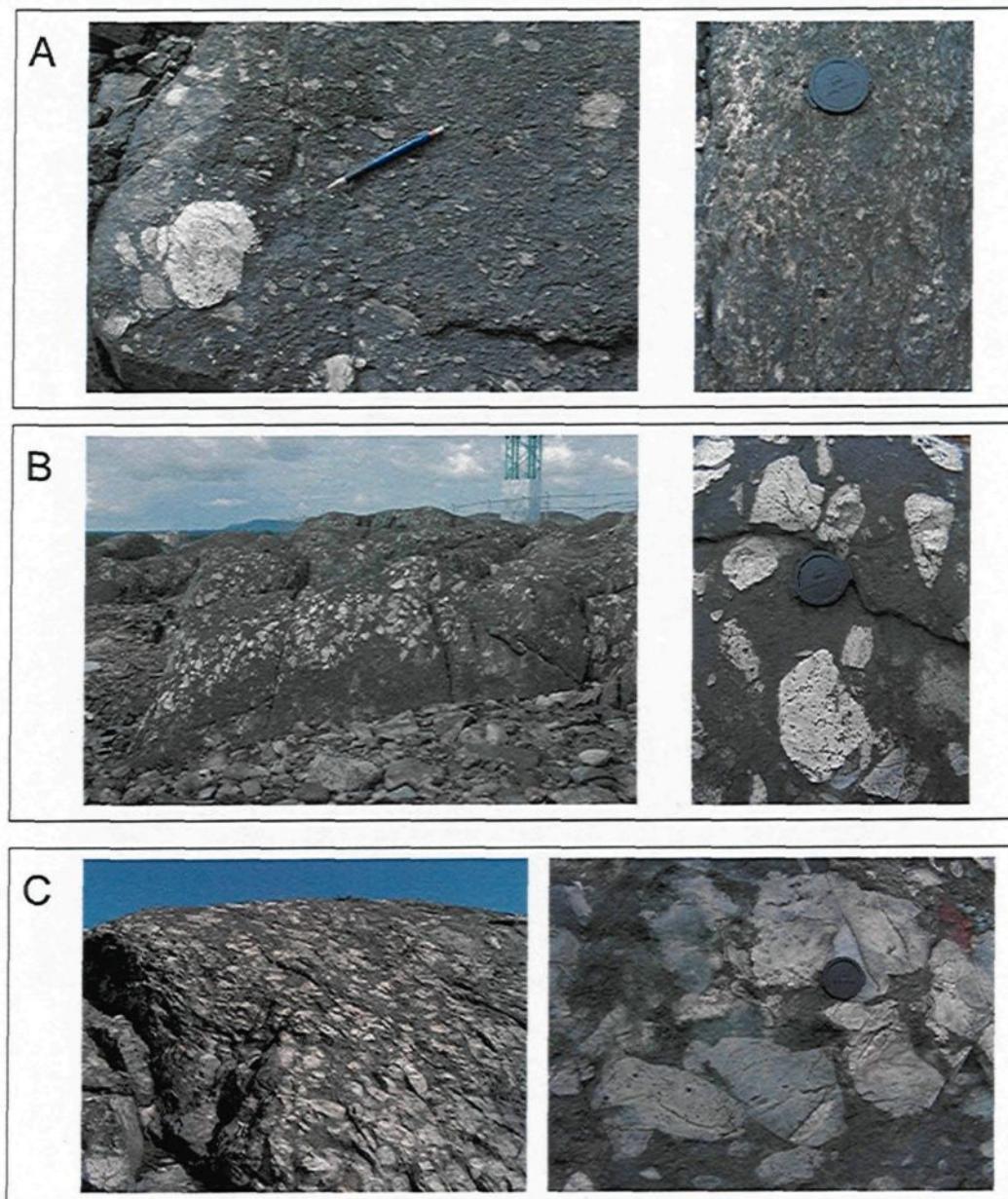


Figure 14 : Différents faciès bréchiques reconnus sur le Cap d'Ours. A – Microbrèches. B – Coulées de brèches. C – Brèches en « casse tête ». Capuchon d'appareil photo : 3,5 cm, et stylo : 15 cm pour échelles.

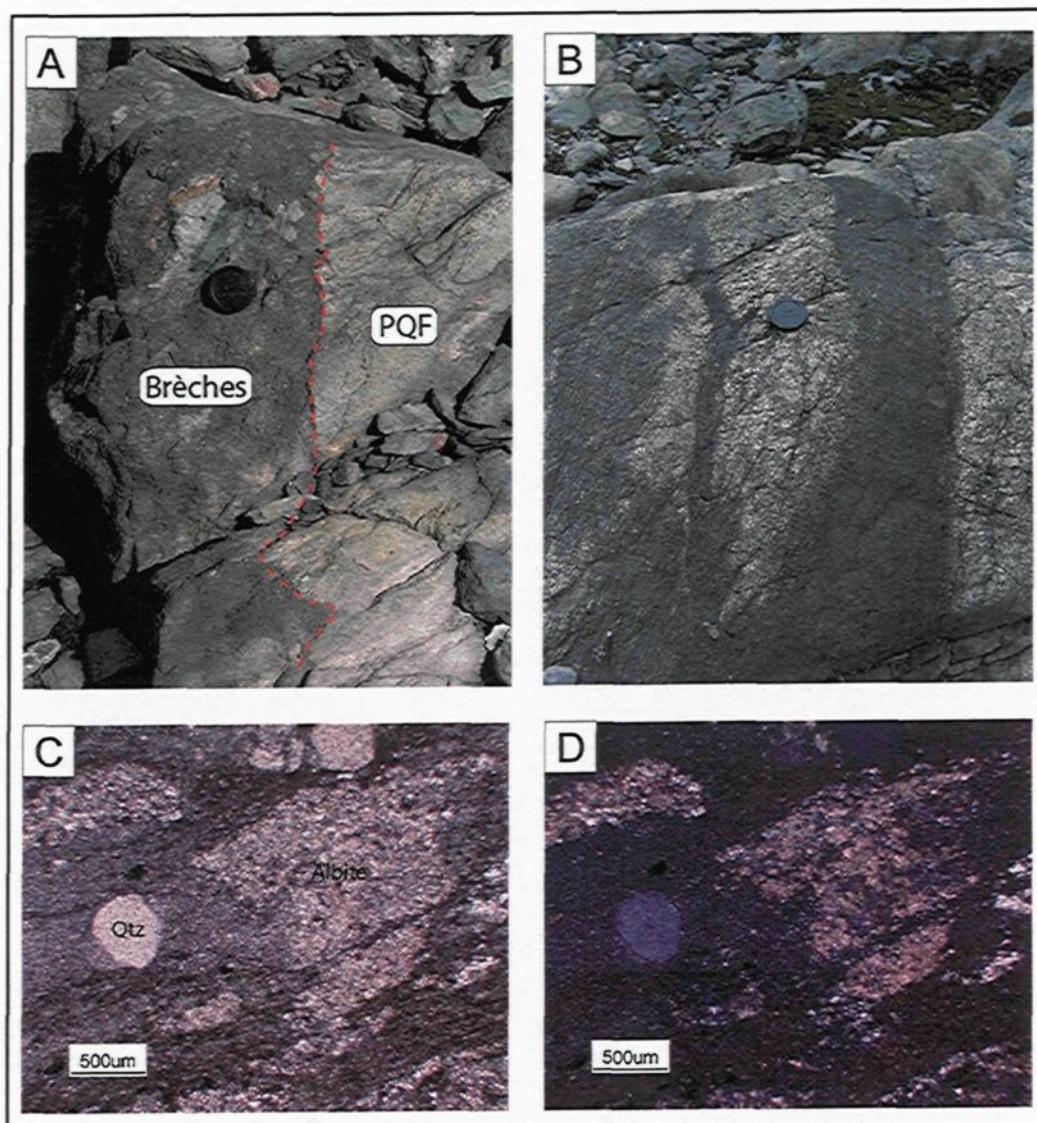


Figure 15 : Le porphyre à Quartz et Feldspaths (PQF). Capuchon d'appareil photo : 3,5 cm pour échelle. A – Contact net entre le PQF et les brèches encaissantes. B – PQF rubané. C et D – Microphotographies du PQF. Habitus hexagonal du quartz. Albite complètement altérée et remplacée par de la séricite et du quartz (lame DG-21, LN et LP)

Cette hypothèse était déjà proposée par Gauthier (1980) et Tassé et al. (1982). Localement, le porphyre rhyolitique a un aspect rubané marqué par une alternance de bandes noires et blanches (figure 15 B). Les bandes sombres sont particulièrement riches en chlorite et en épidote, et montrent une texture fluidale prononcée (Gauthier, 1980). Ce phénomène semble résulter d'une altération hydrothermale locale.

En lames minces, les phénocristaux sont relativement isolés. On estime le pourcentage de plagioclase entre 15 et 20%, alors que celui de quartz, est inférieur à 2%. Les plagioclases sont des albites fracturées et communément remplacées par de la séricite et du quartz. Les phénocristaux de quartz sont localement recristallisés, mais quelques cristaux hexagonaux typique de l'habitus rhyolitique sont observés (figure 15C,D). Ces phénocristaux baignent dans une mésostase quartzo-feldspathique, riche en séricite, \pm chlorite, carbonate et épidote.

Sur le terrain, une zonalité texturale depuis la partie Sud du dyke, vers la partie Nord est observable. En s'approchant du sommet de la séquence rhyolitique, la schistosité devient plus pénétrante, l'altération plus intense, et les phénocristaux d'albites sont plus fracturés, broyés et souvent complètement remplacés. Cette zonalité semble traduire une augmentation de l'altération du PQF vers le sommet de la série volcanique.

2.3.4 Les dykes mafiques

Les dykes mafiques ont un grand intérêt sur le terrain, puisqu'ils peuvent matérialiser des failles synvolcaniques (chapitre III). Les dykes mafiques présents sont de composition dioritique (Tassé et al., 1982) et ils recoupent tous les faciès. Les dykes ont des épaisseurs comprises entre 10 cm et 1 m et ont en majorité une orientation Est-Ouest (figure 10). Une autre famille de dyke, de direction N070 est présente (figure 10). Elle correspond à l'orientation de la faille synvolcanique de Glenwood, qui limite le Cap d'Ours à l'Est. Les relations de recouplement observées sont nombreuses et contradictoires. Elles ne permettent donc pas d'établir une chronologie relative de mise en place, et les deux familles, Est-Ouest et N070, sont donc considérées comme synchrones. On perçoit une augmentation de la vésicularité de ces dykes vers le Nord, ce qui est en accord avec la polarité de la séquence volcanique. Aucune étude pétrographique n'a cependant été réalisée sur les dykes mafiques, puisqu'ils ne semblent pas y avoir de relation spatiale avec la minéralisation.

2.4 CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES

2.4.1 Méthodologie

Huit échantillons de roches felsiques ont été sélectionnés pour des analyses géochimiques. Cinq de ces échantillons proviennent du faciès bréchique. Les

fragments ont été isolés et séparés de la matrice afin de tester l'hypothèse de mélange de magma de Tassé et al. (1982).

Dans le but de comparer la composition chimique des différents faciès 13 échantillons ont été étudiés. Le broyage a été réalisé à l'UQAC, par l'intermédiaire d'un pulvérisateur en alumine. Avant chaque nouvelle pulvérisation, un nettoyage à la silice, suivi d'une pré-contamination par l'échantillon ont été effectués. L'analyse des éléments majeurs fut réalisée par le laboratoire ALS Chemex de Val-d'Or avec une méthode Fluorescence-X (Fusion Metaborate : données géochimiques brutes et limites de détections en annexe 2). Les éléments traces ont été analysés par activation neutronique au LabMater (UQAC) avec la méthode de Bédard et Barnes (2002). Afin de contrôler la validité des résultats, 3 analyses de duplicita et 2 analyses de standard on été réalisées. Le standard R-2003-81 est un échantillon provenant de l'étude de Gaboury et Pearson (2008). Le standard KPT est un standard communément utilisé par l'UQAC. Les données brutes de ces analyses sont présentées en annexe 2.

2.4.2 Résultats

La figure 16 illustre la composition en éléments traces des échantillons. Ils possèdent tous des spectres très similaires indiquant que les rhyolites dérivent

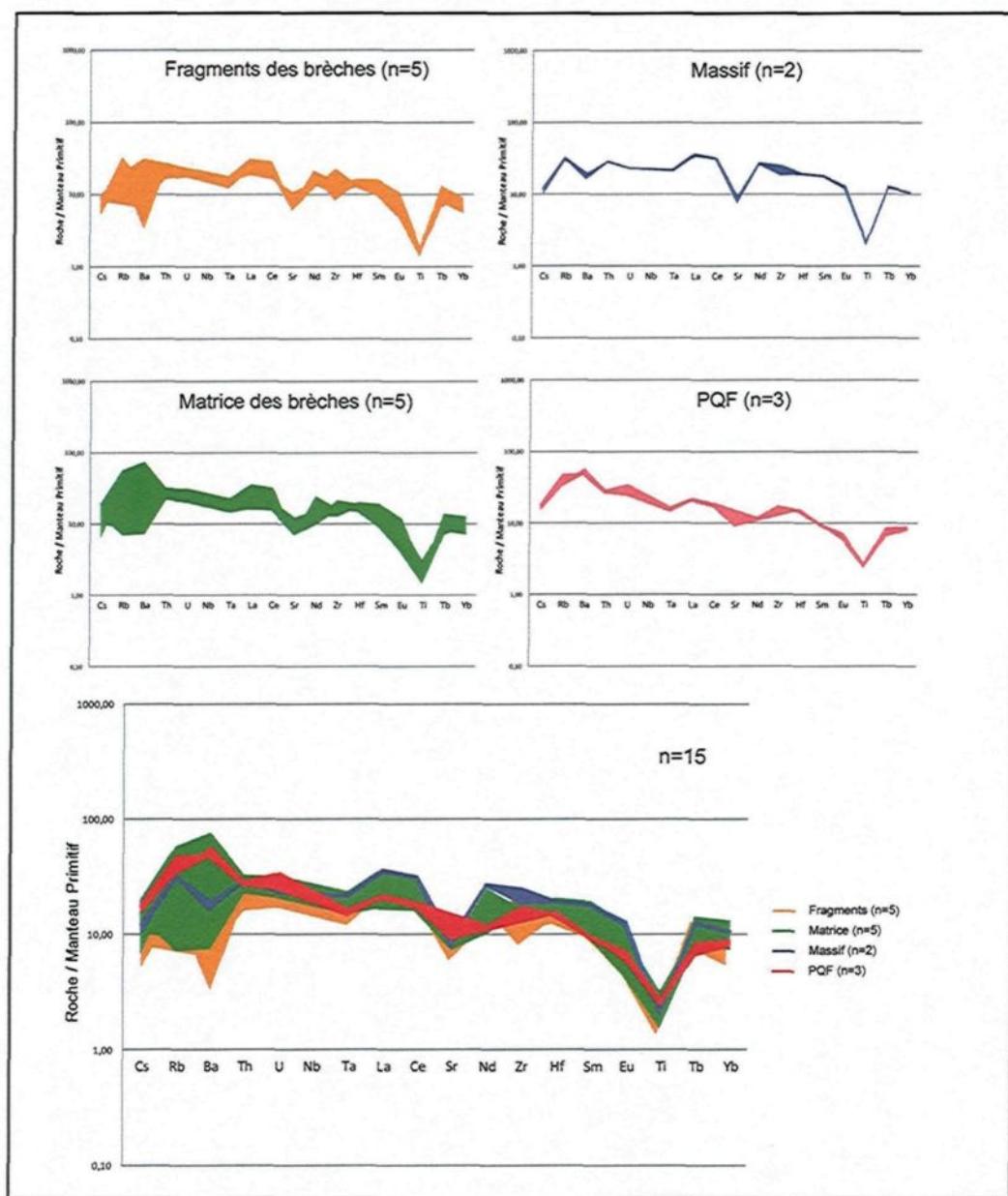


Figure 16 : Diagrammes multiéléments des différents faciès felsiques du Cap d'Ours normalisés par rapport au manteau primitif (Sun et McDonough, 1989).

toutes d'une même source magmatique. Le fait que matrice et fragments aient le même profil en éléments traces annihile l'hypothèse d'un mélange de magma. En ce qui concerne le PQF, il semble posséder une signature un peu plus fractionnée que le reste des rhyolites, mais de manière générale, les spectres des échantillons du Cap d'Ours sont très plats, caractéristiques des rhyolites de type FIIa du camp de Noranda (Gaboury et Pearson, 2008).

2.5 INTÉGRATION DANS UN MODÈLE EFFUSIF

La cartographie de terrain, ainsi que l'étude pétrographique et géochimique permet de réinterpréter complètement la mise en place du complexe du Cap d'Ours. Les contacts de notre carte interprétative (figure 17) sont bien entendus les mêmes que ceux déjà observés en 1980 par Tassé et al., mais l'interprétation est totalement différente. Des trois hypothèses formulées en introduction pour tenter d'expliquer la mise en place du complexe du Cap d'Ours, seule celle des brèches autoclastiques est retenue. En effet, l'enchaînement latéral des faciès, depuis le massif, vers les micro-brèches, puis les coulées de brèches et enfin les brèches en casse-tête (*jigsaw*) est en effet typique des complexes sous-marins de dômes et coulées felsiques (De Rosen-Spence et al., 1980; Yamagishi, 1991; Kazuhiko et al., 1991). Cette bréchification résulte de l'écoulement visco-plastique des rhyolites, et est accentuée par les phénomènes de trempe engendrés par le contact avec l'eau de mer. Par ailleurs, les textures volcaniques préservées

(fractures perlitiques) sont visibles dans la matrice, et témoignent de cette interaction avec l'eau, ce qui défait l'hypothèse d'une bréchification tardive associée à un glissement gravitaire sur la marge de la caldeira de New Senator.

La signature en éléments traces des roches felsiques réfute l'hypothèse de mélange de magma, et montre un lien génétique étroit entre les rhyolites du dôme et le PQF qui sont certainement issu de la même chambre magmatique. Le léger fractionnement du profil des éléments traces, ainsi que la quantité de phénocristaux beaucoup plus élevé semble indiquer que le PQF correspond probablement à une nouvelle venue de magma felsique un peu plus différenciée que celle qui a alimenter la construction du complexe de dôme et coulées. Cette deuxième venue vient tout de même participer à la croissance de l'édifice par l'intermédiaire de lobes et de coulées endogènes.

La géométrie des faciès plus massifs permet d'établir que la direction des lobes pointe vers l'Est, ce qui implique que le Cap d'Ours ne correspond qu'à la partie orientale du complexe felsique comme l'illustre la figure 17. Le centre d'émission est donc situé vers l'Ouest et il n'apparaît pas dans notre zone d'étude. Cependant, le centre d'émission supposé est un secteur complexe puisqu'il est caractérisé par de multiples injections de dykes mafiques d'orientation générale Nord-Sud, et l'un d'entre eux, d'âge protérozoïque, semble continu jusqu'à la mine

Horne (figure 7). Ce dyke protérozoïque suit un autre dyke mafique, celui-là archéen, qui aurait pu emprunter une zone de faiblesse préexistante pouvant relier le Cap d'Ours à la mine Horne.

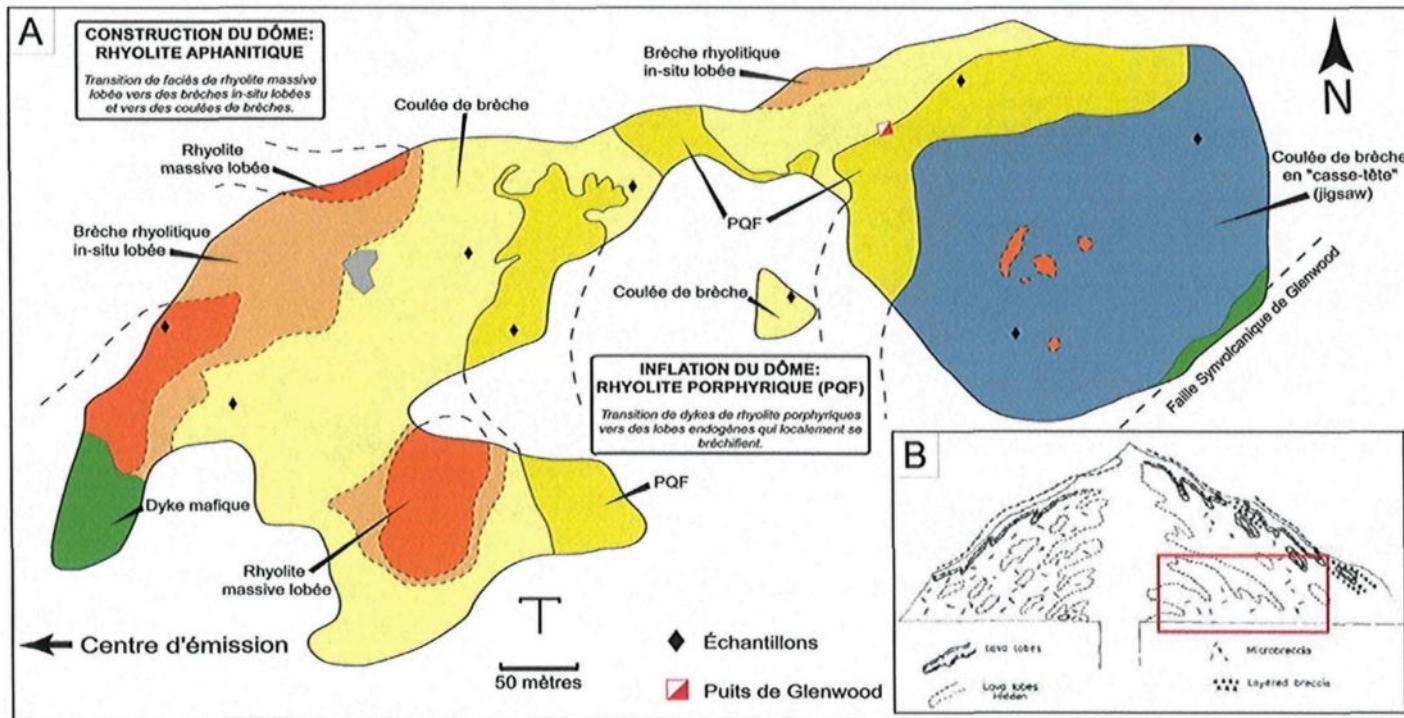


Figure 17 : A – Carte interprétative simplifiée du Cap d'Ours et position des échantillons utilisés pour les analyses des éléments traces. Les dykes mafiques ne sont pas représentés ici. B – Environnement général de formation (d'après De Rosen-Spence et al., 1980). Le rectangle rouge représente le secteur équivalent à celui du complexe du Cap d'Ours dans un dôme felsique idéalisé.

CHAPITRE III

GÉOLOGIE STRUCTURALE

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'analyse structurale du complexe du Cap d'Ours. Dans un premier temps, les différents éléments structuraux observés seront décrits. Par la suite, l'étude de l'anisotropie planaire réalisée sur le terrain sera utilisée afin de démontrer que la déformation n'est pas homogène. Cette étude permettra d'interpréter des structures synvolcaniques qui seront documentées au cours de la troisième partie de ce chapitre.

3.2 ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

Deux phases de déformation ont été reconnues dans la région de Rouyn-Noranda (Hubert et al., 1984), mais la déformation y est hétérogène (Camiré et

Watkinson, 1989). De plus, des jeux de failles synvolcaniques rendent les corrélations difficiles entre les différentes unités du camp. En ce qui concerne le secteur du Cap d'Ours, il constitue la partie Est de la Rhyolite de Glenwood. L'ensemble, bien que relativement peu déformé sur le plan horizontal d'observation, est complètement verticalisé. Un seul épisode tectonique est enregistré par les roches. Celui-ci correspond à un raccourcissement Nord-Ouest - Sud-Est particulièrement bien visible dans les dykes mafiques possédant une orientation à angle avec la direction du raccourcissement (figure 18A).

Une schistosité ainsi qu'une linéation d'étirement sont aussi associées à cet épisode de déformation. La schistosité, de direction moyenne N070 a un pendage subvertical (figure 19 et annexe 3). L'intensité de pénétration de cette schistosité est variable et fait l'objet d'une étude pour caractériser l'anisotropie de la déformation dans la section suivante. La linéation d'étirement est bien visible sur le terrain et représente la principale manifestation de la déformation ductile. Elle se caractérise par un allongement vertical des fragments qui peut atteindre un rapport de 1/5 dans les secteurs les plus déformés, mais qui en moyenne est de 1/2. Cette linéation est aussi bien développée dans la matrice (figure 18C).

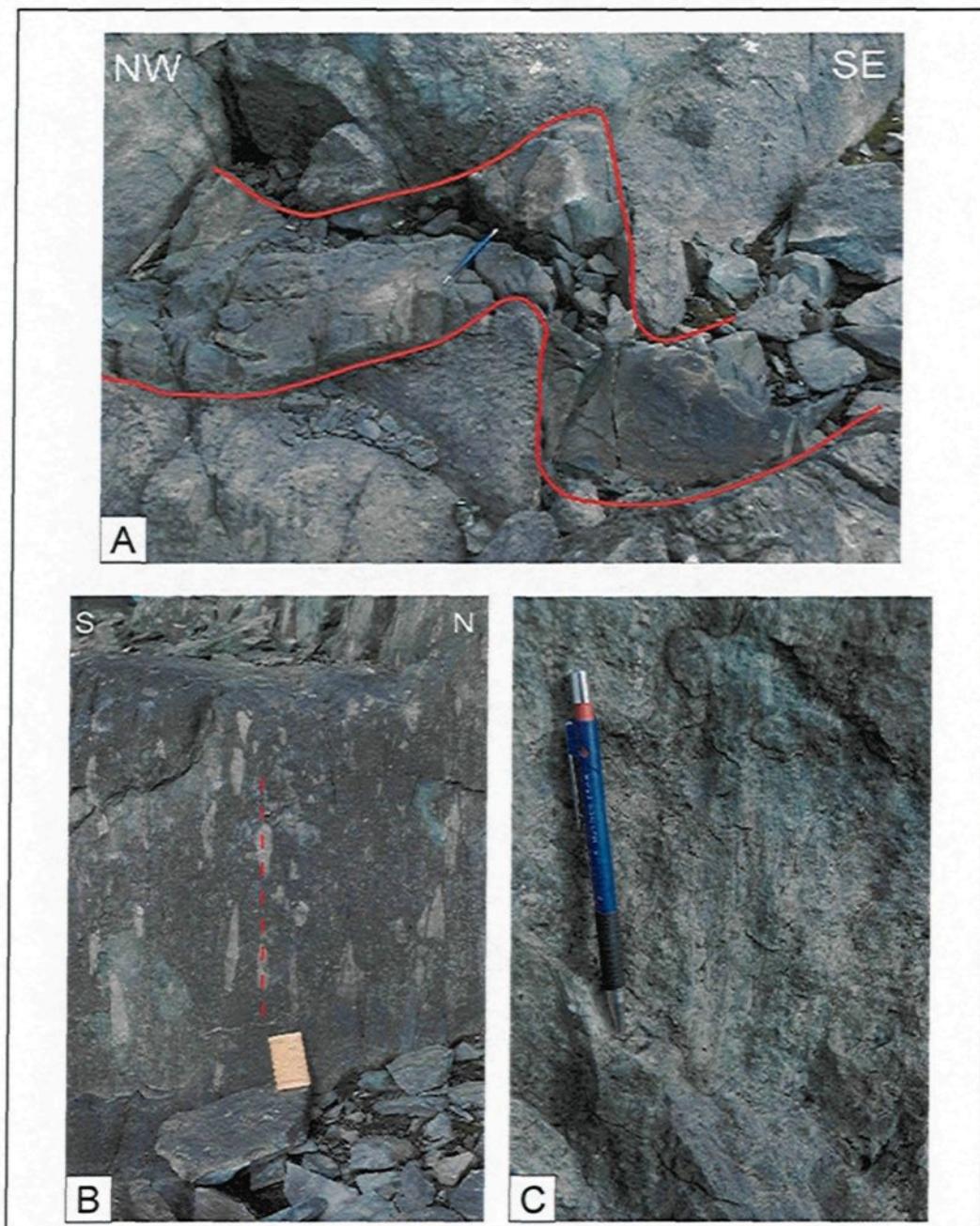


Figure 18 : Éléments de déformation observés sur le Cap d'Ours. Stylo de 15 cm pour échelle. A – Plissement d'un dyke mafique. B – Vue en coupe de la linéation d'étirement marquée par l'allongement des fragments. C – Linéation d'étirement visible dans la matrice.

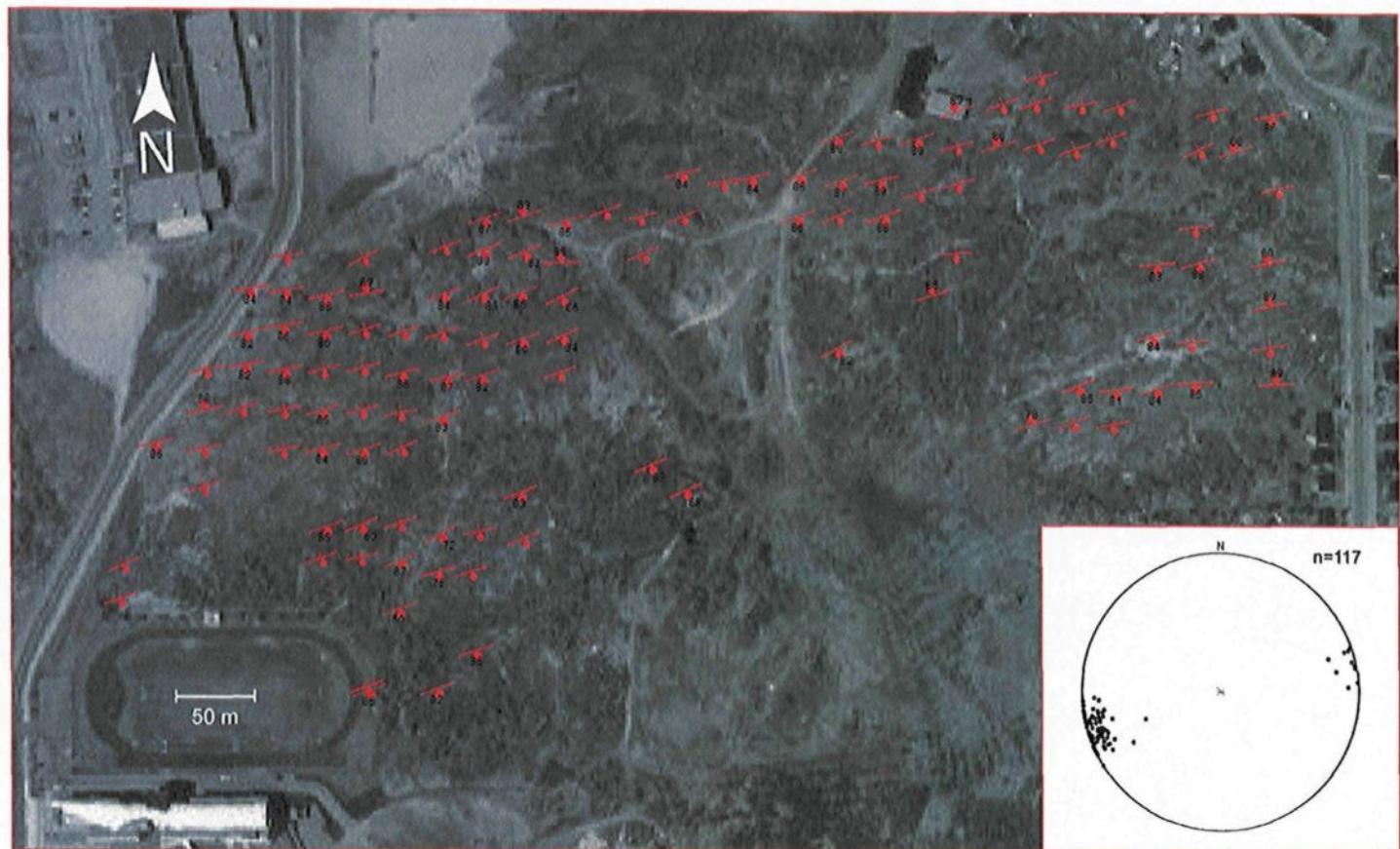


Figure 19 : Mesures de schistosité sur le Cap d'Ours. Une station de mesure tout les 25 m.

Un réseau de veines est associé à cet épisode tectonique. Il est observé sur le Cap d'Ours et dans les séries mafiques localisées au Nord-Est (Paquin et al., 2007). Ces veines, d'épaisseur comprise entre 5 et 10 cm, sont subverticales et d'orientation moyenne N070 (figure 20.). Elles sont constituées de quartz-carbonate-chlorite et quelques rares sulfures y sont associés. Ces veines sont considérées comme étant orogéniques. N'ayant aucun lien avec les altérations et minéralisations volcanogènes, elles n'ont donc pas été étudiées.

Il est donc présumé que l'empilement de roches volcaniques, à l'échelle du complexe, n'a été sujet qu'à un seul épisode de déformation simple selon un raccourcissement Nord-Ouest – Sud-Est. Cependant, cette déformation, n'est pas enregistrée de manière homogène sur le secteur comme il le sera démontré dans la section suivante.

3.3 ANISOTROPIE PLANaire DE LA DÉFORMATION DUCTILE

Le but principal de l'étude structurale vise à produire une carte de répartition de la déformation ductile afin de mettre en relation l'intensité de cette déformation avec les cartographies de répartition des altérations (chapitre IV). Pour y parvenir, près de 160 stations de mesure de l'indice d'anisotropie planaire secondaire ont été enregistrées, soit une station tous les 25 m. Une échelle de 0 à 5 représentant l'appréciation de cette anisotropie planaire a été développée (tableau 3-1).

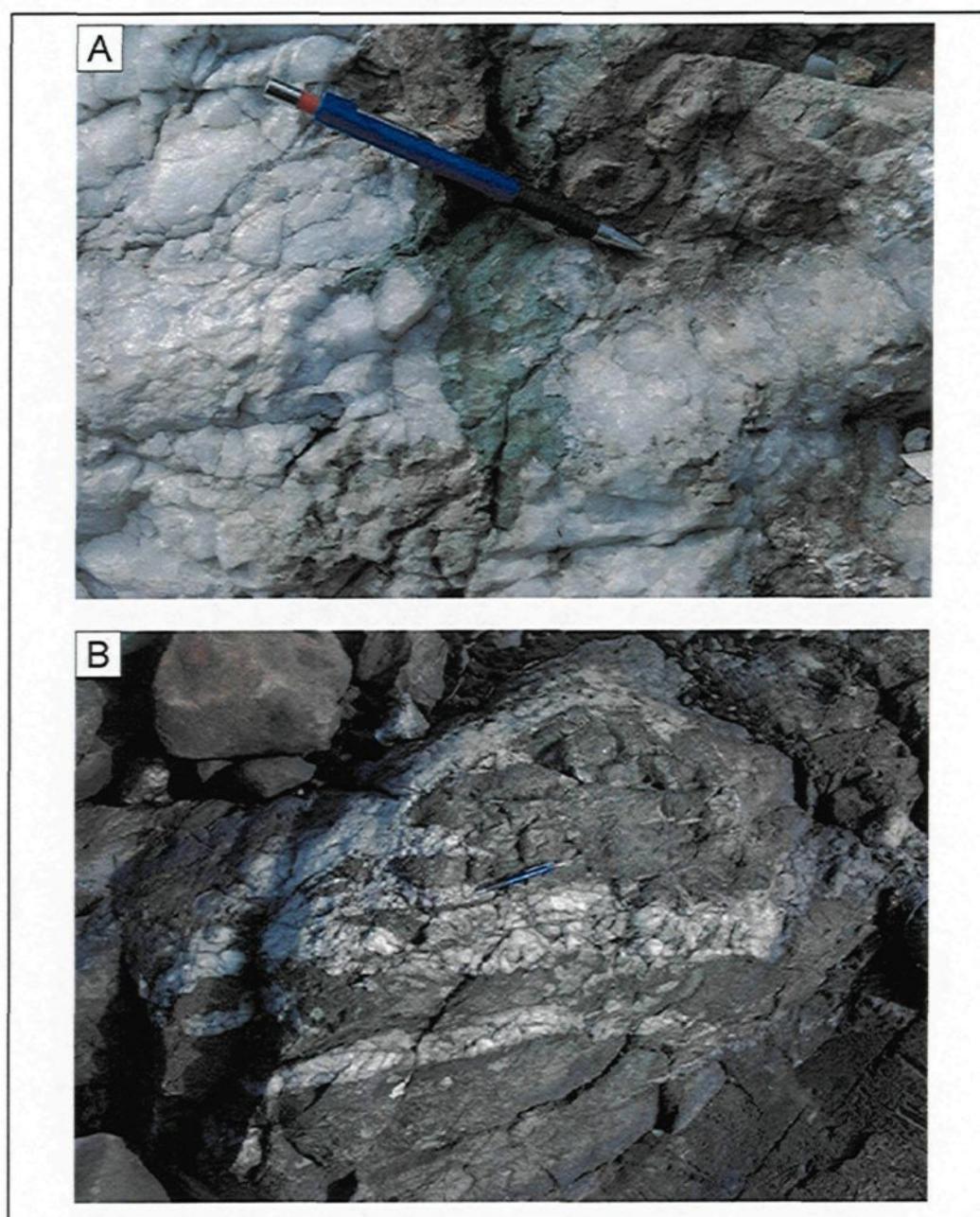


Figure 20 : Veines de quartz-carbonate-chlorite. Stylo 15 cm pour échelle. A – Poche de chlorite dans une veine de quartz-carbone. B – Réseau anastomosé des veines de quartz-carbone-chlorite

Zéro étant égale à « aucun élément de déformation visible », et cinq à « la roche initiale n'est plus identifiable ». Cette échelle est basée sur le type de roche, l'alignement des fragments et surtout l'intensité et la pénétrativité de la schistosité. La liste des stations de mesure est en annexe 3.

La figure 21 représente le résultat de l'étude concernant l'anisotropie de la déformation secondaire liée à la déformation ductile. Elle permet de mettre en évidence deux zones de plus forte anisotropie interprétées comme représentant une déformation plus intense : une partie du secteur Ouest, caractérisée par une zone de micro-brèche, et la partie centrale du Cap d'Ours, au sommet de l'intrusif de PQF. L'interprétation de cette carte sera développée dans le chapitre VI. Cependant, il faut noter que la distribution hétérogène de la déformation a permis de préserver plusieurs secteurs où des structures primaires peuvent donc être interprétées.

Tableau 3-1 : Échelle d'estimation visuelle de l'anisotropie planaire secondaire

0	Nulle	Aucune schistosité, aucune déformation visible
1	Faible	Schistosité diffuse, mais visible. Si brèche: pas d'orientation des fragments. Schistosité visible uniquement dans la matrice.
2	Modérée	Schistosité bien visible. Si brèche: orientation préférentielle des fragments. Schistosité visible uniquement dans la matrice.
3	Moyenne	Schistosité bien imprimée. Si brèche: alignement des fragments et linéation bien visible. Schistosité bien développée dans la matrice. Début de schistosité dans les fragments.
4	Forte	Schistosité très pénétrative. Si brèche: Schistosité pénétrative dans la matrice. Schistosité imprimée dans les fragments.
5	Intense	On ne reconnaît plus la roche initiale. Débit en feuillets fins.

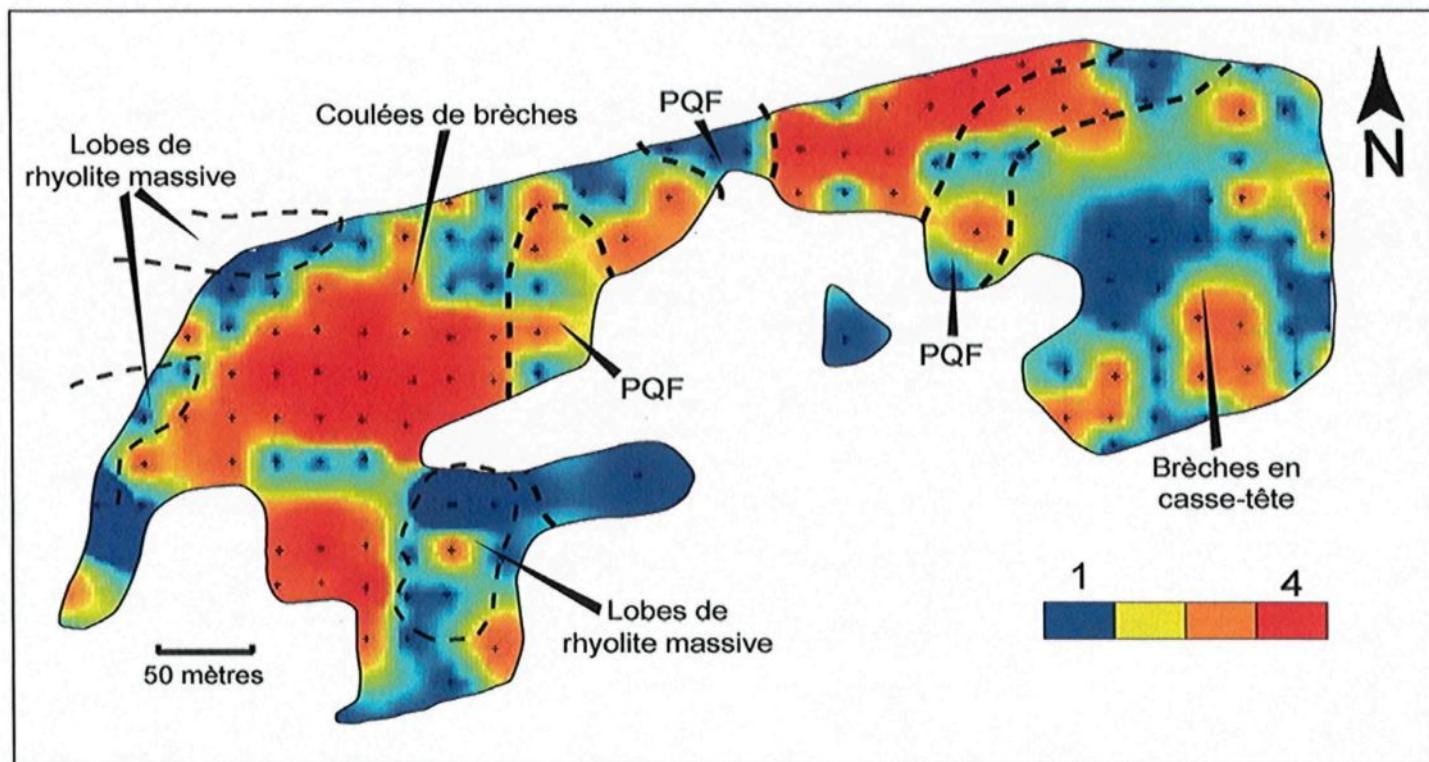


Figure 21 : Carte de l'anisotropie planaire secondaire, interprétée comme le résultat de la déformation ductile. Une station de mesure tous les 25 m.

3.4 STRUCTURES SYNVOLCANIQUES

En environnement volcanogène, les fractures et failles synvolcaniques sont omniprésentes et elles constituent des structures d'intérêt majeur en exploration minérale puisqu'elles offrent la perméabilité structurale nécessaire à la circulation des fluides hydrothermaux (Stix et al., 2003). Outre la possibilité de conduits hydrothermaux, elles représentent des zones de faiblesses pouvant être empruntées par les magmas et sont donc communément matérialisées par des dykes sur le terrain (Gibson et al., 1999; Mueller et al., 2008). La figure 22, localisée sur la figure 10, illustre un exemple de faille synvolcanique observée sur le Cap d'Ours. Deux générations de dykes mafiques, I et II peuvent être observées. Le dyke mafique II a la même orientation que la faille de Glenwood, et représente la structure synvolcanique. Il recoupe le dyke mafique I avec un déplacement apparent senestre d'environ un mètre.

D'un point de vue cinématique, si l'on replace la séquence verticalisée dans son état initial, on peut interpréter un mouvement normal le long de cette faille. Ce mouvement est compatible avec l'environnement en extension de la marge de la caldeira de New-Senator.

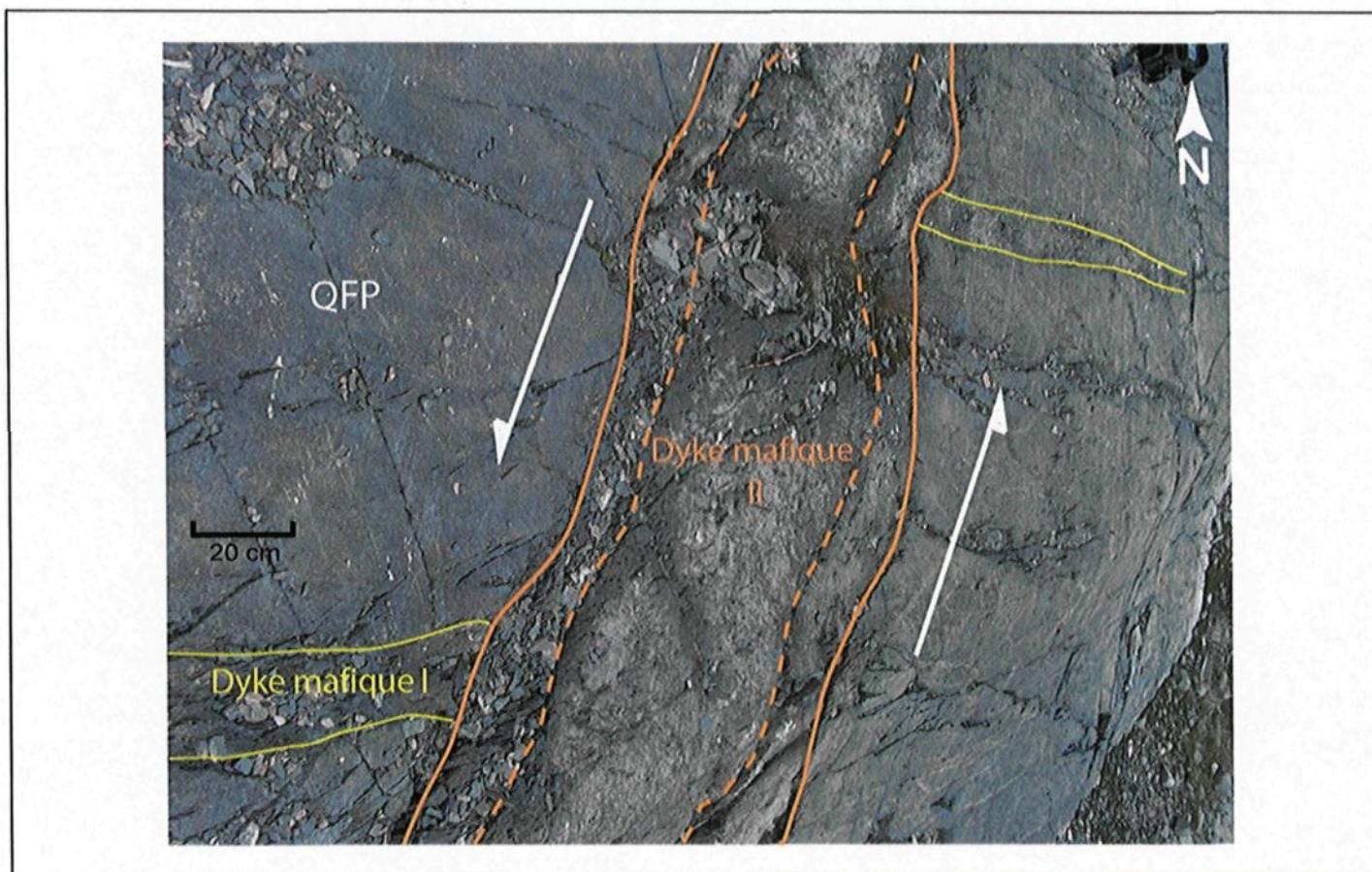


Figure 22 : Interprétation d'une faille synvolcanique matérialisé par un dyke mafique. Le dyke mafique II est composite, indiquant que la structure synvolcanique a été utilisée à au moins deux reprises par le magma mafique.

De plus, le dyke synvolcanique de type II a la particularité de posséder deux bordures de trempe (figure 22), ce qui signifie que le magma a utilisé la structure à plusieurs reprises pour alimenter les coulées mafiques dans les niveaux supérieurs et par conséquent, participer au recouvrement du complexe felsique.

La faille de Glenwood, qui limite le Cap d'Ours à l'Est, constitue un des rares exemples de structure synvolcanique où la transition avec les roches effusives est bien démarquée. Cette faille, dans le modèle de Pearson et Daigneault (2009) fait partie intégrante de la caldeira de New-Senator et aurait servi de conduit magmatique et hydrothermal. Dans les séquences volcaniques mafiques chapeautant la rhyolite de Glenwood, les travaux de Paquin et al. (2007) documentent un réseau de veines de quartz-dolomite-épidote, dont le caractère synvolcanique semble indéniable puisqu'elles sont recoupées par la schistosité régionale et par des dykes mafiques synvolcaniques. Ces veines d'épaisseurs millimétriques à centimétriques, sont anastomosées et présentent une géométrie en échelon et sigmoïde. Ces mêmes veines sont reconnues sur le Cap d'Ours (figure 23) et témoignent donc de la présence de fractures synvolcaniques remplies par la précipitation de minéraux hydrothermaux.

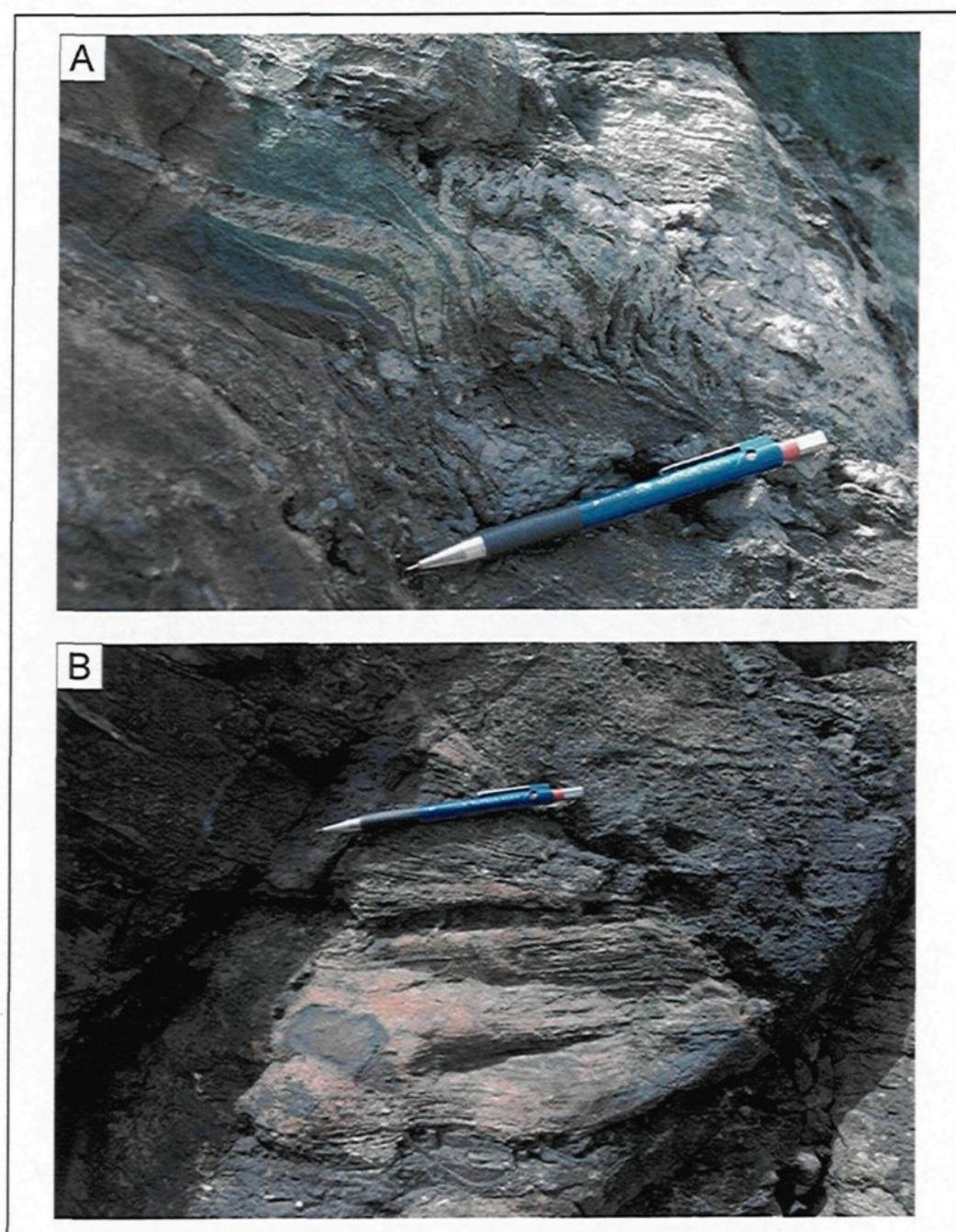


Figure 23 : Veines de quartz-dolomite-épidote synvolcaniques. Stylo : 15 cm pour échelle.

3.5 INTÉGRATION DES OBSERVATIONS

L'étude structurale sur le Cap d'Ours permet de mettre en évidence que la déformation ductile est imprimée de manière hétérogène (figure 21), ce qui permet de préserver et d'interpréter des structures primaires de différents types: (1) des veines de quartz-dolomite-épidote, (2) la faille de Glenwood, et (3) des failles synvolcaniques empruntées par des dykes (figure 22). La présence de telles structures synvolcaniques est très intéressante, puisqu'elles constituent des zones de faiblesses perméables communément empruntées par les fluides hydrothermaux et/ou les magmas. Les mouvements normaux observés le long de ces structures sont en accords avec le modèle de Pearson et Daigneault (2009) qui interprètent le Cap d'Ours, et plus particulièrement la faille de Glenwood, comme étant la marge de la caldeira de New Senator. Par ailleurs, il est intéressant de noter que l'existence de veines synvolcaniques à quartz-dolomite-épidote développées à l'intérieur même des dykes mafiques empruntant des structures synvolcaniques semble indiquer que la subsidence est relativement continue au cours de l'édification du complexe felsique, et que plusieurs générations de fractures synvolcaniques sont créées.

CHAPITRE IV

ALTÉRATIONS HYDROTHERMALES

4.1 INTRODUCTION

L'étude des altérations hydrothermales constitue un intérêt majeur dans la compréhension et l'exploration des systèmes minéralisateurs volcanogènes (Franklin et al., 1981, 2005; Galley, 1993). La signature de ces altérations traduit des échanges fluides/roches impliquant des appauvrissements ou des enrichissements en certains éléments (MacLean et Kranidiotis, 1987; Barrett et al., 1993). Des changements minéralogiques et des zonalités induit par la circulation de ces fluides sont communément présents au sein de l'enveloppe d'altération et constituent des paramètres de grandes importances pour l'exploration de gisements de sulfures massifs (Galley, 1993; Hannington et al., 2003). Les méthodes d'analyses chimiques pour documenter ces altérations, comme la fluorescence-X, sont basées sur des analyses en roche totale et sont

donc relativement efficaces lorsque la roche est homogène. Cependant, sur le complexe du Cap d'Ours, l'omniprésence des faciès bréchiques, ainsi que les variations de taille des fragments qui les constituent, complique réellement les analyses puisque la matrice, beaucoup plus poreuse que les fragments massifs, enregistre préférentiellement l'empreinte de la circulation des fluides. Les signatures hydrothermales de faible intensité peuvent alors ne pas être décelées si la quantité de matériel réfractaire à l'altération (les fragments) est trop importante. Afin de garder un certain contrôle sur le matériel analysé, il devient essentiel d'étudier séparément la matrice et les fragments. Afin de résoudre cette problématique, une nouvelle méthode d'analyse, basée sur le micro-XRF a été développée. Celle-ci permet désormais de caractériser séparément l'altération de la matrice versus celle des fragments.

Les roches volcaniques du complexe du Cap d'ours sont variablement altérées, mais possèdent des signatures en éléments traces comparables (figure 16). Sur cette base, il est supposé que les roches rhyolitiques avaient les mêmes compositions chimiques avant l'altération. L'hydrothermalisme se manifeste par de la silice, de la chlorite, de la séricite (figure 24), de l'épidote et des carbonates, mais il est difficile de définir une zonalité sur le terrain. Visuellement, seul le secteur Est bordant la faille de Glenwood semble plus riche en chlorite que le secteur Ouest, mais il ne s'agit que d'une observation empirique.

En lame mince, on peut observer des secteurs où la matrice est complètement remplacées par des minéraux d'altération comme la séricite ou la chlorite (figure 24C,D). Dans le PQF, les phénocristaux d'albite sont fréquemment complètement détruits, au bénéfice de la séricite et du quartz (figure 24E).

4.2 MÉTHODOLOGIE

La géochimie a été réalisée à partir du micro-XRF - EDAC Eagle III au LabMater de l'UQAC. Le micro-XRF permet d'obtenir des compositions simultanées en éléments majeurs - s'étendant du sodium à l'uranium. Les éléments trop légers sont cependant plus difficiles à quantifier de manière précise, comme l'illustre les limites de détections calculées pour les éléments utilisés dans le cadre de cette étude (tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Limites de détection calculées pour le Micro-XRF (en %)

Éléments	Limite de Détection la plus basse (incertitude de 100%)	Limite de Détection (6 σ)
Na ₂ O	6.6	13.1
MgO	3.0	6.0
Al ₂ O ₃	1.1	2.3
TiO ₂	0.05	0.11
CaO	0.08	0.16
SiO ₂	0.7	1.5
K ₂ O	0.13	0.25
Cr ₂ O ₃	0.05	0.1
Fe ₂ O ₃	0.04	0.09
MnO	0.05	0.1

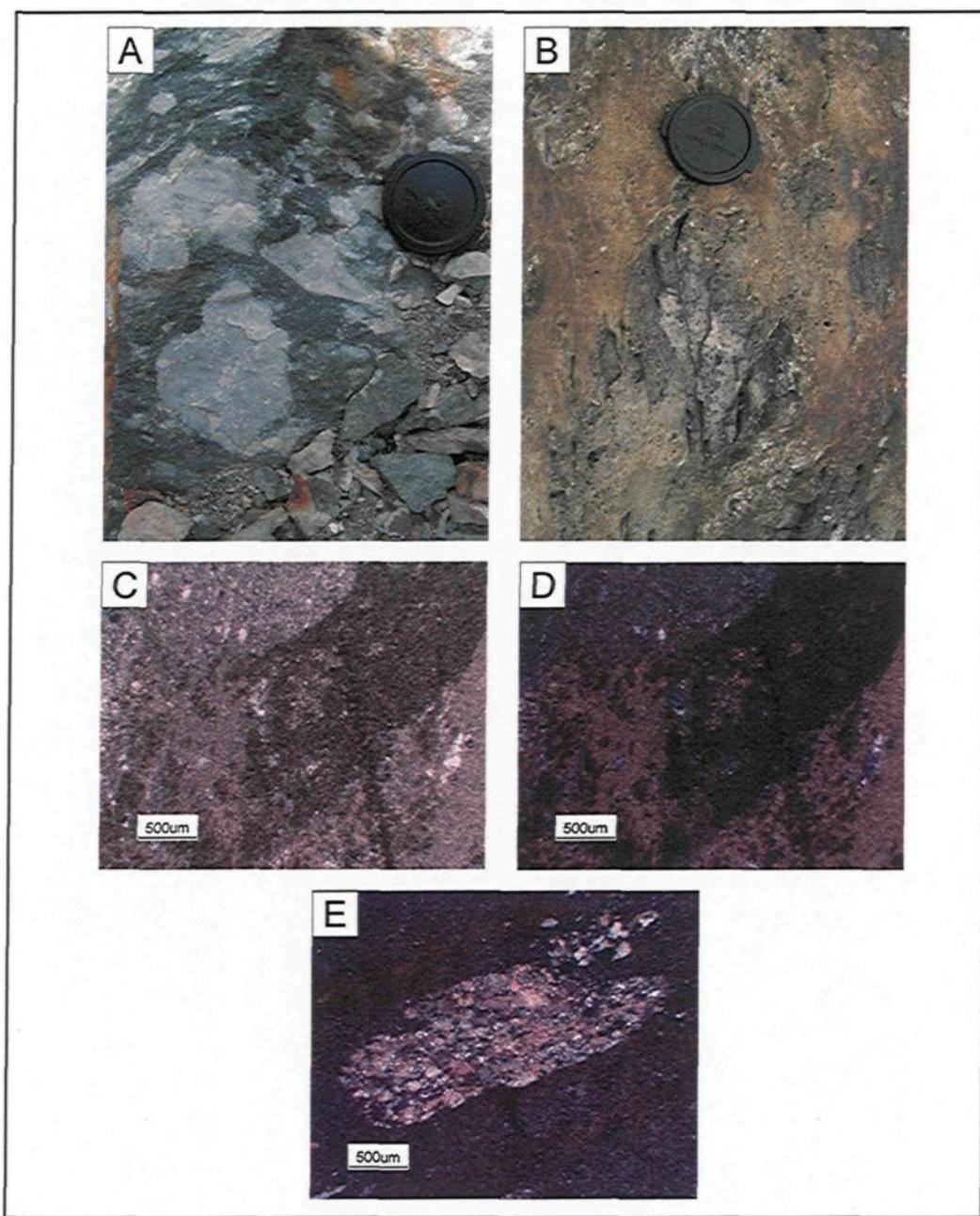


Figure 24: Altérations typiques observées sur le terrain. A – Chloritisation de la matrice. B – Séricitisation intense de la matrice. Capuchon d'appareil photo : 3,5 cm pour échelle. C – Microphotographie de l'altération en chlorite/séricite de la matrice (lame DG-18 en LN). D – Microphotographie de l'altération en chlorite/séricite de la matrice (lame DG-18 en LP). E – Transformation de l'albite des QFP en quartz/séricite (lame DG-21 en LP).

L'acquisition des données se déroule sous vide, de manière rapide et non destructive, par l'intermédiaire d'un faisceau de rayon-X de 50 microns. Une caméra est disposée dans la chambre d'analyse et permet de choisir précisément les zones d'intérêt. Ce paramètre constitue vraisemblablement la plus grande force du micro-XRF puisqu'il est donc possible d'établir un lien direct entre la minéralogie, la texture et la composition chimique du matériel étudié. De plus, les échantillons sont disposés sur un plateau mobile dans les trois dimensions. Ceci permet donc de réaliser des cartes de répartition spatiale des éléments, où chaque pixel correspond à un spectre d'analyse ainsi qu'à une position sur l'échantillon.

Sur le terrain, notre échantillonnage au 50 m (figure 25) permet d'obtenir une maille suffisamment homogène pour effectuer des interpolations et ainsi représenter la zonalité spatiale de l'altération. Une soixantaine d'échantillons contenant fragments et matrice ont été collectés. Pour chacun d'eux, une lame mince, sans couvre-objet, non polie et de 30 microns d'épaisseur a été confectionnée. Les analyses ont été réalisées sur les fragments et la matrice de ces lames, par l'intermédiaire de cartographies. Les paramètres choisis (tableau 4-2) ont été fixés dans le but d'optimiser la qualité des résultats à partir d'analyses à la micro-sonde réalisées sur des chlorites (annexe 4).

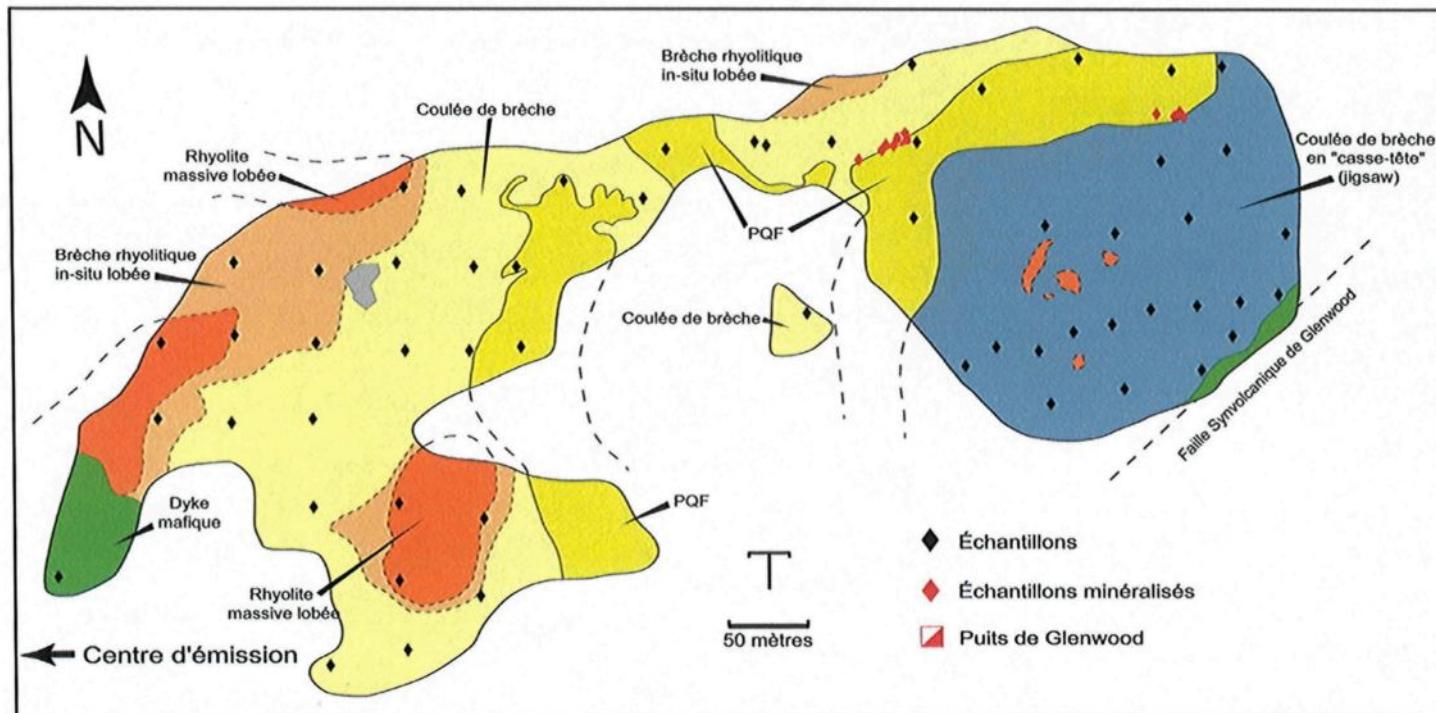


Figure 25: Répartition spatiale des échantillons sur le Cap d'Ours en fonction des faciès volcaniques.

Tableau 4-2 : Paramètres d'analyses Micro-XRF

Taille des cartes	64 x 50 pixels 1,7 x 1,3 mm
Limite – kV	20
μA	200
Dwell (temps/point)	800

Au total, plus de 160 analyses ont été réalisées (annexe 4), réparties sur 58 lames minces. Douze éléments ont été cartographiés sur un minimum de 3 zones par lame, soit une zone dans un secteur homogène d'un fragment, et au moins deux autres zones dans la matrice qui est beaucoup plus hétérogène.

Les fenêtres d'analyses correspondent à des surfaces de 1,7 x 1,3 mm sur lesquelles l'appareil effectue des mesures sur une matrice de 64 x 50 pixels, ce qui représente 3200 analyses, chaque pixel correspondant à un spectre. Cette fenêtre est considérée, comme suffisamment homogène pour être représentative de l'échantillon. Cependant, les surfaces d'analyses peuvent être optimisées en fonction de la granulométrie du matériel analysé. La composition est déterminée sur une durée analytique de 800 ms par pixel. Une moyenne est ensuite calculée pour les 3200 analyses de cette zone, ce qui donne accès à une analyse chimique quasi-complète (sauf pour la perte au feu - PAF) (figure 26). Cette analyse constitue le matériel de base du traitement des altérations hydrothermales.

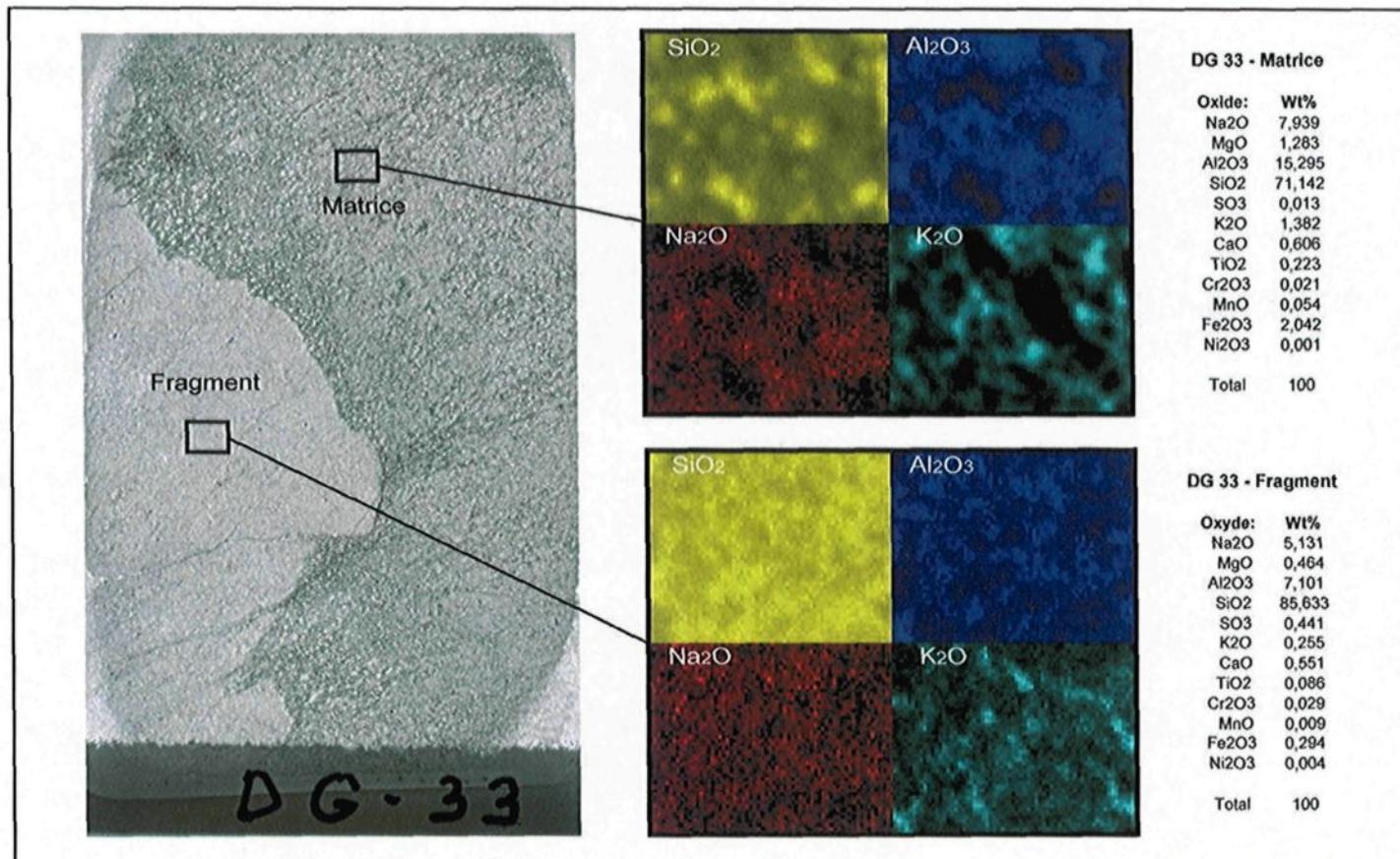


Figure 26 : Exemple de cartographie d'éléments sur fragment et matrice et composition moyenne de la fenêtre d'analyse.

Toutes les données sont ensuite exportées dans un logiciel d'interpolation (MapInfo-Discover) afin d'obtenir une carte de distribution des altérations.

En parallèle, et afin de tester la validité de la méthode, 11 échantillons ont été analysés par fluorescence-X (XRF) au Laboratoire ALS Chemex en vue de comparer les résultats. Pour ce faire, fragments et matrice ont été séparés manuellement, puis réduits, à l'UQAC, à une granulométrie inférieure à 75 µm à l'aide d'un broyeur à mâchoire et d'un broyeur en céramique d'alumine. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

4.3 RÉSULTATS

4.3.1 Validité de la méthode

La figure 27 est la représentation graphique des résultats de l'étude (annexes 2 et 4) confrontant le micro-XRF et la fluorescence-X (XRF). Il en ressort que même s'il y a des écarts, ils sont relativement constants. L'exemple du SiO₂ permet de mettre en évidence qu'à l'exception de l'échantillon DG-19 M, qui possède la plus faible concentration de SiO₂, les pourcentages sont systématiquement surévalués par le micro-XRF, supportant ainsi la représentativité des résultats. Il devient alors possible, si nécessaire, d'établir un facteur de correction pour chaque élément.

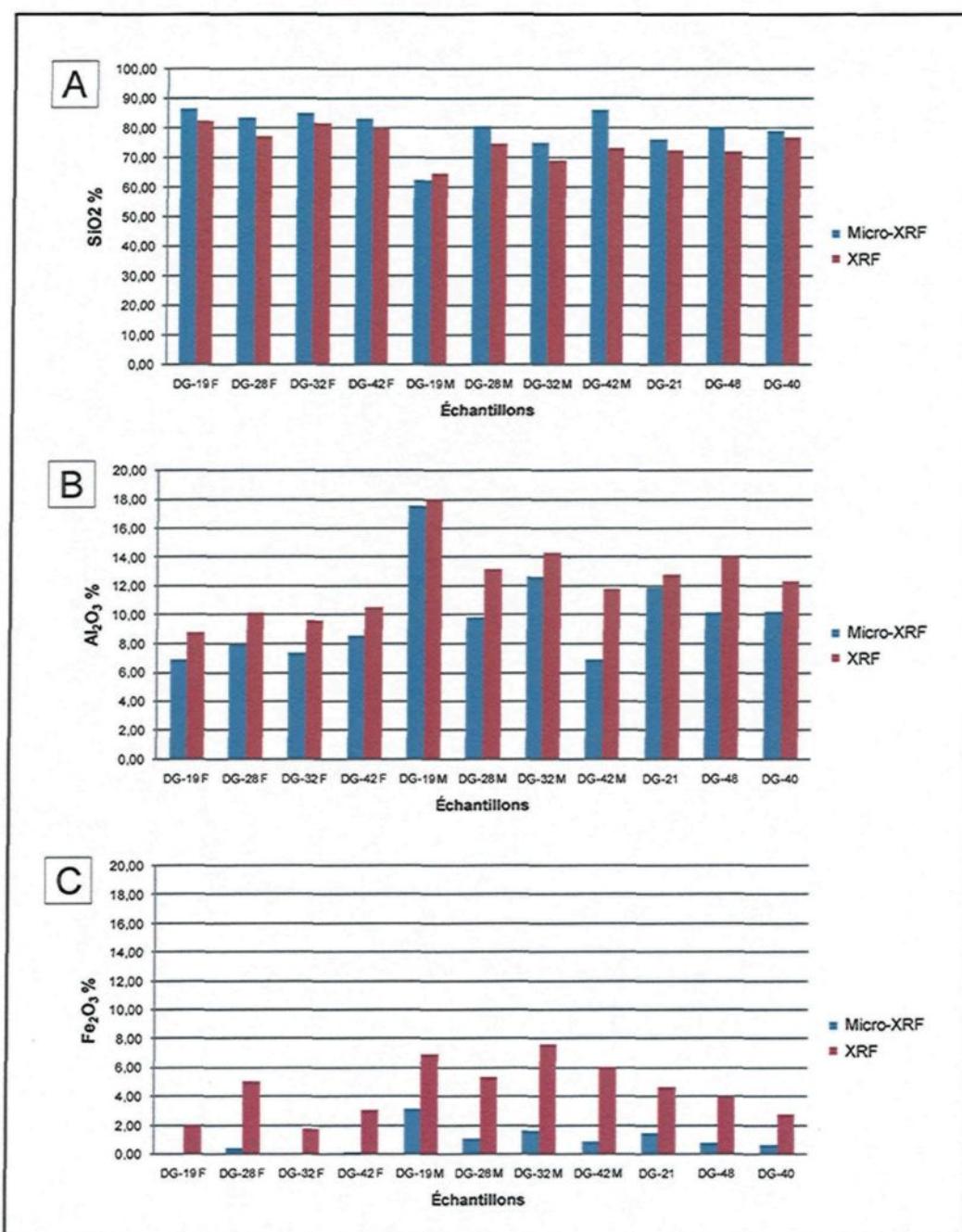


Figure 27 : Diagrammes de comparaison des concentrations obtenus par les méthodes micro-XRF et XRF. F = échantillon de fragment et M = échantillon de matrice.

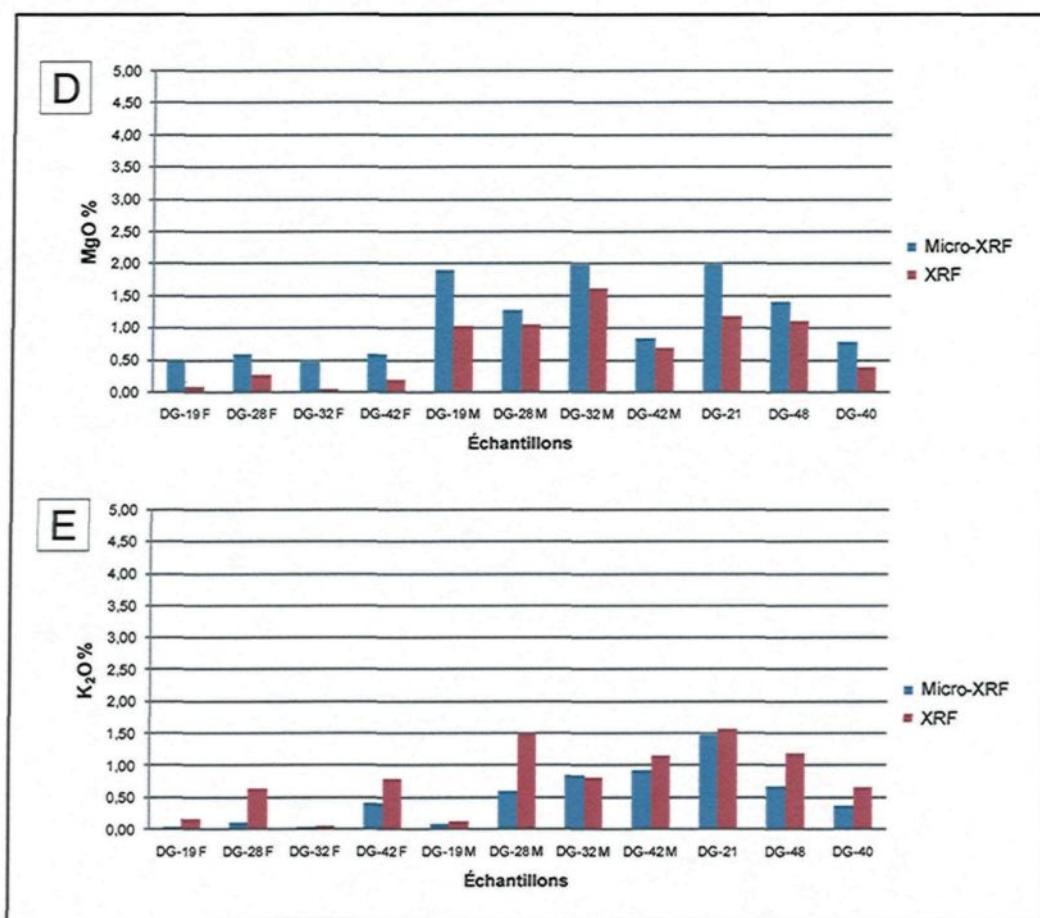


Figure 27 (suite): Diagrammes de comparaison des concentrations obtenus par les méthodes Micro-XRF et XRF. F = échantillon de fragment et M = échantillon de matrice.

Le tableau 4-3 est une comparaison quantitative. La différence entre les deux méthodes est calculée pour chaque élément, et c'est la valeur absolue de cette différence qui est présentée ici. Il en ressort que l'écart analytique engendré par le micro-XRF est relativement faible (<5%). Il est important de souligner que les données XRF ont été normalisées en éliminant la PAF, puisque le micro-XRF ne permet pas de l'obtenir.

Dans le cadre de cette étude, puisque ce sont des transferts de masse significatifs qui sont recherchés, l'écart entre les deux méthodes est évalué comme minime et par conséquent négligeable.

4.3.2 Représentativité des données

Pour considérer la méthode comme utilisable, il est essentiel de s'assurer de la représentativité des analyses. Dans cette optique, six analyses ont été effectuées au sein de la lame DG-7 : une dans un fragment homogène, et cinq répartis à différents endroits dans la matrice hétérogène. La figure 28 démontre que la composition chimique est relativement homogène en dépit de l'altération hétérogène de la matrice. Cependant, afin de garder le maximum de contrôle sur le matériel analysé, nous nous sommes concentrés par la suite sur les secteurs les plus homogènes, et possédant le degré d'altération le plus faible des lames minces.

Tableau 4-3 : Différence entre les analyses micro-XRF et XRF (en %). Il s'agit ici de la valeur absolue de la différence.

	Fragments				Matrice				PQF			Moyenne	Médiane
	DG-19-F	DG-28-F	DG-32-F	DG-42-F	DG-19-M	DG-28-M	DG-32-M	DG-42-M	DG-21	DG-48	DG-40		
SiO₂	4,33	6,19	3,37	3,27	2,28	6,13	5,71	12,91	3,69	8,36	2,28	5,32	4,33
Al₂O₃	1,89	2,25	2,26	2,00	0,49	3,32	1,66	4,95	0,86	3,95	2,15	2,34	2,15
Fe₂O₃	1,90	4,58	1,69	2,89	3,73	4,14	6,01	5,12	3,12	3,08	2,08	3,49	3,12
CaO	1,46	0,95	0,25	0,09	1,97	0,25	0,42	2,36	1,45	1,83	0,09	1,01	0,95
MgO	0,40	0,33	0,43	0,40	0,86	0,22	0,36	0,17	0,79	0,31	0,40	0,42	0,40
Na₂O	0,78	1,68	0,55	1,81	3,42	2,45	2,25	0,29	1,14	1,08	1,82	1,57	1,68
K₂O	0,13	0,54	0,03	0,38	0,04	0,91	0,05	0,24	0,10	0,51	0,28	0,29	0,24
Cr₂O₃	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
TiO₂	0,15	0,18	0,13	0,13	0,11	0,16	0,23	0,16	0,18	0,38	0,11	0,17	0,16
MnO	0,08	0,06	0,04	0,04	0,01	0,06	0,10	0,07	0,14	0,09	0,03	0,07	0,06

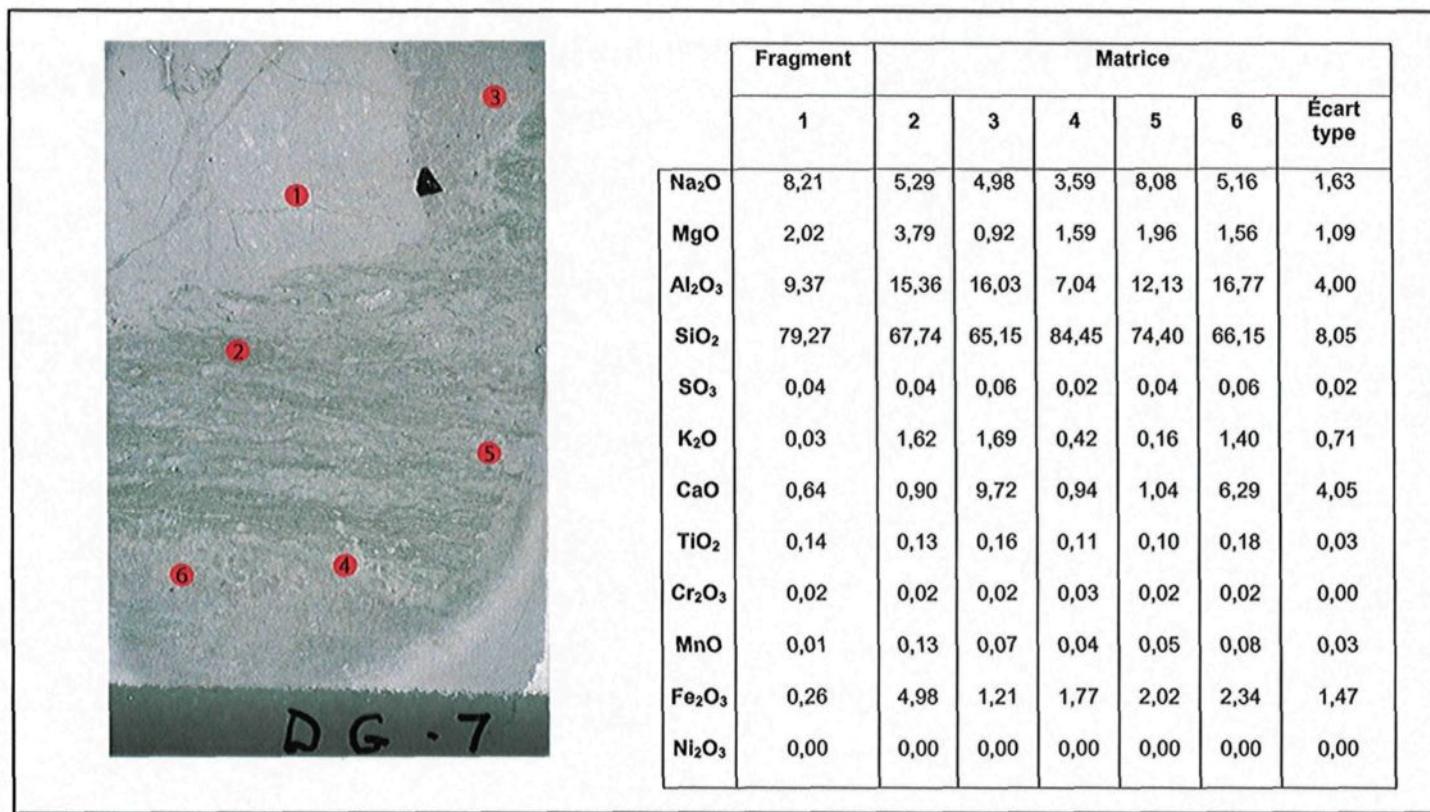


Figure 28 : Représentativité des données micro-XRF. Tableau de comparaison des compositions chimiques (%) en fonction du degré d'altération de la zone d'analyse. Résultats obtenus par le Micro-XRF.

Tableau 4-4 : Composition des fragments analysés au micro-XRF

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	K₂O	CaO	TiO₂	C₁₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	T_{total}	
DG-01	648626	5344181	5,956	0,496	7,442	85,128	0,041	0,092	0,583	0,113	0,036	0,001	0,11	0,003	100
DG-02	648599	5344178	6,812	0,683	8,868	82,173	0,083	0,203	0,708	0,15	0,028	0,007	0,284	0,002	100
DG-03	648574	5344175	7,252	0,459	8,559	82,732	0,006	0,077	0,734	0,102	0,016	0,003	0,058	0,002	100
DG-04	648545	5344172	5,814	0,552	7,374	85,297	0,013	0,098	0,485	0,128	0,019	0,002	0,215	0,002	100
DG-05	648521	5344163	4,783	0,564	7,114	86,393	0,007	0,256	0,432	0,128	0,035	0,004	0,28	0,003	100
DG-06	648497	5344158	6,194	0,583	9,399	82,608	0,025	0,421	0,342	0,125	0,032	0,002	0,266	0,002	100
DG-07	648474	5344146	8,209	2,017	9,368	79,27	0,044	0,029	0,635	0,139	0,023	0,006	0,259	0,002	100
DG-08	648449	5344148	6,141	0,502	7,767	83,576	0,015	0,228	0,472	0,15	0,03	0,008	0,192	0,002	100
DG-09	648428	5344135	5,896	0,474	7,461	85,582	0,023	0,054	0,311	0,101	0,033	0,002	0,059	0,003	100
DG-11	648595	5344154	6,044	0,605	7,578	85,029	0,034	0,038	0,36	0,098	0,033	0,002	0,176	0,002	100
DG-13	648645	5344307	4,659	0,541	7,577	85,91	0,056	0,552	0,325	0,132	0,039	0	0,205	0,003	100
DG-14	648527	5344122	6,221	0,458	8,306	84,126	0,057	0,059	0,415	0,128	0,032	0,003	0,192	0,002	100
DG-15	648482	5344112	3,806	0,679	8,181	84,665	0,008	1,323	0,605	0,116	0,032	0,006	0,577	0,003	100
DG-16	648479	5344225	5,591	0,46	8,401	84,182	0,035	0,369	0,631	0,156	0,034	0	0,138	0,003	100
DG-17	648523	5344221	3,75	0,672	8,477	85,149	0,011	1,079	0,288	0,14	0,036	0,002	0,393	0,003	100
DG-18	648568	5344230	3,781	0,604	5,927	87,465	0,132	0,275	1,314	0,082	0,03	0,012	0,375	0,002	100
DG-19	648593	5344274	5,207	0,472	6,891	86,802	0,057	0,039	0,304	0,103	0,04	0	0,081	0,003	100
DG-25	648347	5344277	6,185	0,49	7,88	84,467	0,018	0,062	0,682	0,131	0,029	0,005	0,05	0,002	100
DG-28	648229	5344243	5,836	0,597	7,931	83,567	0,329	0,107	1,071	0,107	0,029	0,008	0,416	0,002	100
DG-30	648115	5344247	9,159	0,488	11,77	77,765	0,029	0,031	0,501	0,168	0,029	0,004	0,054	0,001	100
DG-32	648123	5344199	5,61	0,465	7,338	85,213	0,008	0,03	1,121	0,107	0,034	0,004	0,068	0,002	100
DG-33	648074	5344201	5,131	0,464	7,101	85,633	0,441	0,255	0,551	0,086	0,029	0,009	0,294	0,004	100
DG-36	648125	5344145	6,011	0,968	7,834	80,737	0,031	0,092	3,592	0,146	0,029	0,019	0,538	0,003	100
DG-37	648080	5344145	3,5	0,516	5,243	88,518	0,032	0,317	1,471	0,081	0,041	0,006	0,272	0,004	100
DG-38	648025	5344151	3,963	0,692	6,264	86,846	0,007	0,31	1,07	0,094	0,033	0,011	0,706	0,003	100
DG-43	648023	5344102	4,462	0,621	6,963	86,621	0,023	0,354	0,479	0,121	0,037	0,002	0,31	0,002	100
DG-44	648023	5344046	2,396	0,587	4,844	89,13	0,153	0,512	1,93	0,05	0,037	0,005	0,351	0,004	100
DG-49	647864	5344004	3,616	0,768	5,809	88,263	0,029	0,249	0,561	0,048	0,031	0,005	0,618	0,003	100
DG-52	648079	5343957	0,836	0,988	8,715	85,969	0,021	2,12	0,257	0,064	0,036	0,012	0,978	0,004	100
DG-53	648032	5343948	3,9	0,964	8,68	82,907	0,676	0,927	0,557	0,125	0,033	0,011	1,217	0,002	100
DG-61	648333	5344172	4,563	0,502	5,829	87,851	0,016	0,059	0,939	0,085	0,035	0,004	0,115	0,003	100
DG-63	648590	5344325	4,137	0,515	5,013	89,837	0,004	0,042	0,225	0,065	0,039	0	0,12	0,004	100
Moyenne			5,169	0,639	7,560	84,982	0,077	0,333	0,748	0,112	0,032	0,005	0,311	0,003	100,00
Ecart type			1,637	0,292	1,431	2,689	0,144	0,452	0,648	0,031	0,006	0,004	0,270	0,001	

4.3.3 Répartition spatiale des altérations

La composition des fragments rhyolitiques est relativement constante, aussi bien pour les éléments majeurs (tableau 4-4) que pour les éléments traces (figure 16) et constitue le matériel le moins altéré. La matrice, plus poreuse, a enregistré l'empreinte de la circulation des fluides hydrothermaux de manière plus prononcée. Il paraît donc plus approprié de caractériser le ou les épisodes d'altération en se concentrant sur les analyses de la matrice.

L'approche initiale visait à comparer la matrice et les fragments dans l'optique d'effectuer des bilans de masse. Cependant, comme les fragments sont de composition très similaire (tableau 4-4), cette étape a été omise.

La figure 29 illustre la répartition spatiale des éléments majeurs analysés dans la matrice. Les éléments choisis sont supposés être les plus pertinents dans l'étude des altérations volcanogènes. Aluminium et titane sont les éléments majeurs considérés comme les moins mobiles face à une altération hydrothermale (Finlow-Bates et Stumpfli, 1981; MacLean et Kranidiotis, 1987; Barrett et al. 1993, Skirrow et Franklin, 1994). Ils sont donc de bons indicateurs de transfert de masse. Dans notre cas, ces deux éléments sont enrichis dans le secteur Est et appauvris à l'Ouest (figure 29). Ceci implique donc un lessivage du secteur Est au détriment

du secteur opposé. Effectivement, lorsque l'on s'intéresse à la répartition spatiale de la silice dans la matrice, on s'aperçoit que celle-ci est lessivée à l'Est, avec des teneurs inférieures à 60% ce qui est particulièrement faible par rapport à une rhyolite fraîche. A l'inverse, à proximité du centre d'émission, l'enrichissement en SiO_2 approche les 90% (figure 29).

La chloritisation supposée du secteur Est se confirme par les résultats de MgO et Fe_2O_3 dans la matrice. En effet, la répartition de ces deux éléments est interprétée comme représentative de celle de la chlorite. Il faut cependant spécifier que les teneurs du MgO , sur le complexe du Cap d'Ours sont toutes inférieures à la limite de détection du Micro-XRF. Mais combinée avec celle du Fe_2O_3 , la cartographie du MgO semble cohérente.

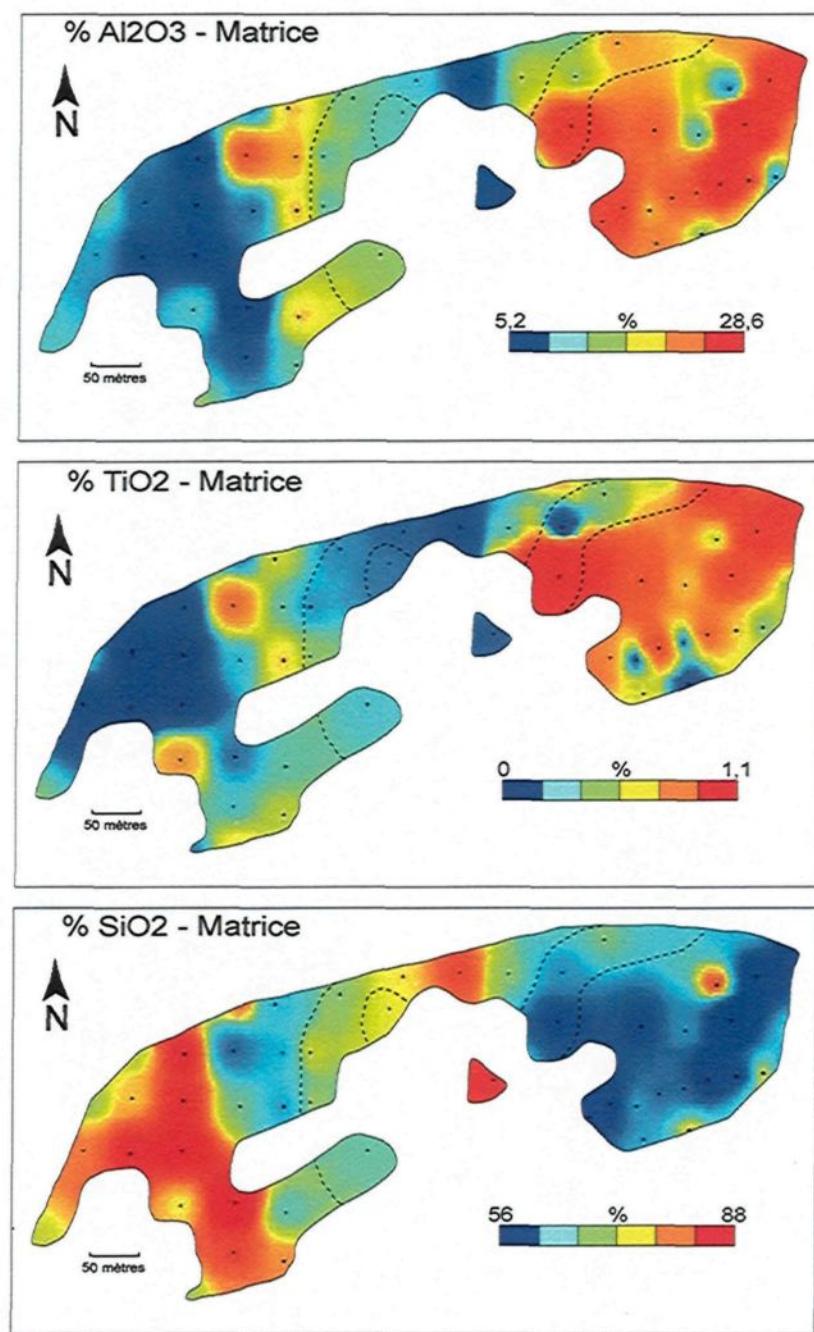


Figure 29 : Répartition spatiale de Al₂O₃, TiO₂, et SiO₂ sur le complexe volcanique du Cap d'Ours.

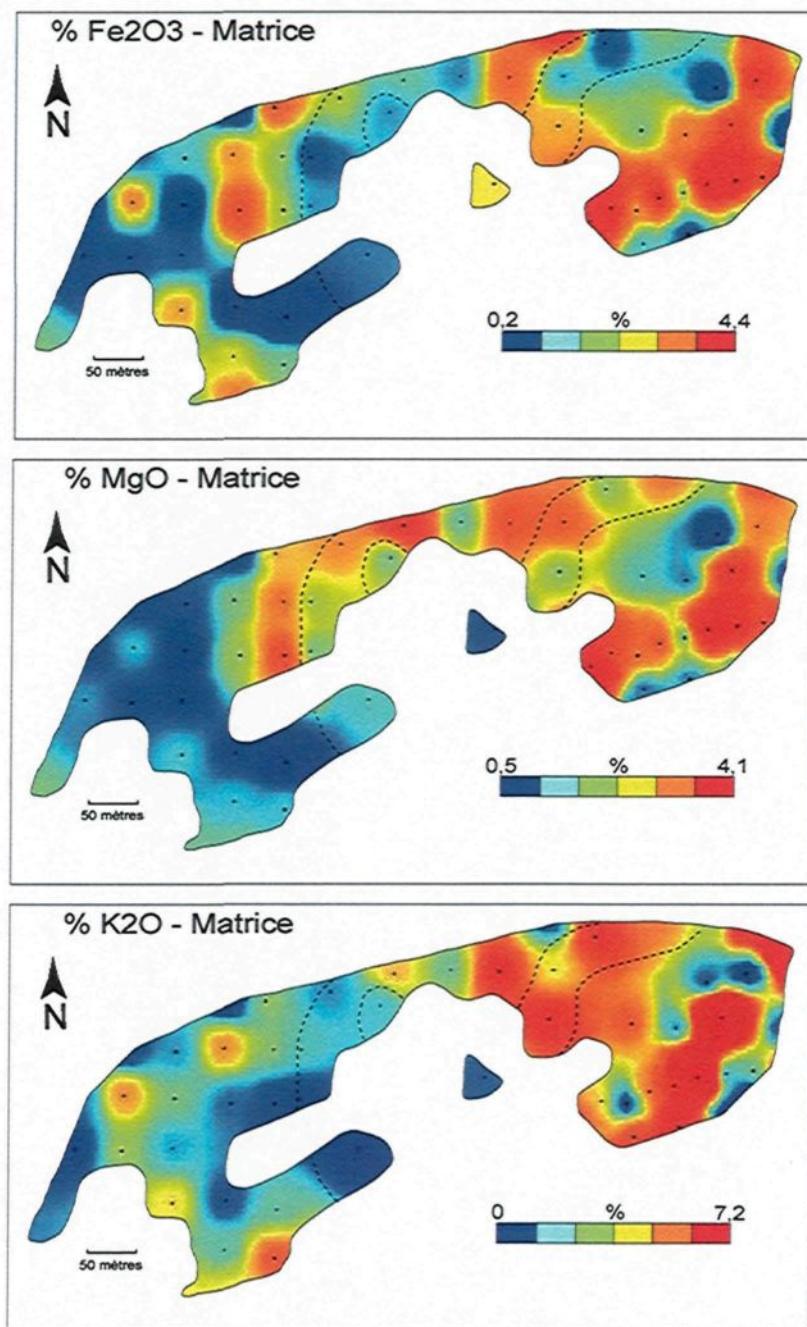


Figure 29 (suite) : Répartition spatiale de Fe₂O₃, MgO et K₂O sur le complexe volcanique du Cap d'Ours.

L'examen pétrographique révèle que la séricite est le seul minéral présent dans nos échantillons qui contient du potassium. La carte de répartition du K₂O indique une séricitisation du PQF, de sa partie sommitale, ainsi que d'une bonne partie du secteur Est.

Deux altérations bien distinctes sont mises en évidence. Une zonalité latérale, avec une silicification à proximité du centre d'émission qui atteint localement 90% et une altération en chlorite/séricite un peu plus distale. Une deuxième zonalité, qui est cette fois-ci verticale, est bien mise en évidence par l'intense altération en séricite du PQF dans sa partie supérieure.

4.4 INTERPRÉTATION

L'altération en silice proximale et chlorite/séricite distale est un phénomène déjà observé au sein de complexes felsiques de dômes et coulées sous-marins (De Rosen-Spence et al. 1980; Ylagan et al. 1996; Altaner et al., 2003). L'eau de mer percole au travers de la carapace bréchique du dôme et lessive la silice dans les zones hyaloclastitiques. Cependant, lorsque ces fluides parviennent à proximité du centre d'émission, la température est trop élevée pour conserver leur état de stabilité, ce qui entraîne la précipitation de silice. Ce processus est en accord avec les expérimentations de Fournier (1985) et Von Damm et al., (1991) qui démontrent les capacités de transport, à basse température, de la silice par l'eau

de mer. Le fer et le magnésium rejetés des aires silicifiées vont se fixer dans les secteurs aujourd’hui chloritisés. Il s’agit donc d’une altération typique produite par l’interaction avec l’eau de mer.

L’altération du PQF est clairement reliée à une altération hydrothermale puisque nous observons une zonalité verticale. Nous y observons la déstabilisation de l’albite au profit de la séricite et du quartz (figure 24E). L’équation (1) ci-dessous modélise cette modification minéralogique.



Il ne s’agit cependant que d’une altération hydrothermale qui se produit à une température relativement faible (Galley, 1993; Large et al., 2001).

4.5 DISCUSSION DE LA MÉTHODE

L’étude comparative micro-XRF versus XRF (tableau 4-4 et figure 27) est particulièrement révélatrice. En effet, elle permet de considérer nos résultats comme cohérents et valides malgré un appareillage qui se veut semi-quantitatif à la base. De plus, l’homogénéité de la composition chimique de la matrice malgré l’hétérogénéité de l’altération assure la représentativité nécessaire. Un certain niveau de confiance est donc atteint en ce qui concerne la validité des données et de la méthode.

Plusieurs limites sont néanmoins existantes. (1) La zone d'analyse doit être considérée comme suffisamment homogène et représentative de l'échantillon. (2) Il existe des problèmes dans la quantification des éléments trop légers. Enfin, (3) il est impossible d'obtenir les teneurs en volatils. Ces limitations peuvent cependant facilement être surmontées par des étalonnages, par l'optimisation de la taille de la fenêtre d'analyse et par des calculs normatifs sur les minéraux afin d'estimer la PAF.

Ce chapitre démontre la validité des résultats obtenus grâce à cette nouvelle méthode de caractérisation des altérations qui s'avère particulièrement utile dans le cas de faciès fragmentaires mais qui peut finalement s'appliquer à n'importe quel type de lithologie. Le produit final consiste en une carte très visuelle et facile à interpréter.

L'application de cette méthode au sein du complexe volcanique felsique du Cap d'Ours a permis de mettre en évidence des zones d'altérations peu ou pas perceptibles sur le terrain et qui sont associées à un système hydrothermal de faible intensité. La capacité de cette méthode à détecter des altérations diffuses montre que le micro-XRF pourrait servir comme un outil d'exploration. La puissance de l'appareil repose sur sa capacité à établir un lien direct entre la minéralogie, la texture et la composition chimique. De plus, la rapidité d'acquisition et de traitement des données ainsi que les faibles coûts analytiques rendent la

méthode particulièrement attractive. L'éventail des utilisations possibles du micro-XRF, appliquées au traitement des altérations hydrothermales, peut être très vaste : variations d'éléments chimiques au sein d'un minéral (ex : Fe et Mg dans la chlorite), calcul de minéraux normatifs sur une zone homogène, cartographie de la zonalité compositionnelle d'un minéral, et bien d'autres.

CHAPITRE V

MINÉRALISATIONS

5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la description de la minéralisation ainsi que sa répartition spatiale seront étudiés afin de comprendre les facteurs qui la contrôlent. Un deuxième volet plus analytique, basé sur la détermination des signatures en éléments traces des pyrites, permettra de faire le lien entre les deux épisodes d'altération définis au chapitre précédent, et les épisodes minéralisateurs. Une comparaison entre les signatures des pyrites du Cap d'Ours et celles de la mine Horne sera aussi réalisée.

5.2 CARACTÉRISTIQUES MÉGASCOPIQUE ET RÉPARTITION SPATIALE

La minéralisation se présente sous forme de zones rouillées (figure 30A) d'intensité variant en fonction de la quantité de sulfures. Même si des teneurs

aurifères ont déjà été enregistrées par le passé (Butterfield, 1933), la minéralisation est uniquement constituée de fine pyrite (\pm cpy) qui localement remplace complètement des fragments felsiques dans la matrice. La minéralisation, recoupée par des dykes mafiques synvolcaniques et par la schistosité régionale, est clairement d'origine volcanogène (figure 30B).

C'est le faciès intrusif porphyritique à quartz et feldspaths (PQF) qui semble contrôler la circulation des fluides minéralisateurs à l'échelle du complexe. En effet, les zones riches en pyrites sont localisées de part et d'autre des PQF, dans les brèches et hyaloclastites, où la circulation hydrothermale a été facilitée par la perméabilité primaire des roches (figure 31). L'intensité de la minéralisation augmente progressivement vers le Nord, soit vers le sommet de la séquence volcanique. Le paroxysme de la minéralisation correspond à deux zones de pyrite disséminée au Nord du complexe: (1) un horizon de 1 m d'épaisseur, continu sur plus de 50 m (figure 32A) et connu comme la zone de Glenwood, sur lequel un puits a été implanté en 1929; et (2) une zone de minéralisation chaotique développée dans des brèches et des hyaloclastites à la base d'une coulée dérivant du PQF (figure 32B).

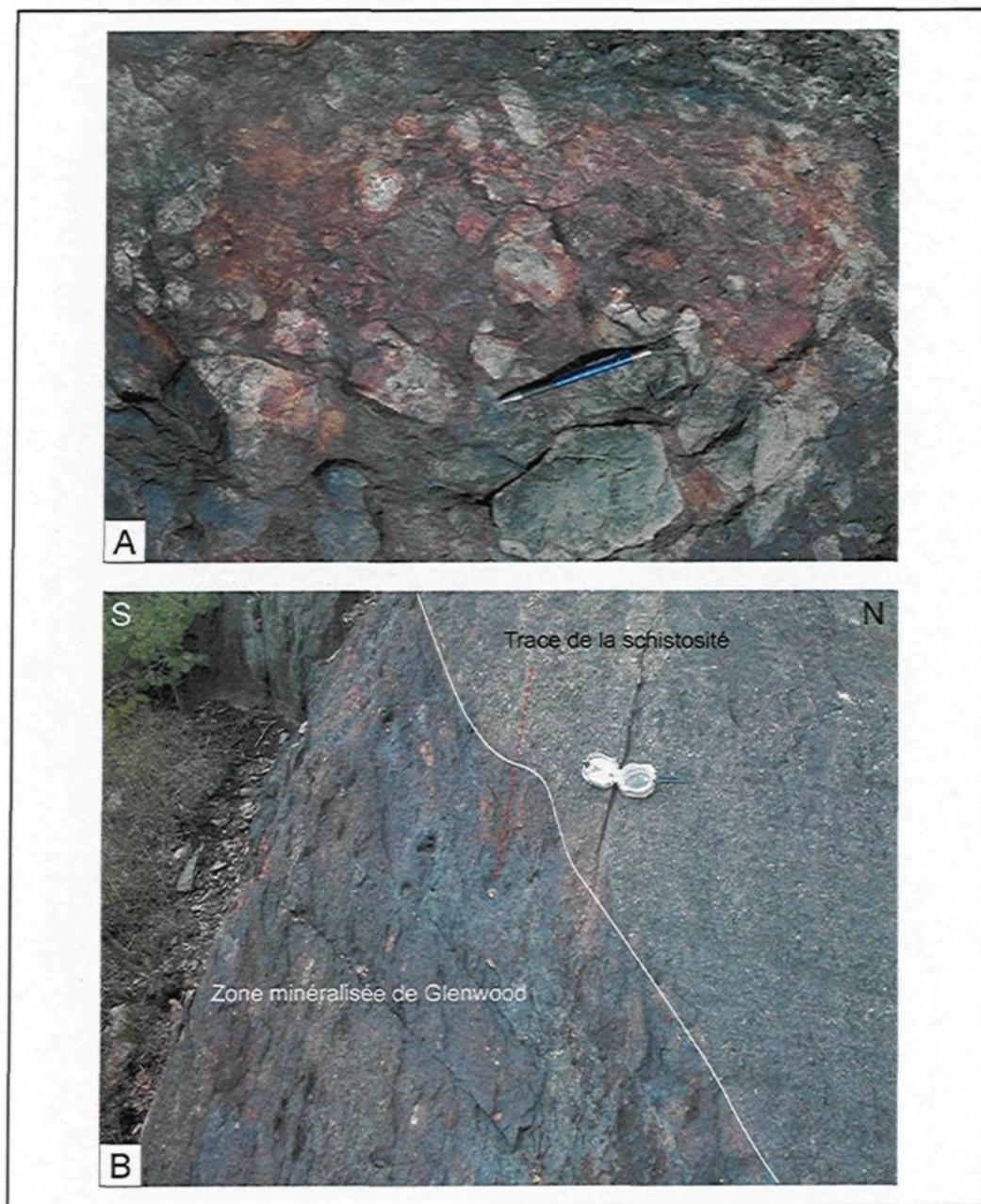


Figure 30 : Aspect mégascopique de la minéralisation du Cap d'Ours. Stylo : 15 cm pour échelle. A – Zone rouillée dans la matrice d'une brèche rhyolitique. B – Horizon minéralisé de Glenwood recoupé par la schistosité.

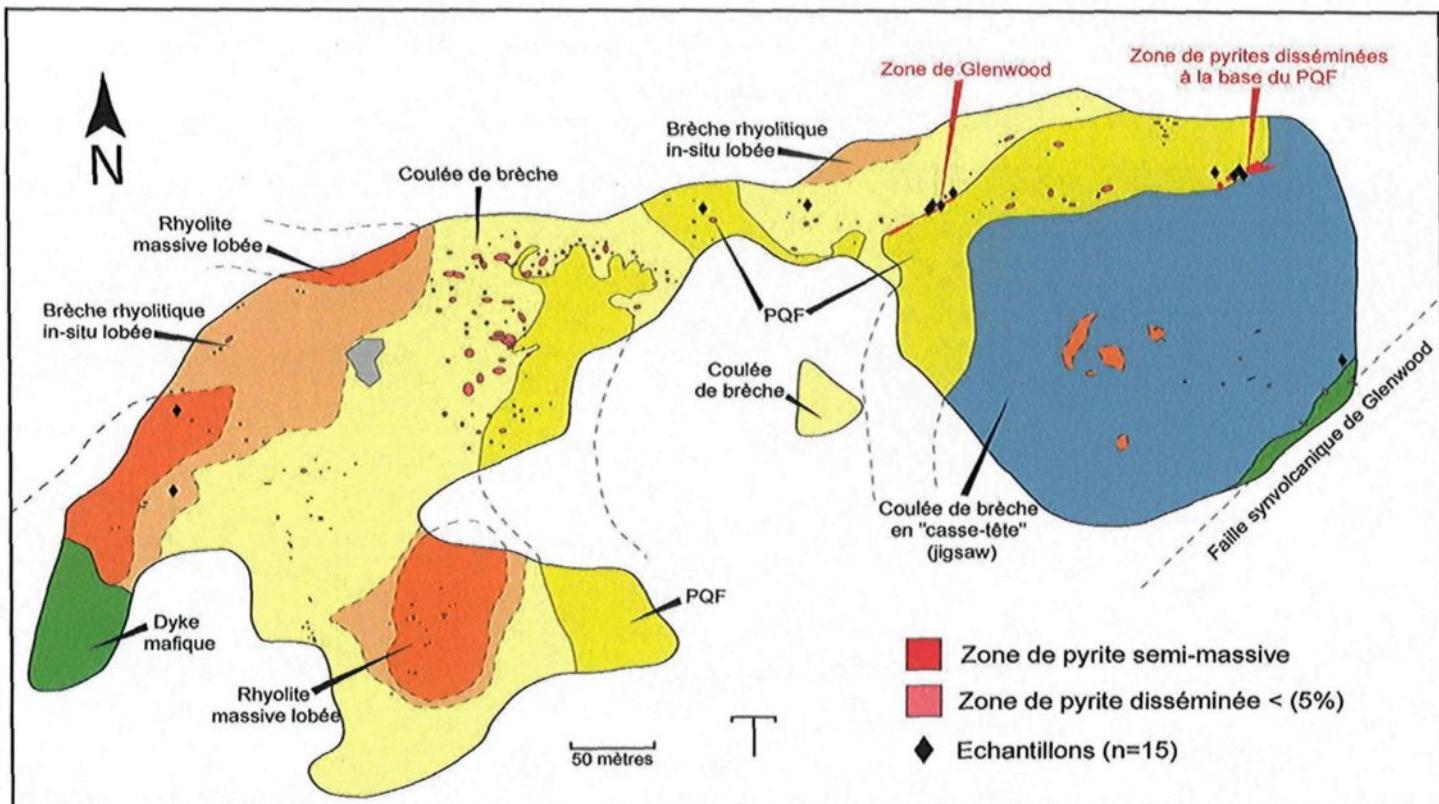


Figure 31 : Carte de répartition des zones minéralisées semi-massives et disséminées et position des échantillons étudiés en fonction des faciès volcaniques.

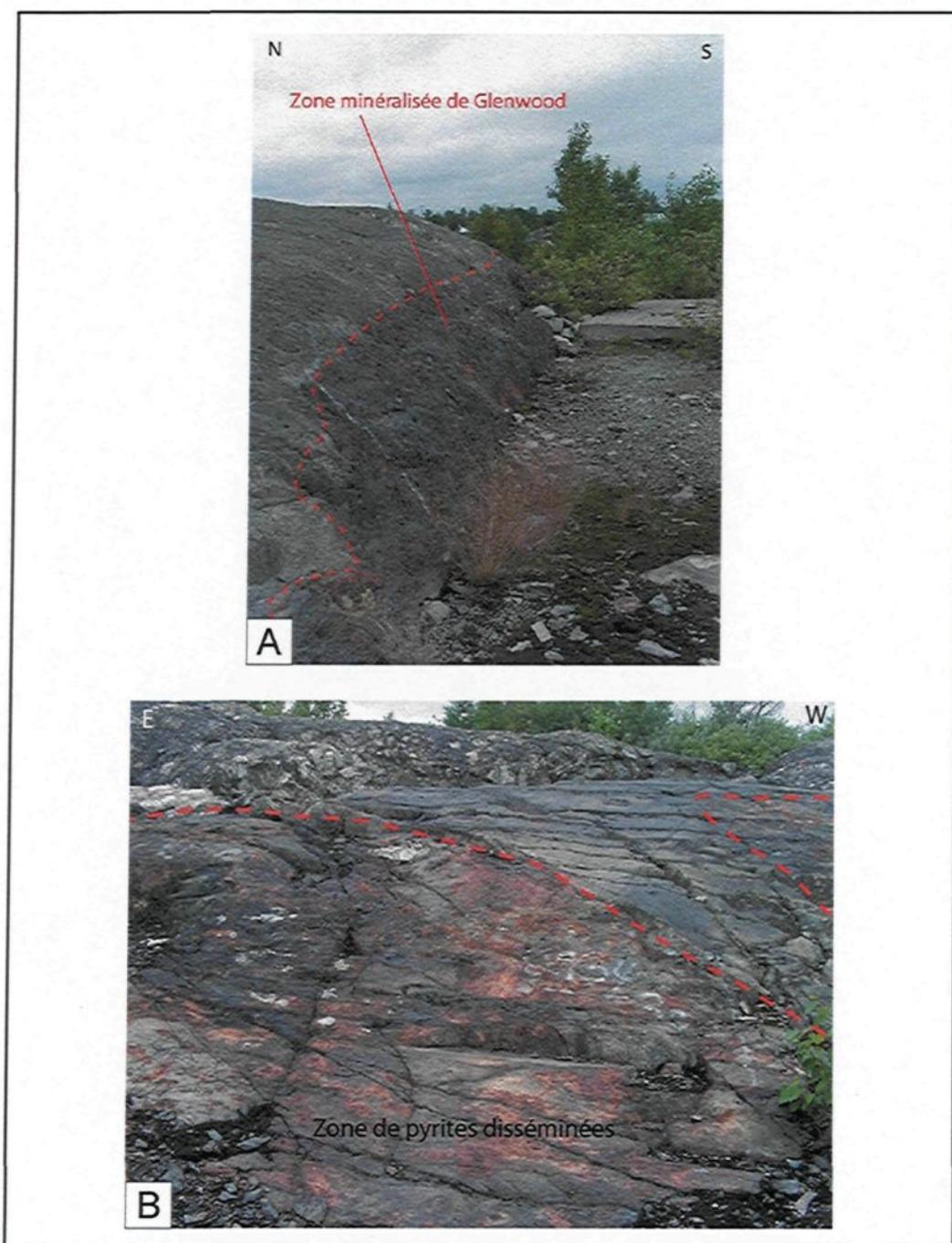


Figure 32 : Zones minéralisées principales. A – Zone de Glenwood. Horizon sulfureux continu sur plus de 50m. B – Pyrite disséminé à la base d'une coulée.

L'étude pétrographique des pyrites (figure 33) révèle la présence de 3 types de textures différentes: 1) les pyrites spongieuses, 2) les pyrites idiomorphes et 3) les pyrites spongieuses recristallisées en bordure, que nous appellerons respectivement *py1*, *py2* et *py3*.

Les pyrites de type *py1* ont une texture spongieuse (figure 33A,B), et sont particulièrement riches en inclusions de gangue et plus rarement de chalcopyrite. Un rubanement entre des bandes de pyrites relativement homogènes et des bandes plus poreuses est fréquemment observé (figure 33A). Cette texture est caractéristique de processus de remplacement hydrothermal de fragment (Roedder, 1968). L'initiation de ce processus est très bien illustrée sur la figure 33 C et D.

Les pyrites *py2* sont idiomorphes à subidiomorphes, et ont une texture très homogène, même si quelques rares inclusions de chalcopyrite, sphalérite et pyrrhotite sont présentes (figure 33E). Elles peuvent se retrouver sous forme d'agrégats de plusieurs grains (figure 33F).

Le type *py3* semble être un intermédiaire entre les deux derniers types de pyrite. En effet, elles ont un cœur très poreux, mais une bordure complètement recristallisée (figure 33G, H). Des inclusions de chalcopyrite sont présentes en quantité plus importante que dans les pyrites de type *py2*.

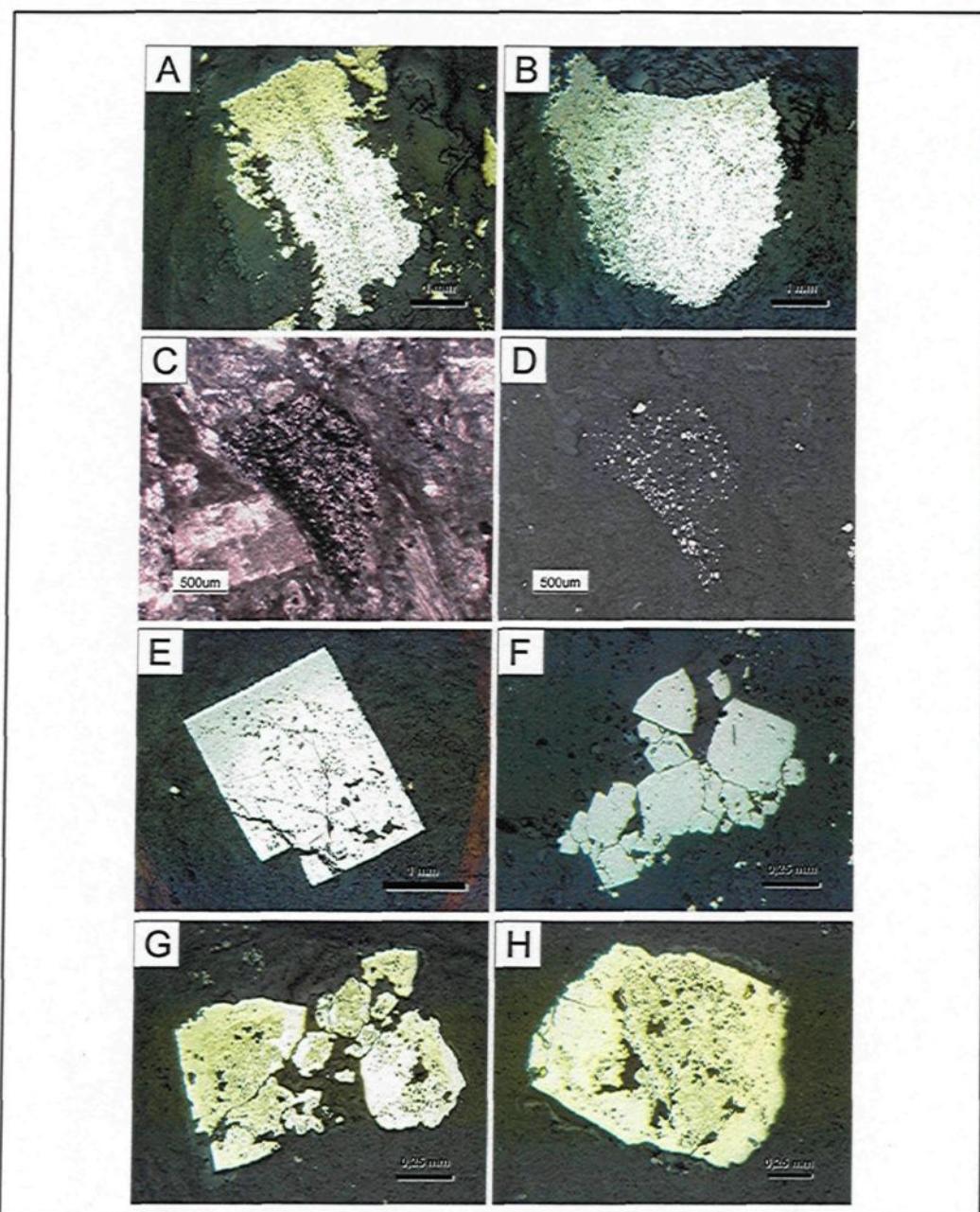


Figure 33: Microphotographies des pyrites. A – Pyrite spongieuse, présentant un rubanement typique de texture de remplacement primaire (lame DG-55, LR). B – Pyrite spongieuse (lame DG-56, LR). C et D – Fragment en cours de remplacement par de la pyrite (lame DG-67, LN et LR). E – Pyrite idiomorphe (lame DG-1, LR). F – Agglomérat de pyrites subidiomorphes (lame DG-68, LR). G et H – Pyrites subidiomorphes présentant un cœur riche en inclusions de gangue et une bordure bien recristallisé (lame DG-35, LR).

5.3 SIGNATURE EN ÉLÉMENTS TRACES DES PYRITES (LA-ICP-MS)

Le contenu en éléments traces dans les sulfures reflète en partie la composition des fluides à partir desquels ils ont précipités (Loftus-Hills et Solomon, 1967), mais aussi celle des roches hôtes (Bralia et al., 1979). Ces deux éléments constituent l'hypothèse de base de cette étude, et impliquent qu'il devrait être possible de discriminer les différents épisodes hydrothermaux éventuels en fonction de leurs signatures géochimiques. Cette approche a d'ores et déjà démontré son intérêt (Kelley et al., 2004; Large et al., 2007).

5.3.1 Méthodologie

La concentration des éléments traces dans les pyrites a été déterminée par analyses La-ICP-MS au LabMater (UQAC). Un laser New Wave Nd:YAG 213 nm, équipé d'un microscope, est connecté à un ICP-MS Thermo Elemental X-7. Les analyses sont effectuées directement sur des lames minces polies de 100 µm et sous une atmosphère d'hélium-argon. Les paramètres utilisés pour le laser sont les suivants : un faisceau laser de 80 µm de diamètre, un taux de répétition de 10 Hz et une énergie du laser d'environ 0,350 mJ/cm².

Le temps d'analyse est de 80 s, et inclut 20 s d'analyse du bruit de fond (*background*), ce qui permet un intervalle de temps d'acquisition de données avec

le laser d'environ 60 s. Une attention particulière a été portée pour analyser des zones homogènes afin d'essayer de ne pas incorporer d'inclusions, ce qui est d'ailleurs problématique pour le groupe *py3* puisque nous sommes contraints d'analyser les bordures de grains, le cœur étant trop poreux (figure 33 G,H).

Toutes les concentrations ont été calculées à partir du standard PS-1 (Wilson et al., 2002; Gaboury et Graham, 2004), un sulfure synthétique dont la composition est représentée dans le tableau 5-1. Afin d'assurer un bon calibrage et la répétitivité des résultats, 6 analyses de PS-1 ont été réalisées pour chaque lame mince, trois avant de débuter, et trois nouvelles à la fin. Lors du traitement des données, nous avons choisi les spectres les plus homogènes possibles de manière à ne pas intégrer d'éventuelles inclusions qui fausseraient les résultats.

Tableau 5-1 : Composition en éléments traces du PS-1 (en ppm).

Éléments	ppm	Éléments	ppm
⁵⁵ Mn	260	¹⁰⁷ Ag	67
⁵⁷ Fe	156000	¹¹⁸ Sn	55
⁵⁹ Co	67	¹²¹ Sb	55
⁶¹ Ni	94	¹²⁵ Te	20
⁶⁵ Cu	134000	¹⁹⁷ Au	47
⁶⁶ Zn	210000	²⁰² Hg	57
⁷⁵ As	65	²⁰⁵ Tl	10
⁸² Se	53	²⁰⁸ Pb	67
⁹⁸ Mo	61	²⁰⁹ Bi	7

Environs 160 analyses ont été effectuées sur 16 lames minces provenant aussi bien des deux zones de minéralisations principales, que des zones de pyrites disséminées (annexe 5). La répartition des échantillons est représentée à la figure 31.

5.3.2 Résultats

La figure 34 illustre la répartition spécifique de chacun des types de pyrites mis en évidence. Un lien entre la composition en éléments traces et la texture est clairement mis en évidence par le résultat de nos analyses. En effet, chaque texture possède une signature qui lui est propre (figure 35A,B,C, figure 36 et tableau 5-2).

Les pyrites *py1* présentent des teneurs relativement élevées en plusieurs métaux, en comparaison des deux autres types *py2* et *py3*. Les éléments Mn, Cu, Zn, Ag, Sb, Au, Tl et Pb constituent le cortège métallique spécifique de ces pyrites. De plus, le groupe *py1* montre une répartition spatiale particulière, puisque ces pyrites sont localisées uniquement à proximité du PQF (figure 34).

Les pyrites *py2* sont appauvries en métaux, mais présentent cependant une concentration en Se un peu plus importante que le groupe *py1* (32 ppm contre 7 ppm en moyenne). On les retrouve à l'échelle de tout le complexe du Cap d'Ours.

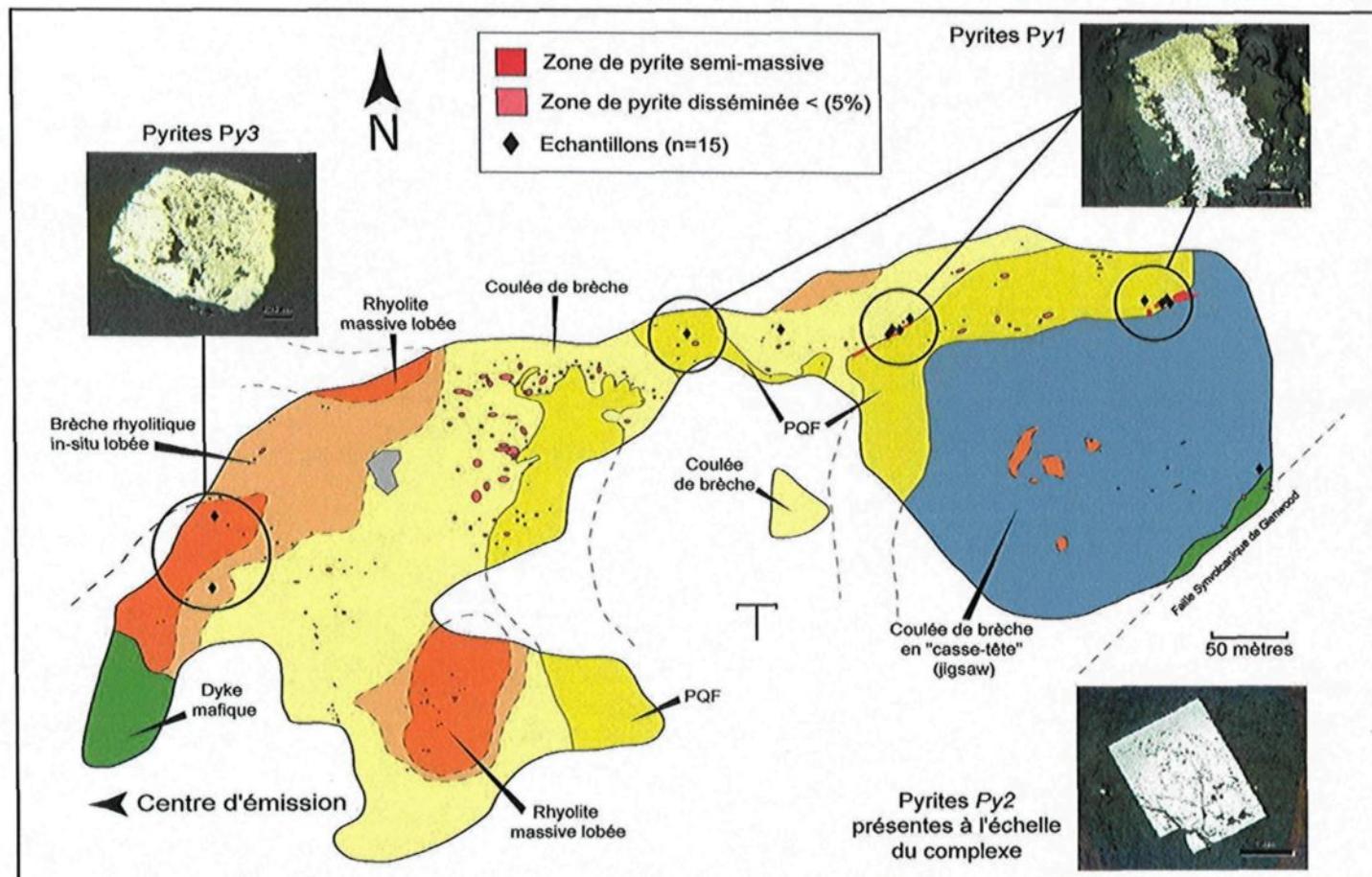


Figure 34 : Répartition spatiale des différents types de pyrite en fonction des faciès volcaniques.

Tableau 5-2 : Statistiques des résultats obtenus sur les pyrites du Cap d'Ours analysées au La-ICP-MS

	Pyrites Py1, n=51					Pyrites Py2, n=53					Pyrites Py3, n=22				
	Moyenne	Médiane	Écart type	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart type	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart type	Min	Max
55Mn	167,5	89,1	419,9	2,9	3193,0	25,5	2,7	80,0	1,4	486,0	22,9	7,3	42,6	1,3	192,8
59Co	113,4	88,9	91,9	4,7	416,1	204,9	102,0	272,5	0,9	1432,0	109,6	93,8	99,8	3,9	405,8
60Ni	157,9	144,5	95,0	47,8	743,3	139,8	118,9	84,1	64,9	633,8	102,8	104,9	20,6	44,5	141,7
65Cu	762,6	370,2	1129,6	22,2	5652,0	259,4	7,9	1781,6	1,1	14300,0	32,8	10,4	84,0	1,3	403,5
66Zn	254,0	18,0	1265,0	2,8	9539,0	27,5	3,3	165,0	0,0	1335,0	4,8	4,4	3,8	2,1	19,4
75As	512,3	476,5	296,8	14,4	1365,0	428,8	463,8	230,5	69,3	981,1	25,4	6,7	26,9	3,3	82,8
82Se	7,1	4,1	8,3	1,1	46,4	32,2	11,1	106,9	2,7	864,2	64,0	49,6	47,5	12,7	188,8
98Mo	1,9	1,5	1,9	0,1	10,0	1,7	0,2	9,8	0,0	78,6	0,3	0,2	0,4	0,1	1,9
107Ag	31,2	21,9	73,5	0,2	555,5	0,5	0,1	1,7	0,0	13,7	0,2	0,1	0,2	0,0	0,9
118Sn	0,7	0,5	0,6	0,3	4,9	0,6	0,4	0,8	0,0	5,7	0,5	0,4	0,3	0,2	1,5
121Sb	34,9	34,0	35,8	0,3	192,1	0,3	0,2	0,4	0,0	2,1	0,5	0,0	1,3	0,0	5,4
125Te	6,1	1,8	7,5	0,5	27,5	2,0	0,6	4,5	0,0	20,9	3,3	1,4	4,3	0,3	17,6
197Au	0,6	0,6	0,5	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200Hg	0,4	0,4	0,1	0,2	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1	0,4
202Hg	0,4	0,4	0,1	0,2	0,7	0,3	0,3	0,1	0,1	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4
205Tl	0,8	0,3	1,2	0,0	5,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
208Pb	42,9	38,7	40,5	0,5	197,6	0,6	0,4	0,6	0,0	2,9	0,4	0,2	0,5	0,0	1,7
209Bi	0,2	0,1	0,4	0,0	3,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3

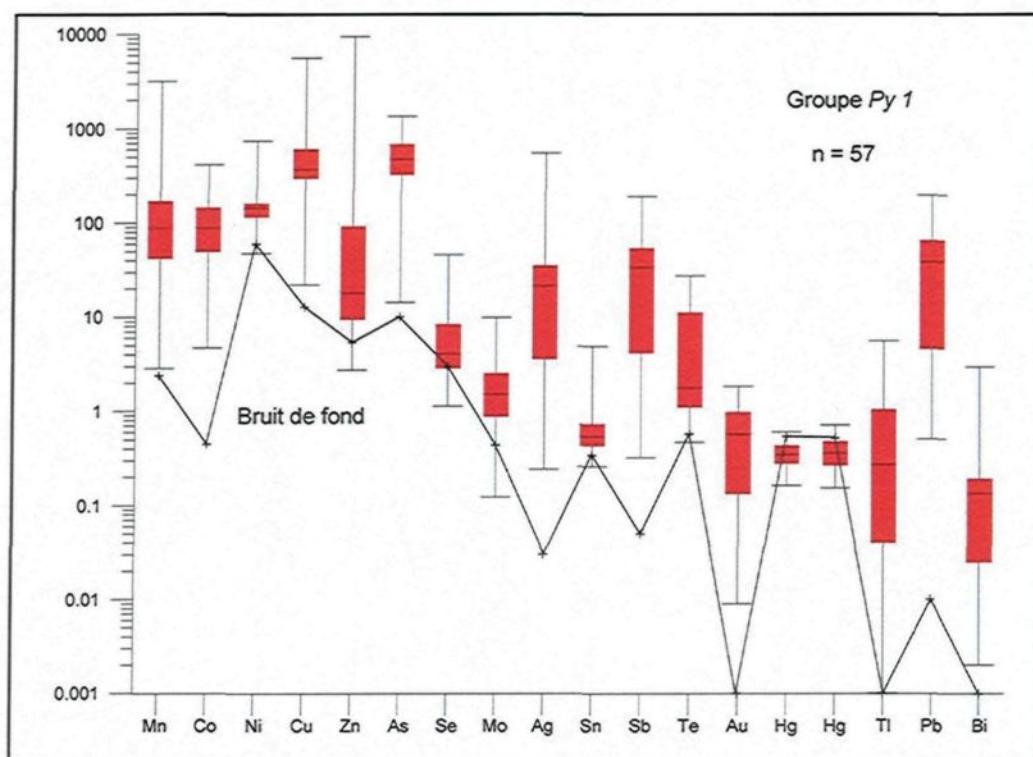


Figure 35 A : Représentation statistique de la signature des pyrites de type *py1*. Les boîtes à moustaches représentent ici les valeurs maximales et minimales, le premier et le troisième quartile ainsi que la médiane pour chaque élément. La valeur analytique du bruit de fond est aussi représentée.

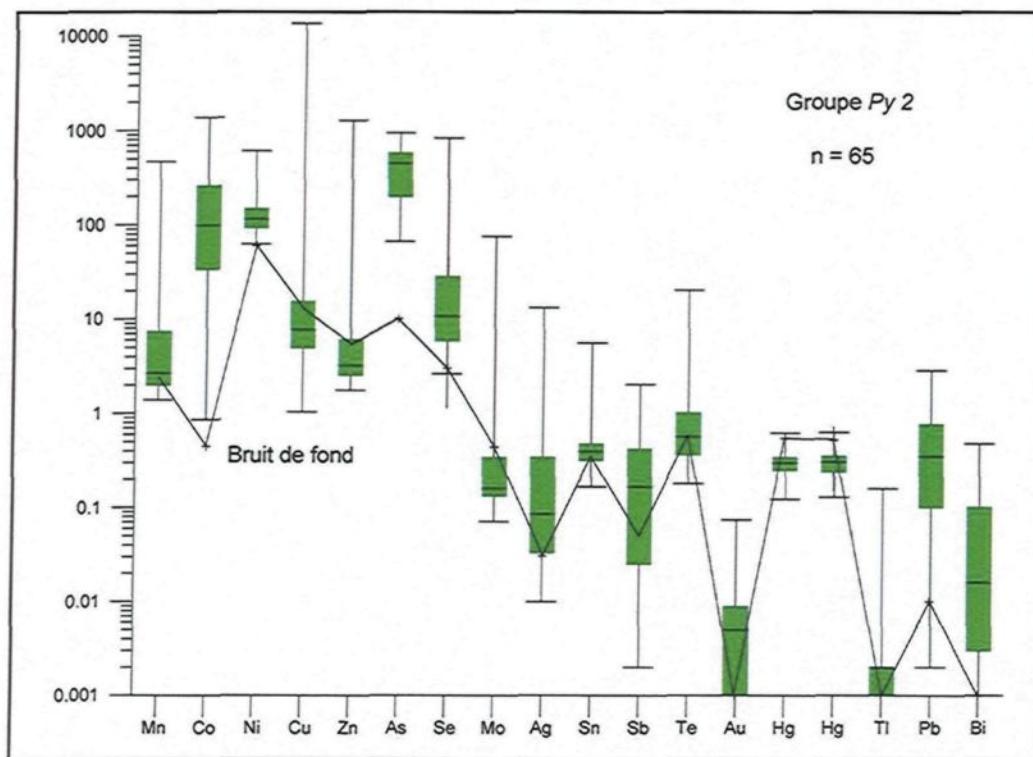


Figure 35 B : Représentation statistique de la signature des pyrites de type py2. Les boîtes à moustaches représentent ici les valeurs maximales et minimales, le premier et le troisième quartile ainsi que la médiane pour chaque élément. La valeur analytique du bruit de fond est aussi représentée.

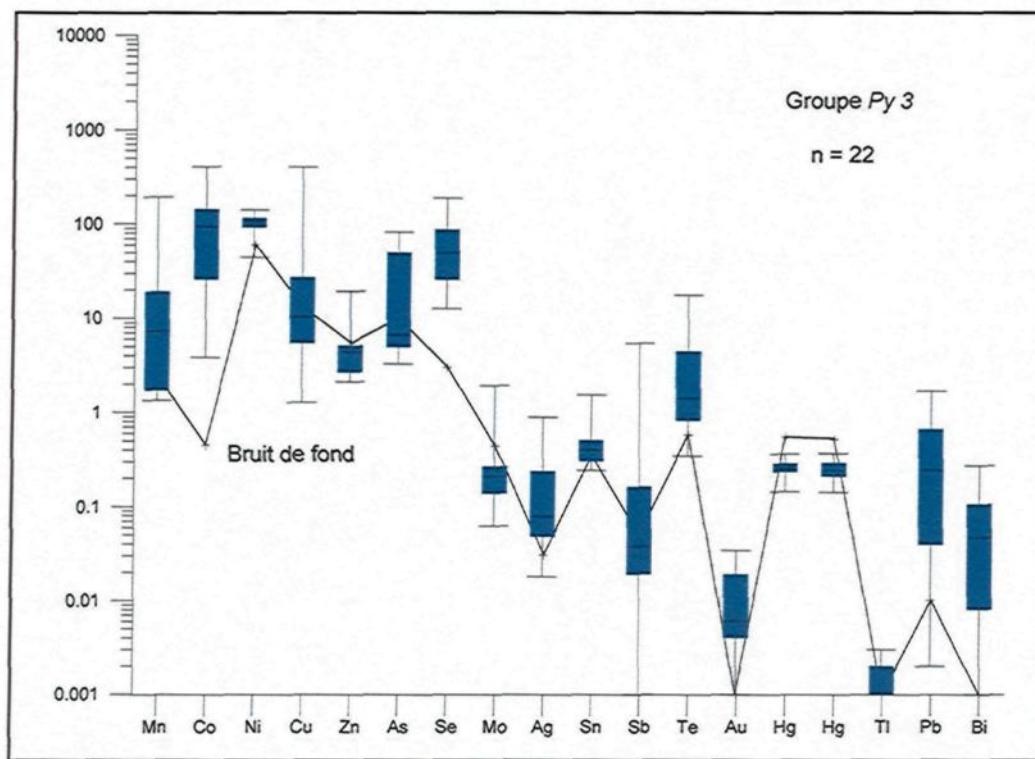


Figure 35 C : Représentation statistique de la signature des pyrites de type *py3*. Les boîtes à moustaches représentent ici les valeurs maximales et minimales, le premier et le troisième quartile ainsi que la médiane pour chaque élément. La valeur analytique du bruit de fond est aussi représentée.

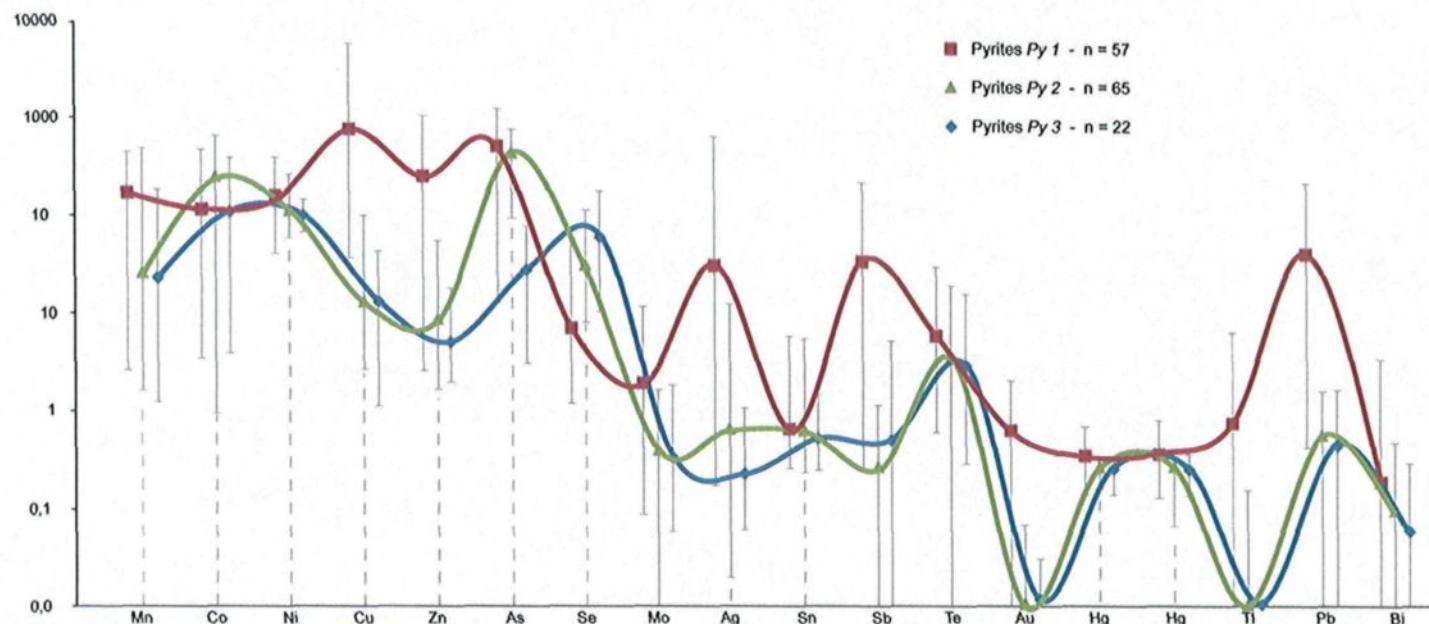


Figure 36 : Signatures des trois types de pyrites identifiés sur le Cap d'Ours. La position du symbole correspond à la moyenne des analyses, dont les valeurs maximales et minimales sont présentées par les bandes.

En ce qui concerne les pyrites du groupe *py3*, il est important de signaler que nos résultats concernant la composition en éléments traces de ces pyrites ne correspondent pas à leurs signatures primaires, mais à celle de l'épisode de recristallisation qui les a affecté, puisque nos analyses ont été conduites uniquement sur les bordures recristallisées. Cependant, même si ces pyrites présentent sensiblement les mêmes signatures que celles du groupe *py2*, elles sont distinctement pauvres en As (30 ppm, contre près de 500 ppm pour les groupes *py1* et *py2*). Leur répartition spatiale est très limitée, puisque nous les retrouvons uniquement dans le secteur Ouest, plus près du centre d'émission (figure 34).

5.4 DISCUSSION

D'après Huston et al., (1995), les éléments traces dans un minéral prennent la forme de (1) substitutions stœchiométriques, (2) substitutions non-stœchiométriques, ou (3) inclusions. Les substitutions stœchiométriques dans la pyrite correspondent essentiellement au Ni et du Co qui remplace le Fe, et au Se et Te qui peuvent se substituer au S. C'est le rayon ionique et la charge des éléments qui contrôle leur substitution (Ringwood, 1956; Craig et al., 1998; Chouinard et al., 2005). Les remplacements non-stœchiométriques se feront par des éléments tels que l'As, le Mo, l'Au, ou le Tl. En ce qui concerne les éléments présents en inclusions, il s'agit généralement du Cu, du Zn et du Pb dans les

environnements volcanogènes. Ces résultats sont cependant basés sur des analyses réalisées à la micro-sonde. Nos résultats, basés sur le La-ICP-MS, démontrent que des éléments tels que le Cu, le Zn ou encore le Pb peuvent se retrouver directement dans la structure cristalline de la pyrite puisque les spectres d'analyses ne montrent pas les pics de variations typiques rencontrés lorsqu'une inclusion est analysée (figure 37).

La variabilité des signatures en fonction de la texture permet d'associer un type de pyrite à un événement hydrothermal, métamorphique ou diagénétique. Le groupe *py1* se localise uniquement à proximité du PQF. Ces pyrites possèdent une signature unique, marquée par un enrichissement en Mn, Cu, Zn, Ag, Sb, Au, Tl et Pb, que l'on ne retrouve pas dans les pyrites de type *py2* et *py3*. Cette suite de métaux est typique des systèmes volcanogènes, du moins pour le Cu, le Zn, l'Ag et l'Au (Galley et al., 2007), mais le Mn, le Sb et le Tl sont considérés comme des éléments significatifs des gisements de SMV (Galley et al., 2007). Par ailleurs, la texture spongieuse qui leur est propre vient aussi appuyer l'hypothèse d'une formation d'origine volcanogène. En effet, Roedder (1968) démontre que la rapidité de la précipitation des sulfures volcanogènes facilite le piégeage des inclusions dans leur structure par l'intermédiaire de textures spongieuses et/ou colloformes.

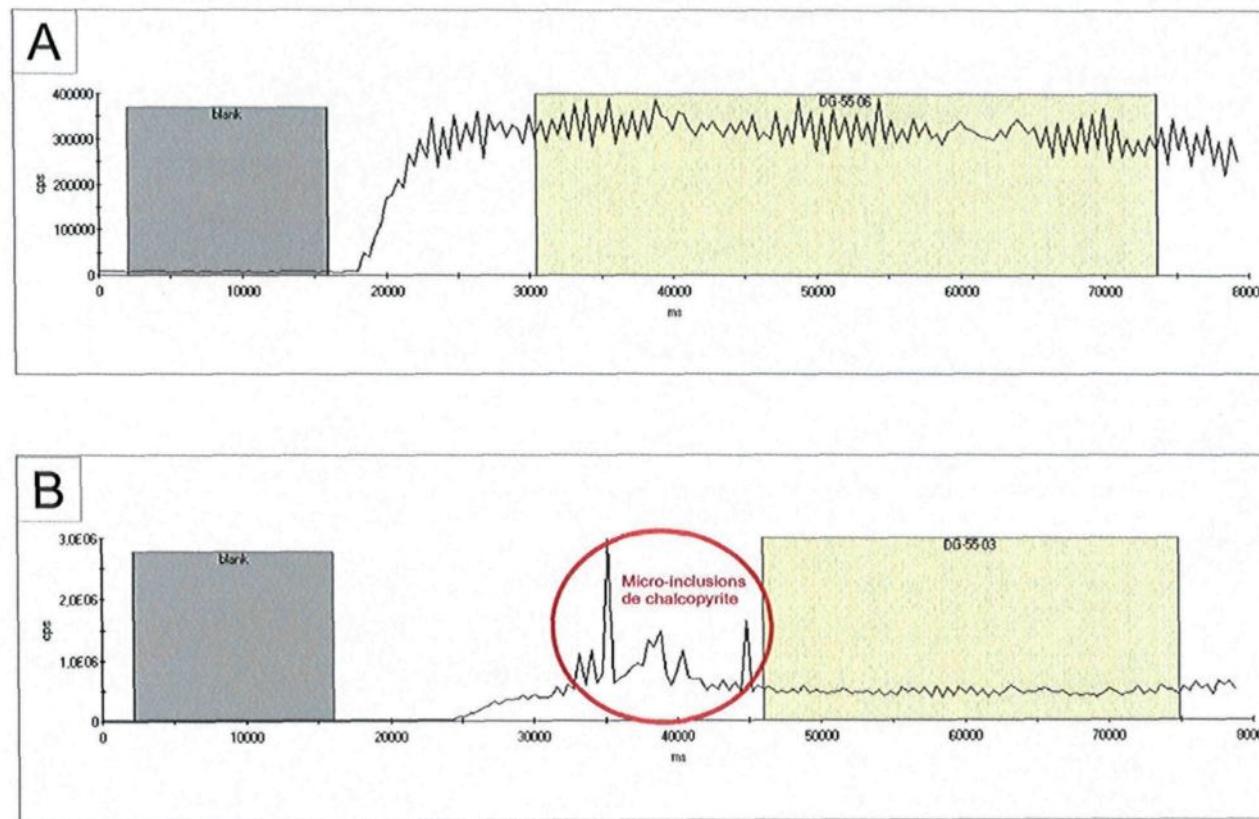


Figure 37 : Diagramme cps (*count per second*) versus le temps (ms) illustrant les spectres d'analyse La-ICP-MS du cuivre dans une pyrite (lame DG-55). L'ablation laser débute après 20 s. A – Profil en plateau indicateur que le cuivre se trouve dans la structure cristalline de la pyrite. B – Profil avec des micro-inclusions de chalcopyrite analysées.

Le cortège métallique présent dans les pyrites *py1* est donc sans doute issu d'un fluide hydrothermal, d'origine volcanogène, draîné par le réseau de dykes de PQF, et qui ne peut précipiter que dans la partie supérieure de l'empilement volcanique, où les conditions physico-chimiques (pression, température, pH...) sont plus favorables.

Les pyrites *py2* sont idiomorphes, ne présentent que localement des inclusions, et leurs signatures en éléments traces ne présentent pas d'enrichissements en métaux. Par ailleurs, leur répartition sur l'ensemble de la zone d'étude laisse supposer qu'elles sont d'origine métamorphique.

La texture poreuse au centre et recristallisée en bordure du type *py3*, rend ces pyrites particulièrement intéressantes. Malheureusement, il est impossible d'établir leurs signatures primaires à cause de la trop grande quantité d'inclusions en leur centre. La texture poreuse de la partie centrale laisse supposer une précipitation rapide de ces sulfures (Roedder, 1968), et donc possiblement une origine volcanogène. La signature de la bordure recristallisée présente cependant des caractéristiques spéciales, et en particulier une très faible concentration d'As. La faible concentration en As dans les pyrites recristallisées est un phénomène déjà documenté (Huston et al., 1995). Lors de cette recristallisation, l'As métastable est expulsé de la pyrite. Il se produit le même phénomène pour les

éléments présents en inclusions, tels que le Cu, sous forme de chalcopyrite, ou le Zn sous forme de sphalérite, qui eux aussi disparaissent.

Le métamorphisme entraîne une recristallisation minérale qui épure la structure cristalline des micro-inclusions. La recristallisation n'a cependant pas d'effet sur les éléments présents dans la pyrite par substitution stœchiométrique comme le Ni et le Co qui sont donc considérés comme des outils dans la détermination génétique des gisements par l'intermédiaire du rapport Co/Ni (Loftus-Hills et Solomon, 1967; Bralia et al., 1979). Dans notre cas, les concentrations de Co et de Ni sont similaires dans les trois types de pyrites, et nous ne pouvons donc pas discriminer différentes familles sur cette base.

Le Se est lui aussi présent dans la pyrite grâce à sa substitution avec le S. Huston et al. (1995) documentent que la concentration du Se diminue avec l'augmentation de la température. Dans notre cas, ce sont les pyrites *py1* qui ont le moins de Se. Les pyrites volcanogènes se seraient donc formées avec des fluides de plus hautes températures que les types *py2* et *py3*.

Afin de tenter d'intégrer la mine Horne à l'environnement de la caldeira de New Senator, des échantillons de pyrite provenant du secteur Ouest de la mine Horne ont été analysés. Ce secteur a été choisi car il est principalement constitué

de pyrites et considéré ici comme un équivalent de basse température de la minéralisation de la mine Horne. De plus, la lithologie hôte est similaire à celle du Cap d'Ours, à savoir, des rhyolites bréchiques.

Deux types de textures et de signatures sont mis en évidence. Des pyrites idiomorphes, pauvres en métaux, interprétées comme métamorphiques, et des pyrites poreuses présentant un enrichissement de la suite de métaux : Mn, Cu, Zn, Ag, Sb, Au, Te et Pb (tableau 5-3 et figure 38). Ces deux types de pyrites présentent cependant des concentrations en Co particulièrement faibles (3 ppm en moyenne). La figure 39 présente la comparaison des signatures des pyrites volcanogènes de la mine Horne, et celles du Cap d'Ours. Il est particulièrement intéressant d'observer les mêmes enrichissements en métaux dans les pyrites volcanogènes des deux secteurs. Cet élément n'est cependant pas suffisant pour supposer un lien entre les deux, mais cette similarité mérite d'être soulevée et sans doute d'être étudiée d'avantage.

Tableau 5-3 : Statistiques des résultats obtenus sur les pyrites de la mine Horne analysées au La-ICP-MS

	Pyrites volcanogéniques - n=7					Pyrites métamorphiques - n=9				
	Moyenne	Médiane	Écart type	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart type	Min	Max
55Mn	714,49	704,70	472,23	193,30	1591,00	418,09	293,35	495,01	1,36	1591,00
59Co	1,54	0,57	6,83	0,23	6,55	3,48	0,76	6,12	0,23	21,32
60Ni	112,32	112,70	34,56	98,04	134,40	118,85	118,30	12,54	98,04	134,40
65Cu	1157,96	536,60	1276,85	192,00	4307,00	687,61	306,70	1204,95	10,86	4307,00
66Zn	50,22	48,07	24,80	28,88	79,53	31,88	31,70	27,10	4,92	79,53
75As	97,27	100,80	120,04	22,98	148,40	161,20	101,15	130,03	22,98	460,00
82Se	2,22	1,10	12,04	0,71	8,72	9,44	5,48	11,99	0,71	39,08
98Mo	0,23	0,23	0,07	0,21	0,26	0,23	0,23	0,03	0,18	0,29
107Ag	17,86	15,58	10,41	9,16	36,75	10,64	10,50	11,24	0,03	36,75
118Sn	2,69	1,11	3,10	0,65	8,74	2,49	0,93	2,98	0,42	8,74
121Sb	5,60	5,06	2,68	2,80	8,55	3,44	3,83	3,03	0,02	8,55
125Te	50,42	50,87	46,54	12,65	79,48	69,52	51,65	52,14	12,65	181,50
197Au	0,95	1,09	0,48	0,46	1,48	0,59	0,50	0,54	0,01	1,48
200Hg	0,35	0,31	0,12	0,28	0,52	0,33	0,30	0,08	0,25	0,52
202Hg	0,37	0,32	0,13	0,28	0,55	0,34	0,29	0,10	0,28	0,55
205Tl	0,23	0,01	0,35	0,00	1,08	0,14	0,01	0,32	0,00	1,08
208Pb	127,43	28,36	239,77	7,33	756,10	74,78	11,92	214,94	0,00	756,10
209Bi	0,03	0,03	0,02	0,02	0,07	0,02	0,02	0,02	0,00	0,07

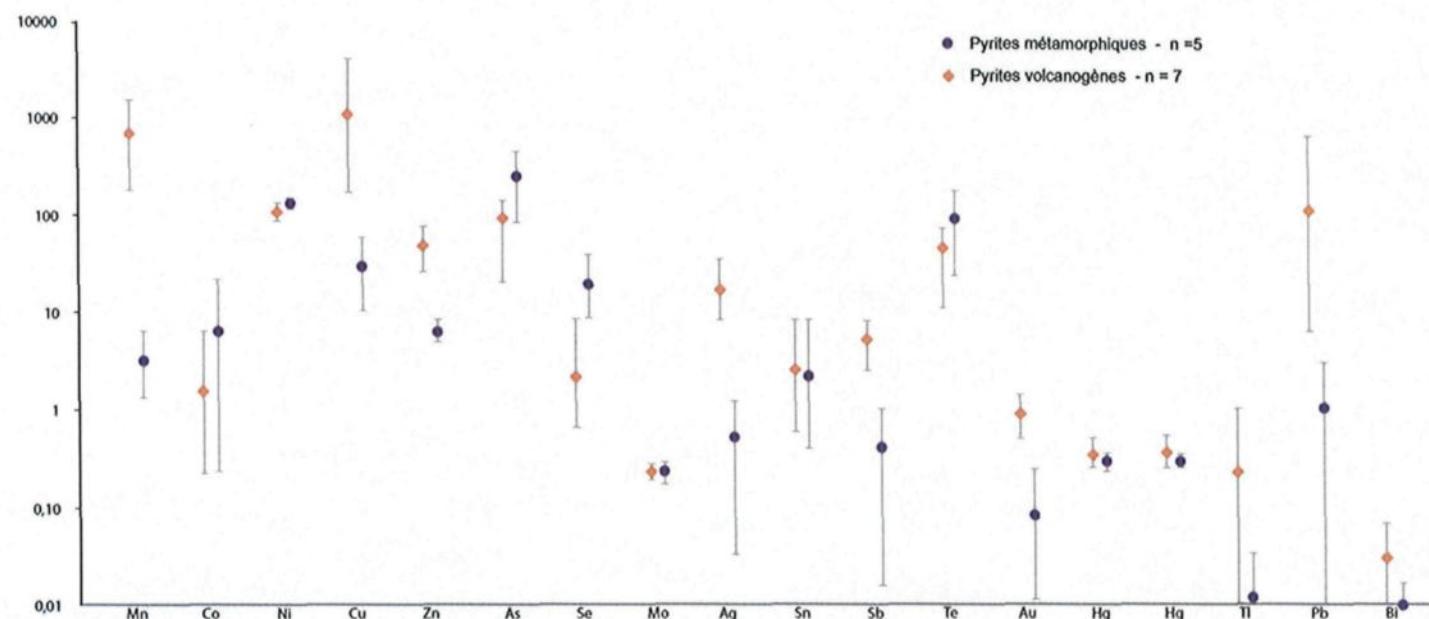


Figure 38: Signatures en éléments traces des pyrites de la Zone Ouest de la mine Horne.

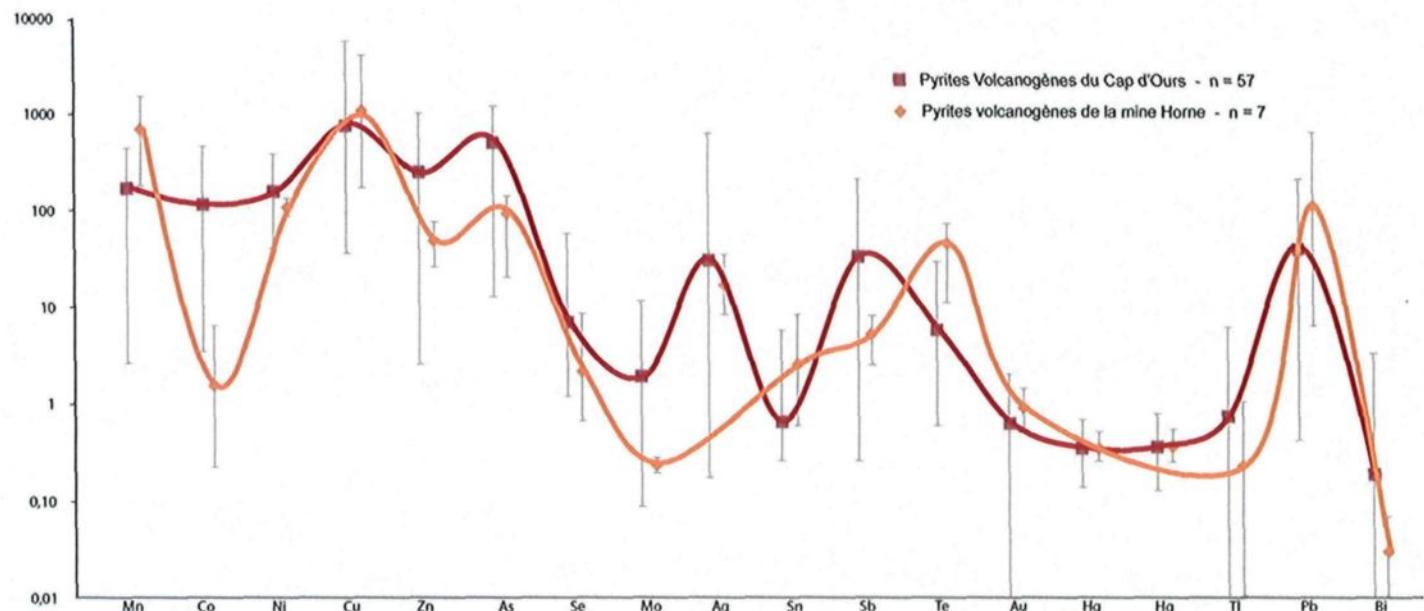


Figure 39: Comparaison signatures en éléments traces des pyrites de la Zone Ouest de la mine Horne et du Cap d'Ours.

5.5 BILAN

Le couplage entre la répartition spatiale, l'étude pétrographique et les analyses La-ICP-MS amène une image cohérente de la minéralisation. Le lien entre les textures des pyrites et leurs signatures en éléments traces est démontré et permet d'établir une relation entre les épisodes d'altération hydrothermale et les épisodes à l'origine de la précipitation des pyrites. Ainsi, les pyrites *py1* sont issues de fluides volcanogènes focalisés le long des conduits du PQF et qui ont entraîné son altération. Les pyrites *py2* sont réparties sur tout le secteur et résultent vraisemblablement du métamorphisme. Les *py3* sont plus problématiques puisque leurs signatures primaires n'ont pas pu être établies. Cependant, leur texture particulière et leur répartition spatiale spécifique laissent supposer qu'elles sont issues d'un épisode hydrothermal d'origine volcanogène indépendant de celui qui a affecté le PQF. Il est proposé qu'il pourrait peut-être exister un lien entre ces pyrites et celle de la mine Horne. Cependant, aucun élément ne permet de valider indépendamment cette hypothèse.

CHAPITRE VI

INTÉGRATION DES RÉSULTATS

6.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sur la base des différentes observations et interprétations des chapitres précédents, un modèle métallogénique évolutif sera présenté. Mais avant cela, un retour rapide sur la relation déformation-altération observée sur le Cap d'Ours permettra de discuter ce lien intéressant.

6.2 ALTÉRATION VERSUS DÉFORMATION

Il est important de rappeler que la cartographie de l'anisotropie secondaire a permis de mettre en évidence deux zones de déformation plus importantes (figure 21). La première correspond au secteur Ouest. Les faciès y sont essentiellement composés de micro-brèches et la zone est complètement silicifiée. La silicification

implique généralement une induration de la roche. Un faciès compétant devrait être réfractaire à la déformation. Or ce n'est pas le cas ici car la schistosité est pénétrante. Ce comportement de la déformation ductile résulte donc fort probablement d'un contrôle de la lithologie du secteur. En effet, la petitesse des fragments et la grande quantité de matrice vont accommoder plus facilement la déformation.

En ce qui concerne le deuxième secteur, il est localisé au sommet du PQF. Le faciès est de type « coulée de brèche ». Les fragments sont de grandes tailles et la matrice représente 40 à 50% de la roche. Les analyses sur les altérations indiquent que la zone est intensément sérichtisée. Dans ce cas, nous pouvons considérer que c'est l'altération de la roche qui a favorisé l'imprégnation de la déformation par l'intermédiaire de l'alignement des phyllosilicates dans la schistosité.

Sur le Cap d'Ours, l'intensité de la déformation semble donc être reliée à la combinaison de deux paramètres: les lithologies, et plus particulièrement leurs contrastes de compétences, et le degré d'altération des roches.

6.3 MODÈLE GÉNÉRAL ÉVOLUTIF DE LA MISE EN PLACE DU COMPLEXE VOLCANIQUE DU CAP D'OURS

La cartographie de détail (figure 10) permet d'observer une succession de faciès typiques de ceux des complexes sous-marins felsiques de dômes et de coulées. L'omniprésence des structures synvolcaniques, et les mouvements à caractères normaux qui leurs sont attribués, sont des éléments cohérents avec le modèle de Pearson et Daigneault (2009) qui interprètent le secteur comme étant la marge de la caldeira de New-Senator.

Un modèle évolutif, divisé en cinq étapes, est établi pour le complexe volcanique du Cap d'Ours. D'après les observations recueillies et les interprétations proposées, la séquence volcanique correspond à la partie orientale d'un complexe de dômes et coulées qui se met en place proche d'un réseau de failles synvolcaniques majeures associées à la subsidence de la caldeira de New Senator. Cette relation entre les failles synvoicanques et les centres d'émissions felsiques qui les surmontent est bien documentée dans la caldeira de Noranda (Gibson et Galley, 2007) et en particulier pour les gisements de Amulet-Millenbach (figure 40, Gibson et al., 1999.). Cette relation est également observée dans les environnements récents (Cole et al. 2005).

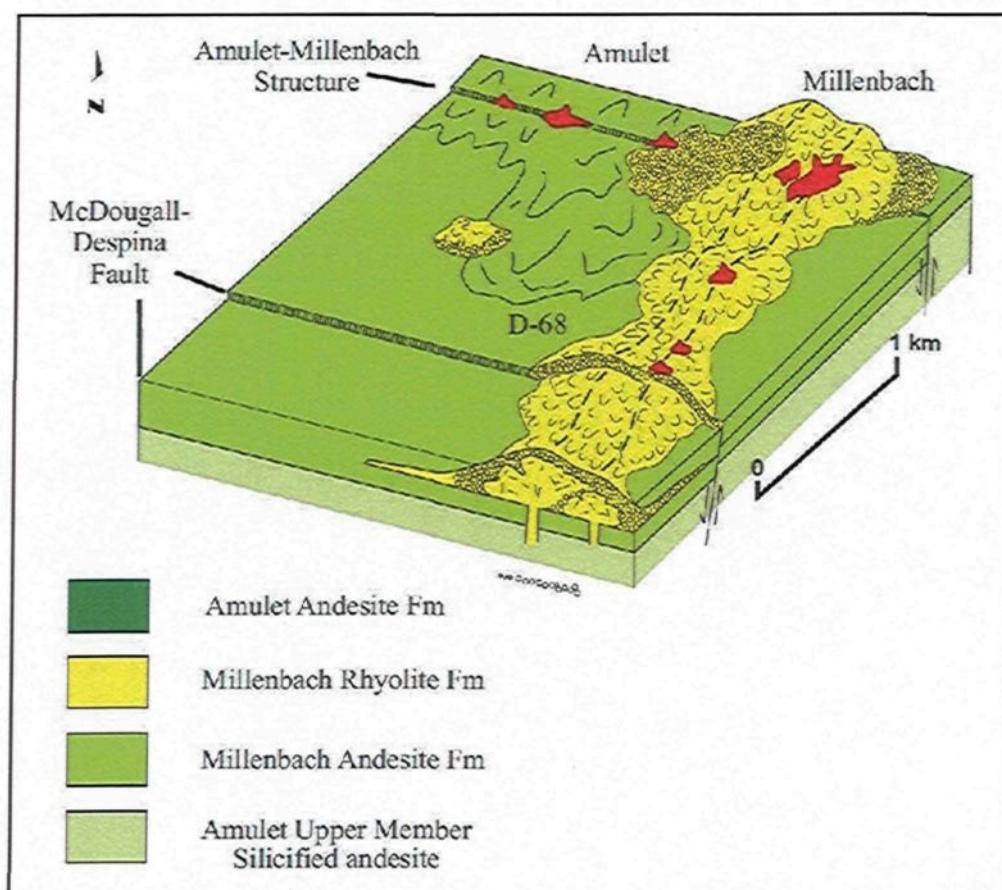


Figure 40 : Reconstruction de l'architecture volcanique dans le secteur des gisements SMV de Amulet et Millenbach montrant le lien étroit entre les structures synvolcaniques, les centres d'émissions felsiques et les sulfures massifs (en rouge). Modifiée de Gibson et al., 1999.

Plusieurs structures synvolcaniques associées à la subsidence de la caldeira de New Senator sont présentes dans le secteur du Cap d'Ours, et l'une d'elles, la faille de Glenwood, limite le complexe felsique à l'Est (figure 41A). La croissance du dôme peut être interprétée comme synchrone de la subsidence de la caldeira, de telle sorte que la faille constitue un mur le long duquel viennent s'accumuler les brèches en « casse-tête » (figure 41B).

Lors de la mise en place du complexe, l'eau de mer percole au sein de l'édifice (figure 41B,C), ce qui a pour conséquence la création de fractures perlitiques au sein de la matrice vitreuse. Ces textures sont plus abondantes dans le secteur Est, où la porosité des faciès bréchiques facilite la circulation des fluides. L'eau de mer lessive la silice dans les zones hyaloclastitiques du secteur Est. Cependant, lorsque ces fluides parviennent à proximité du centre d'émission, la température est trop élevée pour conserver leur état de stabilité, ce qui entraîne la précipitation de silice. Le fer et le magnésium rejetés des aires silicifiées vont se fixer dans les secteurs aujourd'hui chloritisés. Cette intense silicification au cœur de l'édifice volcanique est bien documentée dans les complexes felsiques sous-marins (De Rosen-Spence et al. 1980; Ylagan et al. 1996; Altaner et al., 2003). La zonalité en silice proximale et chlorite-séricite plus distale est donc le résultat d'une altération classique d'un complexe felsique sous-marin de dômes et coulées par une eau d'origine marine.

Une deuxième venue de magma felsique (figure 41D), correspondant à une phase porphyrique à quartz et feldspath (PQF), pénètre au sein de l'édifice par l'intermédiaire d'une autre structure synvolcanique. Cette hypothèse repose sur l'orientation sub-parallèle que possèdent les dykes de PQF et la faille de Glenwood. Le PQF vient participer à la croissance de l'édifice par la mise en place de différents lobes endogènes. À la suite de cela, un court hiatus dans le volcanisme permet le développement d'un système hydrothermal modeste qui utilise le réseau de dykes felsiques comme conduit de décharge. Ce laps de temps n'est certainement pas suffisamment long pour pouvoir former des minéralisations économiques, mais le passage de ces fluides permet tout de même la séricitisation des PQF, ainsi que la précipitation de pyrites poreuses, d'origine volcanogène et riches en métaux (type *py1*), dans les niveaux supérieurs les plus perméables. Nous pourrions supposer, que la faille de Glenwood aurait pu participer au drainage de l'eau de mer en profondeur et ainsi avoir servi comme une zone de recharge venant alimenter cette cellule hydrothermale.

Un épisode de magmatisme mafique vient recouvrir le complexe du Cap d'Ours (figure 41E) par l'intermédiaire de zones de faiblesses comme le soulignent les dykes mafiques orientés N070. La faille de Glenwood est un bel exemple. Elle a vraisemblablement servi de conduit hydrothermal, mais elle est réutilisée comme conduit magmatique pour alimenter les séquences de laves mafiques supérieures. Plusieurs failles demeurent actives dans le secteur, à l'image de celle du centre

d'émission du complexe du Cap d'Ours. Cette zone se manifeste aujourd'hui par de multiples injections de dykes mafiques qui sont directement orientés vers la mine Horne. Ce secteur complexe est en dehors de notre zone d'étude, cependant, la signature et la texture unique des pyrites de type *py3* (poreuses au centre et recristallisées en bordure) présentent à proximité de ce réseau de dykes peuvent être interprétées comme étant associées à un deuxième épisode de circulation hydrothermale qui aurait éventuellement pu alimenter la mine Horne. Quoique spéculatif, cette interprétation est cohérente avec la similarité des enrichissements métalliques mesurés dans les pyrites du Cap d' Ours et celles de la mine Horne qui suggère un lien entre les deux systèmes minéralisateurs.

6.4 FACTEURS DE CONTRÔLE

Bien qu'aucun dépôt économique ne soit mis en évidence sur le complexe du Cap d'Ours, les facteurs dominants qui ont conduit à la mise en place des minéralisations peuvent être établis. Le modèle présenté démontre l'importance des structures synvolcaniques qui, bien que difficiles à identifier sur le terrain, représentent des structures importantes pour la circulation de fluides hydrothermaux.

Outre les capacités de transport des métaux par les fluides minéralisateurs, qui nous sont inconnues, tous les facteurs semblaient réunis pour permettre la formation de minéralisations sur le Cap d'Ours (perméabilité structurale, fluide en quantité illimité, et proximité d'une source de chaleur). Il est donc probable que l'intervalle de temps entre la construction du complexe felsique et son recouvrement par des laves mafiques a été trop court, et n'a permis que la création d'une cellule de convection de faible durée et par conséquent de faible intensité.

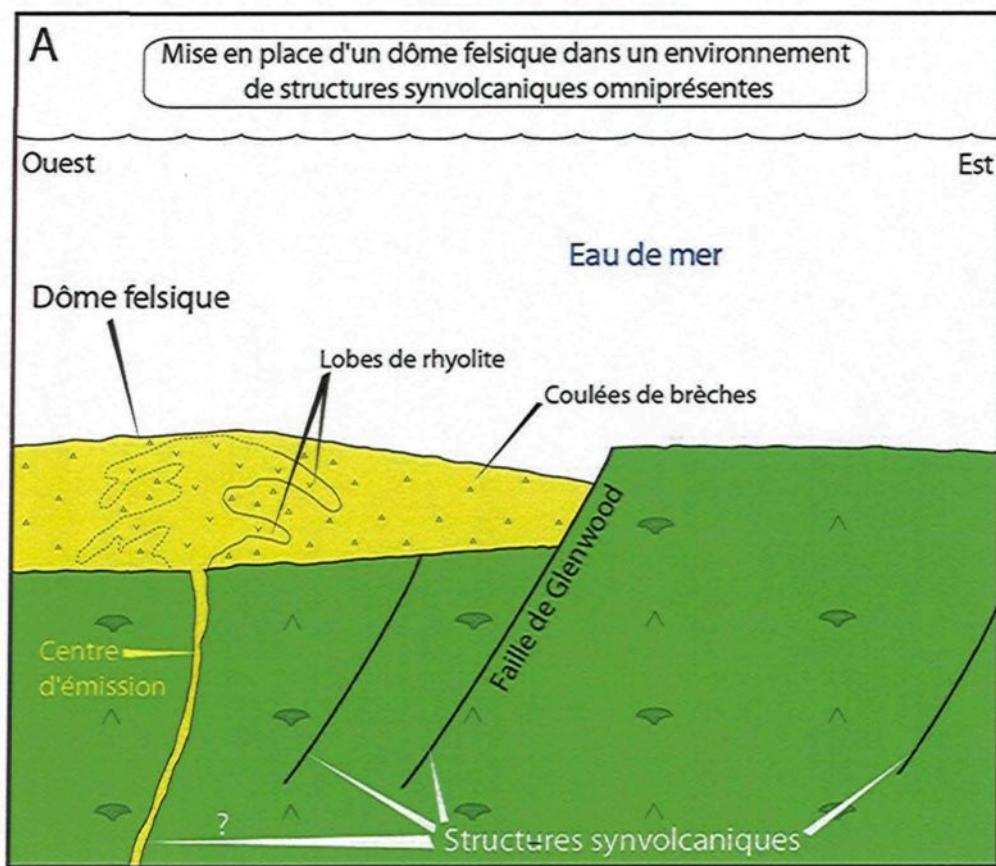


Figure 41 : Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.

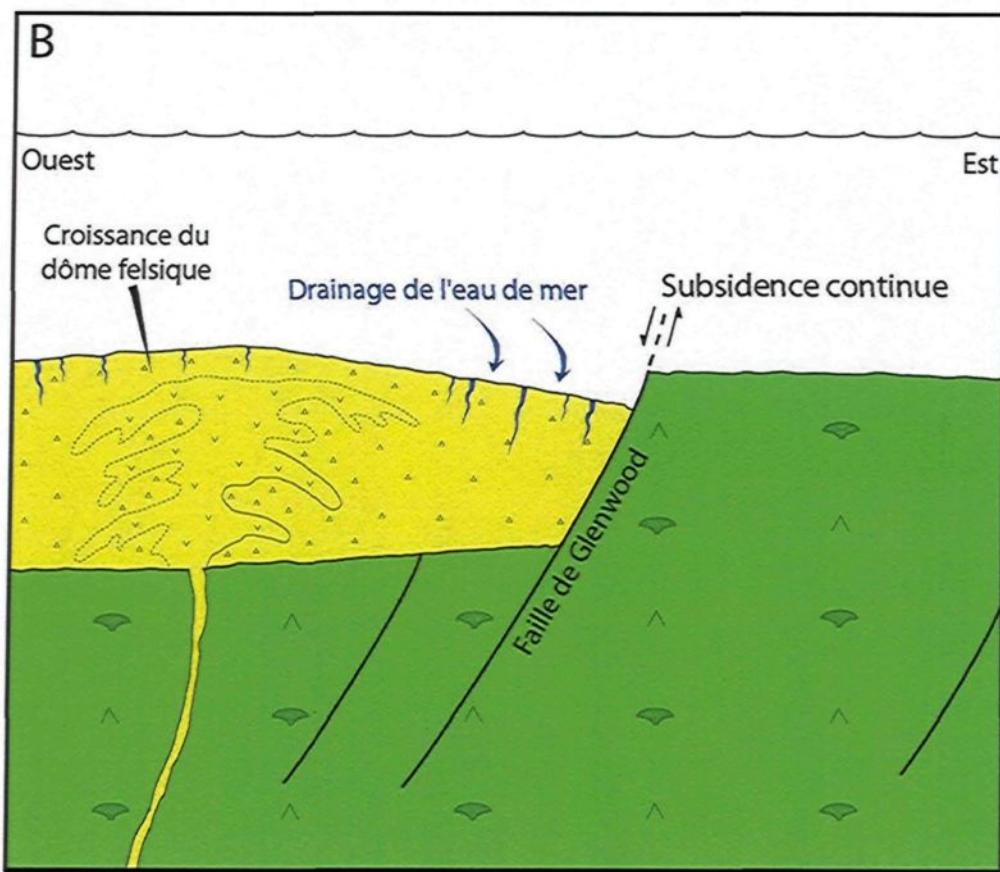


Figure 41 (suite): Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.

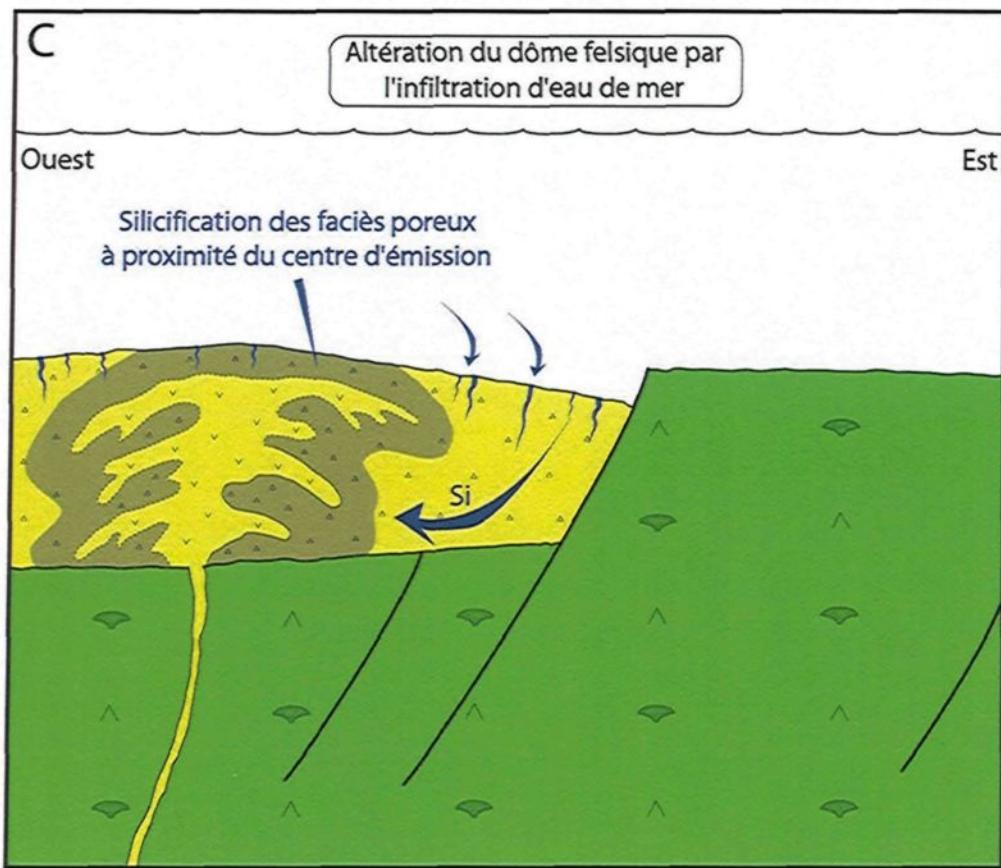


Figure 41 (suite): Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.

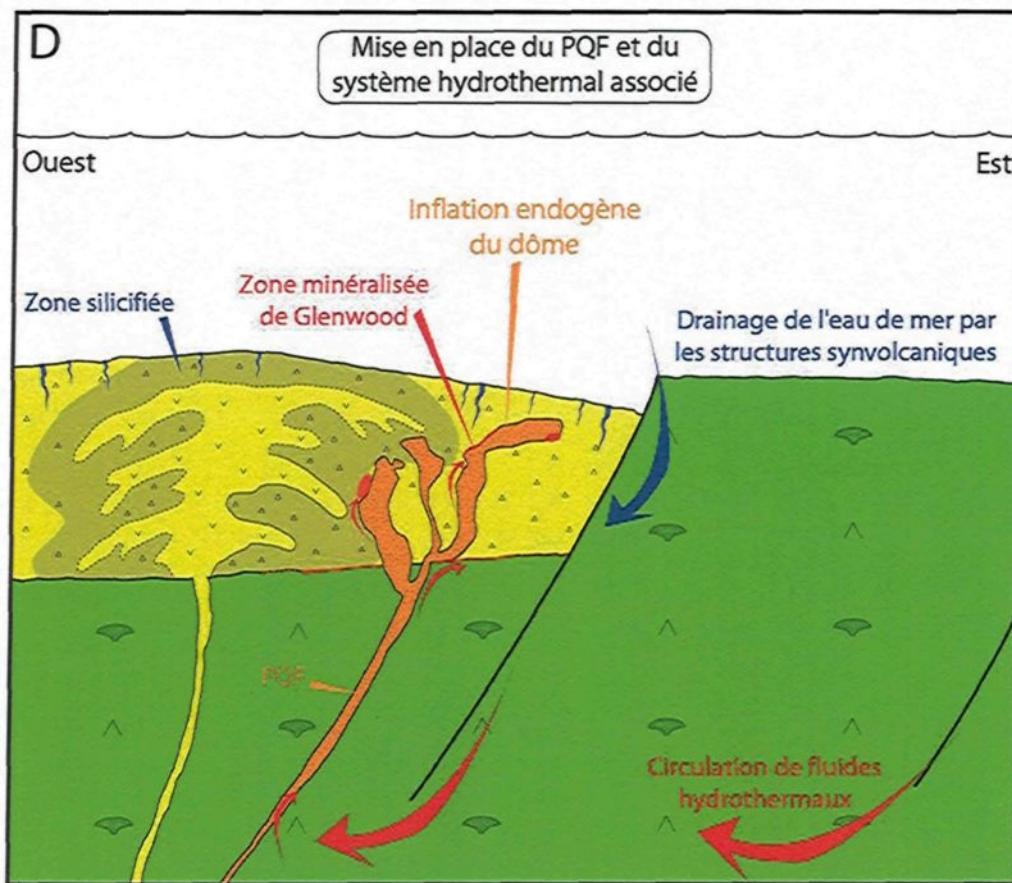


Figure 41 (suite): Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.

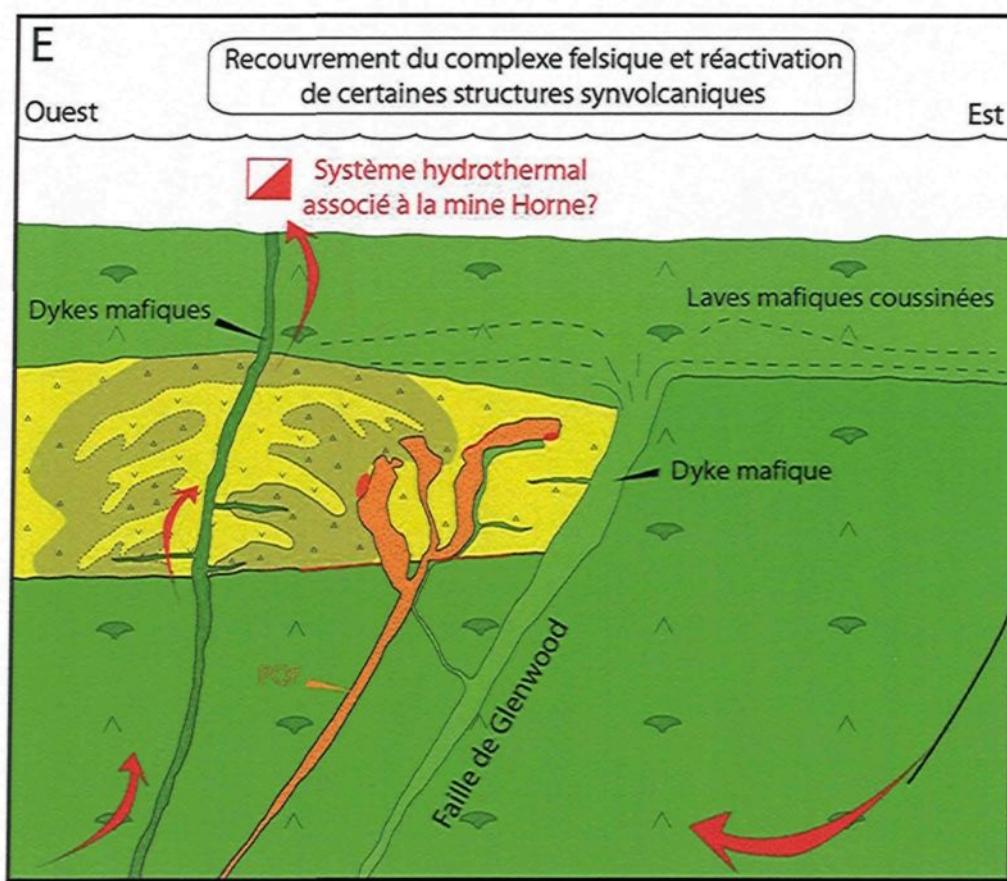


Figure 41 (suite): Modèle évolutif de la mise en place et de l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours.

CHAPITRE VII

CONCLUSIONS

7.1 INTRODUCTION

Le premier chapitre a permis la présentation du modèle de Pearson et Daigneault (2009) ainsi que celle du complexe du Cap d'Ours qui représente la marge Sud-Est de la caldeira de New-Senator. La grande quantité de matériel bréchique, la présence d'altération et de minéralisations ainsi que la proximité de la mine Horne ont permis de soulever une problématique relative aux processus de mise en place de la séquence volcanique du Cap d'Ours ainsi que des minéralisations qu'elle renferme.

Afin de résoudre cette problématique, cinq objectifs avaient été retenus :

- 1) identification des lithologies, des faciès volcaniques et reconstruction de l'environnement géologique (en collaboration avec L. Moore);
- 2) identification des structures synvolcaniques;

- 3) caractérisation des altérations;
- 4) caractérisation des minéralisations et comparaison de la signature géochimique des pyrites du Cap d'Ours avec celles de la mine Horne;
- 5) création d'un modèle évolutif expliquant la mise en place et l'histoire hydrothermale du Cap d'Ours;

Dans les sections suivantes les objectifs fixés seront repris un par un et les conclusions de l'étude seront énoncées. Ce bilan sera achevé par les contributions de ce projet.

7.2 ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

Au deuxième chapitre, les travaux de cartographie, ainsi que les résultats de pétrographie et de géochimie réalisés sur les affleurements du Cap d'Ours ont été présentés. Ceux-ci ont permis de documenter une succession de faciès particulière. Les principales conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- 1) Les processus de bréchifications sont d'origine autoclastique.
- 2) L'enchaînement des faciès de rhyolites massives-lobées à l'Ouest, vers des brèches rhyolitiques in-situ lobées, puis des coulées de brèches et enfin des brèches en « casse-tête » et typique de celle que l'on retrouve au sein des complexes felsiques de dômes et coulées sous-marins.

- 3) La direction des lobes indique que le centre d'émission est localisé à l'Ouest et par conséquent, le secteur étudié constitue la partie orientale de l'édifice volcanique.
- 4) Le PQF constitue une phase un peu plus différenciée, mais il reste génétiquement lié au dôme felsique qu'il recoupe et il vient participer à sa croissance sous forme de lobes endogènes.

7.3 STRUCTURES SYNVOLCANIQUES

Au troisième chapitre, les éléments structuraux présents sur le secteur d'étude ont été décrits. Un seul épisode de déformation a été enregistré par les roches, et il correspond à un raccourcissement Nord-Ouest – Sud-Est. Une étude de l'anisotropie planaire de cette déformation a permis de mettre en évidence que la déformation est hétérogène et dominée par un étirement vertical qui a pour conséquence la préservation des relations primaires (structures et textures) observées en plan. Plusieurs structures anté-déformation et donc synvolcaniques ont été identifiées. Voici les points importants concernant ces structures.

- 1) Plusieurs failles synvolcaniques sont présentes sur le terrain, et la principale est la faille de Glenwood qui constitue la limite Est du Cap d'Ours.
- 2) Un mouvement normal interprété le long de certaines structures est en accord avec le modèle de Pearson et Daigneault (2009).

- 3) Les fractures synvolcaniques à quartz-dolomite-épidote ont régulièrement une géométrie en échelon et elles semblent indiquer que la subsidence est relativement continue au cours de l'édification de la séquence volcanique.
- 4) Les structures synvolcaniques constituent des zones de faiblesses idéales pour la circulation de fluides hydrothermaux et/ou l'ascension de magma.

7.4 CARACTÉRISATION DES ALTÉRATIONS

Le chapitre quatre a été dédié à l'étude des altérations. L'omniprésence des faciès bréchiques a nécessité le développement d'une nouvelle méthodologie basée sur le micro-XRF. Une partie du chapitre a été consacrée à la démonstration de la validité et fiabilité des résultats obtenus. Les points clés de cette méthode sont présentés ci-dessous :

- 1) Le micro-XRF permet d'obtenir des compositions simultanées en éléments majeurs - s'étendant du sodium à l'uranium.
- 2) Grâce au système d'imagerie, le micro-XRF permet d'établir un lien en temps réel, entre la minéralogie, la texture et la composition chimique du matériel étudié. Des cartes de répartition d'éléments peuvent donc être réalisées.
- 3) La méthode permet de détecter des altérations de faibles intensités. L'acquisition et le traitement des données sont relativement rapides, et les coûts analytiques sont raisonnables. De nombreuses autres utilisations sont

possibles, comme l'étude des variations d'éléments chimiques au sein d'un minéral (ex : Fe et Mg dans la chlorite), le calcul de minéraux normatifs sur une zone homogène et la cartographie de la zonalité compositionnelle d'un minéral entre-autre.

L'application de cette méthode a permis de mettre en évidence deux types d'altération :

- 1) Une zonalité latérale, avec une altération en silice pouvant atteindre près de 90% de la composition des roches à proximité du centre d'émission, et une altération plus distale en chlorite/séricite. Il a été démontré que cette altération est typique de l'interaction entre un complexe felsique et l'eau de mer.
- 2) Une zonalité verticale, caractérisée par la séricitisation du PQF. Cette altération est indépendante de l'altération du complexe felsique et elle est le résultat de la circulation de fluides hydrothermaux.

7.5 CARACTÉRISATION DES MINÉRALISATIONS ET COMPARAISON DE LA SIGNATURE GÉOCHIMIQUE DES PYRITES DU CAP D'OURS AVEC CELLES DE LA MINE HORNE

Au chapitre 5, l'emphase a été portée sur l'étude des facteurs de contrôle de la minéralisation. Dans cette optique, après avoir documenté la répartition spatiale

des zones minéralisées, la signature en éléments traces des pyrites a été étudiée.

Voici les conclusions.

- 1) La minéralisation du Cap d'Ours, recoupées par la schistosité régionale et par des structures volcanogènes, est clairement d'origine volcanogène.
- 2) C'est le PQF, et la structure synvolcanique qu'il incarne, qui contrôle la minéralisation puisque les zones minéralisées sont localisées dans les faciès perméables sur les bordures du PQF. Les structures synvolcaniques ont donc joué un rôle majeur dans la circulation des fluides minéralisateurs.
- 3) L'étude pétrographique met en évidence, sur une base texturale, trois types de pyrites, *py1*, *py2* et *py3* qui sont respectivement d'origine volcanogènes, métamorphiques et volcanogènes-recristallisées.
- 4) L'analyse La-ICP-MS de ces différentes pyrites démontre qu'il y a un lien étroit entre la texture et la composition en éléments traces. Les pyrites volcanogènes sont une bonne estimation de la composition du fluide à partir duquel elles ont précipités et ont donc une signature enrichie en métaux en comparaison de la signature des pyrites métamorphiques.
- 5) La texture unique et la répartition spatiale spécifique des pyrites volcanogènes-recristallisées laissent supposer qu'elles sont issues d'un épisode hydrothermal d'origine volcanogène indépendant de celui qui a affecté le PQF et qui pourrait peut-être être relié à la genèse de la mine Horne.

Afin de tester un éventuel lien génétique avec la mine Horne, les signatures en éléments traces ont été comparées. Il est intéressant d'observer les mêmes enrichissements en métaux dans les pyrites volcanogènes des deux secteurs. Cet élément n'est cependant pas suffisant à lui seul pour établir une relation génétique indéniable. Néanmoins, il suggère un lien entre les deux systèmes minéralisateurs.

7.6 MODÈLE ÉVOLUTIF DE LA MISE EN PLACE ET DE L'HISTOIRE HYDROTHERMALE DU CAP D'OURS

Le chapitre six a permis d'intégrer l'ensemble des résultats dans un modèle métallogénique évolutif qui rend compte de la mise en place de la séquence volcanique et de l'histoire hydrothermale associée. Ce modèle met en évidence l'importance de la perméabilité des structures synvolcaniques pour le passage de fluide ou de magma. L'importance du facteur temps est aussi mise en évidence puisqu'il semblerait que le hiatus entre la mise en place du complexe felsique et son recouvrement par les laves mafiques n'a permis que le développement d'une cellule hydrothermale de trop courte durée et par conséquent, de faible intensité.

7.7 CONTRIBUTIONS

Outre l'élaboration du modèle métallogénique proposé, ce projet a permis le développement de nouvelles méthodes analytiques. L'utilisation du micro-XRF

montre d'excellents résultats pour le traitement des altérations hydrothermales et ouvre de nouvelles perspectives pour la science et l'exploration. De la même manière, l'étude de la composition en éléments traces des pyrites constitue elle aussi une méthode particulièrement intéressante dont les résultats sont plus que prometteurs.

RÉFÉRENCES

- Acocella V., 2007.** *Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas*. Earth-Science Reviews 85, 125-160.
- Acocella V., Cifelli R., Fucicello R., 2000.** *Analogue models of collapse calderas and resurgent domes*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 104, 81-96.
- Allen R.L., 1988.** *False pyroclastic textures in altered silicic lavas, with implications for volcanic-associated mineralization*. Economic Geology 83, 1424-1446.
- Altaner S.P., Ylagan R.F., Savin S.M., Aronson J.L., Belkin H.E., Pozzuoli A., 2003.** *Geothermometry, geochronology, and mass transfer associated with hydrothermal alteration of a rhyolitic hyaloclastite from Ponza Island, Italy*. Geochemica et Cosmochimica Acta 67-2, 275-288.
- Barrett T.J., Cattalani S., MacLean W.H., 1991.** *Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. I. The Horne Mine*. Canadian Journal of Earth Sciences 28, 464-488.
- Barrette J.G., 1981.** *Rapport de propriété – Explorateur du Nord Québécois Ltee – Bloc 125. Canton de Rouyn*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. GM 37450.
- Barrette J.G., 1982.** *Rapport de propriété – Explorateur du Nord Québécois Ltee – Bloc 125. Canton de Rouyn*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. GM 38589.
- Barrie C.T., Hannington M.D., 1999.** *Classification of volcanic-associated massive sulfide deposits based on host-rock composition: Reviews*. Society of Economic Geology 8, 1-11.
- Bedard L.P., Barnes S.J., 2002.** *Comparison of N-type semi-planar and coaxial INAA detectors for 33 Geochemical reference samples*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 254, 485-497.
- Brilia A., Sabatini G., Troja F., 1979.** *A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems*. Mineralium Deposita 14, 353-374.

- Butterfield H.M., 1933.** *Geological Report – Glenwood Mining Company, Limited – Rouyn, Québec. North Claim.* Ministère des Mines, Québec. GM 20561.
- Camiré G., Watkinson D.H., 1989.** *Volcanic stratigraphy and structure in the Hunter Creek Fault area, Rouyn-Noranda, Quebec.* Canadian Journal of Earth Sciences 27, 1348-1358.
- Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E., 2005.** *Cristallographic controls on trace-element incorporation in auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina.* The Canadian Mineralogist 43, 951-963.
- Chown E.N., Daigneault R., Mueller W., and Mortensen J.K., 1992.** *Tectonic evolution of the Northern volcanic zone, Abitibi belt, Quebec.* Canadian Journal of Earth Sciences 29, 2211-2225.
- Cole J.W., Milner D.M., Spinks K.D., 2005.** *Calderas and calderas structures: a review.* Earth-Science Reviews 69, 1-26.
- Corfu F., 1993.** *The evolution of the southern Abitibi greenstone belt in light of precise U-Pb geochronology. A special issue devoted to Abitibi ore deposits in a modern context.* Economic Geology 88, 1323-1340.
- Craig J.R., Vokes F.M., Solberg T.N., 1998.** *Pyrite: physical and chemical textures.* Mineralium Deposita 34, 82-101.
- Cregheur P., 1982.** *Report on surface sampling on property of Northern Quebec explorers limited. Block 125. Rouyn township, Quebec.* Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. GM 39768. 3.
- Daigneault R., Mueller W.U., and Chown E.N., 2004.** *Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous history of arc development, accretion and collision.* In Eriksson P., Altermann W., Nelson D., Mueller W., Catuneanu O. and Strand K., eds., *Developments in Precambrian geology/Tempos of events in Precambrian time.* Amsterdam, Elsevier, 88-103.
- De Ronde C.E.J., Hannington M.D., Stoffers P., Wright I.C., Ditchburn R.G., Reyes A.G., Baker E.T., Massoth E.T., Lupton J.E., 2005.** *Evolution of a submarine magmatic-hydrothermal system: Brothers Volcano, Southern Kermadec Arc, New-Zealand.* Economic Geology 100, 1097-1133.
- De Rosen-Spence A.F., 1976.** *Stratigraphy, development and petrogenesis of the central Noranda volcanic pile, Noranda, Quebec.* Ph.D. thesis, University of Toronto, Toronto, Ontario, 166 p.

- De Rosen-Spence A.F., Provost G., Dimroth E., Gochnauer K., Owen V., 1980.** *Archean subaqueous felsic flows, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada, and their quaternary equivalents.* Precambrian Research 12, 43-77.
- Dimroth E., Imreh, L., Rocheleau, M., Goulet, N., 1982.** *Evolution of the south-central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part I. Stratigraphy and paleogeographic model.* Canadian Journal of Earth Sciences 19, 1729-1758.
- Dubé B., Gosselin P., Mercier-Langevin P., Hannington M., Galley A., 2007.** *Gold-rich volcanogenic massive sulphide deposits; in Mineral Deposits of Canada: a Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods,* (ed.) W.D. Goodfellow: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 75-94.
- Finlow-Bates T., Stumpfl E.F., 1981.** *The behaviour of the so-called immobile element in hydrothermally altered rocks associated with volcanogenic submarine-exhalative ore deposits.* Mineralium Deposita 16, 319-328.
- Fiske R., Naka J., Iizasa K., Yuasa M., Klaus A., 2001.** *Submarine silicic caldera at the front of the Izu-Bonin arc, Japan: Voluminous seafloor eruptions of rhyolite pumice.* GSA Bulletin 113-7, 813-824.
- Fournier R.O., 1985.** *The behavior of silica in hydrothermal solutions.* Reviews in Economic Geology 2, 45-61.
- Franklin J.M., Gibson H.L., Jonasson I.R., Galley A.G., 2005.** *Volcanic Massive Sulfide Deposits.* Economic Geology - 100th Anniversary Volume, 523-560.
- Franklin J.M., Sangster D.M., Lydon J.W., 1981.** *Volcanic-associated massive sulfide deposits.* Economic Geology – 75th Anniversary Volume, 485-627.
- Gaboury D., Graham S., 2004.** *In-situ trace elements by LA-ICP-MS in metamorphosed pyrites as pathfinder for hydrothermal conditions.* Geochimica et Cosmochimica Acta, Abstract of the 13th annual V.M. Goldschmidt Conference Copenhagen, Danmark, June 5-11, 2004, p. A303.
- Gaboury D., Pearson V., 2008.** *Rhyolite geochemical signatures and association with volcanic massive sulfide deposits: Examples from the Abitibi belt, Canada.* Economic Geology 103, 1531-1562.
- Galley A.G., 1993.** *Characteristics of semi-conformable alteration zones associated with volcanogenic massive sulphide districts.* Journal of Geochemical Exploration 48, 175-200.

- Galley A.G., Hannington M.D., and Jonasson I.R., 2007.** *Volcanogenic massive sulphide deposits*, in Goodfellow W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 141-161.
- Gauthier N., 1980.** *Étude pétrographique et sédimentologique des rhyolites du complexe de Glenwood, région de Rouyn-Noranda, Québec*. Thèse (M.Sc.) Université de Montréal.
- Gélinas L., Ludden J.N., 1984.** *Rhyolitic volcanism and the geochemical evolution of an Archean central ring complex : the Blake River Group volcanics of the southern Abitibi belt, Superior province*. Physics of the Earth and Planetary Interiors 35, 77-88.
- Geshi N., Shimano T., Chiba T., Nakada S., 2002.** *Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan*. Bulletin of Volcanology 64, 55-68.
- Gibson H.L., 2005.** *Volcanic-hosted ore deposits*, in Marti J., and Ernst G.J., eds., Volcanoes and the Environment. Cambridge University Press. 333-386.
- Gibson H.L., Watkinson D.H., 1990.** *Volcanogenic massive sulphide deposits of the Noranda cauldron and shield volcano, Quebec*. In: Rive M., Verpaelst P., Gagnon Y., Lulin J.-M., Riverin G., Simard A. (Eds.), The Northwestern Quebec Polymetallic Belt: A Summary of 60 Years of Mining Exploration. Can. Inst. Min. Metal., Spec., vol. 43, pp. 119–132.
- Gibson H.L., Galley A.G., 2007.** *Volcanogenic Massive Sulfide deposits of the Archean, Noranda district, Quebec*. In: Goodfellow W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Special Publication No. 5, Mineral Deposits Division, Geological Association of Canada, 533-552.
- Gibson H.L., Morton R.L. and Hudak G.J., 1999.** *Submarine volcanic processes, deposits and environments favorable for the location of volcanic- associated massive sulphide deposits*, in Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., Volcanic-Associated Massive Sulphide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings. Reviews in Economic Geology 8, 13-51.
- Gibson H.L., Watkinson D.H., Comba C.D.A., 1983.** *Silicification: hydrothermal alteration in an Archean geothermal system within the Amulet Rhyolite formation, Noranda, Quebec*. Economic Geology 78, 954-971.

- Hannington M.D., Santaguida F., Kjarsgaard I.M., Cathles L.M., 2003.** *Regional scale hydrothermal alteration in the central Blake River Group, western Abitibi, Canada: implications for VMS prospectivity.* Mineralium Deposita 38, 393–422.
- Hart T.R., Gibson H.L., Lesher C.M., 2004.** *Trace element geochemistry and petrogenesis of felsic volcanic rocks associated with volcanogenic massive Cu-Zn-Pb sulfide deposits.* Economic Geology 99, 1003-1013
- Herzig P.M., Hannington M.D., 1995.** *Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor. A review.* Ore Geology Reviews 10, 95-115.
- Hubert C., Trudel P., Gélinas L., 1984.** *Archean wrench fault tectonics and structural evolution of the Blake River Group, Abitibi belt, Quebec.* Canadian Journal of Earth Sciences 21, 1024-1032.
- Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., Cooke D.R., Both R.A., 1995.** *Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I. Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II. Selenium levels in pyrite: comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems.* Economic Geology 90, 1167-1196.
- Iisaza K., Fiske R.S., Ishizuka O., Yuasa M., Hashimoto J., Ishibashi J., Nakaj., Horii Y., Fujiwara Y., Imai A., Koyama S. 1999.** *A Kuroko-Type Polymetallic Sulfide Deposit in a Submarine Silicic Caldera.* Science 283, 975-977.
- Kazuhiko K., Takeuchi K., Yamamoto T., Hoshizumi H., 1991.** *Subaqueous rhyolite block lavas in the Miocene Ushikiri Formation, Shimane Peninsula, SW Japan.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 46, 241-253.
- Kelley K.D., Leach D.L., Johnson C.A., Clark J.L., Fayek M., Slack J.F., Anderson V.M., Ayuso R.A., Ridley W.I., 2004.** *Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: implications for ore formation.* Economic Geology 99, 1509-1532.
- Kerr D.L., Mason R., 1990.** *A re-appraisal of the geology and ore deposits of the Horne mine complex at Rouyn-Noranda, Quebec; in* The Northwestern Quebec Polymetallic Belt, (ed.) M. Rive, P. Verpaet, Y. Gagnon, J.M. Lulin, G. Riverin and A. Simard; The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special Volume 43, 153-165.

- Kerr D.J., Gibson H.L., 1993.** A comparison of the Horne volcanogenic massive sulfide deposit and intracauldron deposits of the Mine Sequence, Noranda, Quebec. *Economic Geology* 88, 1419-1442.
- Large R.R., Gemmell J.B., Paulick H., 2001.** The Alteration Box Plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide deposits. *Economic Geology* 96, 957-971.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang K., 2007.** Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology* 102, 1233-1267.
- Lipman P.W., 1997.** Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bulletin of Volcanology* 59, 198-218.
- Loftus-Hills G., Solomon M., 1967.** Cobalt, Nickel and Selenium in sulphides as indicators of ore genesis. *Mineralium Deposita* 2, 228-242.
- MacLean W.H., Kranidiotis P., 1987.** Immobile elements as monitors of mass transfert in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology* 82, 951-962.
- McPhie J., Allen R.L., 1992.** Facies architecture of mineralized submarine volcanic sequences: Cambrian Mount Read Volcanics, Western Tasmania. *Economic Geology* 87, 587-596.
- McPhie J., Doyle M., Allen R., 1993.** Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, Hobart, Tasmania. 198 p.
- Mercier-Langevin P., Dubé B., Hannington M.D., Davis D.W., Lafrance B., Gosselin G., 2007.** The LaRonde Penna Au-rich volcanogenic massive sulphide deposit, Abitibi greenstone belt, Quebec: Part I. Geology and geochronology. *Economic Geology* 102, 585-609.
- Monecke T., Gibson H., Dubé B., Laurin J., Hannington M.D., Martin L., 2008.** Geology and volcanic setting of the Horne deposit, Rouyn-Noranda, Quebec: initial results of a new research project. Geological Survey of Canada, Current Research 2008-9, 16 p.
- Mortensen J.K., 1993a.** U-Pb geochronology of the eastern Abitibi Subprovince. Part 1. Chibougamau-Matagami-Joutel region. *Canadian Journal of Earth Sciences* 30, 11-28.

- Mortensen J.K., 1993b.** *U-Pb geochronology of the eastern Abitibi subprovince. Part2. Noranda-Kirkland lake area.* Canadian Journal of Earth Sciences 30, 29-41.
- Mueller W.U., Mortensen J.K., 2002.** *Age constraints and characteristics of subaqueous volcanic construction, the Archean Hunter Mine Group, Abitibi, greenstone belt.* Precambrian Research 115, 119-152.
- Mueller W.U., Daigneault R., Gaboury D., Pearson V., 2008.** *Effusive and explosive subaqueous volcanism in the Abitibi Greenstone Belt: Ocean floor and subaqueous caldera volcanism.* Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Québec 2008, Guidebook to field trip A1, 80 p.
- Mueller W.U., Daigneault R., Mortensen J., and Chown E.H., 1996.** *Archean terrane docking: Upper crust collision tectonics, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada.* Tectonophysics 265, 127-150.
- Mueller W.U., Stix J.B., White J.D.L., Corcoran P.L., Lafrance B., Daigneault R., 2008.** *Characterisation of Archean subaqueous calderas in Canada: Physical volcanology, Carbonate-rich hydrothermal alteration and a new exploration model.* In Gottsmann J. and Martí J., Developments in Volcanology Volume 10 : Caldera Volcanism : Analysis, Modelling and Responses. 181-232.
- Mueller W.U., Stix J., Corcoran P.L., Daigneault R., 2009.** *Subaqueous calderas in the Archean Abitibi greenstone belt: An overview and new ideas,* Ore Geology Reviews, doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.12.003
- Ohmoto H., 1978.** *Submarine calderas: a key to the formation of volcanogenic massive sulfide deposits.* Mining Geology 89, 1687-1696.
- Ohmoto H., 1996.** *Formation of volcanogenic massive sulfide deposits : the Kuroko perspective.* Ore Geology Reviews 10, 135-177.
- Paquin D., Tremblay A., Faure S., 2007.** *La faille synvolcanique de Glenwood dans la caldeira de New-Senator, Blake River, Abitibi.* Recueil de résumés du Carrefour des Sciences de la Terre UQAC.
- Pearson V., Daigneault R., 2009.** *An Archean megacaldera complex: the Blake River Group, Abitibi greenstone belt.* Precambrian Research 168, 66-82.
- Powell W.G., Carmichael D.M., Hodgson C.J., 1995.** *Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec.* Canadian Journal Earth Sciences 32, 787-805.

- Richard M., Gaucher E., 1984.** *Rapport de Forages – Bloc 125.* Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec. GM 41171.
- Ringwood A.E., 1956.** *Melting relationships of Ni-Mg olivines and some geochemical implications.* Geochem. Cosmochim. Acta 10, 297-303.
- Roche O., Druitt T.H., Merle O., 2000.** *Experimental study of caldera formation.* Journal of Geophysical Research 105, 395-416.
- Rodney A.L., PAR Weihed, and the Global VMS Research Project Team, 2002.** *Global comparisons of volcanic-assiciated massive sulfide districts.* Geological Society of London Special Publication 204, 13-37.
- Roedder E., 1968.** *The noncolloidal origin of “colloform” textures in sphalerite ores.* Economic Geology 63, 451-471.
- Rytuba J.J., 1994.** *Evolution of volcanic and tectonic features in caldera settings and their importance in the localization of ore deposits.* Economic Geology 89, 1687-1696.
- Skirrow R.G., Franklin J.M., 1994.** *Silicification and metal leaching in semiconformable alteration beneath the Chisel Lake massive sulfide deposit, Snow Lake, Manitoba.* Economic Geology 89, 31-51.
- Stix J., Kennedy B., Hannington M., Gibson H., Fiske R., Mueller W., Franklin J., 2003.** *Caldera-forming processes and the origin of submarine volcanogenetic massive sulfide deposit.* Geology (Boulder) 31-4, 375-378.
- Sun S. McDonough W.F., 1989.** *Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes.* From : Saunders A.D and Norry M.J (eds), Magmatism in the Ocean Basins. Geological society Special Publication 42, 313-345.
- Tassé N., Gauthier N., Lajoie J., Gélinas L., 1982.** *Les volcanoclastites du complexe rhyolitique du Cap d'Ours, Rouyn-Noranda, Québec : Exemples des mécanismes de fragmentation et de mise en place dans le volcanisme felsique.* Journal Canadien des Sciences de la Terre, 19-7, 1337-1349.
- Urabe T., Yusa M., Nakao S., 1987.** *Hydrothermal sulfides from a submarine caldera, the Shichito-Iwojima Ridge, Northwestern Pacific.* Marine Geology 74, 295-299.
- Von Damm K.L., Bischoff J.L., Rosenbauer R.J., 1991.** *Quartz solubility in hydrothermal seawater : an experiment study and equation describing quartz*

- solubility for up to 0,5 M NaCl solutions.* American Journal of Science 291, 977-1007.
- Wilson M.E., 1941.** *Noranda district, Québec.* Geological Survey of Canada, Memoir 229, 162.
- Wilson S.A., Ridley W.I., Koenig A.E., 2002.** *Development of sulphide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique.* Journal of Analytical Atomic Spectrometry 17, 406-409.
- Yamagishi H., 1991.** *Morphological and sedimentological characteristics of the Neogene submarine coherent lavas and hyaloclastites in Southwest Hokkaido, Japan.* Sedimentary Geology 74, 5-23.
- Ylagan R.F., Altaner S.P., Pozzuoli A., 1996.** *Hydrothermal alteration of a rhyolitic hyaloclastite from Ponza Island, Italy.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 74, 215-231.

ANNEXE 1**LISTE DES ÉCHANTILLONS**

Échantillon	Coordonnées UTM-Zone 17		Analyse XRF	Analyse micro-XRF	Analyse La-ICP- MS sur pyrite
	Est	Nord			
DG-01	648625	5344181		X	X
DG-02	648599	5344178		X	
DG-03	648574	5344175		X	
DG-04	648545	5344172		X	
DG-05	648421	5344163		X	
DG-06	648497	5344158		X	
DG-07	648474	5344146	X	X	
DG-08	648449	5344148		X	
DG-09	648428	5344135		X	
DG-10	648576	5344133		X	
DG-11	648595	5344154		X	
DG-12	648629	5344219		X	
DG-13	648645	5344307		X	
DG-14	648527	5344122		X	
DG-15	648482	5344112		X	
DG-16	648479	5344225		X	
DG-17	648523	5344221		X	
DG-18	648568	5344230		X	
DG-19	648593	5344274	X	X	
DG-20	648553	5344266		X	
DG-21	648501	5344331	X	X	
DG-22	648442	5344311		X	
DG-23	648398	5344328		X	
DG-24	648401	5344278		X	
DG-25	648347	5344277		X	
DG-26-a	648299	5344278		X	X
DG-26-b	648306	5344276		X	
DG-27	648243	5344274		X	
DG-28	648229	5344243	X	X	
DG-29	648179	5344257		X	X
DG-30	648115	5344247		X	
DG-31	648079	5344248		X	
DG-32	648123	5344199	X	X	
DG-33	648074	5344201		X	

Échantillon	Coordonnées UTM-Zone 17		Analyse XRF	Analyse micro-XRF	Analyse La-ICP- MS sur pyrite
	Est	Nord			
DG-34	648026	5344197		X	
DG-35	648075	5344200		X	X
DG-36	648125	5344145		X	
DG-37	648080	5344145		X	
DG-38	648025	5344151		X	
DG-39	647974	5344154		X	
DG-40	647928	5344151	X	X	
DG-41	647925	5344102		X	X
DG-42	647972	5344099	X	X	
DG-43	648023	5344102		X	
DG-44	648023	5344046		X	
DG-45	648076	5344049		X	
DG-46	648127	5344040		X	
DG-47	648151	5344149		X	
DG-48	648150	5344199	X	X	
DG-49	647864	5344004		X	
DG-50	648075	5344000		X	
DG-51	648126	5343991		X	
DG-52	648079	5343957		X	
DG-53	648032	5343948		X	
DG-54	648208	5344102		X	
DG-55	648381	5344278			X
DG-56	648378	5344277			X
DG-57	648386	5344276			X
DG-58	648388	5344281			X
DG-59	648363	5344272			
DG-60	648397	5344229		X	
DG-61	648333	5344172		X	
DG-62	648560	5344324		X	
DG-63	648590	5344325		X	X
DG-64	648567	5344307			X
DG-65	648564	5344303			X
DG-66	648561	5344304			X
DG-67	648550	5344303			X
DG-68	648392	5344288			X

ANNEXE 2**DONNÉES LITHOGÉOCHIMIQUES BRUTES**

Limites de détection Fluorescence-X – Données ALS-Chemex

Éléments	Limite de Détection (exprimées en %)
SiO ₂	0,01
Al ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	0,01
CaO	0,01
MgO	0,01
Na ₂ O	0,01
K ₂ O	0,01
Cr ₂ O ₃	0,01
TiO ₂	0,01
MnO	0,01
P ₂ O ₅	0,01
SrO	0,01
BaO	0,01
LOI	0,01

Résultats des analyses géochimiques XRF :

ECHANTILLONS	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	Cr2O3	TiO2	MnO	P2O5	SrO	BaO	LOI	Total
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
DG-07- F	78,99	9,45	2,11	2,5	0,22	4,52	0,13	-0,01	0,24	0,07	0,057	0,01	-0,01	1,54	99,85
DG-19- F	80,83	8,61	1,94	1,73	0,07	4,34	0,17	-0,01	0,25	0,08	0,039	0,01	0,01	1,3	99,37
DG-28 -F	75,45	9,93	4,87	1,97	0,26	4,05	0,63	-0,01	0,28	0,07	0,038	0,01	0,02	2,25	99,83
DG-32 -F	81	9,5	1,74	1,36	0,03	5,01	0,06	-0,01	0,23	0,04	0,046	0,01	0,01	0,85	99,88
DG-42 -F	78,86	10,37	3	1,13	0,19	3,91	0,78	-0,01	0,19	0,04	0,042	-0,01	0,01	0,97	99,49
DG-07-M	73,88	10,94	6,34	0,6	1,31	3,73	0,24	-0,01	0,33	0,14	0,037	0,01	-0,01	1,61	99,17
DG-19-M	63,4	17,65	6,74	0,85	1,01	7,65	0,13	-0,01	0,28	0,07	0,037	0,02	-0,01	2,01	99,85
DG-28-M	73,01	12,87	5,18	0,69	1,02	3,19	1,47	-0,01	0,26	0,07	0,048	-0,01	0,05	2,08	99,94
DG-32-M	67,18	13,86	7,39	1,11	1,57	4,44	0,78	-0,01	0,35	0,13	0,07	0,01	0,05	2,43	99,37
DG-42-M	70,06	11,3	5,76	3,45	0,65	3,03	1,11	-0,01	0,21	0,08	0,038	-0,01	0,01	3,6	99,3
DG-21	68,96	12,1	4,41	3,62	1,12	2,6	1,49	-0,01	0,31	0,17	0,066	0,01	0,04	4,47	99,36
DG-40	75,51	12,12	2,67	1,35	0,37	5,08	0,65	-0,01	0,24	0,04	0,042	-0,01	0,02	1,56	99,65
DG-40 (Duplicates)	75,32	12,4	2,52	1,37	0,39	5,22	0,66	-0,01	0,23	0,04	0,043	-0,01	0,02	1,52	99,73
DG-40 (Duplicates)	75,5	12,16	2,67	1,43	0,45	5,02	0,66	-0,01	0,26	0,04	0,043	0,01	0,02	1,59	99,84
DG-48	70,01	13,7	3,81	2,32	1,07	4,37	1,16	-0,01	0,48	0,11	0,074	0,02	0,04	2,71	99,87
DG-48 (Duplicates)	70,28	13,4	3,69	2,28	1,03	4,32	1,13	-0,01	0,39	0,11	0,075	0,01	0,04	2,62	99,38
KPT (Standard)	53,78	14,59	12,95	6,47	4,06	2,48	1,57	0,02	0,9	0,15	0,15	0,03	0,05	1,94	99,15
R-2003-81 (Standard)	73,43	9,54	3	3,86	0,18	4,29	0,32	-0,01	0,3	0,13	0,035	0,01	0,01	3,67	98,77

Résultats des analyses lithogéochimiques en fonction des faciès volcaniques :

	Fragments					Matrice				
	DG-07-F	DG-19-F	DG-28-F	DG-32-F	DG-42-F	DG-07-M	DG-19-M	DG-28-M	DG-32-M	DG-42-M
SiO ₂ (%)	68	90	85	85	86	77	71	78	67	81
TiO ₂ (%)	0,26	0,19	0,20	0,22	0,21	0,20	0,31	0,28	0,38	0,25
Al ₂ O ₃ (%)	9,7	8,9	10,1	9,6	10,7	11,3	17,8	13,1	14,2	11,6
Fe ₂ O ₃ (%)	0,39	0,25	2,79	0,27	1,04	5,97	6,12	4,23	6,51	4,50
MnO (%)	0,051	0,061	0,040	0,021	0,017	0,134	0,058	0,052	0,121	0,068
MgO (%)	0,18	0,16	0,29	0,16	0,28	1,32	1,02	0,90	1,37	0,47
CaO (%)	2,6	1,9	2,1	1,4	1,2	0,6	0,9	0,7	1,2	3,8
Na ₂ O (%)	4,85	4,74	4,25	5,27	4,13	3,94	8,08	3,28	4,61	3,20
Na ₂ O (%)	4,8	4,7	4,2	5,3	4,2	3,9	8,0	3,3	4,6	3,3
K ₂ O (%)	0,13	0,09	0,64	0,16	0,78	0,16	0,11	1,50	0,82	1,10
K ₂ O (%)	0,4	0,5	0,7	0,3	0,7	0,6	0,3	1,4	1,0	1,2
Total (%)	86	106	105	101	104	101	105	102	96	106
Ag (ppm)	0,38	0,33	0,30	0,25	0,20	0,61	0,45	0,27	0,37	0,23
As (ppm)	0,59	0,28	2,53	0,28	0,16	0,18	0,36	0,25	0,52	0,19
Au (ppb)	1,3	1,6	1,8	1,0	1,0	1,1	1,8	1,2	2,3	1,1
Ba (ppm)	64	46	212	24	77	51	80	517	434	93
Ba (ppm)	100	102	202	108	175	145	207	459	375	103
Cd (ppm)	0,03	0,11	0,09	0,11	0,08	0,13	0,18	0,10	0,12	0,10
Ce (ppm)	32,9	29,8	49,4	34,5	44,9	27,7	28,1	56,7	37,0	37,2
Cl (ppm)	56	90	58	99	45	90	70	99	67	64
Co (ppm)	0,6	0,8	2,7	0,5	0,5	1,2	1,7	0,7	1,0	1,5
Cr (ppm)	1,3	1,5	1,4	2,6	3,0	1,2	2,5	2,0	3,0	2,5
Cs (ppm)	0,59	0,58	0,69	0,39	0,60	0,94	0,71	1,38	0,47	0,88
Cu (ppm)	110	58	55	66	59	111	147	79	110	58
Dy (ppm)	4,6	4,3	6,8	8,1	5,2	5,1	5,9	9,0	6,4	7,4
Eu (ppm)	1,49	0,81	1,75	1,49	1,53	0,69	1,35	1,98	1,51	1,51
Hf (ppm)	4,00	3,94	4,89	4,22	4,47	4,56	5,92	6,16	5,81	5,49
Ho (ppm)	0,71	0,83	1,01	1,27	0,83	0,72	0,79	1,49	1,05	1,13
In (ppm)	0,06	0,06	0,03	0,08	0,07	0,05	0,09	0,10	0,17	0,11
Ir (ppb)	7	6	5	4	5	7	9	4	4	4
La (ppm)	15,20	12,65	20,69	14,54	20,06	11,43	10,85	24,75	15,57	15,84
Lu (ppm)	0,357	0,573	0,590	0,576	0,437	0,646	0,450	0,930	0,786	0,794
Mo (ppm)	0,8	0,8	0,7	0,9	0,5	0,8	1,0	0,7	0,6	0,5
Nd (ppm)	16,9	19,2	28,3	21,1	26,2	13,5	15,6	33,3	20,7	18,4
Ni (ppm)	52	65	32	25	18	60	49	33	44	17
Rb (ppm)	11	5	13	12	20	5	6	35	19	31
S (%)	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	1,6	0,9	1,6	0,9
Sb (ppm)	0,17	0,17	0,22	0,05	0,06	0,13	0,33	0,13	0,05	0,06
Sc (ppm)	7,12	7,69	10,58	6,29	5,17	7,66	15,80	15,47	22,70	13,60
La (ppm)	1,6	1,5	1,3	1,2	1,0	1,5	2,0	1,2	1,3	1,0
Sr (ppm)	4,907	4,207	6,771	6,567	6,012	4,017	4,048	8,291	5,372	5,674
Sr (ppm)	132	228	142	132	138	155	195	152	253	149
Ta (ppm)	0,51	0,67	0,71	0,66	0,64	0,60	0,82	0,93	0,84	0,83
Tb (ppm)	0,84	0,76	1,15	1,38	0,87	0,79	0,86	1,50	1,01	1,11
Th (ppm)	1,42	1,49	2,22	1,92	1,83	1,90	2,08	2,65	2,15	2,34
U (ppm)	0,36	0,40	0,46	0,46	0,49	0,42	0,43	0,65	0,46	0,53
V (ppm)	2	2	2	1	1	3	4	2	2	1
W (ppm)	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7
Yb (ppm)	2,76	3,93	4,35	4,41	3,21	4,39	3,59	6,30	5,24	5,46
Zn (ppm)	23	26	33	18	20	98	136	34	61	11
Zr (ppm)	250	132	164	110	94	184	234	173	200	147

Résultats des analyses lithogéochimiques en fonction des faciès volcaniques (suite) :

	PQF			Massif	
	DG-21	DG-48	DG-48	DG-40	DG-40
SiO ₂ (%)	76	73	75	82	88
TiO ₂ (%)	0,33	0,32	0,34	0,26	0,26
Al ₂ O ₃ (%)	12,4	13,6	13,8	12,6	12,3
Fe ₂ O ₃ (%)	3,62	2,98	2,94	1,50	1,51
MnO (%)	0,166	0,101	0,101	0,022	0,022
MgO (%)	0,97	0,90	0,87	0,26	0,33
CaO (%)	3,9	2,4	2,4	1,5	1,4
Na ₂ O (%)	2,77	4,53	4,49	5,30	5,38
Na ₂ O (%)	2,7	4,5	4,5	5,4	5,4
K ₂ O (%)	1,60	1,10	1,09	0,47	0,69
K ₂ O (%)	1,7	1,0	1,3	0,5	0,5
Total (%)	101	99	101	104	109
Ag (ppm)	0,16	0,16	0,22	0,23	0,35
As (ppm)	0,44	0,44	0,55	0,27	0,37
Au (ppb)	1,7	2,0	3,1	3,5	2,4
Ba (ppm)	330	354	388	133	113
Ba (ppm)	334	289	352	95	185
Cd (ppm)	0,13	0,06	0,13	0,09	0,14
Ce (ppm)	30,6	33,0	32,0	55,1	57,3
Cl (ppm)	60	66	76	57	62
Co (ppm)	5,0	3,9	3,4	0,7	0,7
Cr (ppm)	2,6	2,8	3,2	2,4	4,4
Cs (ppm)	1,33	0,89	1,09	0,72	0,87
Cu (ppm)	85	79	52	57	50
Dy (ppm)	5,8	4,7	4,9	7,4	7,9
Eu (ppm)	0,99	1,18	1,18	2,06	2,17
Hf (ppm)	4,53	4,76	4,71	5,83	5,94
Ho (ppm)	0,85	0,89	0,86	1,36	1,34
In (ppm)	0,09	0,05	0,06	0,10	0,09
Ir (ppb)	3	3	4	4	6
La (ppm)	14,22	14,96	14,71	23,77	25,19
Lu (ppm)	0,645	0,603	0,599	0,760	0,729
Mo (ppm)	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6
Nd (ppm)	15,8	15,8	16,1	36,5	36,6
Ni (ppm)	18	19	16	17	29
Rb (ppm)	30	21	22	19	21
S (%)	1,4	1,1	1,4	1,4	0,9
Sb (ppm)	0,16	0,10	0,10	0,10	0,10
Sc (ppm)	8,46	8,19	8,15	13,56	13,75
La (ppm)	0,9	1,0	0,9	1,0	1,3
Sm (ppm)	4,284	4,120	4,299	7,777	8,165
Sr (ppm)	201	303	224	160	181
Ta (ppm)	0,65	0,60	0,68	0,85	0,91
Tb (ppm)	0,92	0,73	0,83	1,34	1,40
Th (ppm)	2,28	2,37	2,42	2,42	2,49
U (ppm)	0,52	0,56	0,71	0,47	0,47
V (ppm)	20	22	25	2	2
W (ppm)	0,4	1,3	0,9	1,0	0,9
Yb (ppm)	4,42	4,01	4,08	5,24	5,32
Zn (ppm)	40	35	29	18	26
Zr (ppm)	190	149	176	208	280

ANNEXE 3

LISTE DES STATIONS DE MESURES STRUCTURALES

Stations	Position UTM zone 17		Schistosité		Anisotropie Intensité de 0 à 5	Faciès
	Est	Nord	Direction	Pendage		
1	648603	5344154	266	89	3	brèches
2	648598	5344177	81	90	2	brèches
3	648598	5344203	259	89	2	brèches
4	648596	5344230	260	80	3	brèches
5	648601	5344277	78	90	2	brèches
6	648575	5344301	252	88	2	brèches
7	648598	5344252			3	brèches
8	648577	5344226			2	brèches
9	648578	5344201			2	brèches
10	648577	5344175			2	brèches
11	648580	5344150			2	brèches
12	648574	5344131			3	brèches
13	648552	5344153	87	85	3	brèches
14	648548	5344179	86	90	3	brèches
15	648552	5344201				dyke mafique
16	648552	5344229	74	88	2	brèches
17	648550	5344251	84	90	3	brèches
18	648548	5344271			2	brèches
19	648550	5344300	63	90	3	pqf
20	648531	5344250			2	brèches
21	648526	5344149	72	84	3	brèches
22	648529	5344125			2	brèches
23	648498	5344103			2	brèches
24	648500	5344126	79	90	2	brèches
25	648501	5344148	81	81	2	brèches
26	648502	5344165			2	brèches
27	648502	5344200			2	brèches
28	648500	5344226			2	brèches
29	648500	5344252				dyke mafique
30	648478	5344250				dyke mafique

Stations	Position UTM zone 17		Schistosité		Anisotropie Intensité de 0 à 5	Faciès
	Est	Nord	Direction	Pendage		
31	648475	5344230			2	brèches
32	648475	5344203			2	brèches
33	648478	5344179			2	brèches
34	648477	5344149	67	85	3	brèches
35	648475	5344126	69	90	3	brèches
36	648476	5344111			2	brèches
37	648449	5344125	253	78	3	brèches
38	648449	5344152			2	brèches
39	648525	5344183	73	84	3	brèches
40	648525	5344227	86	83	2	brèches
41	648495	5344307	69	90	2	pqf
42	648500	5344327	69	90	2	pqf
43	648476	5344328	80	90	2	pqf
44	648473	5344299	71	90	3	pqf
45	648452	5344378				dyke mafique
46	648451	5344345	76	90	4	brèches
47	648447	5344328	70	90	3	pqf
48	648450	5344302	71	90	3	pqf
49	648425	5344275			2	pqf
50	648425	5344301	252	86	3	pqf
51	648426	5344327	70	90	4	brèches
52	648398	5344323	251	89	4	brèches
53	648399	5344300	76	90	4	brèches
54	648399	5344276	75	90	2	pqf
55	648376	5344270	73	90	2	pqf
56	648373	5344304	71	89	4	brèches
57	648348	5344303	73	90	3	brèches
58	648350	5344277	77	89	4	brèches
59	648352	5344254	68	88	3	brèches
60	648324	5344254	64	90	2	pqf
61	648325	5344276	70	87	4	brèches
62	648322	5344304	70	89	2	massif
63	648299	5344279	70	86	4	brèches
64	648298	5344253	70	86	3	brèches
65	648269	5344277	76	84	2	pqf
66	648250	5344274	80	90	2	pqf
67	648224	5344279	77	84	2	pqf

Stations	Position UTM zone 17		Schistosité		Anisotropie Intensité de 0 à 5	Faciès
	Est	Nord	Direction	Pendage		
68	648225	5344251	66	90	3	brèches
69	648198	5344251	77	90	2	pqf
70	648200	5344227	67		3	brèches
71	648176	5344254	70		2	pqf
72	648151	5344247	71	85	3	brèches
73	648125	5344251	251	89	2	brèches
74	648100	5344248	70	87	3	brèches
75	648078	5344247			2	massif
76	648148	5344221	268	85	3	brèches
77	648125	5344227	65	83	2	brèches
78	648099	5344228	68	89	2	brèches
79	648075	5344229	70	90	3	brèches
80	648051	5344224			2	brèches
81	648023	5344221	62	83	2	massif
82	648000	5344230			2	massif
83	647975	5344221	82		2	massif
84	647952	5344200	80	84	2	massif
85	647975	5344200	81	84	2	brèches
86	648000	5344197	78	88	2	brèches
87	648026	5344199	260	89	3	brèches
88	648075	5344199	71	84	3	brèches
89	648099	5344199	65	86	2	brèches
90	648123	5344201	69	85	2	brèches
91	648150	5344199	64	86	2	pqf
92	648150	5344174	65	84	3	pqf
93	648125	5344172	70	89	3	brèches
94	648100	5344171	70	90	4	brèches
95	648149	5344151	70	90	2	pqf
96	648125	5344146			3	brèches
97	648100	5344148	71	82	4	brèches
98	648075	5344175	73	90	3	brèches
99	648050	5344175	70	90	4	brèches
100	648024	5344176	72	90	3	brèches
101	648000	5344174	78	86	3	brèches
102	647974	5344177	82	86	2	massif
103	647951	5344172	78	82	3	massif
104	647925	5344149	77	90	2	massif

Stations	Position UTM zone 17		Schistosité		Anisotropie Intensité de 0 à 5	Faciès
	Est	Nord	Direction	Pendage		
105	647950	5344152	80	82	2	massif
106	647975	5344150	78	88	3	brèches
107	648000	5344150	76	90	4	brèches
108	648024	5344152	75	90	4	brèches
109	648050	5344149	76	88	4	brèches
110	648078	5344147	79	87	4	brèches
111	648075	5344122	72	83	4	brèches
112	648049	5344124	78	90	4	brèches
113	648025	5344125	76	90	4	brèches
114	648000	5344125	73	85	3	brèches
115	647975	5344125	79	90	3	brèches
116	647949	5344125	73		3	brèches
117	647925	5344124	257	88	2	massif
118	647895	5344101	76	86	2	massif
119	647925	5344099	77	90	3	brèches
120	648100	5344075			1	massif
121	648125	5344075	68	83	2	massif
122	648128	5344046	66	90	2	massif
123	648100	5344050	79	90	3	massif
124	648075	5344047	60	72	2	massif
125	648050	5344054	70	90	3	brèches
126	648025	5344052	66	80	4	brèches
127	648002	5344051	72	85	3	brèches
128	648000	5344031	70		3	brèches
129	648025	5344032	77	90	3	brèches
130	648050	5344030	69	87	4	brèches
131	648075	5344024	76	78	2	pqf/massif
132	648096	5344025	73	90	2	pqf/massif
133	648075	5344000			2	pqf/massif
134	648050	5344000	70	60	3	brèches
135	648100	5343975	73	86	2	brèches
136	648125	5343995			3	brèches
137	648075	5343950	70	82	2	brèches
138	648030	5343950	70		2	brèches
139	648050	5344102	65	90	2	brèches
140	648025	5344100	72	86	2	brèches
141	648000	5344100	78	84	2	brèches

Stations	Position UTM zone 17		Schistosité		Anisotropie Intensité de 0 à 5	Faciès
	Est	Nord	Direction	Pendage		
142	647975	5344100	81	90	3	brèches
143	647924	5344075	72	90	2	massif
144	647899	5344076			1	massif
145	647900	5344050				dyke mafique
146	647878	5344050				dyke mafique
147	647875	5344024	67		3	brèches
148	647900	5344024				dyke mafique
149	647873	5344003	72	90	2	brèches
150	648032	5343948	69	85	2	brèches
151	648207	5344093	67	89	2	pqf
152	648230	5344078	66	88	2	pqf
153	648399	5344232	87	90	3	pqf
154	648384	5344205	253	86	2	pqf
155	648324	5344170	62	82	2	brèches
156	648559	5344325	77	90	2	pqf
157	648596	5344323	80	88	3	brèches

ANNEXE 4

LE MICRO-XRF

Optimisation des paramètres

Composition moyenne d'une chlorite analysée à la micro-sonde de l'université Laval. Cinq analyses ont été réalisées dans le même minéral. La composition moyenne de ces analyses constitue le standard pour l'optimisation des paramètres du micro-XRF pour la présente étude.

	MM5 3-1	MM5 3-2	MM5 3-3	MM5 3-4	MM5 3-5	MM5 3-6	MM5 3-7	Moyenne	Écart type
SiO ₂	25,375	25,826	25,958	26,117	24,612	26,116	25,243	25,61	0,52
TiO ₂	0,034	0,006	0	0	0,063	0	0,018	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	19,692	20,029	20,118	19,954	19,993	20,316	20,652	20,11	0,28
Cr ₂ O ₃	0,026	0	0	0	0,026	0,03	0	0,01	0,01
MgO	14,799	15,253	15,072	14,725	13,854	15,844	14,89	14,92	0,56
CaO	0,081	0,054	0,049	0,07	0,07	0,015	0,013	0,05	0,02
MnO	0,454	0,504	0,544	0,485	0,55	0,517	0,443	0,50	0,04
FeO	26,202	26,168	26,208	26,658	26,374	25,864	25,798	26,18	0,27
NiO	0,026	0,025	0,051	0,046	0,041	0,042	0,022	0,04	0,01
ZnO	0,043	0,173	0,035	0	0,27	0,078	0,035	0,09	0,09
Na ₂ O	0,069	0,112	0,03	0,061	0,056	0,01	0,028	0,05	0,03
K ₂ O	0,016	0,003	0,015	0,015	0,022	0	0,013	0,01	0,01
H ₂ O	11,156	11,345	11,35	11,338	10,987	11,478	11,245	11,27	0,15
Total	97,973	99,498	99,43	99,469	96,918	100,31	98,4		

Cinq tests de paramétrage ont été réalisés. Dans un premier temps, le principal paramètre modifié a été la durée d'analyse par pixel. La variation a été testée de 400 ms à 1000 ms. Ensuite, c'est la taille de la zone d'analyse qui fut modifiée.

Comme le micro-XRF ne peut pas analyser les volatils, les analyses sur la même chlorite ont été normalisées en soustrayant la concentration de H₂O.

Cinq tests réalisés au micro-XRF :

Paramètres	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Taille de la carte (pixel)	64 x 50	64 x 50	64 x 50	64 x 50	128 x 100
Temps d'analyse	400	600	800	1000	400
Durée totale	30 min	46 min	1h00	1h30	2h00

Éléments	Micro-XRF	Différence (%) micro-sonde								
MgO	20,30	5,38	20,11	5,19	20,18	5,26	19,51	4,59	17,40	2,48
Al2O3	17,94	2,17	18,46	1,65	17,93	2,18	18,41	1,70	14,75	5,35
SiO2	26,64	1,03	26,36	0,75	26,96	1,35	27,16	1,55	32,82	7,21
MnO	0,45	0,05	0,44	0,06	0,44	0,06	0,45	0,05	0,35	0,15
Fe2O3	22,15	4,03	22,16	4,02	22,13	4,05	22,09	4,10	17,73	8,45
CaO	0,33	0,28	0,36	0,31	0,33	0,28	0,29	0,24	5,03	4,98

L'augmentation du temps d'analyse par point augmente la précision, mais la différence n'est pas vraiment significative. Cependant, afin de garder une précision d'analyse suffisante et une durée d'analyse par échantillon raisonnable, nous avons choisi les paramètres du test 3.

Résultat des analyses micro-XRF sur un fragment des faciès bréchiques :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-01	648625	5344181	5,956	0,496	7,442	85,13	0,041	0,092	0,583	0,113	0,036	0,001	0,11	0,003	100
DG-02	648599	5344178	6,812	0,683	8,868	82,17	0,083	0,203	0,708	0,15	0,028	0,007	0,284	0,002	100
DG-03	648574	5344175	7,252	0,459	8,559	82,73	0,006	0,077	0,734	0,102	0,016	0,003	0,058	0,002	100
DG-04	648545	5344172	5,814	0,552	7,374	85,3	0,013	0,098	0,485	0,128	0,019	0,002	0,215	0,002	100
DG-05	648521	5344163	4,783	0,564	7,114	86,39	0,007	0,256	0,432	0,128	0,035	0,004	0,28	0,003	100
DG-06	648497	5344158	6,194	0,583	9,399	82,61	0,025	0,421	0,342	0,125	0,032	0,002	0,266	0,002	100
DG-07	648474	5344146	8,209	2,017	9,368	79,27	0,044	0,029	0,635	0,139	0,023	0,006	0,259	0,002	100
DG-08	648449	5344148	6,141	0,502	7,767	83,58	0,015	0,228	0,472	0,15	0,03	0,008	0,192	0,002	100
DG-09	648428	5344135	5,896	0,474	7,461	85,58	0,023	0,054	0,311	0,101	0,033	0,002	0,059	0,003	100
DG-10	648576	5344133	7,954	0,749	10,65	78,75	0,343	0,02	0,598	0,121	0,031	0,011	0,77	0,002	100
DG-11	648595	5344154	6,044	0,605	7,578	85,03	0,034	0,038	0,36	0,098	0,033	0,002	0,176	0,002	100
DG-12	648629	5344219	8,486	0,593	11,35	78,52	0,097	0,152	0,183	0,137	0,029	0,002	0,449	0,002	100
DG-13	648645	5344307	4,659	0,541	7,577	85,91	0,056	0,552	0,325	0,132	0,039	0	0,205	0,003	100
DG-14	648527	5344122	6,221	0,458	8,306	84,13	0,057	0,059	0,415	0,128	0,032	0,003	0,192	0,002	100
DG-15	648482	5344112	3,806	0,679	8,181	84,67	0,008	1,323	0,605	0,116	0,032	0,006	0,577	0,003	100
DG-16	648479	5344225	5,591	0,46	8,401	84,18	0,035	0,369	0,631	0,156	0,034	0	0,138	0,003	100
DG-17	648523	5344221	3,75	0,672	8,477	85,15	0,011	1,079	0,288	0,14	0,036	0,002	0,393	0,003	100
DG-18	648568	5344230	3,781	0,604	5,927	87,47	0,132	0,275	1,314	0,082	0,03	0,012	0,375	0,002	100
DG-19	648593	5344274	5,207	0,472	6,891	86,8	0,057	0,039	0,304	0,103	0,04	0	0,081	0,003	100
DG-20	648553	5344266	7,946	0,461	10,46	80,28	0,075	0,163	0,33	0,157	0,031	0,002	0,088	0,003	100
DG-23	648398	5344328	6,374	1,321	8,398	74,09	0,113	0,137	7,617	0,178	0,035	0,274	1,464	0,002	100
DG-25	648347	5344277	6,185	0,49	7,88	84,47	0,018	0,062	0,682	0,131	0,029	0,005	0,05	0,002	100
DG-26-a	648299	5344278	1,048	0,934	1,609	40,09	2,812	0,291	48,32	0,027	0,051	1,14	3,633	0,048	100
DG-28	648229	5344243	5,836	0,597	7,931	83,57	0,329	0,107	1,071	0,107	0,029	0,008	0,416	0,002	100
DG-30	648115	5344247	9,159	0,488	11,77	77,77	0,029	0,031	0,501	0,168	0,029	0,004	0,054	0,001	100
DG-31	648079	5344248	6,644	0,597	8,227	83,17	0,059	0,045	0,841	0,109	0,03	0,014	0,264	0,002	100
DG-32	648123	5344199	5,61	0,465	7,338	85,21	0,008	0,03	1,121	0,107	0,034	0,004	0,068	0,002	100
DG-33	648074	5344201	5,131	0,464	7,101	85,63	0,441	0,255	0,551	0,086	0,029	0,009	0,294	0,004	100
DG-34	648026	5344197	5,201	0,567	7,587	83,81	0,043	0,265	1,881	0,084	0,038	0,021	0,494	0,003	100

Résultat des analyses micro-XRF sur un fragment des faciès bréchiques :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-35	647975	5344200	6,179	0,589	8,686	82,76	0,027	0,225	0,941	0,092	0,02	0,013	0,464	0,002	100
DG-36	648125	5344145	6,011	0,968	7,834	80,74	0,031	0,092	3,592	0,146	0,029	0,019	0,538	0,003	100
DG-37	648080	5344145	3,5	0,516	5,243	88,52	0,032	0,317	1,471	0,081	0,041	0,006	0,272	0,004	100
DG-38	648025	5344151	3,963	0,692	6,264	86,85	0,007	0,31	1,07	0,094	0,033	0,011	0,706	0,003	100
DG-39	647974	5344154	3,734	1,036	11,06	77,55	0,043	1,595	3,584	0,246	0,026	0,026	1,097	0,002	100
DG-40	647928	5344151	7,001	0,773	10,22	79,3	0,036	0,386	1,466	0,133	0,029	0,006	0,647	0,002	100
DG-41	647925	5344102	7,794	0,66	10,77	79,41	0,102	0,066	0,718	0,134	0,028	0,003	0,323	0,002	100
DG-42	647972	5344099	5,784	0,597	8,533	83,35	0,008	0,417	1,06	0,065	0,028	0,002	0,154	0,001	100
DG-43	648023	5344102	4,462	0,621	6,968	86,62	0,023	0,354	0,479	0,121	0,037	0,002	0,31	0,002	100
DG-44	648023	5344046	2,396	0,587	4,844	89,13	0,153	0,512	1,93	0,05	0,037	0,005	0,351	0,004	100
DG-46	648127	5344040	6,475	0,629	9,664	81,56	0,059	0,321	0,748	0,124	0,03	0,004	0,381	0,002	100
DG-49	647864	5344004	3,616	0,768	5,809	88,26	0,029	0,249	0,561	0,048	0,031	0,005	0,618	0,003	100
DG-50	648075	5344000	3,308	0,942	6,284	84,82	0,048	0,388	2,969	0,112	0,032	0,017	1,08	0,002	100
DG-51	648126	5343991	2,646	1,146	10,05	82,14	0,008	1,606	0,686	0,151	0,034	0,02	1,516	0,003	100
DG-52	648079	5343957	0,836	0,988	8,715	85,97	0,021	2,12	0,257	0,064	0,036	0,012	0,978	0,004	100
DG-53	648032	5343948	3,9	0,964	8,68	82,91	0,676	0,927	0,557	0,125	0,033	0,011	1,217	0,002	100
DG-61	648333	5344172	4,563	0,502	5,829	87,85	0,016	0,059	0,939	0,085	0,035	0,004	0,115	0,003	100
DG-63	648590	5344325	4,137	0,515	5,013	89,84	0,004	0,042	0,225	0,065	0,039	0	0,12	0,004	100

Résultat des analyses micro-XRF sur une zone représentative de la matrice des faciès bréchiques :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-01	648625	5344181	5,429	2,872	13,53	72,63	0,059	1,435	0,451	0,15	0,026	0,045	3,368	0,001	100
DG-02	648599	5344178	3,989	2,367	8,815	80,36	0,346	0,777	0,324	0,14	0,036	0,03	2,809	0,003	100
DG-03	648574	5344175	8,867	3,054	16,49	65,88	0,055	0,584	0,431	0,174	0,014	0,048	4,403	0,001	100
DG-04	648545	5344172	0,996	3,541	20,35	62,86	0,059	4,583	3,576	0,234	0,014	0,072	3,711	0,001	100
DG-05	648521	5344163	6,378	1,219	15,31	71,34	0,017	1,892	2,175	0,107	0,023	0,04	1,507	0,002	100
DG-06	648497	5344158	6,035	2,194	14,92	71,21	0,048	1,508	0,404	0,293	0,023	0,074	3,293	0,001	100
DG-07	648474	5344146	8,076	1,964	12,13	74,4	0,035	0,159	1,04	0,1	0,023	0,052	2,019	0,001	100
DG-08	648449	5344148	8,559	2,381	16,94	63,92	0,022	1,166	1,445	0,203	0,015	0,075	3,612	0	100
DG-09	648428	5344135	6,97	4,071	16,16	66,03	0,023	1,562	1,541	0,217	0,018	0,056	3,349	0	100
DG-10	648576	5344133	8,01	1,09	11,3	77,05	0,291	0,026	0,556	0,16	0,03	0,022	1,469	0,001	100
DG-11	648595	5344154	5,841	2,024	8,606	81,12	0,047	0,09	0,516	0,155	0,021	0,025	1,548	0,002	100
DG-12	648629	5344219	9,092	0,545	11,96	77,01	0,014	0,239	0,795	0,144	0,021	0,006	0,171	0,001	100
DG-13	648645	5344307	2,13	1,648	28,41	57,79	0,017	7,184	0,376	0,884	0,041	0,004	1,515	0,003	100
DG-14	648527	5344122	4,071	1,025	10,57	80,8	0,029	2,036	0,471	0,084	0,03	0,016	0,867	0,002	100
DG-15	648482	5344112	6,815	0,988	13,48	74,33	0,026	1,748	1,103	0,158	0,022	0,031	1,3	0,001	100
DG-16	648479	5344225	6,905	1,18	14,62	67,15	0,051	1,58	6,635	0,268	0,02	0,051	1,537	0,004	100
DG-17	648523	5344221	5,514	1,016	9,655	73,75	0,096	0,471	7,041	0,175	0,03	0,089	2,16	0,002	100
DG-18	648568	5344230	2,673	2,769	28,61	55,98	0,044	5,507	1,165	0,307	0,028	0,02	2,892	0,001	100
DG-19	648593	5344274	11,25	1,895	17,56	62,55	0,191	0,089	2,838	0,394	0,017	0,061	3,159	0,001	100
DG-20	648553	5344266	5,758	0,527	8,468	83,92	0,032	0,33	0,304	0,154	0,032	0,003	0,467	0,002	100
DG-23	648398	5344328	4,951	1,887	10,2	77,89	0,051	0,292	0,687	0,183	0,028	0,03	3,802	0,001	100
DG-25	648347	5344277	2,289	2,228	10,8	79,15	0,028	2,031	0,892	0,131	0,03	0,042	2,375	0,003	100
DG-26-a	648299	5344278	1,927	1,227	6,504	84,19	0,029	0,788	4,028	0,071	0,041	0,055	1,133	0,003	100
DG-28	648229	5344243	5,714	1,265	9,848	80,8	0,014	0,598	0,451	0,11	0,027	0,012	1,157	0,002	100

Résultat des analyses micro-XRF sur une zone représentative de la matrice des faciès bréchiques (suite) :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-30	648115	5344247	6,428	1,697	12,07	75,47	0,068	0,882	0,603	0,155	0,025	0,045	2,547	0,002	100
DG-31	648079	5344248	6,644	0,597	8,227	83,17	0,059	0,045	0,841	0,109	0,03	0,014	0,264	0,002	100
DG-32	648123	5344199	6,833	1,979	12,65	75,1	0,037	0,856	0,723	0,134	0,027	0,03	1,627	0,001	100
DG-33	648074	5344201	7,939	1,283	15,3	71,14	0,013	1,382	0,606	0,223	0,021	0,054	2,042	0,001	100
DG-34	648026	5344197	3,036	0,872	6,229	86,18	0,021	0,486	1,722	0,076	0,032	0,028	1,316	0,003	100
DG-35	647975	5344200	6,054	0,749	8,353	79,99	0,038	0,143	3,498	0,078	0,029	0,033	1,034	0,003	100
DG-36	648125	5344145	7,792	2,352	12,19	74,44	0,39	0,229	0,712	0,173	0,016	0,022	1,687	0,001	100
DG-37	648080	5344145	4,64	1,389	8,187	78,84	0,062	0,407	3,643	0,123	0,024	0,047	2,641	0,003	100
DG-38	648025	5344151	3,187	0,712	6,991	85,66	0,018	0,824	2,069	0,06	0,035	0,008	0,432	0,002	100
DG-39	647974	5344154	1,366	1,136	7,882	81,3	0,075	1,389	4,6	0,05	0,028	0,049	2,125	0,003	100
DG-40	647928	5344151	7,001	0,773	10,22	79,3	0,036	0,386	1,466	0,133	0,029	0,006	0,647	0,002	100
DG-41	647925	5344102	5,739	1,064	8,784	82,43	0,066	0,082	0,976	0,071	0,034	0,01	0,743	0,002	100
DG-42	647972	5344099	2,873	0,846	6,864	86,14	0,103	0,92	1,246	0,058	0,034	0,01	0,9	0,004	100
DG-43	648023	5344102	3,652	0,822	6,765	86,19	0,088	0,51	0,854	0,069	0,027	0,013	1,012	0,002	100
DG-44	648023	5344046	3,52	1,153	9,602	80,94	0,018	1,169	1,35	0,193	0,031	0,024	1,996	0,002	100
DG-45	648076	5344049	3,259	0,791	5,213	88,3	0,015	0,295	1,456	0,109	0,024	0,011	0,523	0,003	100
DG-46	648127	5344040	7,062	0,625	12,06	78,15	0,3	0,745	0,572	0,134	0,026	0,003	0,328	0,001	100
DG-49	647864	5344004	5,767	1,299	9,691	80,29	0,032	0,455	0,734	0,141	0,026	0,019	1,54	0,001	100
DG-50	648075	5344000	3,557	1,131	7,57	84,19	0,014	0,714	0,838	0,129	0,03	0,02	1,806	0,002	100
DG-51	648126	5343991	2,646	1,146	10,05	82,14	0,008	1,606	0,686	0,151	0,034	0,02	1,516	0,003	100
DG-52	648079	5343957	2,858	1,228	8,658	82,29	0,057	1,113	1,383	0,169	0,028	0,034	2,178	0,002	100
DG-53	648032	5343948	4,776	1,253	10,6	79,42	0,036	1,165	1,006	0,11	0,023	0,019	1,585	0,002	100
DG-61	648333	5344172	2,981	0,837	5,788	85,53	0,033	0,351	2,462	0,088	0,032	0,046	1,853	0,002	100
DG-63	648590	5344325	2,146	2,474	13,38	75,91	0,02	2,342	0,433	0,231	0,032	0,012	3,021	0,002	100

Résultat des analyses micro-XRF sur la zone la plus altérée de la matrice des faciès bréchiques :

Id	Est	Nord	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	SO3	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	Fe2O3	Ni2O3	Total
DG-01	648625	5344181	3,359	3,533	11,6	73,96	0,054	1,174	0,655	0,132	0,026	0,076	5,435	0,001	100
DG-02	648599	5344178	2,317	9,971	25,96	46,1	0,074	3,867	0,931	0,673	0,018	0,126	9,968	0,001	100
DG-03	648574	5344175	4,613	6,975	20,93	55,88	0,086	1,61	1,196	0,31	0,009	0,1	8,285	0,001	100
DG-04	648545	5344172	4,173	8,767	21,63	47,31	0,044	2,188	1,201	0,993	0,012	0,26	13,41	0	100
DG-05	648521	5344163	2,282	1,622	22,01	63,55	0,05	5,564	1,859	0,247	0,027	0,049	2,742	0,002	100
DG-06	648497	5344158	3,938	2,931	20,39	62,56	0,024	3,668	0,508	0,37	0,029	0,116	5,465	0,001	100
DG-07	648474	5344146	5,289	3,791	15,36	67,74	0,041	1,62	0,9	0,134	0,018	0,125	4,981	0	100
DG-08	648449	5344148	3,408	5,829	18,63	48,67	0,043	1,302	1,231	0,319	0,017	0,329	17,04	0,002	100
DG-09	648428	5344135	5,464	4,597	12,75	69,24	0,141	0,708	0,572	0,271	0,018	0,104	6,134	0,001	100
DG-10	648576	5344133	8,01	1,09	11,3	77,05	0,291	0,026	0,556	0,16	0,03	0,022	1,469	0,001	100
DG-11	648595	5344154	5,841	2,024	8,606	81,12	0,047	0,09	0,516	0,155	0,021	0,025	1,548	0,002	100
DG-12	648629	5344219	9,092	0,545	11,96	77,01	0,014	0,239	0,795	0,144	0,021	0,006	0,171	0,001	100
DG-13	648645	5344307	2,818	9,392	23,07	43,23	0,141	1,912	0,159	0,125	0,033	0,134	18,98	0,001	100
DG-14	648527	5344122	1,65	1,687	17,1	70,52	0,04	5,437	1,201	0,359	0,023	0,033	1,949	0,002	100
DG-15	648482	5344112	5,947	1,968	18,84	63,98	0,155	3,762	0,971	0,299	0,018	0,104	3,953	0,001	100
DG-16	648479	5344225	4,984	1,534	11,74	72,4	0,052	1,275	4,001	0,245	0,02	0,069	3,674	0,004	100
DG-17	648523	5344221	4,776	2,792	15,29	67,9	0,044	1,434	2,237	0,114	0,02	0,114	5,274	0,002	100
DG-18	648568	5344230	3,358	7,677	24,68	46,63	0,148	1,931	1,101	0,367	0,022	0,106	13,98	0,003	100
DG-19	648593	5344274	6,642	1,922	16,85	64,42	0,163	1,584	3,558	0,27	0,02	0,065	4,498	0,001	100
DG-20	648553	5344266	5,758	0,527	8,468	83,92	0,032	0,33	0,304	0,154	0,032	0,003	0,467	0,002	100
DG-23	648398	5344328	3,509	1,163	21,02	67,02	0,123	4,61	0,338	0,575	0,027	0,014	1,609	0,002	100
DG-25	648347	5344277	2,292	4,727	28,39	50,69	0,039	6,475	0,378	0,698	0,035	0,088	6,193	0,001	100
DG-26-a	648299	5344278	1,857	2,1	12,32	78,53	0,031	2,173	0,532	0,165	0,038	0,026	2,232	0,002	100
DG-28	648229	5344243	1,555	3,561	27,64	54,42	0,089	7,033	0,288	0,383	0,039	0,053	4,942	0,002	100

Résultat des analyses micro-XRF sur la zone la plus altérée de la matrice des faciès bréchiques (suite) :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-30	648115	5344247	4,163	2,444	19,61	64,1	0,036	4,141	0,794	0,434	0,028	0,067	4,184	0,002	100
DG-31	648079	5344248	7,224	0,653	9,188	81,74	0,057	0,039	0,483	0,086	0,029	0,013	0,487	0,001	100
DG-32	648123	5344199	3,481	2,955	16,8	69,04	0,058	3,651	0,779	0,374	0,022	0,052	2,789	0,001	100
DG-33	648074	5344201	4,737	3,204	14,04	66,64	0,058	0,65	0,721	0,608	0,024	0,244	9,074	0,001	100
DG-34	648026	5344197	3,333	2,001	27	57,06	0,056	6,896	0,409	0,425	0,026	0,034	2,756	0,002	100
DG-35	647975	5344200	3,55	1,654	27,14	57,43	0,018	6,622	0,352	0,71	0,031	0,022	2,47	0,002	100
DG-36	648125	5344145	4,869	4,982	11,53	72,97	0,029	0,426	0,596	0,323	0,019	0,058	4,195	0,002	100
DG-37	648080	5344145	4,029	3,22	25,06	53,81	0,121	4,807	0,256	0,38	0,033	0,101	8,179	0,001	100
DG-38	648025	5344151	2,803	1,289	24,2	60,95	0,042	6,12	2,39	0,324	0,033	0,026	1,825	0,002	100
DG-39	647974	5344154	1,747	1,11	14,06	65,33	0,397	3,069	12,1	0,156	0,021	0,089	1,922	0,007	100
DG-40	647928	5344151	2,458	1,129	6,046	72,85	0,05	0,802	14,48	0,303	0,031	0,057	1,791	0,01	100
DG-41	647925	5344102	8,732	3,577	18,14	62,06	0,095	0,419	3,351	0,119	0,016	0,063	3,434	0,001	100
DG-42	647972	5344099	2,531	1,081	9,746	79,88	0,047	1,79	2,759	0,077	0,031	0,027	2,03	0,004	100
DG-43	648023	5344102	3,076	1,888	16,03	67,14	0,072	2,249	4,858	0,224	0,02	0,067	4,38	0,001	100
DG-44	648023	5344046	3,551	1,537	27,5	55,92	0,173	7,003	1,747	0,434	0,028	0,024	2,079	0,002	100
DG-45	648076	5344049	4,688	1,913	22,79	52,53	0,196	4,829	8,844	0,72	0,017	0,071	3,405	0,005	100
DG-46	648127	5344040	4,159	0,557	10,51	73,51	0,125	1,499	8,961	0,174	0,037	0,033	0,436	0,003	100
DG-49	647864	5344004	3,423	3,373	16,01	66,4	0,084	2,905	2,148	0,248	0,02	0,076	5,316	0,001	100
DG-50	648075	5344000	4,699	1,573	21,63	61,65	0,037	4,067	3,098	0,457	0,023	0,028	2,729	0,001	100
DG-51	648126	5343991	1,208	1,79	12,56	58,29	0,089	2,455	18,1	0,228	0,031	0,243	4,997	0,008	100
DG-52	648079	5343957	3,749	2,648	15,05	65,12	0,101	1,87	3,983	0,117	0,018	0,132	7,209	0,002	100
DG-53	648032	5343948	2,855	1,429	11,8	78,25	0,009	2,326	1,265	0,233	0,026	0,02	1,78	0,002	100
DG-61	648333	5344172	2,953	1,372	12,47	77,38	0,033	2,65	0,558	0,197	0,027	0,038	2,315	0,002	100
DG-63	648590	5344325	2,379	5,497	20,53	57,44	0,071	2,933	0,896	0,681	0,028	0,062	9,481	0,001	100

Résultat des analyses micro-XRF sur les PQF :

Id	Est	Nord	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃	Ni₂O₃	Total
DG-21	648501	5344331	3,49	1,76	8,60	82,97	0,08	0,74	0,80	0,12	0,03	0,02	1,37	0,00	100
			4,21	2,33	16,46	66,47	0,28	2,46	5,50	0,19	0,02	0,08	1,99	0,00	100
			3,95	1,82	10,67	79,92	0,17	1,22	0,83	0,14	0,03	0,02	1,24	0,00	100
DG-22	648442	5344311	3,85	1,27	10,15	82,18	0,02	1,25	0,32	0,10	0,04	0,01	0,82	0,00	100
			3,36	1,48	15,01	75,77	0,03	2,78	0,43	0,18	0,03	0,01	0,92	0,00	100
DG-24	648401	5344278	1,83	2,23	9,19	77,09	0,04	1,08	7,06	0,10	0,03	0,07	1,27	0,00	100
			3,46	2,05	11,96	70,55	0,33	1,16	9,20	0,04	0,03	0,09	1,14	0,00	100
DG-27	648243	5344274	3,02	3,10	9,27	81,23	0,01	1,25	0,47	0,11	0,03	0,06	1,47	0,00	100
			3,11	3,11	9,27	81,02	0,03	1,26	0,65	0,09	0,03	0,06	1,38	0,00	100
DG-29	648179	5344257	5,40	1,99	10,56	78,92	0,02	0,60	0,77	0,11	0,02	0,04	1,58	0,00	100
			6,06	1,70	10,13	79,27	0,01	0,34	0,49	0,12	0,03	0,04	1,81	0,00	100
DG-47	648151	5344149	6,55	1,26	10,39	79,52	0,05	0,23	0,74	0,11	0,03	0,03	1,10	0,00	100
			6,41	1,25	9,76	79,20	0,13	0,10	1,72	0,17	0,02	0,03	1,20	0,00	100
DG-48	648150	5344199	5,58	1,42	10,28	80,36	0,06	0,71	0,55	0,12	0,03	0,02	0,89	0,00	100
			5,59	1,40	10,06	80,67	0,10	0,66	0,57	0,12	0,03	0,02	0,80	0,00	100
DG-54	648208	5344102	7,20	1,15	10,39	79,34	0,01	0,02	0,72	0,13	0,03	0,01	0,99	0,00	100
			7,22	1,21	10,74	77,75	0,03	0,09	1,52	0,13	0,03	0,02	1,25	0,00	100
DG-60	648397	5344229	5,99	1,13	10,79	78,62	0,04	0,36	1,20	0,17	0,03	0,03	1,67	0,00	100
			5,99	1,61	25,60	55,19	0,04	3,70	3,43	2,11	0,02	0,04	2,27	0,00	100
DG-62	648560	5344324	2,36	1,32	8,67	79,84	0,09	1,18	4,63	0,10	0,04	0,03	1,73	0,01	100
			3,33	2,56	14,10	69,91	0,14	1,54	4,31	0,10	0,04	0,04	3,93	0,00	100
			1,92	1,17	5,18	69,70	0,12	0,54	19,17	0,07	0,04	0,15	1,93	0,01	100

ANNEXE 5**ANALYSE DES PYRITES AU LA-ICP-MS**

Composition en éléments traces du PS-1 (en ppm).

Éléments	ppm
⁵⁵ Mn	260
⁵⁷ Fe	156000
⁵⁹ Co	67
⁶¹ Ni	94
⁶⁵ Cu	134000
⁶⁶ Zn	210000
⁷⁵ As	65
⁸² Se	53
⁹⁸ Mo	61

Éléments	ppm
¹⁰⁷ Ag	67
¹¹⁸ Sn	55
¹²¹ Sb	55
¹²⁵ Te	20
¹⁹⁷ Au	47
²⁰² Hg	57
²⁰⁵ Tl	10
²⁰⁸ Pb	67
²⁰⁹ Bi	7

Composition en éléments traces des pyrites du Cap d'Ours et de la mine Horne analysées au La-ICP-MS :

Région	Groupe			⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁶ Zn	⁷⁵ As	⁸² Se	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sn	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm								
Py-1-1		X		2,1	21,0	116,5	9,9	2,5	324,8	43,8	0,0	0,1	0,4	0,1	0,7	0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,1
Py-1-2		X		2,3	1,9	117,3	9,9	2,9	351,9	30,3	1,3	0,1	0,5	0,3	1,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,4	0,2
Py-1-3		X		2,4	45,7	112,6	8,0	2,9	534,7	32,6	0,0	0,1	0,4	0,2	1,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,1
Py-1-4		X		3,0	602,2	117,0	8,4	3,1	211,2	20,2	78,6	0,2	0,4	0,4	1,4	0,0	0,3	0,3	0,0	0,7	0,3
Py-1-5		X		2,1	29,5	121,3	7,9	3,1	582,0	43,8	1,2	0,1	0,4	0,3	1,3	0,0	0,3	0,3	0,0	0,4	0,2
Py-1-6		X		2,2	312,4	128,7	7,9	3,0	554,5	34,6	0,4	0,1	0,4	0,2	1,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,4	0,1
Py-1-7		X		2,3	9,6	125,2	9,2	2,9	472,5	41,2	0,4	0,5	0,4	0,7	3,0	0,1	0,3	0,2	0,0	1,3	0,5
Py-1-8		X		2,0	4,5	118,9	6,2	2,8	463,8	39,6	0,2	0,1	0,3	0,2	1,1	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,1
Py-1-9		X		2,0	0,9	144,8	7,0	3,0	489,0	49,8	0,3	0,0	0,3	0,1	0,8	0,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0
Py-26-1		X		4,2	36,3	140,5	17,3	10,2	409,2	16,1	0,2	0,4	0,5	0,7	1,0	0,0	0,3	0,2	0,0	1,1	0,2
Py-26-10	X			4,7	207,5	123,5	5652	385,9	272,4	11,1	0,2	4,3	4,9	2,4	1,3	0,0	0,3	0,3	0,0	3,1	0,5
Py-26-2		X		1,7	133,2	85,1	5,6	3,0	662,6	29,6	0,1	0,1	0,4	0,5	0,7	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0
Py-26-3		X		28,8	94,6	82,0	3,9	25,9	517,9	19,7	1,1	0,1	1,3	0,2	0,8	0,0	0,2	0,2	0,0	0,5	0,1
Py-26-4		X		1,7	77,4	89,4	5,1	6,6	611,6	23,5	0,2	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
Py-26-5	X			3,2	54,4	94,5	42,6	304,0	119,4	5,3	1,1	3,4	0,8	2,7	2,4	0,1	0,3	0,4	0,1	3,5	0,8
Py-26-6		X		66,5	88,9	91,6	186,4	10,4	42,7	2,5	1,8	5,3	1,2	4,2	5,9	0,3	0,3	0,2	0,2	11,1	3,0
Py-26-7		X		2,7	137,1	137,7	3,3	3,6	608,1	21,5	0,4	0,1	0,8	0,3	0,6	0,0	0,2	0,2	0,0	0,5	0,1
Py-26-8		X		486,0	30,7	81,2	2,8	8,4	695,6	21,5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,6	0,0	0,3	0,2	0,0	0,6	0,1
Py-26-9	X			19,9	14,7	47,8	71,7	9539	14,4	6,0	0,6	1,7	1,2	0,8	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,9	0,1
Py-29-1		X		146,8	118,1	218,1	103,1	15,1	782,2	29,8	1,7	0,4	0,3	0,8	5,0	0,0	0,3	0,3	0,0	1,6	0,1
Py-29-10		X		3,8	814,3	71,8	7,9	1,9	584,2	18,0	0,9	0,0	0,4	0,0	1,9	0,0	0,2	0,1	0,0	1,0	0,1
Py-29-11		X		52,5	580,4	78,7	9,2	0,0	788,9	21,2	0,1	0,2	1,4	0,4	3,9	0,0	0,2	0,2	0,0	1,5	0,2
Py-29-2		X		2,7	650,1	98,8	5,6	2,5	102,6	40,9	0,1	0,0	0,2	0,0	11,9	0,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0
Py-29-3		X		3,7	577,0	77,0	14,2	1,9	117,1	40,4	0,1	0,0	0,2	0,0	9,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,5	0,2
Py-29-4		X		2,5	337,4	67,9	5,4	2,8	625,5	27,2	0,1	0,0	0,2	0,1	0,5	0,0	0,3	0,4	0,0	0,2	0,0
Py-29-5		X		2,3	1432	91,7	4,5	2,4	674,5	12,3	0,1	0,0	0,3	0,0	0,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,0
Py-29-6		X		5,0	506,1	74,3	6,1	2,3	175,8	42,2	0,1	0,0	0,2	0,0	20,9	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,2
Py-29-7		X		10,2	10,6	104,9	4,5	2,6	431,3	14,5	0,1	0,0	1,3	0,1	0,7	0,0	0,4	0,4	0,0	0,4	0,1

Région	Grroupe	⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁶ Zn	⁷⁵ As	⁸² Sr	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sn	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm						
Py-29-8	X	2,9	170,5	96,1	3,9	2,2	632,9	22,4	0,1	0,1	0,3	0,3	0,9	0,0	0,3	0,4	0,0	0,7	0,1
Py-29-9	X	2,8	662,1	96,7	4,0	2,5	547,4	23,0	0,2	0,0	0,3	0,1	0,7	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1
Py-35-1	X	3,8	144,3	126,3	13,0	5,5	6,7	82,7	0,2	0,1	0,5	0,0	1,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,1
Py-35-10	X	33,3	256,8	111,8	11,4	5,1	6,6	84,3	0,2	0,2	0,4	0,1	1,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,7	0,1
Py-35-2	X	1,7	92,4	121,7	9,4	5,2	6,6	75,8	0,2	0,1	0,4	0,0	0,5	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Py-35-3	X	10,8	34,7	117,9	14,5	5,2	5,2	132,0	0,3	0,1	0,4	0,3	11,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,6	0,0
Py-35-4	X	3,3	85,8	115,5	8,3	4,6	6,1	67,2	0,5	0,1	0,4	0,0	0,7	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0
Py-35-5	X	72,6	17,1	95,5	35,8	11,0	6,2	126,3	0,5	0,9	1,0	1,2	4,5	0,0	0,2	0,3	0,0	0,7	0,1
Py-35-6	X	11,5	3,9	107,9	27,2	5,2	4,5	127,8	0,2	0,1	1,3	5,4	1,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,7	0,0
Py-35-7	X	17,4	16,8	111,9	403,5	5,0	5,0	188,8	0,6	0,3	0,8	2,6	8,3	0,0	0,3	0,2	0,0	1,7	0,0
Py-35-8	X	62,2	180,9	92,2	32,3	19,4	5,0	91,9	1,9	0,6	0,4	0,2	2,8	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,3
Py-35-9	X	17,8	126,2	104,4	21,5	4,4	4,9	18,3	0,8	0,4	0,6	0,0	0,9	0,0	0,2	0,3	0,0	0,7	0,1
Py-41-1	X	1,3	38,1	92,2	4,6	3,1	46,1	29,5	0,1	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,7	0,0
Py-41-2	X	19,2	405,8	44,5	5,8	2,7	3,3	87,2	0,1	0,1	0,4	0,0	17,6	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	1,2
Py-41-3	X	192,8	116,0	91,8	44,0	2,8	58,5	35,0	0,2	0,3	0,4	0,1	2,6	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,3
Py-41-4	X	14,2	127,9	93,2	13,8	2,5	50,3	15,5	0,1	0,2	0,3	0,0	2,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,4	0,1
Py-41-5	X	26,3	174,6	111,5	5,4	2,9	66,0	42,5	0,2	0,2	1,5	0,2	5,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Py-41-6	X	1,5	260,3	126,1	3,1	2,7	58,7	46,2	0,2	0,0	0,4	0,0	2,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0
Py-41-7	X	3,4	80,6	84,3	2,4	2,5	42,2	25,7	0,1	0,1	0,3	0,0	1,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,1
Py-41-8	X	3,4	95,1	92,5	1,8	2,2	82,8	21,9	0,1	0,0	0,3	0,0	1,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,0
Py-41-9	X	1,4	97,2	71,5	1,3	2,1	64,4	53,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Py-55-1	X	132,1	115,5	157,4	4145	122,4	623,0	4,5	7,2	21,9	0,8	56,6	27,5	0,8	0,5	0,5	1,2	61,4	0,2
Py-55-10	X	150,2	67,0	132,7	416,4	19,0	423,8	2,5	1,6	17,1	0,5	34,2	18,2	0,6	0,3	0,3	0,1	40,2	0,2
Py-55-2	X	2,2	124,2	148,5	40,2	36,4	258,5	9,0	0,0	0,7	0,5	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0
Py-55-3	X	116,7	29,4	139,9	425,8	19,1	417,2	2,0	2,1	16,9	0,8	38,7	20,4	0,6	0,4	0,4	0,0	45,4	0,2
Py-55-4	X	170,5	73,5	147,5	381,9	18,0	452,6	3,1	1,7	16,3	0,6	37,3	18,5	0,6	0,4	0,4	0,1	45,2	0,2
Py-55-5	X	3193	71,9	160,1	297,3	27,8	422,0	3,0	1,4	12,9	0,6	34,2	16,7	0,5	0,4	0,4	0,8	38,0	0,2
Py-55-6	X	64,7	49,3	157,1	288,8	9,1	390,8	1,9	1,4	14,2	0,6	30,0	14,2	0,5	0,4	0,4	0,9	33,0	0,2

Region	Groupe		⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁶ Zn	⁷⁵ As	⁸² Se	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sn	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁸ Bi		
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm										
Py-55-7	X			83,5	55,1	148,3	318,9	11,1	430,3	2,2	1,5	14,7	1,0	35,5	17,4	0,5	0,4	0,3	0,8	41,2	0,2	
Py-55-8	X				204,6	78,7	148,2	437,5	20,9	417,6	3,0	2,7	17,5	0,5	30,9	14,2	0,7	0,4	0,4	0,2	36,9	0,2
Py-55-9	X			364,3	111,1	150,2	597,8	19,9	561,1	3,6	1,9	23,4	0,5	46,6	22,9	0,8	0,4	0,4	0,2	57,0	0,2	
Py-56-1	X			114,2	96,8	121,5	304,6	11,4	622,6	4,1	0,9	22,7	0,6	38,7	1,8	0,9	0,4	0,6	2,7	55,2	0,1	
Py-56-10	X			380,6	33,9	81,6	19,7	2,3	163,9	3,4	0,2	0,0	0,5	0,2	0,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,0	
Py-56-11		X		2,5	34,9	97,9	5,5	12,8	204,2	4,0	0,2	0,6	0,4	0,4	0,0	0,3	0,3	0,0	0,5	0,0		
Py-56-2	X			69,7	138,0	96,6	498,9	9,3	832,6	6,5	1,3	38,8	0,4	68,0	2,5	1,6	0,6	0,6	2,0	103,9	0,2	
Py-56-3	X			112,6	78,4	115,9	505,2	16,2	837,5	3,6	1,5	37,3	0,6	82,7	3,0	1,8	0,5	0,5	1,1	127,8	0,2	
Py-56-4	X			42,0	202,7	115,5	450,2	9,3	768,0	10,8	1,4	29,6	0,4	38,6	1,8	1,2	0,5	0,5	3,8	56,4	0,1	
Py-56-5	X			33,8	141,7	138,4	432,2	8,9	680,4	3,5	1,0	27,0	0,5	34,0	1,6	1,0	0,4	0,4	5,6	50,6	0,1	
Py-56-6	X			198,7	48,7	86,1	324,5	402,7	687,7	3,6	1,5	26,0	0,4	57,2	1,9	0,8	0,5	0,5	0,2	78,1	0,2	
Py-56-7	X			285,8	73,2	159,7	300,0	136,6	476,5	4,9	3,4	21,9	0,8	27,0	1,5	0,7	0,4	0,5	0,3	39,1	0,1	
Py-56-8	X			195,2	144,7	159,7	245,4	21,5	582,9	8,3	2,6	24,3	0,5	34,0	1,7	1,0	0,5	0,6	0,5	51,2	0,1	
Py-56-9	X			247,6	29,5	120,5	356,1	15,6	739,0	3,6	2,7	35,6	0,6	88,5	2,9	1,2	0,2	0,5	0,1	124,6	0,2	
Py-57-1	X			7,6	203,9	171,6	27,5	10,2	179,2	119,9	0,7	1,6	0,5	1,2	20,4	0,1	0,3	0,3	0,1	2,0	0,0	
Py-57-2	X			23,1	161,9	275,2	50,8	57,9	200,4	101,3	1,7	1,5	0,5	0,8	19,9	0,0	0,4	0,3	0,2	1,7	0,0	
Py-57-3	X			12,9	16,6	73,8	14,0	45,8	419,9	10,8	0,1	13,7	5,7	0,4	0,6	0,0	0,3	0,3	0,0	0,8	0,0	
Py-57-4	X			169,9	46,6	147,7	823,5	191,9	683,3	2,4	2,3	38,2	0,5	61,6	15,1	1,2	0,4	0,4	0,1	90,2	0,2	
Py-57-5	X			139,6	86,1	109,2	428,7	9,0	675,3	2,7	1,3	47,4	0,4	45,6	13,0	1,0	0,4	0,4	0,2	71,6	0,2	
Py-57-6	X			72,2	125,4	144,5	297,8	24,8	421,9	5,7	2,6	17,9	0,5	11,8	4,1	0,5	0,3	0,3	0,3	16,9	0,1	
Py-57-7	X			109,4	15,7	116,4	274,4	54,7	20,7	1,5	0,4	3,8	0,4	2,1	0,7	0,1	0,4	0,4	0,0	2,5	0,0	
Py-57-8	X			1,9	28,0	104,1	3,1	2,3	252,8	1,1	0,1	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0		
Py-58-1	X			188,4	98,6	161,7	392,7	9,9	718,7	3,4	2,2	54,5	0,5	54,3	1,8	0,6	0,3	0,4	0,5	86,5	0,2	
Py-58-10	X			107,7	104,9	153,4	339,8	9,0	648,6	2,2	1,6	45,5	0,4	36,4	1,6	0,5	0,3	0,3	0,8	66,0	0,1	
Py-58-11	X			117,0	117,1	156,1	327,8	8,5	665,8	3,9	2,0	44,5	0,4	38,7	1,7	0,6	0,3	0,3	1,6	70,3	0,1	
Py-58-2	X			242,0	101,5	210,8	688,6	2,9	1365	8,2	3,3	101,6	0,6	121,1	3,6	1,5	0,5	0,5	0,2	197,6	0,3	
Py-58-3	X			128,3	143,0	187,8	598,2	9,5	1086	9,2	3,1	77,5	0,5	68,1	2,4	0,9	0,4	0,4	0,4	108,5	0,2	
Py-58-4	X			142,1	49,7	129,7	274,0	11,4	466,3	1,8	1,7	34,3	0,7	23,4	1,2	0,3	0,4	0,2	38,7	0,1		

Région	Groupe	⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁸ Zn	⁷⁵ As	⁸² Se	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sr	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi	
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm							
Py-58-5	X	5,7	46,2	86,2	114,8	3,0	106,3	46,4	0,2	3,6	0,4	1,7	26,3	0,1	0,2	0,2	0,0	2,5	0,0	
Py-58-6	X	3,5	19,6	100,5	73,1	2,8	112,3	41,4	0,2	1,8	0,4	0,3	4,2	0,1	0,2	0,2	0,0	0,5	0,0	
Py-58-7	X	6,8	92,8	64,9	4,5	2,1	201,7	11,9	0,1	0,5	0,2	0,0	1,8	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	
Py-58-8	X		103,2	94,6	128,6	228,3	8,9	486,1	2,9	1,0	30,2	0,4	23,1	1,2	0,3	0,3	0,3	0,6	39,6	0,1
Py-58-9	X		105,3	76,1	144,9	342,8	8,6	667,6	3,0	1,7	46,0	0,4	42,3	1,7	0,6	0,3	0,3	0,9	76,6	0,1
Py-63-1	X	2,3	124,2	141,1	11,5	3,7	545,4	6,3	0,2	1,0	0,5	1,0	0,4	0,0	0,4	0,4	0,0	1,8	0,0	
Py-63-2	X	2,1	111,0	84,7	5,0	6,3	343,2	4,2	0,1	1,6	0,5	0,4	0,4	0,0	0,3	0,3	0,0	2,9	0,0	
Py-63-3	X	1,6	102,8	153,4	5,3	3,2	385,4	4,9	0,2	0,1	0,4	0,2	0,5	0,0	0,3	0,4	0,0	0,7	0,0	
Py-63-4	X	1,8	139,9	138,8	2,9	2,3	880,0	8,3	0,1	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,5	0,5	0,0	0,1	0,0	
Py-63-5	X	2,0	34,4	155,7	173,2	15,7	300,0	4,1	0,1	1,6	2,4	0,6	0,5	0,0	0,4	0,5	0,0	2,3	0,0	
Py-63-6	X	1,8	62,8	170,3	9,9	3,6	515,8	4,8	0,2	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,5	0,5	0,0	0,1	0,0	
Py-63-7	X	1,5	60,5	217,0	2,7	3,3	597,1	5,9	0,1	0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	
Py-63-8	X	1,5	67,1	95,2	1,9	2,2	580,0	4,9	0,1	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0	
Py-63-9	X	1,4	129,1	145,5	1,1	2,9	981,1	5,9	0,2	0,0	0,4	0,0	0,3	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	
Py-64-1	X	7,3	113,6	175,0	12,9	4,9	109,0	7,1	0,0	0,1	0,9	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	
Py-64-2	X	174,2	75,0	188,0	20,7	133,5	134,2	8,0	0,3	0,1	3,2	0,1	0,9	0,0	0,3	0,3	0,0	0,4	0,0	
Py-64-3	X	7,4	68,8	172,7	16,9	5,1	145,6	7,6	0,2	0,0	0,5	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	
Py-64-4	X		103,4	434,8	208,7	26,0	20,3	143,0	7,4	1,0	0,1	1,2	0,1	0,7	0,0	0,2	0,3	0,0	0,7	0,0
Py-64-5	X		27,5	300,7	233,7	2852	965,8	330,1	8,4	1,1	1,3	1,1	11,7	1,1	0,1	0,3	0,3	0,0	8,7	0,0
Py-64-6	X	11,9	245,3	247,5	20,9	11,3	553,4	9,5	0,7	0,6	0,8	2,1	1,1	0,0	0,2	0,2	0,0	1,1	0,0	
Py-64-7	X	2,9	171,7	182,3	188,6	16,8	398,9	10,2	0,4	2,6	0,6	6,0	1,0	0,1	0,2	0,2	0,0	2,9	0,0	
Py-65-1	X	2,9	272,2	147,3	5,7	2,3	505,9	6,1	0,1	0,0	0,3	0,1	0,4	0,0	0,5	0,5	0,0	0,2	0,0	
Py-65-2	X	1,8	59,6	213,1	8,1	3,3	816,3	9,0	0,2	0,0	0,4	0,8	0,7	0,0	0,4	0,4	0,0	0,8	0,0	
Py-65-3	X	3,0	212,6	99,8	6,0	3,0	659,4	3,3	0,2	0,3	0,3	0,8	0,8	0,0	0,6	0,6	0,0	0,4	0,0	
Py-65-4	X	2,9	64,7	107,0	3,7	3,1	568,4	3,0	0,1	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	
Py-65-5	X	4,5	271,3	124,8	10,5	4,1	650,1	3,7	0,2	0,2	0,6	0,7	0,2	0,0	0,4	0,3	0,0	0,5	0,0	
Py-65-6	X	58,8	4,7	116,5	22,2	46,2	151,2	5,3	0,8	0,2	0,6	7,4	0,7	0,0	0,2	0,2	0,0	7,3	0,0	
Py-65-7	X	1,7	74,6	89,5	12,9	3,2	392,4	2,7	1,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	0,0	

Région	Groupe			⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁶ Zn	⁷⁵ As	⁸² Se	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sn	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm								
Py-65-8	X			19,1	41,8	70,3	370,2	28,5	441,6	3,0	3,9	0,8	0,3	1,4	0,5	0,0	0,2	0,3	0,0	1,1	0,0
Py-65-9	X			10,4	30,4	140,7	135,5	6,8	295,7	2,9	9,2	0,9	0,6	3,4	0,8	0,1	0,2	0,2	0,0	2,0	0,0
Py-66-1	X			15,1	225,4	128,5	123,2	37,5	501,9	8,8	0,2	0,3	0,6	0,8	0,6	0,0	0,4	0,3	0,0	0,8	0,0
Py-66-2	X			34,2	183,4	167,9	184,3	7,0	368,6	12,3	0,2	0,5	1,0	2,5	0,7	0,0	0,2	0,3	0,0	1,7	0,0
Py-66-3	X			36,2	90,1	118,4	3367	192,1	192,7	20,4	0,3	1,3	0,5	0,9	0,7	0,0	0,3	0,3	0,0	2,0	0,0
Py-66-4		X		9,4	133,8	633,8	35,4	5,9	500,6	18,7	0,2	0,1	0,0	0,4	0,3	0,0	0,6	0,6	0,0	0,3	0,0
Py-66-5	X			8,1	130,2	743,3	885,0	145,7	773,6	20,5	0,3	1,7	0,3	3,5	0,7	0,1	0,6	0,6	0,0	2,1	0,0
Py-66-6	X			7,7	433,3	213,4	68,6	4,0	765,5	8,4	0,1	0,6	0,2	0,6	0,3	0,0	0,6	0,5	0,0	0,7	0,0
Py-67-1	X			48,2	400,8	323,6	611,5	10,1	1060	13,6	3,8	22,3	0,4	75,1	9,2	1,7	0,3	0,3	4,1	30,7	0,2
Py-67-10	X			361,5	278,9	329,8	416,4	92,5	1032	5,2	1,1	29,0	0,7	192,1	17,0	1,9	0,5	0,5	0,4	112,4	0,5
Py-67-11	X			3,7	26,0	141,7	49,5	2,6	4,1	28,3	0,2	0,0	0,3	0,0	6,4	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
Py-67-12	X			52,3	755,3	391,9	32,6	6,3	69,3	864,2	12,2	0,2	0,3	0,3	1,0	0,0	0,3	0,3	0,0	1,0	0,0
Py-67-2	X			89,1	155,9	206,6	390,2	16,0	715,5	4,1	3,0	17,0	0,4	58,9	6,9	1,1	0,3	0,2	1,0	28,3	0,2
Py-67-3	X			67,3	182,8	271,9	616,1	8,2	960,9	7,0	2,8	24,5	0,5	82,7	10,4	1,7	0,3	0,3	1,7	35,6	0,3
Py-67-4	X			58,6	416,1	238,4	729,6	16,7	971,9	12,2	1,2	26,1	0,4	97,5	11,2	1,7	0,4	0,3	2,9	50,2	0,3
Py-67-5	X			2,7	923,5	83,8	4,0	1,8	633,4	3,6	0,1	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Py-67-6	X			88,6	342,1	144,8	678,9	848,8	197,9	14,4	0,2	3,4	0,4	4,5	1,1	0,2	0,3	0,3	0,3	28,2	0,0
Py-67-7	X			328,7	49,5	107,0	3361	183,1	123,3	1,1	0,2	6,9	0,8	6,0	1,5	0,4	0,3	0,3	2,6	4,6	0,0
Py-67-8	X			451,0	22,1	92,4	3509	220,0	55,1	4,2	0,1	1,5	0,3	0,9	0,5	0,1	0,2	0,2	0,3	1,8	0,0
Py-67-9	X			56,7	178,8	138,1	310,7	70,8	268,7	6,8	10,0	555,5	0,5	4,2	0,5	0,6	0,2	0,2	1,4	13,6	0,0
Py-68-1	X			1,4	30,9	155,3	14,3	6,1	215,7	6,3	0,2	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0
Py-68-10	X			131,9	67,2	146,6	537,1	24,9	561,9	7,2	1,7	39,6	1,1	34,7	1,7	1,0	0,6	0,6	0,3	65,1	0,1
Py-68-11	X			2,1	15,5	98,9	5,1	3,7	107,2	5,2	0,1	0,3	0,3	0,0	0,3	0,0	0,5	0,5	0,0	0,1	0,0
Py-68-12	X			1,6	19,4	123,9	5,0	3,9	344,8	6,6	0,2	0,1	0,4	0,0	0,4	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
Py-68-2	X			3,5	30,2	114,5	10,6	5,5	163,1	6,0	0,2	0,1	0,4	0,0	0,5	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0
Py-68-3	X			1,6	13,2	120,9	6,9	4,8	236,3	6,8	0,2	0,0	0,4	0,0	0,5	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
Py-68-4	X			6,8	42,7	115,6	12,0	5,5	107,9	6,0	0,2	0,9	0,4	1,1	0,3	0,0	0,3	0,4	0,0	1,6	0,0
Py-68-5	X			1,5	16,3	100,7	6,1	4,4	7,5	12,7	0,2	0,0	0,4	0,0	0,5	0,0	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0

Région	Grroupe	⁵⁵ Mn	⁵⁹ Co	⁶⁰ Ni	⁶⁵ Cu	⁶⁹ Zn	⁷⁵ As	⁸² Se	⁹⁸ Mo	¹⁰⁷ Ag	¹¹⁸ Sn	¹²¹ Sb	¹²⁵ Te	¹⁹⁷ Au	²⁰⁰ Hg	²⁰² Hg	²⁰⁵ Tl	²⁰⁸ Pb	²⁰⁹ Bi			
	Py1	Py2	Py3	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm									
Py-68-6	X	1,5	15,5	105,4	5,8	4,3	17,0	14,6	0,2	0,1	0,4	0,0	0,8	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0			
Py-68-7	X	16,1	102,0	146,8	16,0	10,7	82,3	11,2	0,3	1,2	0,5	0,7	0,3	0,0	0,3	0,4	0,0	1,3	0,0			
Py-68-8	X	77,7	30,1	128,7	331,3	12,8	366,6	2,2	2,2	29,1	0,5	20,7	1,1	0,6	0,6	0,7	0,2	32,3	0,0			
Py-68-9	X	66,6	67,8	174,3	330,6	13,2	513,9	2,4	2,5	35,4	0,8	23,5	1,1	0,7	0,6	0,6	1,4	41,4	0,0			
Py-H-1	X	6,1	7,2	127,3	46,1	7,4	87,3	39,1	0,3	1,2	1,0	1,0	25,8	0,1	0,3	0,3	0,0	3,1	0,0			
Py-H-2	X	2,7	2,0	128,4	20,9	8,2	90,8	25,8	0,2	0,4	0,9	0,2	164,7	0,2	0,4	0,3	0,0	0,3	0,0			
Py-H-3	X	1,5	0,3	132,3	11,1	5,2	357,4	9,8	0,2	0,0	0,6	0,4	72,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0			
Py-H-4	X	1,4	0,2	132,6	10,9	4,9	460,0	9,4	0,2	0,1	0,4	0,0	181,5	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0			
Py-H-5	X	4,0	21,3	119,3	56,7	5,3	258,1	13,6	0,2	0,9	8,2	0,4	37,2	0,1	0,3	0,3	0,0	1,9	0,0			
Py-H-6	X		1591	19	98,0	477,7	75,8	101,5	8,7	0,2	21,4	8,7	5,2	52,4	1,5	0,5	0,6	1,1	756,1	0,1		
Py-H-7	X			852,2	0,6	115,2	536,6	36,1	134,2	1,2	0,2	15,6	2,9	7,6	70,5	1,1	0,3	0,3	0,0	31,9	0,0	
Py-H-8	X			193,3	1,0	109,0	111,0	28,9	23,0	0,8	0,2	12,7	0,8	2,8	12,7	0,5	0,5	0,5	0,5	7,3	0,0	
Py-H-9	X			393,4	6,6	134,4	106,1	79,5	82,0	2,2	0,2	36,8	3,9	4,9	41,8	0,7	0,3	0,3	0,1	28,4	0,0	
Py-H-10	X				782,2	0,3	112,7	421,4	48,6	100,8	0,7	0,2	11,8	0,6	5,0	50,9	1,3	0,3	0,3	0,0	19,1	0,0
Py-H-11	X				484,6	0,3	117,3	192,0	34,5	91,0	0,8	0,3	9,2	0,8	5,1	45,2	0,5	0,3	0,3	0,0	16,5	0,0
Py-H-12	X				704,7	0,2	99,6	430,7	48,1	148,4	1,1	0,2	17,6	1,1	8,5	79,5	1,1	0,3	0,3	0,0	32,7	0,0

Matrice de corrélation pour les pyrites volcanogènes (*Py1*). En rouge, les coefficients de corrélation >0,4 ou <-0,4

Matrice de corrélation pour les pyrites métamorphiques (Py2). En rouge, les coefficients de corrélation >0,4 ou <-0,4

Matrice de corrélation pour les pyrites volcanogènes recristallisées (Py3). En rouge, les coefficients de corrélation >0,4 ou <-0,4

