
Zonalité et typologie de la carbonatation pour les minéralisations Au-MB

PROJETS 2005-04 & 2006-04

PAR : HASSAN NABIL, PH.D.

AVRIL 2007



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non-commerciales en citant la référence suivante :

Nabil, H. 2006. Zonalité et typologie de la carbonatation pour les minéralisations Au-MB, Projet CONSOREM 2005-04, 34 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

La carbonatation est une altération commune qui accompagne les minéralisations aurifères et de métaux de base. La typologie et la zonalité des espèces de carbonates sont même utilisées, à différentes échelles, comme guides en exploration. Cependant, les méthodes traditionnelles pour établir cette carbonatation impliquent soit la détermination par diffraction X, la colorimétrie ou la microsonde soient des méthodes coûteuses ou longues et donc difficiles à intégrer dans un processus d'exploration. D'un autre côté, les vastes banques de données lithogéochimiques disponibles peuvent également être mises à profit dans l'établissement des types de carbonates et cette approche est donc privilégiée dans le cadre de ce projet.

Plusieurs outils basés sur les données lithogéochimiques de roches totales ont été testés, améliorés ou développés dans le cadre du projet. L'indice de saturation ($\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$ molaire) représente la capacité d'une roche à se combiner avec le CO_2 . L'indice de discrimination (CO_2/CaO molaire) permet de porter un jugement sur les espèces de carbonates présentes dans une roche. L'indice de discrimination a été testé avec succès sur des roches qui ont été analysées également par diffraction x afin d'établir leur abondance et leur typologie de carbonates de manière plus précise.

Un nouveau diagramme de carbonatation a été développé afin de mettre ces deux indices en relation. Ce diagramme permet notamment une discrimination partielle des empreintes des systèmes de carbonatation d'origine volcanogène avec ceux d'origine orogénique. Le diagramme permet également le ciblage des secteurs considérés plus proximaux par rapport aux minéralisations.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
1 Introduction	1
1.1 La carbonatation en contextes minéralisés	1
1.2 Zonalité de la carbonatation	3
1.2.1 Or orogénique	3
1.2.2 Sulfures massifs volcanogènes de type Mattabi	4
1.3 Discrimination des carbonates	5
1.3.1 Méthode de colorimétrie	5
1.3.2 Méthode de diffraction X	6
1.3.3 Lithogéochimie	6
1.4 Objectifs	6
1.5 Méthodologie	7
2 Indices de carbonatation	7
2.1 Indice de saturation: $I_s = \text{CO}_2/\text{CaO} + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}$ molaire	7
2.2 Indice de discrimination : $I_d = \text{CO}_2/\text{CaO}$ molaire	9
3 Validation de l'indice de discrimination	9
3.1 Test pour des roches volcaniques mafiques	9
3.2 Test pour des roches volcaniques variées	11
3.3 Sommaire	15
3.3.1 Exemples d'applications de la zonalité de la carbonatation	15
4 Diagramme de carbonatation	18
5 Conclusion	22
Remerciements	24
Références	25
Annexe I : Analyse de l'indice de saturation	28
Annexe II : Caractéristiques des échantillons analysés (éléments majeurs et diffraction X)	29
Annexe III : Proportions des phases carbonatées par la méthode de diffraction X	31
Annexe IV : Analyse des éléments majeurs et indices d'altération	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Variation de la teneur en CO ₂ (% poids, interpolation par l'inverse de la distance) dans le secteur de la mine Bouchard-Hébert, Groupe de Blake River, Abitibi.	8
Figure 2.	Diagramme CO ₂ /(CaO+FeO+MgO) vs CO ₂ (%) montrant la relation entre la saturation, la teneur en CO ₂ et la composition de la roche.	8
Figure 3.	Diagramme de l'indice de saturation en fonction de l'abondance totale de carbonates établie par diffraction X pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.	9
Figure 4.	Diagramme de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.	10
Figure 5.	Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de discrimination pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.	11
Figure 6.	Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de saturation pour des roches mafiques et felsiques de différents secteurs du Blake River et de Gemini en Abitibi.	12
Figure 7.	Diagrammes de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour les roches felsiques (en haut) et mafiques (en bas) de différents secteurs du Blake River et de Gemini en Abitibi.	12
Figure 8.	Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de discrimination (Id) pour les roches mafiques et felsiques de différents secteurs de l'Abitibi.	13
Figure 9.	Abondance de la sidérite par rapport aux carbonates totaux en fonction de l'indice de discrimination (Id) pour les roches mafiques et felsiques de différents secteurs de l'Abitibi.	14
Figure 10.	Diagrammes de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour des roches du secteur Gemini en Abitibi caractérisées par du matériel de veine carbonatée (sauf un cas de formation de fer).....	14
Figure 11.	A) Distribution générale des types de carbonates dans le gisement de Mattabi (modifié de Franklin et al., 1975) et montrant une dominance de la sidérite dans la cheminée d'altération sous la lentille et de la dolomite à l'extérieur. B) Représentation détaillée de la même lentille minéralisée avec la position des forages. Les ratios molaires CO ₂ /CaO ont été calculés à partir des données lithogéochimiques tirées de Franklin et al., 1975. Ces analyses représentent la moyenne de plusieurs échantillons provenant de chaque trou de forage et les indices de discrimination calculés permettent d'établir la même zonalité avec des Id élevés sous la lentille représentant la présence de la sidérite et des Id entre 1 et 2 à l'extérieur, typique de l'ankérite ou de la dolomite.	15
Figure 12.	Indice de discrimination CO ₂ /CaO pour le secteur de la mine Bouchard-Hébert (méthode d'interpolation : inverse de la distance).....	16
Figure 13.	A) Section vue vers l'ouest du gisement de Casa Berardi en Abitibi avec la position des échantillons de la banque de données Mines Aurizon.	17
Figure 14.	Diagramme de carbonatation.	18
Figure 15.	Carte de la Sous-province d'Abitibi (Daigneault et al., 2004) et localisation des secteurs sélectionnés comme étant dominés par de la carbonatation orogénique et associés aux minéralisations VMS. Pour les secteurs orogéniques, une zone tampon de 1 km au pourtour des failles a été générée pour sélectionner les échantillons de la base de données provenant des partenaires du CONSOREM.	19

Figure 16. Diagrammes de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) de secteurs considérés comme étant caractérisés par des minéralisations orogéniques.	20
Figure 17. Diagrammes de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) de secteurs considérés comme étant caractérisés par des minéralisations volcanogènes.....	21
Figure 18. Carte géologique illustrant la position des échantillons dans le secteur de Bouchard Hébert.	21
Figure 19. Diagramme de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) du secteur Bouchard Hébert. Le diagramme de droite représente les échantillons ayant un I_d supérieur à 2,5 avec une démarcation pour les I_s supérieurs à 70 %.	22
Figure 20. Carte géologique du secteur de Bouchard Hébert avec positionnement des échantillons ayant un I_d supérieur à 2,5 (en rouge) et un I_s supérieur à 70 % (en bleu).	22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Phases carbonatées issues des interactions fluide riche en CO_2 / roches mafiques et ultramafiques (<i>tiré de Harte et Graham, 1975</i>).....	2
Tableau 2. Réactions expliquant la zonalité de la carbonatation dans le cas du gisement aurifère de Kalgoorlie en Australie.	4

1 INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats d'un projet de recherche portant sur la zonalité et la typologie de la carbonatation en contextes de minéralisations aurifères orogéniques et de sulfures massifs volcanogènes. Le projet a été réalisé en deux phases (2005-04 & 2006-04) qui sont ici intégrées et synthétisées dans ce rapport. On y traite d'abord de la carbonatation de manière générale en différents contextes de minéralisation, ceci pour démontrer l'importance de bien établir la typologie et la zonalité des différentes espèces carbonatées. Par la suite, le rapport traitera de la problématique de la détermination typologique de la carbonatation et s'attardera à tester le traitement lithogéochimique. Finalement, des études de cas pour l'exploration minérale seront examinées.

1.1 La carbonatation en contextes minéralisés

La carbonatation est une altération commune aux minéralisations aurifères orogéniques (Kerrich, 1983; Colvine et al., 1988; McCuaig et Kerrich, 1998) et aux gisements volcanogènes de type Matabi (Franklin et al., 1975; Morton et Franklin, 1987; Sharpe et Gemmell, 2001; Allen et al., 1996). Elle se manifeste par un remplacement progressif des silicates de calcium, de fer et de magnésium par des minéraux carbonatés comme la calcite (CaCO_3), l'ankérite (CaFeCO_3), la dolomite (CaMgCO_3), la sidérite (FeCO_3) et la magnésite (MgCO_3), suite à une interaction entre un fluide hydrothermal riche en CO_2 et une roche encaissante.

La composition des phases carbonatées dépend de plusieurs facteurs, incluant la composition des fluides hydrothermaux, la nature des roches encaissantes et les conditions métamorphiques présentes. La composition primaire de la roche influence la nature des carbonates qui seront générés lors d'un apport de CO_2 . Harte et Graham (1975) indiquent que dans les roches de composition basaltique il y aura production de calcite, de dolomite et d'ankérite. Dans une roche ultramafique les phases minérales comme la serpentine, le talc et la trémolite sont remplacées par de la calcite, de la magnésite et de la sidérite (**Tableau 1**).

La carbonatation ne dépend pas uniquement de la disponibilité des éléments Ca-Fe-Mg dans les silicates, mais aussi de la $f\text{CO}_2$ ¹ et de la température. L'abondance des carbonates peut être expliquée par une augmentation de la fraction molaire de CO_2 (X_{CO_2}) dans le fluide ou par une diminution de la température (Johannes, 1969). La fraction molaire de CO_2 (X_{CO_2}) dépend également de l'activité $a_{(\text{K}^+/\text{Na}^+)}$ (Kishida et Kerrich, 1987). En effet, X_{CO_2} augmente avec l'activité de Na et diminue avec celle du K. L'analyse des inclusions fluides (Kerrich, 1983) dans les systèmes volcanogènes révèle que le sodium est supérieur au potassium dans les décharges hydrothermales contrairement aux systèmes aurifères qui sont plus riches en potassium. La variation $a_{(\text{K}^+/\text{Na}^+)}$ dans les deux environnements peut expliquer l'abondance des carbonates dans les minéralisations aurifères orogéniques par rapport au SMV.

D'une manière générale, quelle que soit la température, la dolomite est stable à X_{CO_2} élevée par rapport à la calcite. Par conséquent, la zonalité des phases carbonatées (calcite – dolomite / ankérite – sidérite) observée dans des roches de même composition peut être expliquée par une augmentation de la fraction molaire de CO_2 .

$$^1 X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4}$$

Tableau 1. Phases carbonatées issues des interactions fluide riche en CO₂ / roches mafiques et ultramafiques (tiré de Harte et Graham, 1975)

Roches mafiques
actinotes + épidotes + CO ₂ + H ₂ O → chlorites + calcites + quartz $3\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2] + 2\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) + 10\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O} = 3(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 10\text{CaCO}_3 + 21\text{SiO}_2$
chlorites + calcites + CO ₂ → ankérites + épidotes + quartz + H ₂ O $3(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 19\text{CaCO}_3 + 11\text{CO}_2 = 15\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2 + 2\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) + 3\text{SiO}_2 + 11\text{H}_2\text{O}$
actinote + calcites + CO ₂ → ankérites + quartz + H ₂ O $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2] + 3\text{CaCO}_3 + 7\text{CO}_2 = 5\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2 + 8\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Roches ultramafiques
$3 \text{ trémolites} + 6\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{ talcs} + 6 \text{ calcites} + 4\text{SiO}_2$
$2 \text{ serpentines} + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{talc} + 3 \text{ magnésites} + 3\text{H}_2\text{O}$
$\text{talc} + 3 \text{ calcites} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3 \text{ dolomites} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
$\text{talc} + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{magnésite} + 4\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Roches riches en magnétites
$\text{Magnétite} + 3 \text{ CO}_2 \rightarrow \text{sidérite} + \frac{1}{2} \text{ O}_2$

Les conditions métamorphiques contrôlent également la nature des carbonates. Dans les roches métamorphosées au faciès des schistes verts, la séquence d'altération est dominée par une variété de minéraux carbonatés, des sulfures et des minéraux issus du métasomatisme des alcalis (séricite, biotite, albite, chlorite). Les analyses géochimiques et les observations pétrographiques démontrent qu'il y a un ajout de soufre, de H₂O et de CO₂ dans les roches encaissantes qui enveloppent la minéralisation.

L'ankérite et/ou la dolomite ferrifère avec la pyrite et l'or constituent les principaux minéraux carbonatés caractéristiques des halos d'altérations des roches ayant subi un métamorphisme au faciès des schistes verts et ayant un ratio molaire initial Fe/(Fe+Mg) ≥ 0,5 (Goldfarb et al., 2005). Dans le cas de faibles ratios molaires Fe/(Fe+Mg), tout le fer est incorporé dans la série sidérite-magnésite des carbonates, ce qui défavorise la pyritisation des phases minérales riches en fer. Ceci gêne la précipitation de l'or sous forme disséminée via les réactions de désulfuration (Böhlke, 1989). D'autre part, le degré de sulfuration et le volume d'or disséminé ne sont pas proportionnels à la teneur en fer dans la roche. Ainsi la faible teneur en fer de certaines roches comme les roches métasédimentaires, les granitoïdes et les roches volcaniques intermédiaires, peut être caractérisée par la formation de l'ankérite et de la pyritisation (Böhlke, 1988 et 1989).

Pour des fluides de températures modérées (400-500 °C) caractéristiques des conditions des schistes verts supérieurs, la biotite devient la phase dominante des micas, la pyrrhotite celle des sulfures et la

calcite celle des phases carbonatées. Dans le cas des minéralisations aurifères encaissées dans des roches métamorphisées au faciès des amphibolites, l'assemblage d'altération reflète l'interaction de fluides de hautes températures (≥ 500 °C) avec les roches encaissantes (Colvine, 1989) et le halo d'altération s'étend à un maximum de 10 m de la minéralisation (Eilu et al., 1999). L'amphibole, le grenat et le diopside sont les silicates typiques des zones adjacentes à la minéralisation, alors que la calcite est la phase carbonatée la plus stable dans ces conditions.

1.2 Zonalité de la carbonatation

1.2.1 Or orogénique

Les gisements aurifères orogéniques sont associés à des terrains dont le métamorphisme régional peut être de tous âges (Groves et al., 2002). Ces gisements sont formés durant le processus de déformation (compression à transpression) en bordure des plaques convergentes dans les orogénèses d'accrétion et de collision. La nomenclature *or orogénique* inclut l'ensemble des gisements aurifères connus sous les noms : *quartz-carbonate lode-gold deposits*, *turbidite-hosted lode-gold deposits*, *mesothermal lode-gold* et *archean lode-gold*. Les minéralisations se composent de réseaux simples à complexes de filons qui longent des zones de cisaillement de grandes envergures. Les filons se composent essentiellement de quartz, de carbonates et de pyrite. Les autres minéraux communément associés sont entre autres la tourmaline, la scheelite et l'arsénopyrite (Robert, 1996).

Dans les ceintures de roches vertes archéennes, la carbonatation d'origine orogénique est généralement associée aux grandes failles et aux zones de cisaillement et est caractérisée par des phases carbonatées riches en Fe et en Mg telles que l'ankérite, la dolomite et la magnésite (Groves et al., 1988; Veizer et al., 1989). Un second type de carbonatation régionale, non spatialement ou temporellement associée aux grandes failles, est aussi très développé dans les ceintures archéennes. L'assemblage minéralogique caractéristique de ce type est composé de calcite + ankérite \pm sidérite (Groves et al., 1988).

L'altération hydrothermale est très développée autour des dépôts aurifères orogéniques archéens avec un halo dont l'étendue varie d'une dizaine à une centaine de mètres autour de la minéralisation (Kerrich, 1983; Colvine et al., 1988; Barley et Groves, 1987; McCuaig et Kerrich, 1998). Les principaux types d'altération autour des filons de quartz-carbonates sont la carbonatation, la chloritisation et la silicification (Boyle, 1979). La carbonatation est le type d'altération le plus commun et celui qui est le plus étendu. Une zonalité d'altération caractérise généralement ce type de gisement avec une paragenèse distale (calcite–chlorite–albite–quartz), intermédiaire (calcite–dolomite–chlorite–muscovite–albite–quartz) et proximale (ankérite–dolomite–muscovite–albite–quartz–pyrite) (Eilu et al., 2001). Cette zonalité est également observée dans le gisement de Kalgoorlie en Australie (Phillips, 1988) et de Norbeau au Québec (Dubé, 1990). En effet, trois zones ont été cartographiées dans les deux secteurs, il s'agit de la zone distale à chlorite, la zone proximale à carbonates et la zone minéralisée en pyrite (minéralisation proprement dite). Le **Tableau 2** montre des équations résumant le passage d'une zone à une autre et met en évidence la typologie et la zonalité de la carbonatation dans le cas du gisement de Kalgoorlie (Phillips, 1988).

Tableau 2. Réactions expliquant la zonalité de la carbonatation dans le cas du gisement aurifère de Kalgoorlie en Australie.

<p>Zone distale</p>  <p>Zone proximale</p>	<p>Zone à actinote vers la zone à chlorite</p>
	<p>actinote + fluide (CO₂ + H₂O) → chlorite + calcite + quartz $6\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 12\text{CO}_2 + 14\text{H}_2\text{O} = 5\text{Fe}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 12\text{CaCO}_3 + 8\text{SiO}_2$</p>
	<p>Zone à chlorite vers la zone des carbonates</p>
	<p>Chlorite + calcite + fluide (CO₂) → ankérite + quartz + fluide (H₂O) $\text{Fe}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 6\text{CaCO}_3 + 6\text{CO}_2 = 6\text{FeCa}(\text{CO}_3)_2 + 4\text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$</p>
	<p>Chlorite + fluide (CO₂) → sidérite + quartz + fluide (H₂O) $\text{Fe}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 6\text{CO}_2 = 6\text{FeCO}_3 + 4\text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$</p>
	<p>Zone des carbonates vers la zone à pyrite</p>
	<p>Sidérite + fluide (H₂O + O₂) → pyrite + fluide (CO₂ + H₂O) $\text{FeCO}_3 + 2\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{FeS}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$</p>
<p>Magnétite + fluide (CO₂) → sidérite + fluide (O₂) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{CO}_2 = 3\text{FeCO}_3 + \frac{1}{2}\text{O}_2$</p>	

1.2.2 Sulfures massifs volcanogènes de type Mattabi

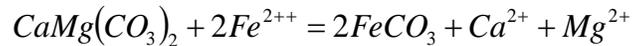
Les principaux éléments du modèle de mise en place des SMV sont résumés dans Franklin et al. (2005). Basé, entre autres, sur la présence ou l'absence de carbonates, Morton et Franklin (1987) subdivisent les gisements de Cu-Zn (SMV) en deux types : Mattabi et Noranda. Cette classification se base sur la profondeur de l'eau sous laquelle ces dépôts sont formés, les différences de composition et les caractéristiques physiques des roches volcaniques qui forment le mur.

Les dépôts de type **Noranda** sont encaissés par une séquence volcanique bimodale mafique. Ces roches se forment suite à une activité extrusive dans une profondeur dépassant les 500 mètres sous l'eau. Les cheminées d'altération de ce type sont très bien définies et comportent une zone centrale chloriteuse, entourée d'une auréole sériciteuse. La zone d'altération semi-concordante est profonde et est composée de quartz-épidote-actinote (Morton et Franklin, 1987).

Les dépôts de type **Mattabi** sont associés à des roches volcaniques qui se sont déposées dans des milieux subaériens à marins peu profonds (< 500 m). Il s'agit d'une séquence de roches pyroclastiques de compositions bimodale felsique. Les cheminées d'altération faiblement définies contiennent des assemblages de carbonates riches en fer, dolomite, calcite, chlorite riche en fer, séricite, aluminosilicates (andalousite, kyanite, pyrophyllite) et quartz. Le type Mattabi est également caractérisé par une zone d'altération semi-concordante à carbonate, séricite, quartz et aluminosilicates (Morton et Franklin, 1987).

Une des caractéristiques fondamentales dans les paragenèses d'altération des deux types de dépôts est la présence de carbonates dans le type Mattabi et leur quasi-absence dans le type Noranda. Cette étude vise donc à documenter la typologie et la zonalité de la carbonatation plus spécifiquement pour le type Mattabi.

Les carbonates riches en fer correspondent à la sidérite, l'ankérite et/ou la dolomite. Une zonalité est observée dans le gisement de Mattabi (Franklin, 1996). La sidérite se concentre dans la cheminée alors que l'ankérite et/ou dolomite est typique de la zone d'altération semi-concordante. Le remplacement de la dolomite par la sidérite peut respecter la réaction suivante :



La distribution des différentes espèces de carbonates marque aussi les zones proximales et distales associées au gisement de Normétal en Abitibi (Lafrance, 2003). En effet, la composition du carbonate passe de sidérite (cheminée d'altération), à dolomite ferrifère – ankérite (zone de 2-4 km autour de la cheminée), à ankérite – ankérite ferrifère (racine de la cheminée) à calcite en s'éloignant latéralement et en profondeur des lentilles de sulfures. Une telle zonalité est présente aussi dans les gisements de Teutonic Bore (Hallberg et Thompson, 1985) et de Scuddles (Ashley et al., 1988) du craton de Yilgarn.

1.3 Discrimination des carbonates

Comme démontré aux sections précédentes, la carbonatation est une altération importante associée aux minéralisations aurifères orogéniques et de SMV de type Mattabi. Certaines études ont pu identifier des zonalités de différents types de carbonates autour des zones ou lentilles minéralisées, ceci aussi bien dans les gisements aurifères orogéniques que pour les SMV de type Mattabi. Par conséquent, l'altération carbonatée présente un excellent potentiel pour être utilisée comme guide d'exploration dans ces contextes de gisements. De plus, la distinction entre une carbonatation d'origine volcanogène et une carbonatation orogénique serait utile dans certains cas afin de bien saisir le contexte de minéralisation auquel on est confronté dans un stade précoce de l'exploration et donc d'y adapter les stratégies adéquates.

Cependant, au-delà de l'origine et de la zonalité des carbonates, quelques questions d'ordre plus pratique se posent. Comment identifier efficacement et facilement les différentes espèces de carbonates dans une stratégie pour l'exploration ?

1.3.1 Méthode de colorimétrie

La colorimétrie (Dickson, 1965, 1966) est une technique d'attaque suivie d'une coloration chimique faisant ressortir les phases minérales carbonatées. Les échantillons sont d'abord immergés dans une solution d'acide hydrochlorhydrique (HCL) puis sont colorés. Plusieurs méthodes de coloration pour la discrimination des minéraux carbonatés sont utilisées selon la diversité des assemblages (les méthodes ainsi que les recettes utilisées sont illustrées et détaillées par Ayan, 1965).

L'identification et la discrimination des minéraux carbonatés dans les échantillons ou dans les sections polies sont facilitées par l'utilisation d'une technique chimique simple de coloration sans perdre de temps avec les autres investigations géochimiques et microscopiques. L'obtention de bons résultats en peu de temps a rendu autrefois cette méthode très populaire. Cependant, il est très difficile de déterminer directement la nature et les proportions des phases carbonatées dans les roches dont la granulométrie est très fine (exemple des roches volcaniques).

1.3.2 Méthode de diffraction X

La diffraction X permet de mettre en évidence, à partir de la structure cristalline, la nature des minéraux en présence. La technique consiste à déterminer les distances interatomiques et l'arrangement des atomes dans les réseaux cristallins. L'irradiation de la matière par des rayons X permet de générer un spectre de diffraction. Ce dernier constitue l'empreinte caractéristique de la structure cristalline analysée. C'est une méthode très efficace pour discriminer les phases carbonatées, même si la granulométrie des roches est très fine. Toutefois, le coût très élevé des analyses (100 \$/analyse) rend la méthode moins accessible surtout lorsque des centaines d'échantillons, voire des milliers, doivent être analysés.

1.3.3 Lithogéochimie

Les banques de données disponibles contiennent un nombre important d'analyses d'éléments majeurs, il est donc judicieux d'utiliser ce matériel afin d'avoir une méthode capable de mettre en évidence la carbonatation et de discriminer les phases carbonatées. C'est d'ailleurs cette philosophie qui a justifié tout le développement d'une méthode de calcul normatif adaptée pour l'altération soit Normat développée par Mathieu Piché (Piché et Jébrak, 2004).

Le calcium, le fer, le magnésium, le manganèse et le CO₂ constituent les composantes principales des phases carbonatées formant les halos d'altération des gisements orogéniques d'or et de SMV. Ainsi, pour déterminer la composition d'une phase carbonatée à partir de l'analyse totale d'une roche, il est indispensable d'avoir les valeurs du CO₂ en plus de celles du CaO, FeO, MgO et MnO. Toutefois, la plupart des banques de données lithogéochimiques, incluant celles utilisées dans cette étude, ne contiennent que partiellement les teneurs en CO₂ (celles-ci étant incluses dans la valeur de perte au feu avec le H₂O). Cependant, elles peuvent être estimées à partir des valeurs de perte au feu (LOI) grâce au logiciel Normat (Piché et Jébrak, 2004). L'indice de carbonatation (IPAF) est calculé à partir des valeurs analytiques de perte au feu (LOI) des échantillons. Cet indice permet d'estimer une valeur de CO₂ en se basant sur le comportement linéaire d'un ensemble d'échantillons analysés de la Sous-province de l'Abitibi.

Les différentes méthodes utilisées pour définir la carbonatation (colorimétrie, diffraction X, etc.) visent à établir la nature d'un carbonate ou d'un assemblage de carbonates. Elles peuvent être difficiles à interpréter en exploration minérale, car l'analyse de la carbonatation se doit de considérer plusieurs variables comme la proportion de plusieurs phases carbonatées distinctes. De plus, ces méthodes impliquent du temps et des travaux en laboratoire qui ne sont pas idéaux dans une stratégie d'exploration. À l'opposé, les données lithogéochimiques font partie du processus habituel d'exploration et des banques de données parfois substantielles peuvent être compilées au début d'un projet donné. Ceci incite à développer davantage les méthodes lithogéochimiques pour déterminer l'intensité et la typologie de la carbonatation.

1.4 Objectifs

L'objectif principal du projet est de développer un outil de traitement de la carbonatation dans un cadre d'exploration minéral.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Développer une méthodologie de traitement de la carbonatation à partir de la lithogéochimie.
- Tester et valider les différents indices de carbonatation lithogéochimiques.

- Intégrer différents cas d'études permettant de valider l'approche lithogéochimique pour la carbonatation.
- Faire la comparaison entre la carbonatation des systèmes volcanogènes et des systèmes orogéniques.

1.5 Méthodologie

Une revue de la littérature a été effectuée dans le but de documenter la carbonatation en contextes de minéralisations aurifères orogéniques et SMV. Les aspects touchant aux caractéristiques principales de la carbonatation, aux facteurs contrôlant la composition des carbonates et à la typologie et la zonalité de la carbonatation ont ainsi été documentés. Une revue des différentes techniques de discrimination des carbonates a aussi été complétée en apportant une attention particulière à l'approche lithogéochimique.

Des banques de données provenant de partenaires du CONSOREM ont été traitées pour des contextes aurifères et volcanogènes. Différents indices de carbonatation ont été testés et/ou développés à partir de ces banques de données. De plus, des analyses complémentaires en éléments majeurs et des analyses par diffraction X ont été effectuées afin de valider l'utilisation des indices développés à partir de la lithogéochimie.

2 INDICES DE CARBONATATION

2.1 Indice de saturation: $I_s = \text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$ molaire

Le ratio molaire $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$ a été développé comme un indicateur approprié du degré de carbonatation. Un ratio légèrement semblable ($\text{CO}_2/\text{Ca}+\text{Fe}+\text{Mg}$) était déjà utilisé par Kishida et Kerrich (1987) pour mettre en évidence l'importance de la carbonatation dans le gisement aurifère de Kerr-Addison en Ontario. Cet indice est ici légèrement modifié en utilisant les oxydes CaO, FeO et MgO sous forme molaire et en incorporant le MnO afin de tenir en compte des phases carbonatées riches en Mn (p. ex. rhodochrosite = MnCO_3).

Les cations Ca, Fe, Mg et Mn sont présents dans les roches volcano-sédimentaires sous forme de silicates. Par conséquent, dans un tel cas le ratio molaire est près de 0. Au fur et à mesure que l'altération en carbonate s'accroît, ces cations sont progressivement transférés dans les carbonates et le ratio approche la valeur de saturation de 1.

L'abondance de CO_2 (%) pourrait être perçue comme un indicateur fiable du degré de carbonatation. Cependant, cette abondance fait abstraction de la capacité d'une roche donnée à fixer le CO_2 , cette capacité étant reliée à sa composition. Pour illustrer ce concept, prenons comme exemple le secteur du gisement de Bouchard-Hébert dans le Groupe de Blake River en Abitibi et qui est associé à une forte carbonatation interprétée d'origine volcanogène (Mueller et al., 2009). La **Figure 1** montre une carte géologique simplifiée du secteur avec les principales unités lithologiques. La maille par interpolation de la teneur en CO_2 indique une forte propension des roches mafiques à fixer plus efficacement le CO_2 . Le diagramme de la **Figure 2** montre pour le secteur de Bouchard-Hébert, l'indice de saturation en fonction du taux de CO_2 . L'abondance en CO_2 (%) est très élevée dans les volcanites mafiques par rapport aux rhyolites. Le diagramme permet de comparer que pour une saturation de 80 %, le niveau de CO_2 dans les rhyolites est de 3 % alors qu'il est de 12 % dans les basaltes. Le degré de saturation se révèle donc un meilleur estimateur du degré de carbonatation d'une roche donnée et neutralise en partie l'effet de la composition primaire de la roche et donc de sa capacité à fixer le CO_2 . Toutefois, dans le cas des roches riches en pyrite et en arsénopyrite, il faut soustraire la quantité de fer associée aux sulfures du fer total.

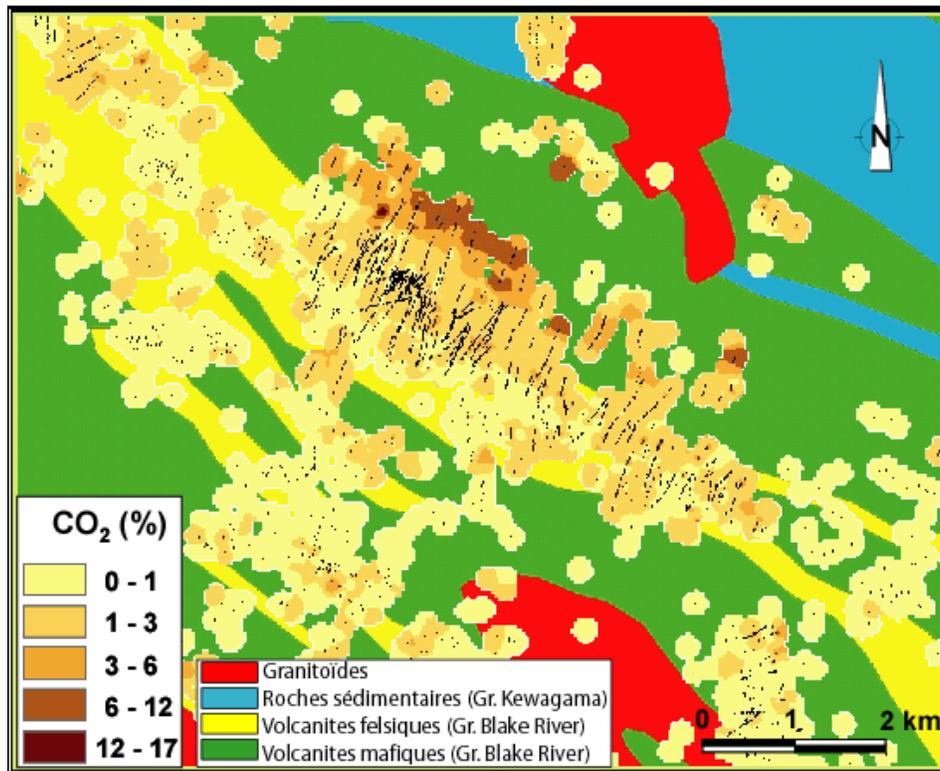


Figure 1. Variation de la teneur en CO₂ (% poids, interpolation par l'inverse de la distance) dans le secteur de la mine Bouchar-Hébert, Groupe de Blake River, Abitibi (les points noirs représentent les points d'analyses lithogéochimiques).

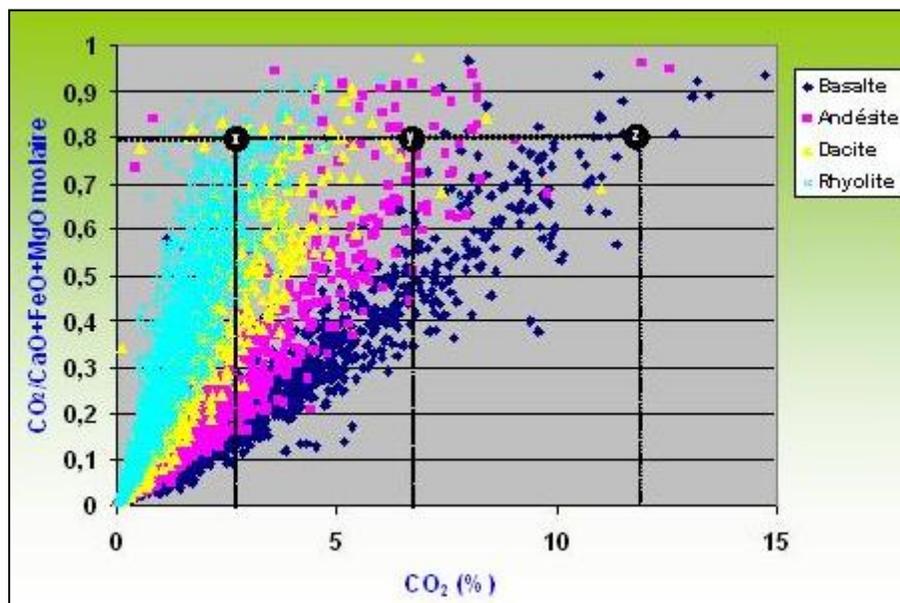


Figure 2. Diagramme CO₂/(CaO+FeO+MgO) vs CO₂(%) montrant la relation entre la saturation, la teneur en CO₂ et la composition de la roche (p.ex. taux de saturation de 80 % pour les rhyolites, andésites et basaltes à des teneurs respectives en CO₂ correspondant aux valeurs de x, y et z).

2.2 Indice de discrimination : $I_d = \text{CO}_2/\text{CaO}$ molaire

Une méthode rapide et efficace pour discriminer les différentes phases de la carbonatation est l'utilisation du ratio molaire CO_2/CaO (Whitehead et Davies, 1988). La discrimination est possible parce que la calcite, l'ankérite-dolomite et la sidérite-magnésite ne contiennent pas le même nombre de moles de CaO pour une mole de CO_2 . La calcite pure (CaCO_3) contient une mole de CO_2 pour une mole de CaO et possède donc un ratio de 1. L'ankérite $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ et la dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ contiennent deux moles de CO_2 pour une mole de CaO et ont donc un ratio de 2. La sidérite et la magnésite quant à elles possèdent un rapport CO_2/CaO très élevé qui tend vers l'infini parce qu'elles ne contiennent pas de CaO.

3 VALIDATION DE L'INDICE DE DISCRIMINATION

Afin de valider l'indice de discrimination, une série de tests en différents contextes de minéralisation a été réalisée. Les échantillons ont été analysés par la méthode de diffraction X au laboratoire de radiocristallographie (diffractomètre des rayons X) de l'UQAM, ceci pour déterminer les proportions relatives des différents carbonates. Les résultats ont été par la suite comparés aux ratios molaires CO_2/CaO calculés à partir d'analyses lithogéochimiques des mêmes échantillons réalisées aux Laboratoires Géoscientifiques de l'OGS² par la méthode ICP-MS. Les résultats des analyses lithogéochimiques et les déterminations par diffraction sont présentés à l'**Annexe I**.

3.1 Test pour des roches volcaniques mafiques

Un premier test a été réalisé sur des échantillons de roches mafiques provenant du gisement de Casa Berardi. Ces roches mafiques sont localisées près des zones minéralisées et font partie de la zone de déformation de Casa Berardi (Pilote et al., 1990). Les roches présentent différentes valeurs de CO_2 et sont donc adéquates pour valider si l'analyse lithogéochimique permet de porter un jugement sur la nature et l'intensité de la carbonatation.

Tout d'abord le diagramme de l'indice de saturation en fonction de l'abondance totale de carbonates établie par diffraction X montre une bonne corrélation ce qui permet de conclure que l'indice de saturation est un excellent estimateur de l'abondance de carbonates dans la roche (**Figure 3**).

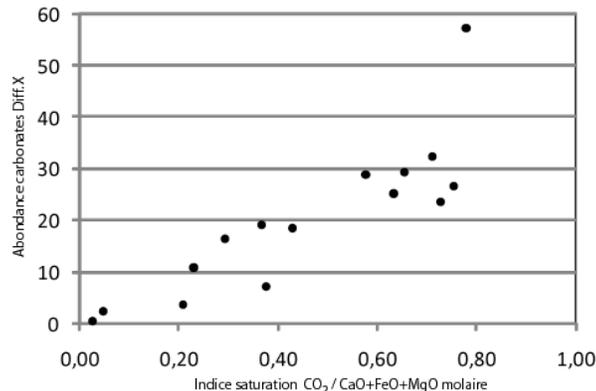


Figure 3. Diagramme de l'indice de saturation en fonction de l'abondance totale de carbonates établie par diffraction X pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.

² http://www.mndmf.gov.on.ca/mines/ogs/labs/default_f.asp

Le diagramme de la **Figure 4** montre les différentes espèces de carbonates en fonction des indices de saturation et de discrimination. Ce diagramme permet de voir que l'ankérite représente l'espèce dominante du secteur et que son abondance devient globalement omniprésente avec une saturation élevée. La calcite pour sa part semble associée à une saturation plus faible sauf pour un échantillon.

Les résultats de l'abondance des principaux types de carbonates en fonction de l'indice de discrimination montrent que les indices faibles correspondent à une abondance de calcite alors qu'un indice entre 1,7 et 2,3 indique une dominance de l'ankérite. Un échantillon avec un ratio de 2 présente autant d'ankérite que de dolomite. La sidérite apparaît seulement aux ratios élevés.

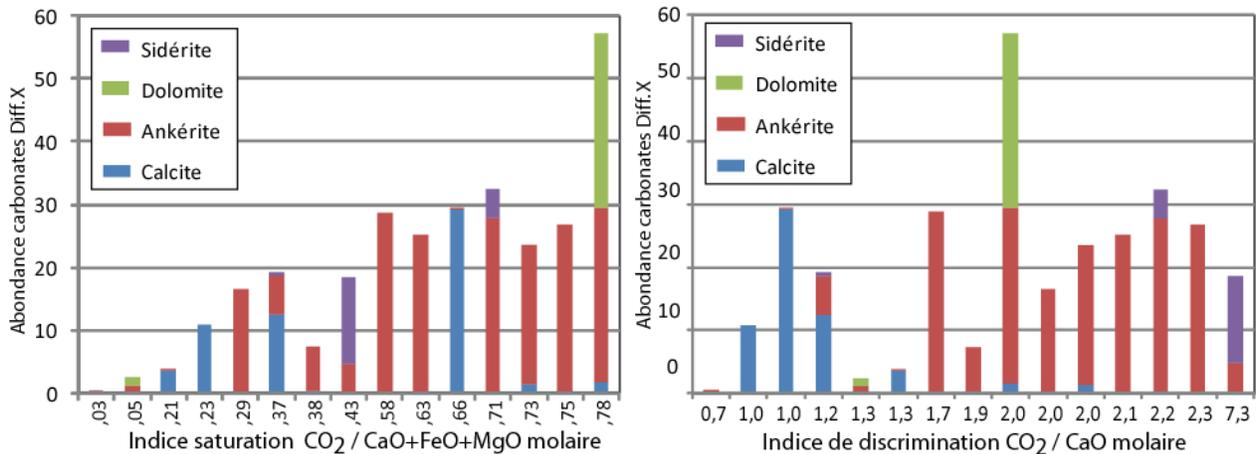


Figure 4. Diagramme de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.

La figure suivante (**Figure 5**) explicite ces résultats en présentant l'abondance de chaque espèce de carbonates en fonction de l'indice de discrimination. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- Les échantillons ayant un **Id** près de 1 sont caractérisés par une dominance de la calcite;
- Les échantillons ayant un **Id** près de 2 sont caractérisés par une dominance de l'ankérite;
- Un échantillon contenant la dolomite en proportion significative possède un **Id** près de 2 et donc ne peut être distingué de l'ankérite;
- Un échantillon dont le **Id** est élevé à 7 contient une forte proportion de sidérite (14 %).

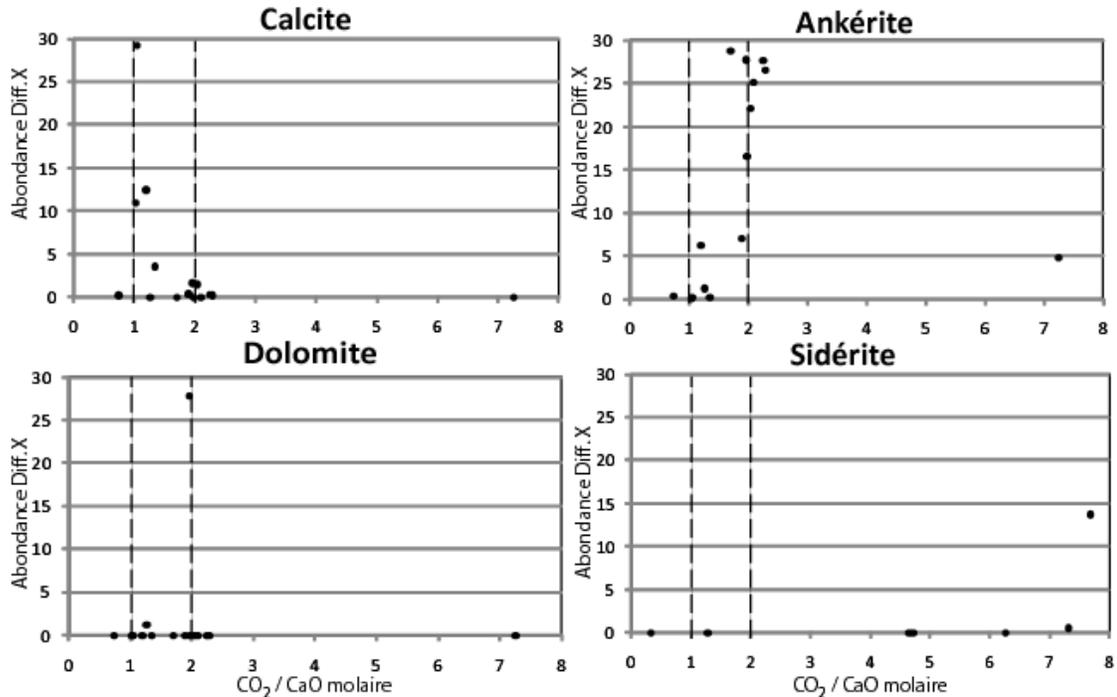


Figure 5. Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de discrimination pour les roches mafiques du secteur Casa Berardi en Abitibi.

3.2 Test pour des roches volcaniques variées.

La même méthodologie a été employée en contexte volcanogène surtout avec des roches provenant du Groupe de Blake River en Abitibi. L'emphase a été placée principalement sur les roches volcaniques felsiques étant donné que le test précédent s'est concentré sur les roches mafiques.

Plusieurs secteurs ont été échantillonnés au sein des roches felsiques dans la Sous-province de l'Abitibi dont celui de Delbridge et de Bouchard Hébert dans le Groupe de Blake River et celui de Gemini dans la portion nord de l'Abitibi. De plus, plusieurs échantillons carbonatés appartenant aux roches mafiques de la caldeira de New Senator au sein du Groupe de Blake River (Pearson et Daigneault, 2009) ont également été inclus dans le traitement. L'idée générale derrière cette sélection vise davantage à analyser le comportement de la carbonatation de manière générale sans s'attarder aux caractéristiques locales de chacun des secteurs.

Le diagramme de la **Figure 6** présente la somme des carbonates identifiés par diffraction X en fonction de l'indice de saturation. Les roches mafiques des différents secteurs montrent une bonne correspondance entre l'indice de saturation et l'abondance totale de carbonates ce qui rejoint le comportement du secteur Casa Berardi précédemment démontré. Toutefois, cette correspondance est moins évidente pour les roches felsiques qui peuvent être fortement saturées avec une abondance relativement faible à modérée de carbonates. Certains échantillons contenant une forte proportion de matériel carbonaté dans des veines sont également représentés sur le diagramme.

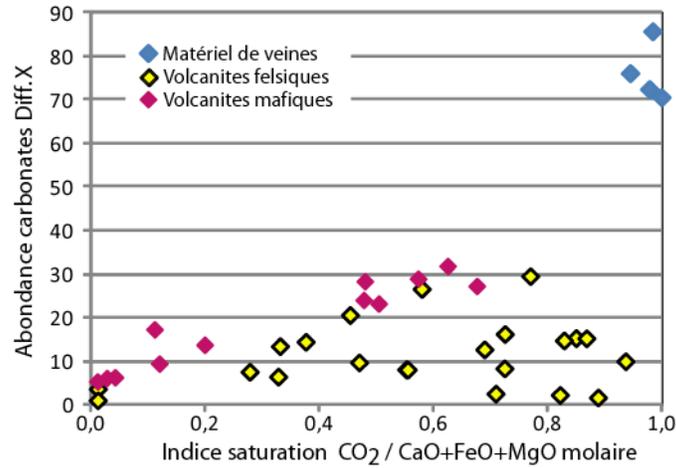


Figure 6. Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de saturation pour des roches mafiques et felsiques de différents secteurs du Blake River et de Gemini en Abitibi.

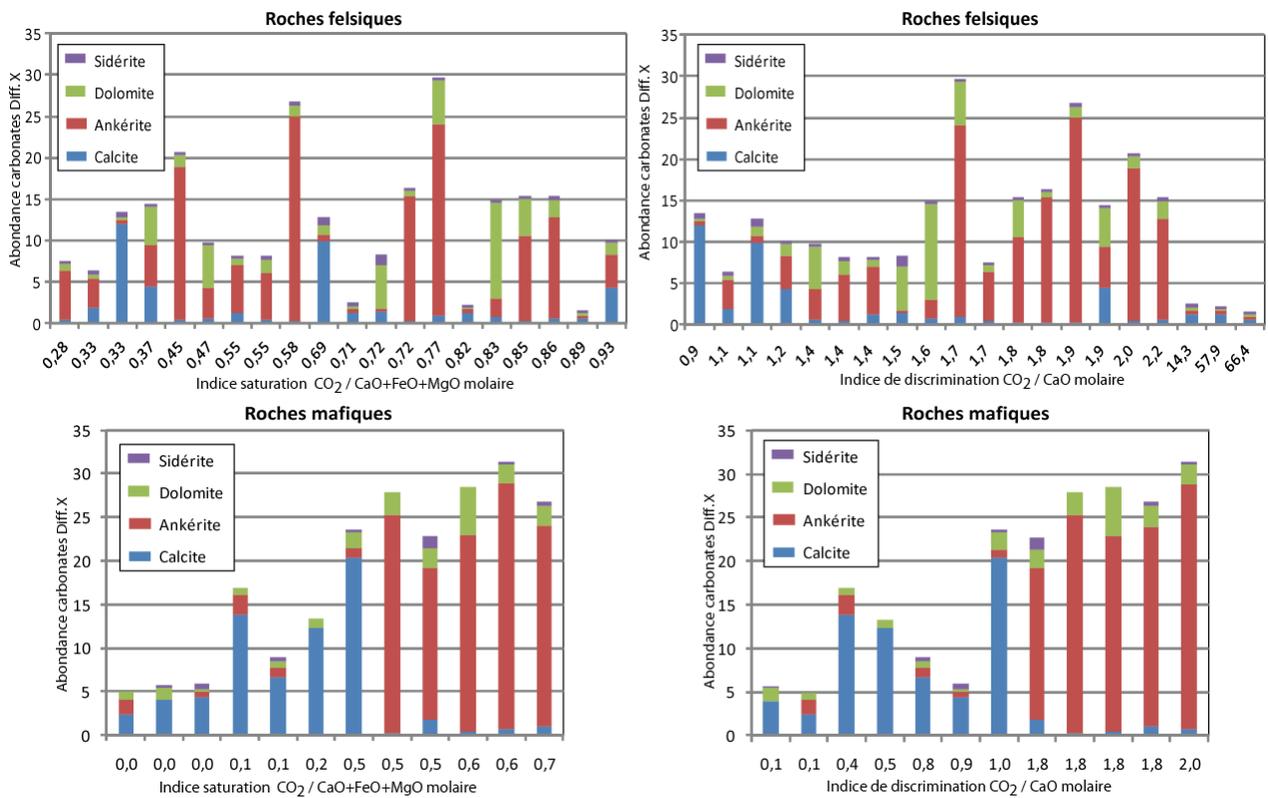


Figure 7. Diagrammes de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour les roches felsiques (en haut) et mafiques (en bas) de différents secteurs du Blake River et de Gemini en Abitibi.

De la même manière, les histogrammes de typologie des carbonates provenant des roches felsiques et mafiques de l'Abitibi (**Figure 7**) permettent de faire les constats suivants :

- Le degré de saturation n'est pas un indicateur de l'abondance de carbonates pour les roches felsiques. À titre d'exemple deux des échantillons contenant respectivement 27 et 30 % de phases carbonatées (diffraction x) ont des indices de saturation de 0,58 et 0,77 alors que deux autres échantillons ayant des indices de 0,71 et de 0,89 n'ont que 3 et 2 % de carbonates totaux respectivement. C'est donc dire que les roches felsiques peuvent dans certains cas être fortement saturées avec un faible contenu en carbonates.
- Il n'existe aucune relation entre la proportion de carbonates présents et l'indice de saturation, l'ankérite étant l'espèce dominante dans la majorité des échantillons.
- La calcite est clairement l'espèce qui domine pour un indice de discrimination autour de 1 alors que l'ankérite domine lorsque l'indice est autour de 2, ceci aussi bien pour les roches felsiques que les mafiques.

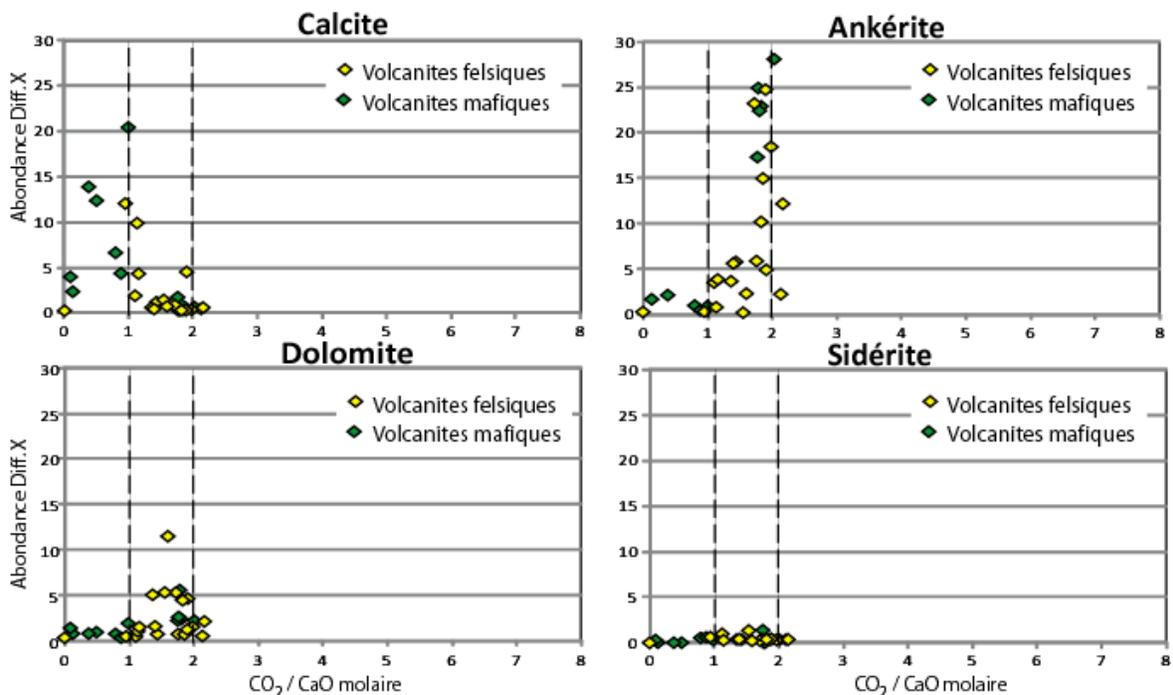


Figure 8. Abondance des différents carbonates en fonction de l'indice de discrimination (**Id**) pour les roches mafiques et felsiques de différents secteurs de l'Abitibi.

Le comportement des différentes espèces de carbonates est également illustré plus en détail à la **Figure 8**. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- La calcite est significative lorsque **Id** est près ou inférieur à 1.
- L'ankérite est le carbonate significatif lorsque **Id** est près de 2.
- La dolomite est présente avec un **Id** entre 1 et 2.
- La sidérite n'est présente que marginalement dans ce groupe d'échantillons.

Toutefois, lorsque présenté sur une échelle logarithmique, les valeurs élevées d'indice de discrimination correspondent à une quantité significative de sidérite par rapport à l'ensemble des carbonates présents dans la roche (**Figure 9**).

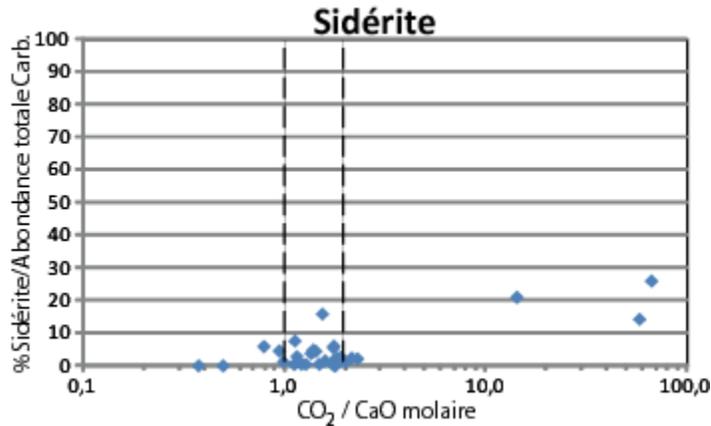


Figure 9. Abondance de la sidérite par rapport aux carbonates totaux en fonction de l'indice de discrimination (I_d) pour les roches mafiques et felsiques de différents secteurs de l'Abitibi.

Quelques échantillons du secteur Gemini présentent un intérêt particulier (**Figure 10**). Ils sont caractérisés par la présence de nombreuses veines de carbonates et ont été intégrés à l'étude pour comparer le rendement de la lithogéochimie avec les déterminations par diffraction x. Ils se caractérisent par des Indices de saturation maximale, ce qui était prévisible. Les 4 échantillons ont des I_d entre 1,1 et 1,5. Le matériel carbonaté est dominé par la calcite lorsque I_d est près de 1 et devient de plus en plus dominé par la dolomite avec une augmentation du I_d vers 1,5. Un échantillon de formation de fer faiblement saturé est caractérisé par un I_d de 2,3 et la dolomite est le carbonate dominant. Donc, même pour du matériel autre que les roches volcaniques et intrusives de compositions mafiques et felsiques, les indices de discrimination et de saturation permettent de porter un jugement sur la typologie de la carbonatation.

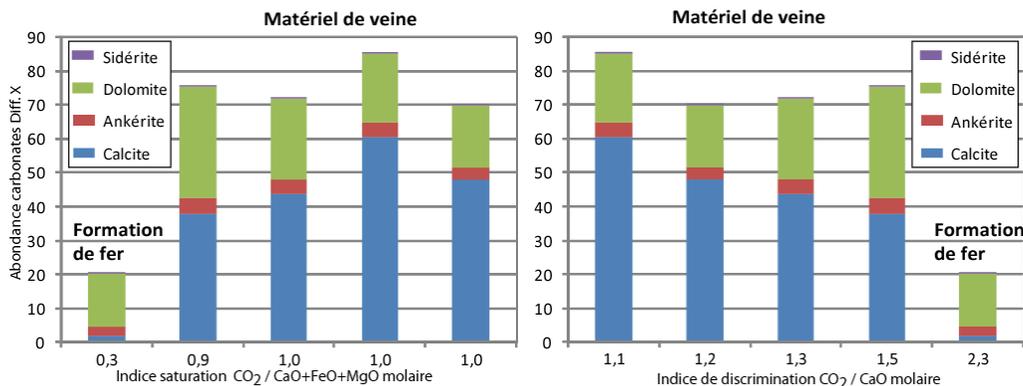


Figure 10. Diagrammes de l'indice de saturation (à gauche) et de l'indice de discrimination (à droite) en fonction de l'abondance des différents types de carbonates pour des roches du secteur Gemini en Abitibi caractérisées par du matériel de veine carbonatée (sauf un cas de formation de fer).

3.3 Sommaire

L'indice de discrimination I_d peut être utilisé comme une valeur significative pour discriminer les différentes phases carbonatées et par conséquent devient un outil fiable et utile dans les phases d'exploration stratégique pour caractériser la typologie de la carbonatation. L'indice de saturation I_s est un indicateur fiable pour représenter une quantité de carbonates présents dans les roches mafiques mais dans les roches felsiques, une forte saturation peut s'exprimer avec des quantités de carbonates en proportion relativement modérées. Cet indice représente davantage la capacité de la roche à fixer le CO_2 .

3.3.1 Exemples d'applications de la zonalité de la carbonatation

3.3.1.1 Gisement de Mattabi et exemple de Bouchard-Hébert

Le gisement de sulfures massifs volcanogènes de Mattabi se caractérise par une zonalité de la carbonatation qui a bien été décrite par Franklin et al. (1975). Cette zonalité, établie à partir d'investigations pétrographiques et d'analyses en diffraction X, est perçue sur une échelle de quelques centaines de mètres. Elle comprend une zone à sidérite dans la cheminée d'altération et une zone à dolomite en s'éloignant de la lentille minéralisée.

La **Figure 11a** représente une version modifiée de Franklin et al. (1975) décrivant la zonalité du gisement de Mattabi. À partir des données lithogéochimiques publiées dans l'article, les indices de discrimination CO_2/CaO ont été calculés et ajoutés à la **Figure 11b**. On y voit que le rapport CO_2/CaO est ≤ 2 (calcite + dolomite) à l'extérieur de la zone minéralisée et > 2 (sidérite) pour atteindre des valeurs de 22 à 173 dans la cheminée d'altération sous la lentille minéralisée (**Figure 11**). C'est donc dire que comme dans le cas des exemples de validation discutés précédemment, il est possible de déduire les espèces carbonatées et donc la zonalité de la carbonatation simplement à partir de la lithogéochimie.

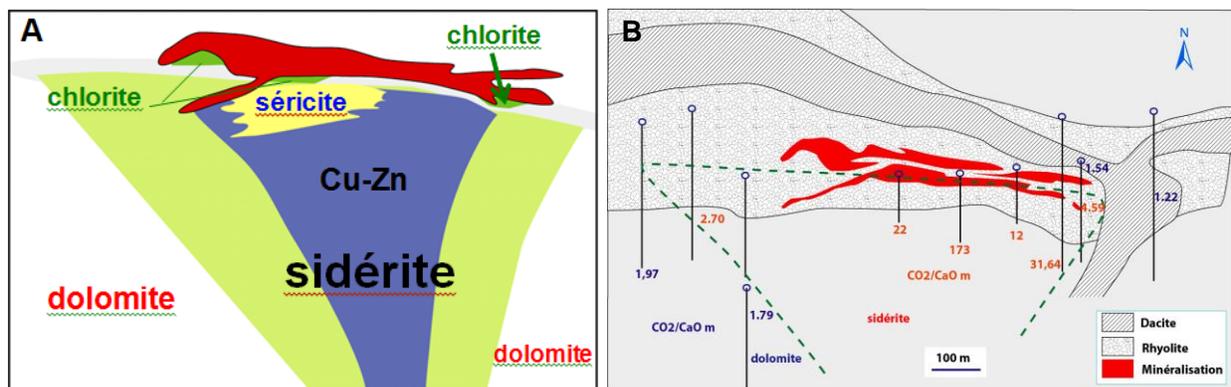


Figure 11 A) Distribution générale des types de carbonates dans le gisement de Mattabi (modifié de Franklin et al., 1975) et montrant une dominance de la sidérite dans la cheminée d'altération sous la lentille et de la dolomite à l'extérieur. **B)** Représentation détaillée de la même lentille minéralisée avec la position des forages. Les ratios molaires CO_2/CaO ont été calculés à partir des données lithogéochimiques tirées de Franklin et al., 1975. Ces analyses représentent la moyenne de plusieurs échantillons provenant de chaque trou de forage et les indices de discrimination calculés permettent d'établir la même zonalité avec des I_d élevés sous la lentille représentant la présence de la sidérite et des I_d entre 1 et 2 à l'extérieur, typique de l'ankérite ou de la dolomite.

Pour le gisement de Bouchard-Hébert, l'indice de discrimination a été appliqué à la banque de données lithogéochimiques du secteur ce qui permet de mettre en évidence une zonalité de la carbonatation à l'échelle régionale (**Figure 12**). Cette zonalité est caractérisée par un halo régional distal à calcite-ankérite/dolomite (ratios compris entre 0,5 et 2,5) et un halo proximal à sidérite (ratios > 3). La présence du gisement dans la zone à sidérite est jugée significative, mais la distribution de ce halo permet d'ouvrir plusieurs perspectives pour l'exploration dans ce secteur.

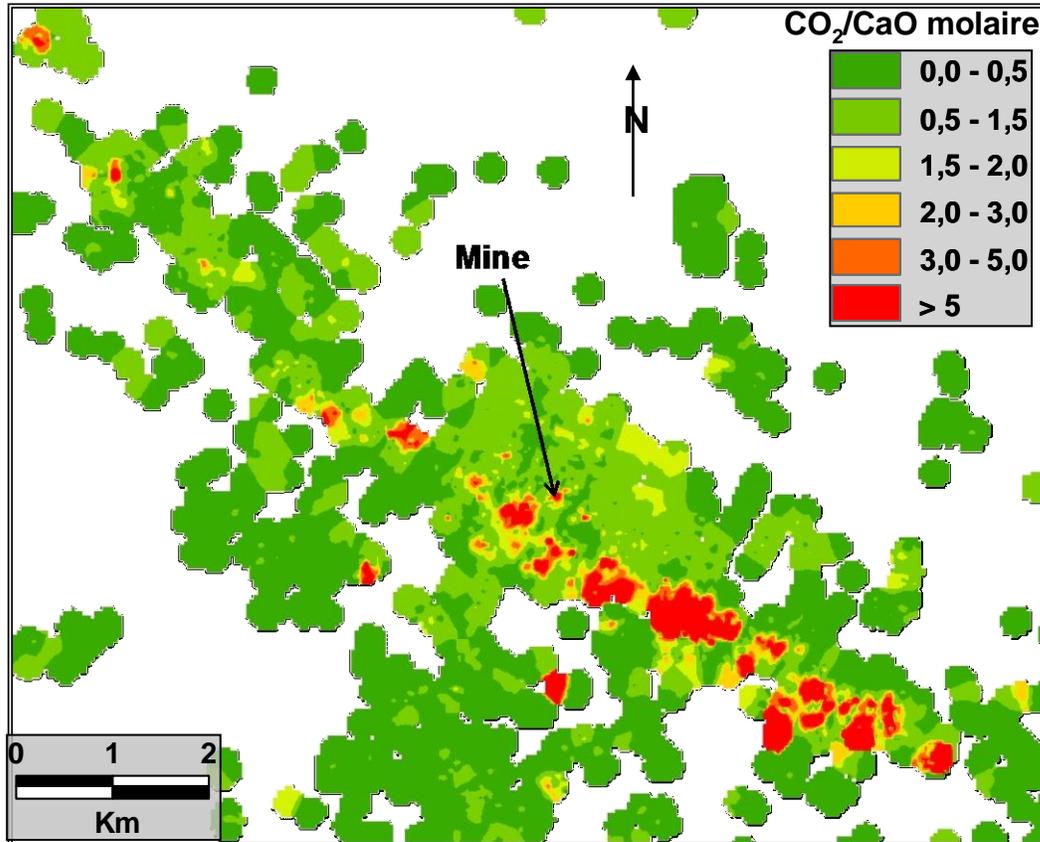


Figure 12. Indice de discrimination CO_2/CaO pour le secteur de la mine Bouchard-Hébert (méthode d'interpolation : inverse de la distance).

3.3.1.2 Gisement de Casa Berardi

La **Figure 13a** présente une vue en section du gisement de Casa Berardi dans le Nord de l'Abitibi avec la position des échantillons prélevés dans les différents forages ainsi que leur interprétation lithologique. La géologie du secteur peut être résumée par une dominance de roches sédimentaires dans la portion sud alors qu'une bande de roches volcaniques mafiques dominant le centre et le Nord de la section.

L'indice de discrimination a été calculé à partir de la banque lithogéochimique de la compagnie Aurizon et les résultats sont présentés à la **Figure 13b**.

Une zonalité de la carbonatation est mise en évidence. On y retrouve :

- une zone ayant un I_d près de 1 et interprétée comme une zone à calcite située dans la portion nord du gisement ;
- une zone au sud du gisement présentant des I_d élevés régulièrement supérieur à 2,5 et interprétée comme une zone à sidérite ;
- une zone centrale caractérisée par un I_d de 2 et interprétée comme une zone à ankérite-dolomite.

La zone à ankérite-dolomite ($1,5 < CO_2/CaO < 2,5$) est définie au pourtour de la faille avec laquelle la minéralisation aurifère est spatialement associée (**Figure 13c**). Les I_d élevés dans la zone dite à sidérite pourraient s'expliquer par la présence de formations de fer au sud de la faille.

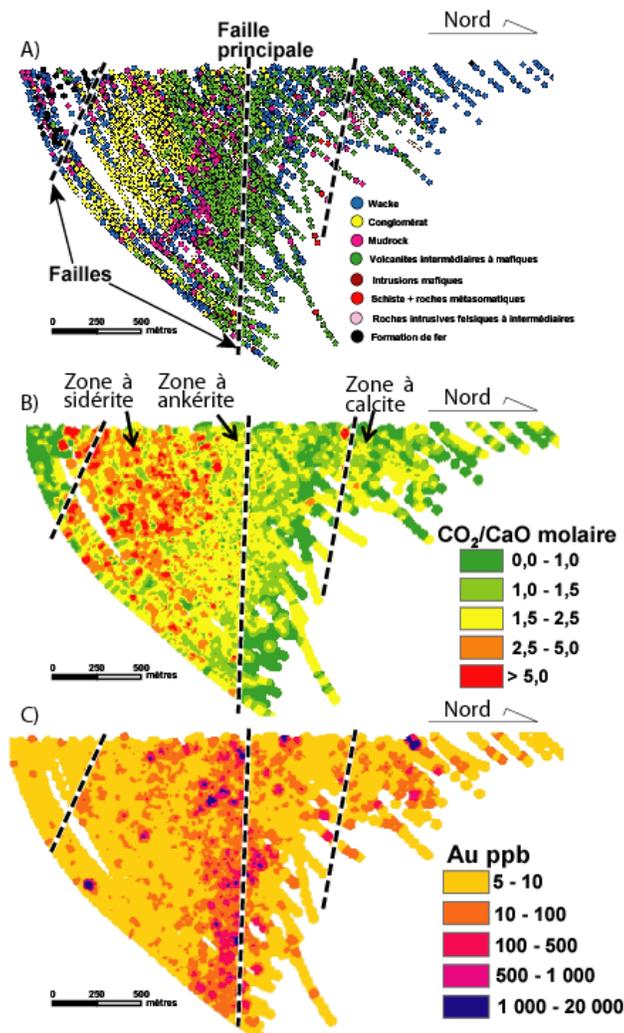


Figure 13. A) Section vue vers l'ouest du gisement de Casa Berardi en Abitibi avec la position des échantillons de la banque de données Mines Aurizon. B) Zonalité de la carbonatation établie à partir de l'indice de discrimination calculé des analyses lithogéochimiques. C) Représentation des teneurs aurifères.

4 DIAGRAMME DE CARBONATATION

La reconnaissance des espèces carbonatées et la saturation en carbonates sont bien définies respectivement par les indices de discrimination et de saturation. Un nouveau diagramme désigné simplement « diagramme de carbonatation » a été construit en combinant l'indice de discrimination **Id** en fonction de l'indice de saturation **Is** (**Figure 14**). Ce diagramme permet de caractériser différents environnements de minéralisation orogéniques ou de type VMS à partir d'une population représentative d'analyses lithogéochimiques

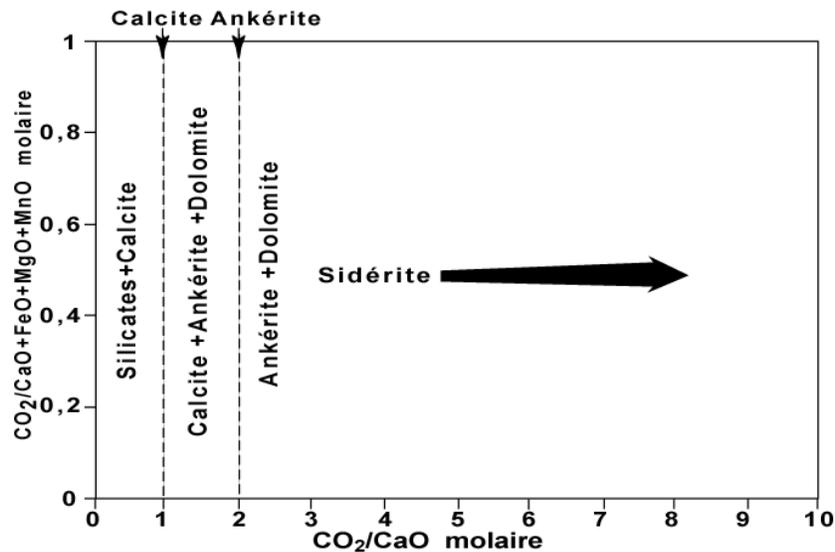


Figure 14. Diagramme de carbonatation.

Des populations d'échantillons provenant de secteurs de la Sous-province d'Abitibi (**Figure 15**) reconnus a priori comme étant soit orogéniques ou soit volcanogènes ont été sélectionnés dans la base de données lithogéochimiques de l'Abitibi (SIGEOM et partenaires CONSOREM). Il s'agit bien sûr d'un dégrossissage qui ne permet pas de distinguer des secteurs où des contextes orogéniques pourraient se retrouver en coïncidence spatiale avec des contextes VMS.

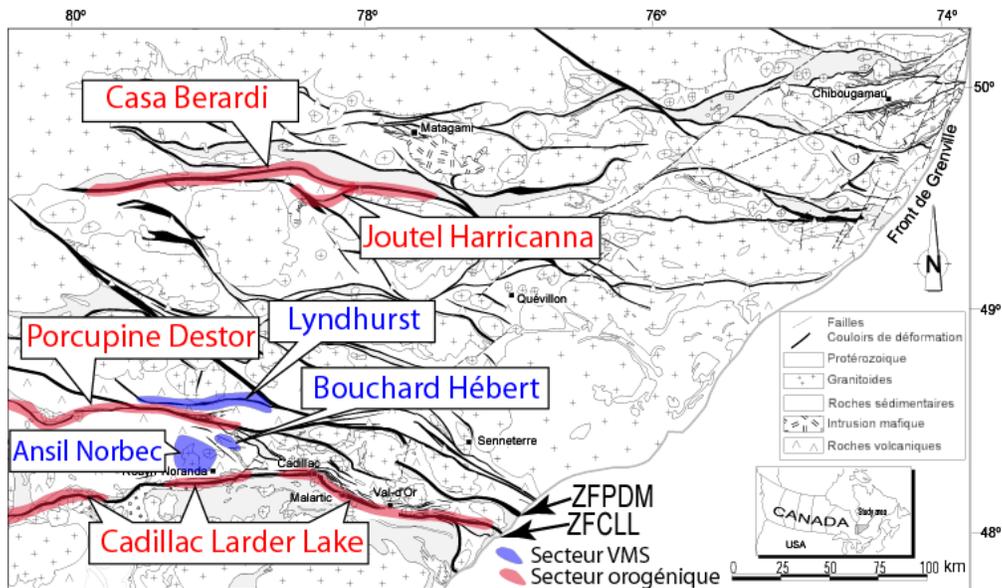


Figure 15. Carte de la Sous-province d'Abitibi (Daigneault et al., 2004) et localisation des secteurs sélectionnés comme étant dominés par de la carbonatation orogénique et associés aux minéralisations VMS. Pour les secteurs orogéniques, une zone tampon de 1 km au pourtour des failles a été générée pour sélectionner les échantillons de la base de données provenant des partenaires du CONSOREM.

Les secteurs choisis comme étant représentatifs de minéralisations orogéniques sont :

- Le secteur de la zone de faille de Casa Berardi (associé aux gisements de Casa-Berardi et Estrade);
- Une portion de la zone de faille de Joutel Harricana (associé au gisement de Telbel);
- Des segments de la zone de faille Cadillac-Larder-Lake (associés à plusieurs gîtes et gisements Au);
- Un segment de la zone de failles de Porcupine Destor (associé à plusieurs gîtes et gisements Au).

Les échantillons de chaque secteur sont reportés sur des diagrammes de carbonatation (**Figure 16**). Pour les cas de Joutel Harricana et de Casa Berardi, les populations d'échantillons définissent des étalements étroits indiquant des saturations entre 0 et 1 ce qui veut dire que les échantillons sélectionnés comprennent des représentants qui sont peu carbonatés à très carbonatés. Les indices de discrimination (CO_2/CaO) sont généralement inférieurs à 2 indiquant que l'ankérite correspond à l'espèce dominante lorsque la saturation est élevée.

Dans le cas des failles Cadillac-Larder-Lake et de Porcupine Destor, la même tendance linéaire est observée mais avec un léger étalement de quelques échantillons vers des Id plus élevés, ceci particulièrement pour le cas de la zone de faille Cadillac Larder Lake.

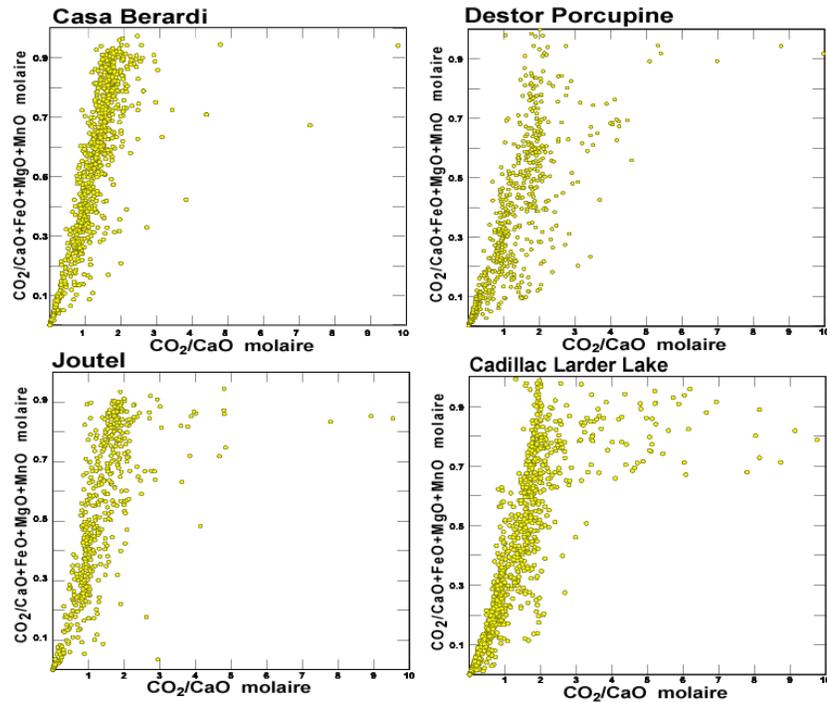


Figure 16. Diagrammes de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/(\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO})$) de secteurs considérés comme étant caractérisés par des minéralisations orogéniques.

Des échantillons provenant de contextes reconnus comme volcanogènes ont aussi été traités (**Figure 17**). Les secteurs choisis comme étant représentatifs de minéralisations volcanogènes sont :

- Le secteur de Lyndhurst (avec les dépôts VMS de Lyndhurst et de Hunter);
- Le secteur de Bouchard-Hébert (gisement de Bouchard-Hébert).

Le cas du secteur Lyndhurst est particulièrement intéressant puisqu'une forte carbonatation volcanogène y est reconnue (Labbé, 1994, Mueller et al., 2009). Le diagramme de carbonatation pour ce secteur montre la même tendance linéaire que pour les secteurs désignés orogéniques mais montre en plus, un étalement de la dispersion vers la droite donc vers des Id élevés. Ceci est observé aussi bien pour des saturations faibles qu'élevées. Cet étalement vers la droite n'est défini toutefois que par une faible portion de l'échantillonnage (environ 20 % des points).

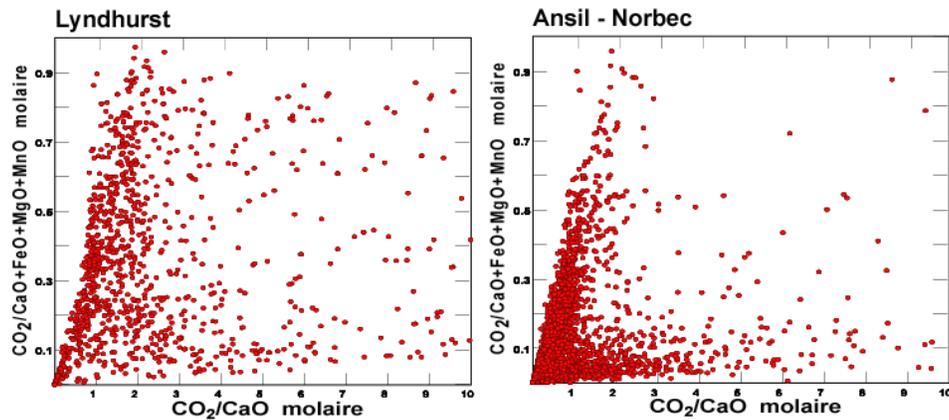


Figure 17. Diagrammes de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) de secteurs considérés comme étant caractérisés par des minéralisations volcanogènes.

Le secteur Bouchard-Hébert est clairement identifié comme un secteur caractérisé par une minéralisation volcanogène. La carte géologique simplifiée de la **Figure 18** montre la localisation des échantillons utilisés pour cette analyse.



Figure 18. Carte géologique illustrant la position des échantillons dans le secteur de Bouchard Hébert.

Le diagramme de carbonatation (**Figure 19**) montre le même genre de dispersion que les diagrammes volcanogènes précédents. La sélection des échantillons ayant un Id supérieur à 2,5 devrait permettre de mettre l'emphase sur les secteurs ayant le plus fort potentiel pour les SMV de type Mattabi en allant chercher la présence de la sidérite. De la même manière la sélection des échantillons ayant une saturation élevée (fixée arbitrairement à 70 %), se localise surtout au voisinage de la position du gisement de Bouchard Hébert mais laisse entrevoir un certain potentiel dans plusieurs autres secteurs (**Figure 20**).

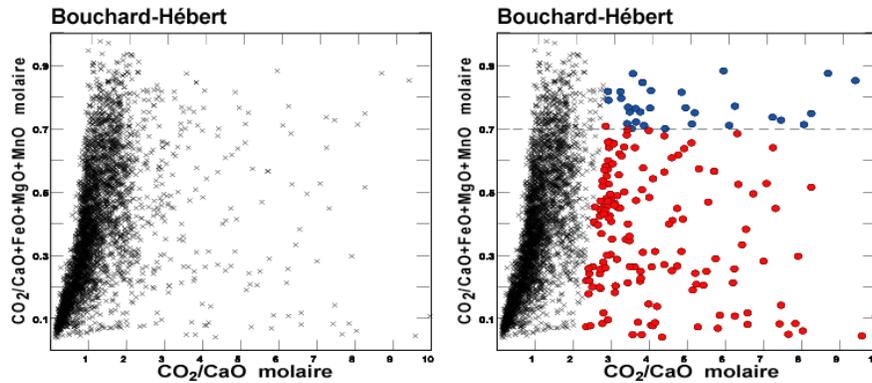


Figure 19. Diagramme de carbonatation (CO_2/CaO molaire versus $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$) du secteur Bouchard Hébert. Le diagramme de droite représente les échantillons ayant un I_d supérieur à 2,5 avec une démarcation pour les I_s supérieurs à 70 %.



Figure 20. Carte géologique du secteur de Bouchard Hébert avec positionnement des échantillons ayant un I_d supérieur à 2,5 (en rouge) et un I_s supérieur à 70 % (en bleu).

5 CONCLUSION

La carbonatation est l'altération la plus commune des gisements d'or orogénique et elle est également typique des minéralisations de sulfures massifs volcanogènes de type Mattabi. Elle se manifeste par un remplacement progressif des silicates de calcium, de fer et de magnésium par des minéraux carbonatés, suite à une interaction entre un fluide hydrothermal riche en CO_2 et une roche encaissante. Ce projet a permis d'établir les principales caractéristiques de la carbonatation et son applicabilité en exploration minérale. Plusieurs aspects ont été traités notamment : 1) les facteurs qui contrôlent la composition des carbonates; 2) la typologie et la zonalité de la carbonatation aux pourtours des minéralisations aurifères et volcanogènes; et 3) les différentes techniques de discrimination des carbonates avec une attention particulière sur l'approche lithogéochimique.

Deux indices lithogéochimiques de carbonatation appliqués à des exemples de minéralisations aurifères et de métaux de base de l'Abitibi ont été améliorés. L'indice de saturation (I_s), permet de déterminer l'intensité de l'altération en carbonates. Cet indice varie entre 0 (roche non carbonatée) et 1 (seuil de

saturation en carbonates). L'indice de discrimination (**Id**) est utilisé pour discriminer les espèces carbonatées.

- **Is** : ratio molaire $\text{CO}_2/(\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO})$
- **Id** : ratio molaire CO_2/CaO

Les différents tests de validation des contenus en carbonates obtenus par diffraction x corroborent l'interprétation de la typologie des carbonates réalisée à partir de l'indice de discrimination.

L'indice de saturation en carbonates (**Is**) inhibe l'effet de la lithologie. Son augmentation peut être globalement interprétée comme un outil de vectorisation vers des zones plus proximales à la minéralisation. Il faut toutefois rappeler que dans le cas des roches riches en pyrite et en arsénopyrite, il faut soustraire la quantité de fer associée aux sulfures du fer total.

L'indice de discrimination (**Id**) permet de définir la typologie de la carbonatation de manière efficace et peut donc également être utilisé comme un outil de vectorisation vers des zones plus proximales à la minéralisation.

Le **diagramme de carbonatation** a été développé en mettant en relation l'indice de saturation **Is** versus l'indice de discrimination **Id**. Ce diagramme est un outil utile en exploration dans les environnements carbonatés. Il permet de porter un jugement sur l'origine de la carbonatation d'un secteur donné (s'il y a suffisamment d'analyses disponibles) et de cibler les zones plus proximales à la minéralisation.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été accompli grâce à l'accès à des banques de données lithogéochimiques de partenaires industriels du CONSOREM, soit IAMGOLD, X-Strata Zn, Mines Aurizon et Ressources Breakwater. Des remerciements particuliers s'adressent à Martin Demers, Martin Perron, Valérie Fillion et Claude Gobeil. Les membres du comité de gestion scientifique sont également remerciés pour leurs suggestions et commentaires fructueux. Des remerciements sont adressés également à Vital Pearson, Stéphane Faure et Sylvain Trépanier pour leurs suggestions enrichissantes. Enfin, tous mes remerciements à Isabelle Lapointe et Geneviève Boudrias pour la revue du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Allen, R.L., Lundstrom, I., Ripa, M., Simeonov, A. et Christofferson, H. 1996. Facies analysis of 1.9 Ga continental margin, backarc felsic caldera province with diverse Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulphide and Fe oxide deposits, Bergslagen region, Sweden. *Economic Geology*, 91: 979-1008.
- Ashley, P.M., Dudley, R.J., Lesh, R.H., Marr, J.M. et Ryall, A.W. 1988. The Scuddles Cu-Zn prospect, an Archean volcanogenic massive sulphide deposit, Golden Grove district, Western Australia. *Economic Geology*, 83: 918-951.
- Ayan, T. 1965. Chemical staining methods used in the identification of carbonates minerals. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 65: 133-147.
- Barley M.E. et Groves D.I. 1987. Hydrothermal alteration of Archean supracrustal sequences in the central Norseman-Wiluna Belt, Western Australia: A brief review. *Geol.Dept. and Univ. Extension, Unive. West. Austr. Publ.* 11, 51-66.
- Böhlke, J.K. 1988. Carbonate-sulfide equilibria and stratabound disseminated epigenetic gold mineralization: A proposal based on examples from Alleghany, California, U.S.A: *Applied Geochemistry*, 3: 499-516.
- Böhlke, J.K. 1989. Comparison of metasomatic reactions between a common CO₂-rich vein fluid and diverse wall rocks: Intensive variable, mass transfers, and Au mineralization at Alleghany, California. *Economic Geology*, 84: 291-327.
- Boyle, R.W. 1979. The geochemistry of gold and its deposits; Geological Survey of Canada, Bulletin 280, 584 pages.
- Colvine, A.C. 1989. An empirical model for the formation of Archean gold deposits-products of final cratonization of the Superior province, Canada: *Economic Geology Monograph* 6: 37-53.
- Colvine, A.C., Fyon J.A. Heather K.B., Marmont S., Smith P.M. et Troop D.G. 1988. Archean lode gold deposits in Ontario, Canada. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper 139, 136pp.
- Daigneault, R., Mueller W.U., et Chown, E.H. 2004. Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous history of arc development, accretion and collision. Pat Eriksson, Wlady Altermann, David Nelson, Wulf U Mueller, and Octavian Catuneanu (editors). *The Precambrian Earth: tempos and events*. In: *Developments in Precambrian Geology* 12, Elsevier, 88-103 pages.
- Dickson, J.A.D. 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of Sedimentary Research*. June 1966, v.36, no. 2. P.492-505.
- Dickson, J.A.D. 1965. A modified staining technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205, no. 4971, p.587.
- Dubé, B. 1990. Métallogénie aurifère du filon-couche de Bourbeau, région de Chibougamau, Québec. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi. 436 pages.
- Eilu, P.K., Mathison, C.I., Groves, D.I. et Allardyce, W.J. 1999. Atlas of alteration assemblages, styles and zoning in orogenic lode-gold deposits in a variety of host rock and metamorphic settings. The University of Western Australia Publication No. 30.
- Eilu, P. Mikucki E.J. et Dugdale, A.L. 2001. Alteration zoning and primary geochemical dispersion at the Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 36: 13-31.

- Franklin, J.M. 1996. Gîtes de sulfures massifs à métaux communs associés à des roches volcaniques. Dans : Eckstrand, W.D. Sinclair and Thorpe, R.I. (Éditeurs), Géologie des types de gîtes minéraux du Canada : Association Géologique du Canada, Geology du Canada, No. 8, 174 à 202.
- Franklin, J.M., Kasarda, J. et Poulsen, K.H. 1975. Petrology and Chemistry of the Alteration Zone of the Mattabi Massive Sulfide Deposit. *Economic Geology*, 70: 63-79 pp.
- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R. et Galley A.G. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. Dans *Economic Geology 100th Anniversary Volume* ; J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb et J.P. Richards, éditeurs, 523-560 p.
- Goldfarb, R., Baker, T., Dubé, B., Groves, D.I., Hart, C.J. et Gosselin, P. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In *Economic Geology 100th Anniversary volume*, 407-450pp.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. et Robert, F. 2002. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Workshop notes*, pages 7-34.
- Groves D.I., Golding S.D., Rock N. M. S., Barley M.E. et McNaughton N.J. 1988. Archean carbon reservoirs and their relevance to fluid source for gold deposits. *Nature* 331, 254-257.
- Hallberg, J.A. et Thompson, J.F.H. 1985. Geologic setting of the Teutonic Bore massive sulphide deposit, Archean Yilgarn Block, Western Australia. *Economic geology*, 80 : 1953-1964.
- Harte, B. et Graham, C.M. 1975. The graphical analysis of greenschist to amphibolite facies mineral assemblages in metabasites. *Journal of Petrology*. 16 : 347-370.
- Ishikawa Y., Sawaguchi T., Iwaya S. et Horiuchi M. 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology*, v. 26, p. 105-117.
- Johannes, W. 1969. An experimental investigation of the system MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ : *American Journal of science*, 267 : 1083-1104.
- Kerrick, R. 1983. Geochemistry of gold deposits in the Abitibi greenstone belt: *CIM Special paper* 27: 75p.
- Kishida, A. et Kerrich, R. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology*, 82 : 649-690.
- Labbé, J.-Y. 1994. Évolution des failles de la sous-province de l'Abitibi : exemple des discontinuités structurales de Lyndhurst et de Macamic, Québec. Thèse de doctorat Université du Québec à Chicoutimi, 271p.
- Lafrance, B. 2003. Reconstruction d'un environnement de sulfures massifs volcanogènes déformé : exemple archéen de Normétal, Abitibi. Thèse de doctorat à l'Université du Québec à Chicoutimi, 362 pages.
- McCuaig, T.C. et Kerrich, R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geol Rev* 12: 381-453.
- Morton, R.L. et Franklin, J.M. 1987. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulphide deposits; *Economic Geology*, 82: 1057-1063.

- Mueller, W.U., Daigneault, R., Lafrance.,B, Stix, J, Corcoran, P.L., and Pearson, V. 2009. Abitibi subaqueous calderas with volcanogenic massive sulfide deposits: exploration models and hydrothermal carbonate alteration. *In* Submarine volcanism and mineralization: modern through ancient, B. Cousens and S.J. Piercey (editors), Submarine volcanism and mineralization: modern through ancient. Geological Association of Canada, Short Course Notes volume 19, 61-90.
- Phillips, G.N. 1986. Geology and alteration in the Golden Mile, Kalgoorlie. *Economic Geology* 81: 779-808.
- Pearson, V. et Daigneault, R. 2009. An Archean megacaldera complex: the Blake River Group, Abitibi greenstone belt. *Precamb. Res.*, 168, 66–82.
- Piché, M. et Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 82: 59-77.
- Pilote, P., Guha, J., Daigneault, R., Robert, F., Golightly, J.P., 1990. Contexte structural et minéralisations aurifères des gîtes Casa-Berardi, Abitibi, Québec; *Revue Canadienne des Sciences de la Terre*, 27: 1672-1685
- Robert, F. 1996. Filons de quartz-carbonates aurifères. In géologie des types de gîtes minéraux du Canada. *Géologie du Canada*, 8: 387-404.
- Sharpe, R. et Gemmell, J.B. 2001. Alteration characteristics of the Archean Golden Grove Formation at the Gossan Hill deposit, Western Australia: Induration as a focusing mechanism for mineralizing hydrothermal fluids. *Economic Geology*, 96: 1239-1262.
- Veizer J., Hoefs, J., Ridler R.H., Jensen L.S. et Lowe D.R. 1989. Geochemistry of Precambrian carbonates: I. Archean hydrothermal systems *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 845-857.
- Whitehead, R.E. et Davies, J.F. 1988. Discriminant analysis involving CO₂/CaO and arsenic in gold exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 30: 243-253.

ANNEXE I : ANALYSE DE L'INDICE DE SATURATION

Échantillons	CO ₂ /CaO+FeO+MgO m	CO ₂ /CaO m	CO ₂	Calcite	Ankérite	Dolomite	Sidérite	Ank/dolm	Au ppm
DG 1	0,29	1,97	8,27	0,00	16,54	0,00	0,00	0,00	0,33
DG 2	0,78	1,96	14,57	1,64	27,75	27,75	0,00	0,00	0,06
DG 3	0,75	2,29	14,64	0,19	26,53	0,00	0,00	0,00	0,01
DG 4	0,38	1,89	4,72	0,33	6,96	0,00	0,00	0,00	0,03
DG 5	0,71	2,25	10,36	0,22	27,64	0,00	4,48	27,64	0,40
DG 6	0,37	1,20	7,32	12,43	6,22	0,00	0,51	0,00	0,02
DG 7	0,73	2,04	8,42	1,46	22,11	0,00	0,00	0,00	0,01
DG 8	0,63	2,09	9,37	0,00	25,19	0,00	0,00	0,00	1,77
DG 9	0,66	1,04	12,15	29,17	0,18	0,00	0,00	0,00	
DG 10	0,03	0,74	0,33	0,20	0,29	0,00	0,00	0,11	0,07
DG 11	0,58	1,70	9,30	0,00	28,75	0,00	0,00	0,00	0,48
DG 12	0,21	1,34	6,26	3,54	0,14	0,00	0,00	0,00	
DG 13	0,23	1,03	4,65	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DG 14	0,05	1,27	1,28	0,00	1,21	1,21	0,00	0,00	0,00
DG 15	0,43	7,25	7,69	0,00	4,76	0,00	13,73	0,14	0,01

ANNEXE II : CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONS ANALYSÉS (ÉLÉMENTS MAJEURS ET DIFFRACTION X)

Échantillons	Projets	Trou	De (m)	À (m)	Nom et description	UTM-N	UTM-E
HN-1	Bouchard-Hébert	Au99-123	18,6	18,9	Rhyolite bréchifiée altérée en chlorite, faible séricite		
HN-2	Bouchard-Hébert	Au99-123	35,6	35,9	Rhyolite		
HN-3	Bouchard-Hébert	Au99-123	111,39	111,6	Rhyolite massive avec grains de pyrite. Chlorite		
HN-4	Bouchard-Hébert	Au99-123	146,45	146,6	Tuf fin à lapilli felsique, chloritisé. Faible carbonate		
HN-5	Bouchard-Hébert	Au99-123	207,5		Rhyolite chloritisée séricitisée, faiblement carbonatée		
HN-6	Bouchard-Hébert	Au99-123	275,8		Tuf fin à lapilli avec quartz, séricite, chlorite, calcite?		
HN-7	Bouchard-Hébert	Au99-123	280	280,2	Tuf rhyolitique		
HN-8	Bouchard-Hébert	Au99-123	571,54	571,66	Tuf felsique à lapilli, grains de pyrite, séricite, chlorite, carbonate?		
HN-9	Bouchard-Hébert	Au99-123	696	696,15	Tuf à lapilli, chlorite, carbonate, pyrite		
HN-10	Bouchard-Hébert	Au99-123	764	746,15	Rhyolite déformée, chloritisée, carbonatée		
HN-11	Bouchard-Hébert	Au99-123	827,64		Rhyolite massive, grains de pyrite, chlorite, carbonate		
HN-12	Bouchard-Hébert	Au99-123	882,7		Andésite à phénocristaux de feldspaths et pyrite		
HN-13	Bouchard-Hébert	Au99-123	1050	1050,1			
HN-14	Bouchard-Hébert	Au-96	538,88		Pyroclastite chloritisée, carbonatée		
HN-15	Bouchard-Hébert		569		Rhyolite carbonatée		
HN-16	Bouchard-Hébert	6-A2	101,3		Rhyolite/pyroclastite au foot wall. Carbonatée		
HN-17	Bouchard-Hébert	B-161	29		Brèche pyroclastique (foot wall de la lentille). Chlorite, pyrite.		
HN-18	New-Senator				Dyke mafique carbonaté recoupant les brèches de coulées.	648830	5344341
HN-19	New-Senator				Dyke mafique andésitique carbonatée	648870	5344336
HN-20	New-Senator				Dyke mafique. Grains fins. Carbonate.	648892	5344326
HN-21	New-Senator				Carbonate orogénique? Système de veines à quartz avec épontes carbonatés	648721	534402
HN-22	New-Senator				Dyke mafique fortement altéré en carbonate, chlorite, épidote, pyrite.	648738	534419
HN-23	New-Senator				Basalte avec calcite	648945	5344569
HN-24	New-Senator				Dyke mafique carbonaté (calcite)	648748	5344670

Échantillons	Projets	Trou	De (m)	À (m)	Nom et description	UTM-N	UTM-E
HN-25	Gémini	877014	17,4		Rhyolite avec ankérite		
HN-26	Gémini	877014	18,1	18,3	Rhyolite altérée avec grain de pyrite. Légèrement carbonatée		
HN-27	Gémini	877014	37,8	38	Rhyolite carbonatée		
HN-28	Gémini	877014	150,31		Rhyolite chloritisée et séricitisée		
HN-29	Gémini	877014	171		Rhyolite à quartz		
HN-30	Gémini	877014	227,5		Rhyolite à quartz bleue carbonatée		
HN-31	Gémini	877014	234,8		Dyke synvolcanique carbonaté		
HN-32	Gémini	87790	59		Rhyolite carbonatée dans la zone B (sud)		
HN-33	Gémini	02-51	196,9		Roche très déformée carbonatée de la faille synvolcanique de Turgeon (E-W)		
HN-34	Gémini	02-51	208		Rhyolite altérée carbonatée le long de la faille synvolcanique de Turgeon		
HN-35	Gémini	02-51	211		Veine d'ankérite qui recoupe la zone à calcite (photo)		
HN-36	Gémini	Tu03-54	434		Tuf à lapilli avec yeux de quartz		
HN-37	Gémini	Tu04-54	333		Formation de fer à jaspé avec carbonate		
HN-38	Gémini	GE03-130	78,15		Éch. carbonaté et à graphite		
HN-39	Gémini	GE03-130	158,1		Rhyolite proche des sulfures massifs polymétalliques		
HN-40	Gémini	GE03-130	206,8				
HN-41	Gémini	GE03-130	326,8		Andésite faiblement carbonatée		
HN-42	DELBRIDGE				Rhyolite séricitisée et carbonatée	650715	5347841
HN-43	DELBRIDGE				Rhyolite séricitisée et carbonatée (>15%)	650882	5347844
HN-44	DELBRIDGE				Rhyolite carbonatée	650975	5347721
HN-45	DELBRIDGE				Rhyolite bréchifiée et carbonatée dans le secteur de la lentille de sulf. massif	651016	5347581
HN-46	DELBRIDGE				Dacite à calcite (loin de la zone minéralisée)	651031	5347411
HN-47	DELBRIDGE				Dyke dioritique synvolcanique de direction N-S et très carbonatée (voir photos)	651190	5747552

ANNEXE III : PROPORTIONS DES PHASES CARBONATÉES PAR LA MÉTHODE DE DIFFRACTION X

Échantillons	CC	AK	DO	SI	QZ	MV	BO	PR	CL	AB	FK	AM	MG	HE	AP	GS	PX	Total
Bouchard Hébert																		
HN-1	4,53	4,96	4,63	0,38	42,51	5,55	0,0	0,8	6,3	15,1	11,4	0,3	0,2	0,9	0,3	0,2	0,8	100
HN-3	1,91	3,56	0,46	0,53	57,28	0,00	4,2	1,0	0,3	23,5	3,0	0,5	0,4	0,7	0,3	0,3	0,7	100
HN-5	9,89	0,85	1,03	0,97	53,40	9,89	0,0	1,1	2,5	13,5	2,2	0,5	0,2	0,7	0,3	0,6	0,7	100
HN-7	1,20	5,84	0,72	0,36	56,92	11,91	0,0	0,5	1,0	14,5	1,9	1,2	0,2	0,5	0,4	0,5	0,4	100
HN-9	0,52	5,93	0,73	0,42	52,60	7,59	0,0	0,3	10,8	13,7	2,3	1,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	100
HN-10	0,47	2,28	0,52	0,36	59,31	15,71	0,0	0,4	10,4	4,9	1,3	1,0	0,3	0,5	0,3	0,5	0,4	100
HN-11	12,05	0,36	0,46	0,62	31,77	20,55	0,0	0,8	16,7	9,4	2,2	1,4	1,0	0,7	0,2	0,2	0,3	100
HN-12	6,66	1,07	0,75	0,53	30,47	1,28	0,0	0,5	20,1	27,8	5,0	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	100
HN-13	4,40	0,54	0,33	0,60	35,00	14,73	0,0	0,8	25,4	11,7	2,6	0,5	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	100
HN-14	0,38	18,47	1,52	0,33	13,20	22,98	0,0	3,0	23,2	8,2	3,2	0,9	0,4	0,6	0,3	0,4	0,4	100
HN-15	4,33	3,91	1,49	0,28	65,20	1,92	0,0	0,4	0,5	1,8	14,8	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,6	100
HN-16	0,88	23,23	5,30	0,25	22,35	13,16	0,0	0,2	13,2	15,2	2,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	100
HN-17	0,62	3,70	5,06	0,37	51,60	3,58	0,0	0,3	0,6	25,6	2,8	1,0	0,3	0,3	0,4	0,6	0,4	100
NewSenator																		
HN-18	1,01	22,95	2,35	0,47	22,82	4,77	0,0	0,0	21,5	11,5	6,6	0,7	0,9	0,5	0,4	0,5	0,0	100
HN-19	2,40	1,75	0,76	0,00	4,37	0,00	0,0	0,0	39,0	23,3	4,6	14,6	0,5	3,3	0,7	0,4	0,0	100
HN-20	1,80	17,36	2,21	1,38	23,37	4,50	0,0	0,0	27,9	9,7	6,1	0,7	0,5	0,8	0,6	0,3	0,0	100
HN-21	0,32	24,95	2,59	0,00	15,55	4,34	0,0	0,0	41,5	3,8	2,1	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3	0,0	100
HN-22	0,47	22,44	5,54	0,00	16,77	0,40	0,0	2,3	26,3	11,6	6,3	1,9	1,0	0,6	0,5	0,4	0,7	100
HN-23	12,37		0,93	0,00	26,60	0,74	0,0	0,9	32,6	5,5	3,5	0,7	2,8	0,6	0,7	0,7	1,1	100
HN-24	13,88	2,20	0,77	0,00	16,52	0,77	0,0	0,8	51,5	1,1	0,9	19,7	1,1	0,8	0,9	0,9	0,0	100
Gémini																		
HN-26	0,35	15,00	0,69	0,28	29,03	9,19	0,0	0,6	0,7	34,8	3,9	0,6	0,3	0,5	0,3	0,3	0,6	100
HN-27	1,27	0,38	0,25	0,32	37,33	29,14	0,0	1,8	12,4	7,9	4,8	0,7	0,3	0,4	0,4	0,4	0,0	100
HN-28	0,25	0,25	0,30	0,20	47,52	18,08	0,0	0,5	22,4	4,6	1,7	0,5	0,4	0,6	0,2	0,4	0,2	100
HN-30	0,31	24,75	1,23	0,43	24,32	23,28	0,0	0,6	2,8	15,3	2,5	0,5	0,3	0,6	0,2	0,5	0,4	100
HN-31	0,45	5,67	1,59	0,40	28,84	22,32	0,0	0,5	0,5	30,4	4,8	0,8	0,3	0,5	0,2	0,4	0,3	100
HN-33	60,37	4,31	20,47	0,34	6,64	0,27	0,0	0,0	0,6	1,4	0,7	0,6	0,5	0,8	0,4	0,6	0,3	100
HN-34	43,91	4,10	23,97	0,32	5,93	0,63	0,0	0,5	15,1	1,1	0,6	0,5	0,6	0,4	0,3	0,4	0,5	99

Échantillons	CC	AK	DO	SI	QZ	MV	BO	PR	CL	AB	FK	AM	MG	HE	AP	GS	PX	Total
HN-35	48,09	3,33	18,71	0,35	7,90	9,42	0,0	0,0	0,6	6,4	1,5	0,0	0,4	0,6	0,3	0,6	0,3	100
HN-36	37,66	4,77	33,17	0,35	9,26	0,35	0,0	0,0	3,3	4,5	2,3	0,0	0,5	0,6	0,3	0,5	0,0	100
HN-37	1,71	2,94	15,67	0,44	45,94	0,20	0,0	0,0	0,2	2,9	1,3	0,0	25,1	1,0	0,5	0,4	0,2	100
HN-38	0,31	10,23	4,45	0,38	46,61	10,73	0,0	4,8	0,6	12,3	4,0	0,0	1,3	0,7	0,6	0,3	0,4	100
HN-39	1,32	0,33	0,33	0,53	52,85	21,32	0,0	0,5	10,0	5,6	2,3	0,0	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	100
HN-40	0,57	0,36	0,29	0,43	50,32	28,72	0,0	0,9	0,7	8,9	3,3	0,0	0,6	1,0	0,9	0,6	0,5	100
HN-41	4,02		1,38	0,29	21,55	2,07	0,0	0,0	34,0	4,1	6,2	14,0	0,6	0,5	0,5	1,1	0,4	100
Delbridge																		
HN-42	0,26	0,33	0,33	0,00	59,11	20,67	0,0	2,3	0,6	6,2	3,5	0,7	1,1	0,8	0,5	0,7	0,5	100
HN-43	1,46	0,25	5,32	1,33	50,03	11,15	0,0	0,7	0,4	21,2	4,1	0,3	0,6	0,6	0,4	0,5	0,0	100
HN-44	0,61	12,21	2,13	0,36	48,24	4,86	0,0	1,2	0,4	21,6	3,7	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4	0,0	100
HN-45	0,74	2,35	11,51	0,23	50,09	6,87	0,0	0,4	0,3	20,4	2,9	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,0	100
HN-46	20,39	1,00	1,90	0,29	15,78	3,80	0,0	2,6	34,5	11,6	3,6	1,0	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	100
HN-47	0,72	28,12	2,20	0,33	29,94	3,40	0,0	0,5	21,5	5,6	2,0	1,1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,0	100

ANNEXE IV : ANALYSE DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET INDICES D'ALTÉRATION

Échantillons	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	LOI	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	TOTAL	CO ₂	I _d	I _s	A.I	C.C.P.I
Bouchard Hébert																	
HN-1	11,7	1,1	3,6	5,7	2,8	1,4	0,2	0,9	0,0	72,3	0,2	100	1,67	1,9	0,4	78	43
HN-3	12,0	0,6	1,2	1,3	1,0	0,3	0,0	5,3	0,0	78,2	0,2	100	0,48	1,1	0,3	22	19
HN-5	11,3	2,9	1,4	2,8	3,8	0,6	0,1	1,7	0,0	75,4	0,2	100	2,58	1,1	0,7	43	31
HN-7	11,4	1,3	1,7	2,6	2,5	0,6	0,0	2,4	0,0	77,3	0,2	100	1,45	1,4	0,5	46	32
HN-9	11,8	1,0	4,0	1,6	3,1	1,7	0,1	2,2	0,0	74,2	0,1	100	1,37	1,7	0,3	51	60
HN-10	12,6	0,0	5,3	2,9	2,5	1,7	0,1	0,1	0,0	74,8	0,2	100	0,05	2,1	0,0	98	70
HN-11	16,5	5,2	6,3	2,6	7,2	3,8	0,2	1,4	0,1	56,0	0,6	100	3,89	0,9	0,3	49	71
HN-12	15,5	2,0	6,5	0,2	3,9	4,2	0,1	4,8	0,1	61,7	0,9	100	1,24	0,8	0,1	40	68
HN-13	17,9	0,8	8,4	2,0	4,6	5,6	0,2	1,6	0,1	58,0	0,7	100	0,56	0,9	0,0	76	79
HN-14	20,6	3,9	7,0	7,2	9,3	5,7	0,1	0,1	0,1	44,4	1,4	100	5,98	2,0	0,5	77	64
HN-15	8,0	1,0	0,2	6,3	1,1	0,1	0,0	0,1	0,0	82,0	0,1	99	0,92	1,2	0,9	85	4
HN-16	14,0	6,6	5,9	2,6	10,0	2,8	0,2	3,6	0,2	52,5	0,6	99	8,90	1,7	0,8	34	59
HN-17	9,7	1,3	2,7	0,3	1,8	0,3	0,1	4,8	0,0	78,7	0,2	100	1,37	1,4	0,5	10	37
NewSenator																	
HN-18	13,0	9,6	11,9	1,4	15,8	5,4	0,2	1,7	0,1	39,7	1,0	100	13,63	1,8	0,7	38	85
HN-19	16,7	4,3	14,8	0,1	5,7	11,4	0,3	3,0	0,1	42,2	1,4	100	0,43	0,1	0,0	61	90
HN-20	13,5	7,0	11,4	1,3	12,5	6,4	0,2	1,7	0,1	44,9	1,0	100	9,62	1,8	0,5	47	86
HN-21	14,6	9,9	22,5	0,2	17,7	7,3	0,4	0,6	0,1	25,5	1,0	100	13,78	1,8	0,5	42	97
HN-22	14,7	9,2	13,9	0,3	4,0	6,7	0,2	3,2	0,1	45,9	1,3	99	12,84	1,8	0,6	36	86
HN-23	13,7	10,6	12,8	0,0	6,9	4,2	0,2	1,6	0,1	48,6	1,3	100	4,11	0,5	0,2	26	91
HN-24	9,2	13,1	12,1	0,2	8,3	14,4	0,3	0,1	0,8	40,5	0,9	100	3,86	0,4	0,1	52	99
Gémini																	
HN-26	16,6	1,8	2,3	1,1	3,3	0,8	0,0	7,0	0,2	65,9	0,4	99	2,55	1,8	0,7	17	28
HN-27	15,7	0,2	5,8	3,5	11,5	8,0	0,2	0,6	0,1	53,8	0,6	100	10,00	57,9	0,8	94	77
HN-28	12,5	0,2	4,3	2,5	2,4	2,0	0,0	0,2	0,1	75,3	0,5	100	0,05		0,0	91	70
HN-30	15,9	4,7	5,5	2,3	9,2	4,8	0,2	2,9	0,1	53,6	0,6	100	6,98	1,9	0,6	48	66
HN-31	16,5	1,8	2,1	2,5	3,0	0,9	0,0	5,2	0,2	66,9	0,4	100	2,00	1,4	0,6	33	28
HN-33	0,4	47,6	5,5	0,0	41,4	1,3	1,0	0,0	0,0	2,7	0,0	100	41,72	1,1	1,0	3	99
HN-34	1,6	38,3	10,7	0,0	38,9	2,4	1,2	0,2	0,0	6,6	0,0	100	38,44	1,3	1,0	6	98
HN-35	4,3	36,2	6,8	0,9	36,2	1,6	1,0	0,4	0,0	12,4	0,0	100	34,56	1,2	1,0	6	87

Échantillons	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	LOI	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	TOTAL	CO ₂	I _d	I _s	A.I	C.C.P.I
HN-36	0,9	32,4	18,7	0,0	37,1	3,1	1,5	0,3	0,0	5,7	0,0	100	37,88	1,5	0,9	9	99
HN-37	0,5	4,1	41,0	0,0	5,5	0,9	0,0	0,2	0,0	47,7	0,0	100	7,41	2,3	0,3	17	100
HN-38	12,9	3,5	3,6	2,0	6,3	1,0	0,1	2,3	0,1	67,5	0,5	100	5,01	1,8	0,8	34	52
HN-39	15,1	0,5	4,6	3,8	7,4	4,6	0,1	0,3	0,1	62,8	0,5	100	5,71	14,3	0,7	91	69
HN-40	13,0	0,1	2,5	4,2	6,6	4,0	0,1	0,7	0,0	68,6	0,3	100	5,21	66,4	0,9	91	57
HN-41	15,3	11,4	10,9	0,0	4,2	7,9	0,2	0,8	0,1	48,5	0,7	100	0,81	0,1	0,0	39	96
Delbridge																	
HN-42	16,6	0,1	2,4	3,6	2,8	0,2	0,0	0,9	0,1	72,5	0,7	100	0,00	0,0	0,0	80	37
HN-43	11,5	2,6	3,3	1,3	4,0	0,5	0,1	3,8	0,1	72,6	0,3	100	3,17	1,5	0,7	21	42
HN-44	11,1	2,8	3,6	0,8	5,5	1,2	0,1	3,9	0,0	70,6	0,3	100	4,77	2,2	0,9	23	50
HN-45	9,6	2,5	2,5	1,0	3,7	0,3	0,1	3,1	0,0	76,8	0,2	100	3,09	1,6	0,8	19	41
HN-46	15,9	11,6	11,4	0,8	12,4	2,9	0,2	2,3	0,1	41,5	0,8	100	9,02	1,0	0,5	21	82
HN-47	10,5	9,5	7,8	0,7	17,7	11,0	0,1	0,7	0,2	41,3	0,5	100	14,98	2,0	0,6	53	93