

**Résumé**

Une série de projet portant sur la carbonatation ont été réalisés au CONSOREM. Il s'agissait au départ de développer un outil de discrimination des différentes espèces de carbonate à partir des banques de données lithogéochimiques. Les efforts ont permis de développer le diagramme de carbonatation qui met en relation les indices de saturation (ISCB) et de discrimination (IDCB). En plus de permettre de reconnaître les différentes espèces de carbonates, ce diagramme permet aussi de distinguer en partie la composante orogénique de celle volcanogène. Il y a toutefois une forte superposition des ces deux tendances. L'objectif final était donc d'améliorer la discrimination entre la carbonatation volcanogène et la carbonatation orogénique ce qui a été réalisé avec la création d'un nouveau diagramme ternaire qui met en relation les indices IFRAIS de Normat, l'indice Chlorite et le ratio ISCB/IDCB.

**Introduction**

La carbonatation est une altération commune aux minéralisations aurifères orogéniques et de sulfures massifs volcanogènes (SMV) de type Matfabi. Elle se manifeste par un remplacement progressif des silicates par des carbonates (calcite, ankerite, dolomite, sidérite et magnésite), causé par l'interaction entre un fluide hydrothermal riche en CO<sub>2</sub> et une roche encaissante. La discrimination des différentes phases de carbonates permet de localiser les zones proximales et distales des minéralisations et est donc un outil fort utile en exploration minérale (Fig. 1). De plus, la distinction entre carbonates volcanogènes ou orogéniques est souhaitable afin d'orienter la stratégie d'exploration vers l'un ou l'autre des contextes.

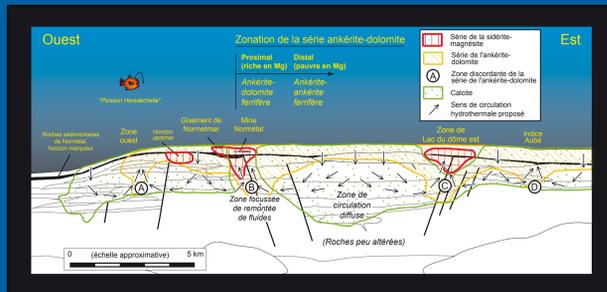


Fig. 1 : Zonation des carbonates volcanogènes du complexe volcanique de Normétal, Abitibi (Lafrance, 2003)

**Méthodes de discrimination des carbonates**

Les méthodes traditionnelles pour établir la carbonatation impliquent soit la détermination par diffraction X, la calorimétrie ou la microsonde. Il s'agit de méthodes coûteuses particulièrement en temps. Parallèlement, les vastes banques de données lithogéochimiques sont peu mises à profit dans l'établissement des types de carbonates hormis la méthode Normat bien connue en exploration (Piché et Jébrak, 2004).

**Indices de carbonatation**

L'outil développé au CONSOREM utilise deux indices déjà connus calculés à partir de bases de données lithogéochimiques. Il permet d'une part d'apprécier l'intensité ou la saturation de la carbonatation, une relation établie à partir de la capacité d'une roche à se combiner avec le CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>/CaO+FeO+MgO+MnO molaire) et d'autre part, la spéciation ou la discrimination des carbonates contrôlée par le rapport CO<sub>2</sub>/CaO molaire (fig. 2).

**Indice de saturation (ISCB)**

$$ISCB = \frac{(\%CO_2 / 44,01)}{((\%MgO/40,3) + (\%CaO/56,08) + (\%MnO/70,94) + (\%Fe_2O_3 * (0,8998/71,85)))}$$

**Indice de discrimination (IDCB)**

$$IDCB = (\%CO_2 / 44,01) / (\%CaO / 56,08)$$

Fig. 2. Les deux indices de carbonatation utilisés.

**Indice de saturation (ISCB)**

Un ratio légèrement semblable à l'indice de saturation 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 (CO<sub>2</sub>/Ca+Fe+Mg). Cet indice est ici modifié en incorporant le MnO afin de tenir en compte des phases carbonatées riches en Mn (ex. rhodochrosite = MnCO<sub>3</sub>).

Les cations bivalents Ca, Fe, Mg et Mn sont présents dans les roches volcano-sédimentaires sous forme de silicates (ISCB y est près de 0). Au fur et à mesure que l'altération en carbonates s'accroît, ces cations sont progressivement transférés dans les carbonates et le ratio approche la valeur de saturation de 1. La figure 3 montre que l'abondance de CO<sub>2</sub> ne peut être utilisée comme un indicateur fiable du degré de carbonatation, puisque la capacité d'une roche donnée à fixer le CO<sub>2</sub> est essentiellement reliée à sa composition. Par exemple pour un ISCB de 0,8 (ce qui est très élevé) on a besoin de seulement 3% de CO<sub>2</sub> dans une rhyolite alors que 12% de CO<sub>2</sub> est nécessaire dans un basalte. L'avantage de l'indice est donc l'inhibition de l'effet de la composition des roches sur l'évaluation de la saturation en carbonates.

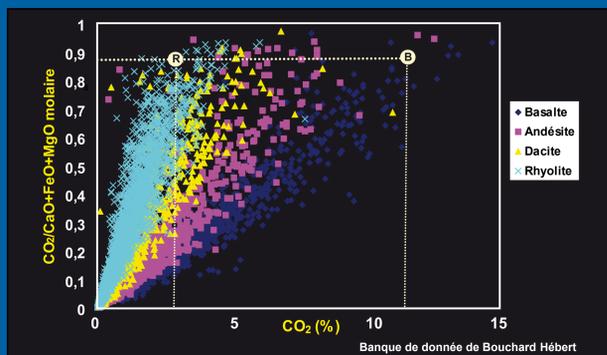


Fig. 3: La teneur en CO<sub>2</sub> ne reflète pas l'intensité de la carbonatation, celle-ci étant mieux représentée par le ratio molaire CO<sub>2</sub>/CaO+FeO+MgO+MnO (indice de saturation ISCB) qui est peu influencé par la lithologie hôte (voir le texte). Échantillons provenant de la banque de données de Bouchard-Hébert (Ressources Breakwater).

**Indice de discrimination (IDCB)**

Une méthode rapide et efficace pour discriminer les différentes phases de la carbonatation est l'utilisation du ratio molaire CO<sub>2</sub>/CaO (Whitehead et Davies, 1988). Ce ratio correspond à 1 pour la calcite pure, alors qu'il est de 2 pour la dolomite et l'ankerite. La sidérite et la magnésite quant à elles possèdent un rapport CO<sub>2</sub>/CaO très élevé qui tend vers l'infini puisqu'elles ne contiennent pas de CaO.

La diffraction X, avec des tests effectués sur des échantillons provenant de Casa Berardi (Fig. 4) confirme que le ratio molaire CO<sub>2</sub>/CaO permet de discriminer entre la calcite (CO<sub>2</sub>/CaO=1), l'ankerite et/ou dolomite (CO<sub>2</sub>/CaO=2) et la sidérite dans les roches volcaniques mafiques.

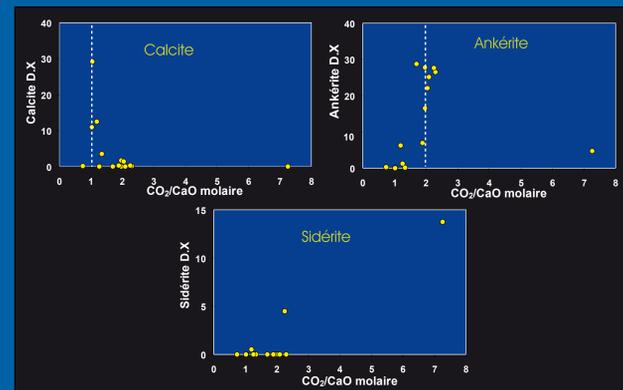


Fig. 4 : Diffraction X de différentes phases carbonatées vs ratios molaires CO<sub>2</sub>/CaO sur des échantillons provenant de Casa Berardi.

**Exemple d'application des indices de carbonatation**

**Mine Bouchard-Hébert**

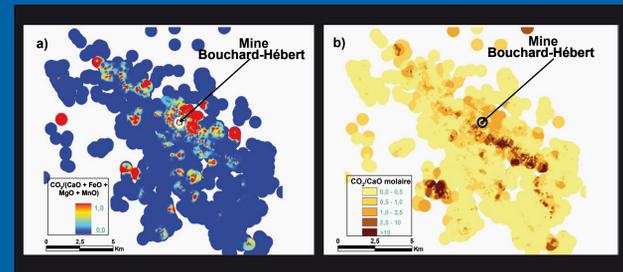


Fig. 5 : Application des indices de carbonatation au secteur de la mine Bouchard-Hébert : a) indice de saturation et b) indice de discrimination.

**Diagramme de carbonatation**

Un nouveau diagramme mettant en relation les indices de discrimination et de saturation a été développé. Ce diagramme est pratique dans le traitement de banques de données provenant d'un secteur donné, en permettant d'isoler les échantillons présentant le plus d'intérêt en fonction du contexte de minéralisation. Avec les exemples de Bouchard-Hébert et Casa Berardi, on peut proposer une limite à IDCB=2,5 pour distinguer les deux environnements de carbonatation (Fig. 6). Le diagramme de carbonatation permet donc, dans une certaine mesure, de faire la distinction entre les systèmes de carbonatation d'origine volcanogène avec ceux d'origine orogénique (Fig. 7).

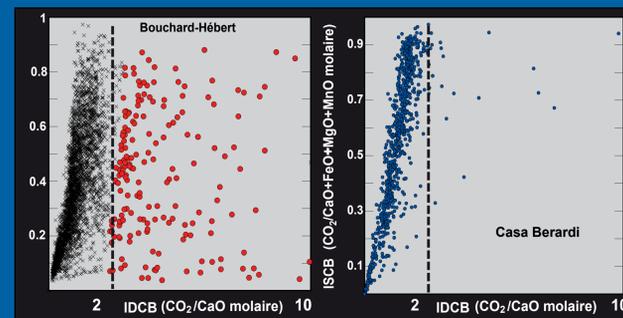


Fig. 6 : Distribution des échantillons dans le diagramme de carbonatation dans le cas d'un système volcanogène (a) et d'un système orogénique aurifère (b). A Bouchard-Hébert (a), les échantillons en rouge sont interprétés comme représentatif d'un halo d'altération associé au gisement de sulfures massifs

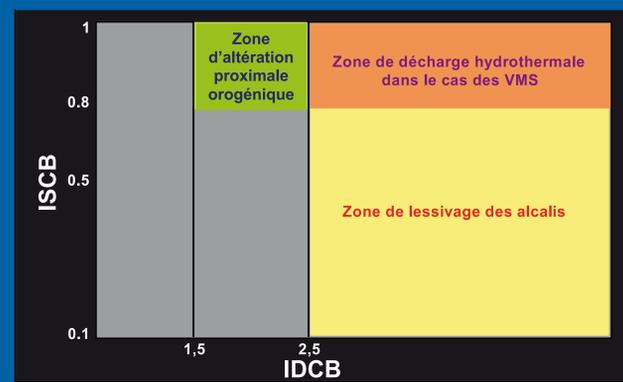


Fig. 7 : Diagramme de carbonatation et proposition des zones d'altération proximales.

**Discrimination entre carbonatation volcanogène et orogénique**

Comme vu précédemment le diagramme de carbonatation développé permet de distinguer en partie la composante orogénique de celle volcanogène (Fig. 7), toutefois une forte superposition des tendances orogéniques et volcanogènes est observée sur ce diagramme (Fig. 6a). Un nouveau diagramme ternaire a donc été développé dans le but d'améliorer cette discrimination.

Dans le but de développer ce diagramme différents cas d'études ont servi à caractériser la carbonatation des environnements orogéniques et volcanogènes. Les sites correspondent à des gisements ou segments de failles où il y a carbonatation, sans superposition reconnue ou suspectée des systèmes volcanogène et orogénique (Fig. 8).



Fig. 8 : Localisation des sites de carbonatation volcanogènes (Bouchard-Hébert, Louvicourt, Joutel, Gemini-Turgeon, Normétal, Lyndhurst) et orogéniques (Faille Cadillac, Larder Kirkland Lake, Douay, Faille Lamark, Destor-Porcupine) étudiés.

Le traitement des données montre que le ratio ISCB/IDCB permet d'améliorer significativement la distinction entre carbonatations orogénique et volcanogène sur le diagramme de carbonatation, les échantillons des sites volcanogènes étant majoritairement dans le champ ISCB/IDCB < 0,25 (sous la droite m=0,25, Fig. 9). Par exemple seulement 12% des échantillons de Bouchard-Hébert possèdent un IDCB > 2,5 (carbonates volcanogènes) alors qu'avec le ratio ISCB/IDCB < 0,25 c'est 41% des échantillons qui sont discriminés (Fig. 9).

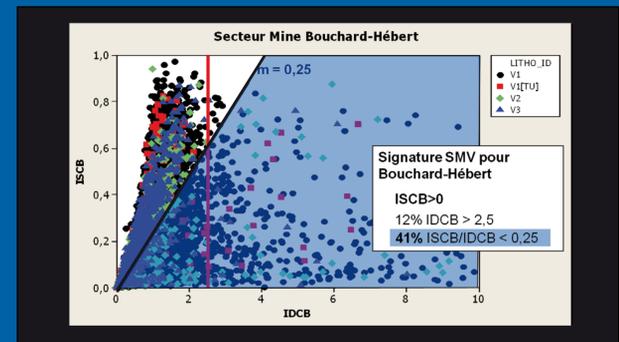


Fig. 9 : Diagramme de carbonatation pour les échantillons de Bouchard-Hébert. Le traitement des données pour tous les sites orogéniques et volcanogène a démontré que les échantillons sous la droite ISCB/IDCB < 0,25 sont majoritairement volcanogènes. C'est le cas pour 41% des échantillons de cet exemple.

**Diagramme ternaire de discrimination**

Des analyses en composantes principales ont été effectuées sur chacun des sites afin de dégager des relations entre les indices de carbonatation et d'autres indicateurs d'altération communs (ex. IFRAIS, Indice Chlorite, Hishikawa, etc.). L'objectif était d'ajouter un troisième pôle au diagramme de carbonatation afin de mieux discriminer la signature de la carbonatation à l'aide d'un diagramme ternaire. Le diagramme ternaire réunissant les indices IFRAIS de Normat, l'indice Chlorite et le ratio ISCB/IDCB s'est avéré très discriminant. À la mine Louvicourt par exemple, 81% des échantillons se situent à l'extérieur du champ défini par les échantillons des environnements orogéniques (Fig. 10).

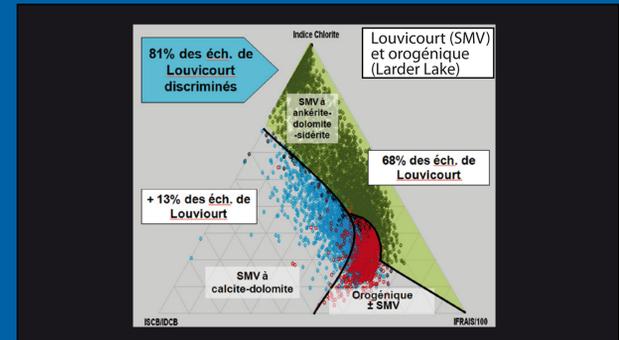


Fig. 10 : Diagramme ternaire de discrimination de la carbonatation volcanogène et orogénique. Dans cet exemple 81% des échantillons de la mine Louvicourt (identifié comme un environnement volcanogène) sont situés à l'extérieur du champ qui contient les carbonates orogéniques (points rouges, Larder Lake dans ce cas-ci).

**Références**

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.  
 Lafrance, B., 2003. Reconstruction d'un environnement de sulfures massifs volcanogènes déformé : Exemple archéen de Normétal. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 362p.  
 Whitehead, R.E. et Davies, J.F., 1988. Discriminant analysis involving CO<sub>2</sub>/CaO and arsenic in gold exploration. Journal of Geochemical Exploration, 30: 243-253.  
 Piché, M. et Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration, 82: 59-77.