
TYPOLOGIE DES ALTÉRATIONS ASSOCIÉES AUX MINÉRALISATIONS AURIFÈRES EN ABITIBI

Projet 2013-07

Par : Ludovic Bigot, M.Sc., géo.
2014



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 :

Bigot, L., 2014. Typologie des altérations associées aux minéralisations aurifères en Abitibi. Rapport, Projet CONSOREM 2013-07, 48 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@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

L'altération est largement reconnue dans les gisements aurifères. Toutefois, bien qu'il existe plusieurs méthodes pour caractériser cette altération, la plupart se heurtent à de nombreuses contraintes notamment d'ordre lithologique qui influencent le résultat. À la lumière des limites des méthodes existantes, il apparaît nécessaire de développer une nouvelle méthode plus polyvalente, indépendante des lithologies, et plus objective afin de caractériser efficacement l'altération en contexte aurifère.

Deux nouvelles méthodes géochimiques ont été développées dans ce projet. Il s'agit de deux diagrammes nommés « Altération SatCarbKNa » et « Altération DiscrCarbKNa » construits à partir des calculs de bilans de masse et des indices de carbonatation qui sont des paramètres indépendants des lithologies. Les deux diagrammes binaires illustrent l'intensité des altérations potassiques et sodiques, et l'intensité et le type d'altération en carbonate. Ces trois altérations sont reconnues comme étant les altérations proximales dominantes en contexte aurifère non-volcanogène.

Le projet mise sur l'aspect méthodologique par une approche quantitative à partir de données lithogéochimiques. Initialement, une base de données provenant de mines et de gisements d'or non-volcanogènes en Abitibi a été construite. Les analyses provenant d'échantillons ignés, altérés, ayant une teneur en or supérieure à 1 g/t Au, et étant représentatifs du gisement ont été sélectionnées. Les analyses répondant aux critères proviennent de 56 mines-gisements d'or d'Abitibi.

À partir des méthodes développées lors de ce projet, des signatures hydrothermales pour les 56 mines-gisements d'or non-volcanogènes de l'étude ont pu être définies. Tout en respectant l'aspect sectoriel et le contexte géologique, il est désormais aisé, à partir de données lithogéochimiques, de comparer la signature hydrothermale d'échantillons minéralisés en or avec celle de mines-gisements d'or en Abitibi. Cela permet, entre autre, de vectoriser des travaux d'exploration.

L'intégration spatiale des signatures hydrothermales des mines-gisements d'or de l'étude a permis de dresser un portrait quantitatif de l'hydrothermalisme en Abitibi, et d'en distinguer des champs géochimiques spécifiques.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement.....	ii
RÉSUMÉ	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des annexes.....	vii
1 INTRODUCTION.....	1
2 NOTIONS ET ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ALTÉRATION EN CONTEXTE AURIFÈRE	1
2.1 Définitions et notions sur l'altération.....	1
2.2 Variables fondamentales de l'altération	2
2.3 Minéralogie de l'or	3
3 LES MÉTHODES EXISTANTES DE CARACTÉRISATION DE L'ALTÉRATION.....	4
3.1 Les ratios d'éléments (indices unaires).....	4
3.2 Les diagrammes binaires et ternaires d'éléments majeurs.....	5
3.3 Minéralogie normative	7
3.4 Méthode des bilans de masse.....	8
3.5 Exemples d'application de caractérisation des altérations.....	9
4 DONNÉES ET ÉTAPES DU PROJET	10
5 TRAITEMENTS ET ANALYSES	12
5.1 Regard sur la compilation de la littérature.....	12
5.2 Test de confiance des résultats.....	12
5.3 Analyses par composantes principales	13
5.4 Relation bilan de masse K_2O et Na_2O	14
5.5 Signature hydrothermale des gisements d'or.....	15
5.6 Champs hydrothermaux en Abitibi	17
6 NOUVEAUX DIAGRAMMES DISCRIMINANTS ET APPLICATIONS.....	22
6.1 Méthode pour la réalisation des diagrammes	22
6.2 Diagramme <i>Altération SatCarbKNa</i>	23
6.3 Diagramme <i>Altération DiscrCarbKNa</i>	26
6.4 Typologie des gisements.....	27
6.5 Exemple d'application du diagramme <i>Altération SatCarbKNa</i> sur un segment de la Faille de Cadillac-Larder Lake.....	28
7 NOUVEAU PORTRAIT HYDROTHERMAL EN ABITIBI	29
7.1 Comparaison et discussion	31
8 CONCLUSIONS	32
REMERCIEMENTS	32
RÉFÉRENCES	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Représentation conceptuelle simple des processus d'altération et du métasomatisme d'une roche (Trépanier, 2011).	2
Figure 2.	Les trois variables fondamentales qui influencent l'altération (nature, intensité, distribution). D'après Colvine et al. (1984) et Colvine (1988).	3
Figure 3.	A) Boîte à moustaches des indices de saturation en albite selon la lithologie. La dépendance de l'indice aux lithologies est forte. Les échantillons utilisés sont des roches fraîches. B) Boîte à moustaches des indices de saturation en carbonate selon la lithologie. Peu à pas d'influence de la lithologie sur l'indice de saturation en carbonate. Les échantillons utilisés sont des roches fraîches.....	5
Figure 4.	A) Diagramme Box-plot original (Large et al., 2001). Index CCP = $100 \frac{MgO+FeO}{MgO+FeO+Na_2O+K_2O}$, Index d'altération = $100 \frac{K_2O+MgO}{K_2O+MgO+Na_2O+CaO}$. Les champs des roches fraîches occupent une boîte au centre du diagramme; les flèches numéro 1, 2, 3, 4, 5, 6 indiquent les processus hydrothermaux; les flèches 7, 8, 9, 10 indiquent le processus de diagenèse. B) Diagramme Box-plot modifié par Trépanier (2011). La forme, la position, et la nature des roches plus fraîches ont été précisées.	6
Figure 5.	Diagramme ternaire ACNK modifié d'après Nesbitt et Young (1984, 1989). Les proportions molaires sont indiquées à chaque pôle. Les champs des lithologies felsiques, mafiques, et ultramafiques sont indiqués. Les flèches indiquent les tendances d'altérations : (1) profil d'altération argileuse d'un gabbro-basalte; (2) profil d'altération potassique à séricite pour un granite.	7
Figure 6.	Indice d'altération chlorite-carbonate-talc selon les lithologies calculé avec la CONSONORM. Échantillons frais. L'effet de la lithologie est souligné par la variabilité de la valeur de l'indice (Trépanier, 2013).	8
Figure 7.	Distribution d'indice d'altération. A) Profil latéral perpendiculaire au cisaillement qui contient l'essentiel du gisement de Kerr-Addison, le <i>flow ore</i> et le <i>carbonate ore</i> (Kishida et Kerrich, 1987). Les indices albite (Na/Al), séricite (3K/Al), et carbonates sont reportés en fonction de la distribution de l'or. B) Distribution des indices d'altération dans le gisement de Bronzewing, Western Australia (Eilu et al., 2001), en environnement de lithologie homogène.....	10
Figure 8.	Gisements/mines d'or retenus pour le projet, 56 au total. Les couleurs indiquent les lithologies (SIGÉOM, Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation); les polygones avec des bandes indiquent les couloirs de déformation (zones de déformation Abitibi version 3, CONSOREM).....	11
Figure 9.	Diagramme teneur-tonnage selon le type d'altération proximale associée à la minéralisation aurifère pour 56 gisements d'or en Abitibi. Deux zones distinctes ressortent : altération à séricite à plus forte teneur et l'altération à albite à plus faible teneur.....	12
Figure 10.	Illustration schématique du principe de l'A.C.P. Il s'agit de projeter sur un plan à deux dimensions les différentes composantes (d'après https://studies2.hec.fr/jahia/Jahia/tenenhaus/pid/1300).	13
Figure 11.	Analyse en composantes principales sur les bilans de masse en CaO, MgO, Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, et Na ₂ O. Résultats présentés selon les composantes 1 et 2. Le nombre entre parenthèses est la variance.	14
Figure 12.	Diagramme binaire des bilans de masse en K ₂ O et Na ₂ O en valeur absolue (gr/100gr). L'enveloppe jaune illustre le champ des échantillons minéralisés de Kerr-Addison (<i>albitite ore</i>); l'enveloppe rouge illustre le champ des échantillons minéralisés de Casa Berardi. Les cercles sont d'autres gisements d'or..	15
Figure 13.	Diagrammes montrant les trois paramètres du métasomatisme : la saturation en carbonate (CO ₂ /CaO+FeO+MgO) en ordonnée, les bilans de masse K ₂ O et Na ₂ O	

	rapportés en valeur absolue (gr/100gr) en abscisse. A) Kerr-Addison (précurseur modélisé). B) Beattie (précurseur unique).....	16
Figure 14.	Exemple de certains gisements d'or dont les échantillons minéralisés (> 1g/t Au) ont une signature hydrothermale distincte des échantillons non-minéralisés. Des enveloppes rouges et oranges illustrent les champs des gisements de Kerr-Addison et Beattie respectivement.....	17
Figure 15.	Portrait hydrothermal de l'Abitibi pour des gisements d'or non-volcanogènes. A) Intensité de la carbonatation d'après l'indice de saturation en carbonate ($CO_2/CaO+FeO+MgO$), et type de carbonates d'après l'indice de discrimination des carbonates (CO_2/CaO). B) Métasomatisme sodique absolu (gr/100gr de précurseur). C) Métasomatisme potassique absolu (gr/100gr de précurseur).....	19
Figure 16.	Portrait de l'hydrothermalisme associé à la minéralisation aurifère à partir des paramètres de carbonatation, et de métasomatisme sodique et potassique. A) Synthèse à l'échelle de l'Abitibi, la zone Telbel-Vezza dans le nord de l'Abitibi est définie. B) Vue rapprochée du rectangle rouge de la figure A. Zone des Failles Porcupine-Destor et Cadillac-Larder Lake.....	21
Figure 17.	Distribution des gains métasomatiques (gr/100gr) selon leur fréquence cumulée (%). A) Gain en potassium. B) Gain en sodium. Dans les deux diagrammes il y a une rupture de pente pour des valeurs de 0,25gr/100gr, un seuil fixé statistiquement comme étant significatif en termes d'altération.....	22
Figure 18.	Diagramme Altération SatCarbKNa avec les quatre scénarios possibles. 1) Un gain en potassium supérieur à 0,25gr/100gr avec une perte en sodium ou un gain en sodium inférieur à 0,25gr/100gr. 2) un gain en sodium supérieur à 0,25gr/100gr avec une perte en potassium ou un gain inférieur à 0,25gr/100gr. 3) Deux pertes en potassium et sodium, ou bien deux gains en potassium et sodium inférieurs à 0,25gr/100gr, ou bien une perte et un gain inférieur à 0,25gr/100gr. 4) Deux gains supérieurs à 0,25gr/100gr. Dans ce cas-ci la plus forte valeur domine, le rapport sera soit supérieur ou inférieur à 1, mais pas égal à 1.....	23
Figure 19.	Diagramme Altération SatCarbKNa avec les altérations reconnues provenant d'échantillons minéralisés dans des gisements d'or de l'Abitibi. Trois zones sont identifiées : 1) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O inférieur à 1, altération sodique dominante; 2) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O supérieur à 1, altération potassique dominante; 3) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O égal à 1, altération à carbonate seulement.....	24
Figure 20.	Concept du diagramme Altération SatCarbKNa avec les champs d'altération.....	25
Figure 21.	Cinq zones avec quatre paliers de carbonatation. De 0 à 0,25 aucun carbonate; de 0,25 à 1,25 calcite; de 1,25 à 1,75 calcite-ankérite-dolomite; de 1,75 à 2,25 ankérite-dolomite; supérieur à 2,25 sidérite-magnésite-ankérite-dolomite.....	26
Figure 22.	Diagramme Altération SatCarbKNa montrant les champs d'altération pour certains gisements d'or en Abitibi. Les pourcentages indiquent la valeur de représentativité du champ par rapport à l'ensemble des échantillons minéralisés du gisement.....	27
Figure 23.	Test des signatures hydrothermales des échantillons le long du segment Mc Bean – Kerr Addison (en bleu), en comparaison avec l'empreinte minéralisée de deux gisements (Kerr Addison en rouge; Mc Bean en vert).....	28
Figure 24.	Approche pour caractériser les altérations dans des gisements aurifères en Abitibi. Les points représentent les échantillons minéralisés (supérieur à 1g/t Au).....	29
Figure 25.	A) Nouveau portrait hydrothermal des altérations associées à l'or en Abitibi. B) Vue rapprochée sur les Failles de Cadillac-Larder Lake et de Porcupine-Destor.....	30
Figure 26.	Champs gîtologiques (A – approche descriptive) versus champs hydrothermaux (B – approche quantitative) le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake.....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Minéralogie et géochimie des altérations en contexte aurifère.	2
Tableau 2. Indices unaires en contexte aurifère (d'après Kishida et Kerrich, 1987).	5
Tableau 3. Sommaire des principaux outils et de leurs avantages et désavantages (d'après Trépanier, 2011)	9
Tableau 4. Pourcentage de gisements dans lesquels l'altération proximale dominante sodique ou potassique (associée à la minéralisation aurifère) est associée à des gains métasomatiques en Na ₂ O et K ₂ O.	13

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – SIGNATURES HYDROTHERMALES DES GISEMENTS D'OR À PARTIR DES DONNÉES D'ÉCHANTILLONS MINÉRALISÉS (> 1G/T AU).....	35
ANNEXE 2 – MÉTHODOLOGIE D'UTILISATION DES OUTILS SOUS LITHOMODELEUR (VERSION 3.6.0).....	40
ANNEXE 3 – UTILISATION DES ÉLÉMENTS TRACES MOBILES POUR CARACTÉRISER L'ALTÉRATION DANS LES PLUTONS FELSIQUES.....	43

1 INTRODUCTION

L'altération est un paramètre omniprésent dans la plupart des gisements d'or, qu'ils soient de type orogénique (Groves et al., 2003; Dubé et Gosselin, 2007; Robert et al., 2007) ou associés à des intrusions (Lang et Baker, 2001; Robert, 2001; Robert et al., 2007). Cependant, l'étendue (e.g., centimétrique à décamétrique), la nature (e.g., carbonatation, albitisation, séricitisation), et l'intensité de l'altération n'obéissent pas à une règle claire. Contrairement aux systèmes de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) pour lesquels les méthodes de reconnaissance de l'altération sont bien établies et efficaces, celles existantes en contexte aurifère non-SMV sont peu développées et soumises à des contraintes notamment d'ordre lithologique. Une approche descriptive et exhaustive au cours de deux projets synthèses CONSOREM 2011-01 et 2012-01 (Rafini, 2014) a fait ressortir la variabilité des signatures géochimiques associées aux gîtes d'or de la partie est de la Faille Cadillac – Larder Lake, et permis de proposer l'existence de champs gîtologiques au regard, entre autres, de la disposition des minéralisations, et de la minéralogie des sulfures et des altérations.

Lors de la découverte sur le terrain de roches minéralisées, la compréhension des altérations et plus globalement du système hydrothermal est importante pour l'exploration. S'agit-il d'une altération potassique, sodique, en carbonate ? Une approche par l'intégration de certains outils existants de traitement de l'altération en contexte aurifère pourrait apporter une solution au manque d'outils de reconnaissance de l'altération pour ce contexte spécifique. Il serait possible de prendre le meilleur de certains outils afin de représenter plus efficacement et plus objectivement l'altération en contexte aurifère. Bien que la géochimie ait été travaillée sur plusieurs gisements d'or en Abitibi, il n'existe pas de représentation intégrée des signatures hydrothermales de ces gisements d'or dans un diagramme caractérisant l'altération. Et par ailleurs, aucun portrait de l'hydrothermalisme associé à la minéralisation aurifère en Abitibi n'a été réalisé.

L'objectif du présent projet est la caractérisation des altérations en contexte aurifère en deux volets : (1) développer des méthodes géochimiques favorisant la reconnaissance rapide des altérations à partir de données lithogéochimiques, et l'association de ces altérations à des signatures hydrothermales de gisements d'or; (2) identifier et quantifier l'hydrothermalisme en Abitibi, par gisement et par champ.

2 NOTIONS ET ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'ALTÉRATION EN CONTEXTE AURIFÈRE

2.1 Définitions et notions sur l'altération

Les notions d'altération et de métasomatisme seront largement évoquées dans ce rapport, il est donc important de les définir. Le processus d'altération est considéré comme des changements minéralogiques de la roche alors que le processus métasomatique représente des changements chimiques (Stanley et Madeisky, 1994). Trépanier (2011) a proposé une représentation conceptuelle simple pour unifier l'altération et le métasomatisme (**Figure 1**). Sous l'effet d'une circulation hydrothermale, une roche fraîche subit une transformation minéralogique (processus d'altération), chimique (processus métasomatique), et physique (masse et volume). Le produit final, c'est-à-dire la roche altérée est dans un état différent de l'état initial au regard de ces trois paramètres.

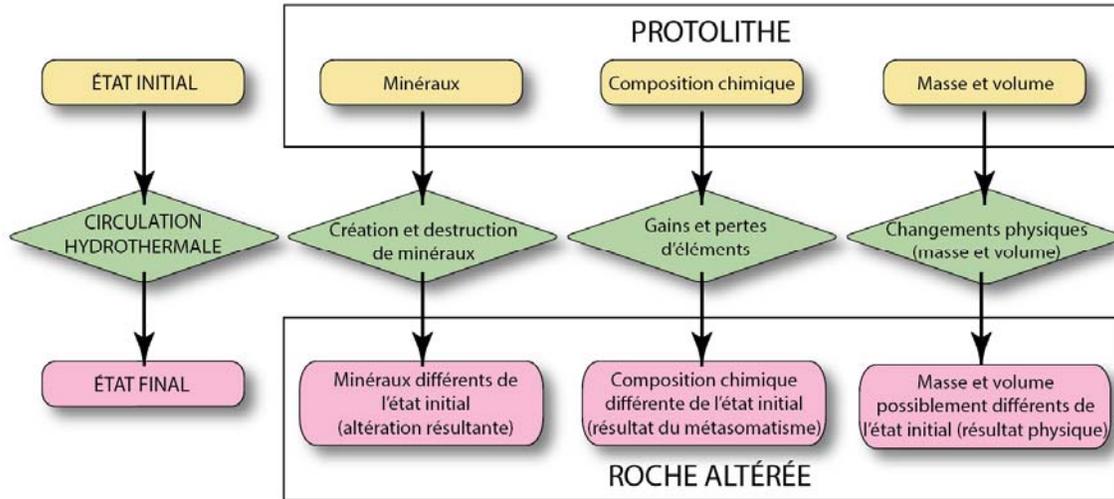


Figure 1. Représentation conceptuelle simple des processus d'altération et du métasomatisme d'une roche (Trépanier, 2011).

L'altération peut être considérée selon trois paramètres majeurs : la nature qui se rapporte au minéral d'altération (e.g., ankérite, séricite, albite), l'intensité qui indique l'abondance de minéraux d'altération (e.g., forte), et le style qui illustre la disposition de l'altération (e.g., éponte des veines, en remplacement pervasif dans l'encaissant).

La minéralogie et la chimie des altérations en contexte aurifère sont variées (**Tableau 1** et références citées). Cependant, peu importe le type géologique, certaines altérations proximales sont récurrentes. Les altérations à carbonates, et les altérations potassiques et sodiques sont dominantes. Ces altérations (minéralogie) traduisent des gains métasomatiques (chimie) en CO_2 , en K_2O , et en Na_2O respectivement. Des altérations en silice sont aussi largement reconnues, néanmoins l'évaluation des gains métasomatiques en silice est difficile car il s'agit souvent de veines de quartz, et non d'une imprégnation dans la roche, ce qui biaise le résultat métasomatique.

Tableau 1. Minéralogie et géochimie des altérations en contexte aurifère.

	Gisement Au orogénique	Gisement Au associé aux intrusions
Altération proximale associée à l'or	Séricite, silice, calcite, ankérite, sidérite, pyrite, (albite)	albite, feldsp, séricite, silice, Fe-dolomite, calcite, pyrite, hématite
Métasomatisme proximal (gain)	K_2O , LILE, CO_2 , S, (Na_2O)	SiO_2 , Na_2O , K_2O , CaO, S, CO_2
Références	Colvine et al., 1984; Robert, 1986; Colvine, 1988; Groves et al., 2003; Dubé et Gosselin, 2007; Robert et al., 2007	Lang et Baker, 2001; Robert, 2001

2.2 Variables fondamentales de l'altération

Pour une composition de fluide constante, la variabilité des altérations dans les gisements aurifères est imputable à trois variables fondamentales et interdépendantes (Colvine et al., 1984; Colvine, 1988). Il s'agit de la lithologie encaissante, des conditions de pression et de température, et de la perméabilité de l'encaissant (**Figure 2**).

Lithologie : la disponibilité d'éléments pour former des minéraux d'altération est fonction de la composition de la roche encaissante. Des altérations à fuschite et chlorite sont plus répandues dans les roches mafiques et ultramafiques, alors que les altérations à séricite et albite sont plus largement reconnues dans les roches felsiques. Par ailleurs, les roches riches en minéraux ferro-magnésiens (e.g., roches ultramafiques) subissent généralement des altérations de forte intensité, alors que les roches pauvres en minéraux ferro-magnésiens mais riches en quartz-feldspath sont plus résistantes à l'altération et présentent des altérations de plus faible intensité.

Conditions P-T : la nature de l'altération est largement dépendante des éléments disponibles dont le H₂O. Alors qu'au faciès schiste vert le H₂O est très répandu, ce qui permet notamment la cristallisation abondante de micas, dans les faciès métamorphiques plus élevés le H₂O est de moins en moins présent, rendant difficile la cristallisation des minéraux typiques du faciès schiste vert (sauf s'il y a un rétro-métamorphisme avec introduction du H₂O). De même que pour le H₂O, le CO₂ est moins présent avec l'augmentation du gradient métamorphique. Dans ces conditions P-T plus élevées, les aluminosilicates (e.g., staurotide, cordiérite) sont les minéraux d'altération dominants. Le style et la disposition de l'altération sont aussi affectés par les conditions de pression et température. Au faciès des schistes verts les structures cassantes sont souvent des pièges structuraux de dépôt de minéralisations, alors que pour des conditions P-T plus élevées le domaine cassant laisse la place au domaine ductile. Les altérations se retrouvent souvent dans des zones de remplacement tabulaires le long de structures ductiles.

Perméabilité de l'encaissant (i.e., ratio eau/roche): la distribution et l'étendue de l'altération sont affectées par la capacité du fluide hydrothermal à se répandre dans la roche. Un pluton felsique très compétent tend à se fracturer sous la contrainte d'une pression hydrostatique, ce qui rend l'altération plus localisée; alors qu'une roche volcanique mafique, peu compétente, permet une circulation plus facile du fluide, ce qui rend l'altération plus forte et plus pervasive. L'empreinte hydrothermale varie grandement selon la fracturation existante et le type roche.

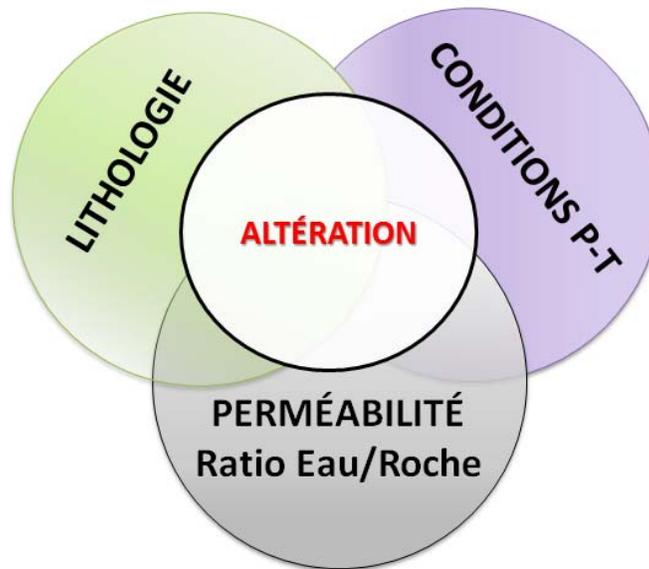


Figure 2. Les trois variables fondamentales qui influencent l'altération (nature, intensité, distribution). D'après Colvine et al. (1984) et Colvine (1988).

2.3 Minéralogie de l'or

Le cortège métallique qui accompagne l'or dans les zones altérées potassique, sodique, et/ou à carbonate est régulièrement à Ag, As, W, Sb, Te, Mo, B. Dans la majorité des cas, l'or se présente dans

des veines de quartz (e.g., la mine Sigma, Robert, 1986), et l'altération se distribue dans les épontes des veines. Dans d'autres cas, l'or se retrouve en association intime avec les sulfures disséminés dans la roche hôte (e.g., la mine Beattie, Bigot et Jébrak, 2015), et les altérations sont plus diffuses. Alors que l'altération proximale associée aux veines de quartz est généralement de quelques centimètres à quelques mètres (Sigma : altération visible 50 cm autour des veines, zone d'altération cryptique de 3 m autour des veines), l'altération proximale dans le cas de l'or associé aux sulfures disséminés est beaucoup plus large (Beattie et Canadian Malartic : enveloppe métrique à décamétrique).

Le comportement de l'or dans les solutions hydrothermales est varié. Selon Romberger (1986), pour des températures de l'ordre de 250°C et sous des conditions de stabilité de la pyrite, l'or est essentiellement transporté sous forme de complexe bisulfuré $Au(HS)_2$. Lorsque le système contient une quantité significative d'arsenic, le complexe thioarséniure $AuAsS_2$ est prédominant. Finalement, en conditions oxydantes, lorsque l'hématite et d'autres oxydes sont stables, l'or est majoritairement transporté sous forme de complexe chloruré $AuCl_2$. Ce complexe bichloruré est surtout reconnu en contexte de températures supérieures à 300°C et très salin, supérieur à 5% poids de Na_2O (Huston et Large, 1989), alors que le complexe bisulfuré se retrouve dans des conditions inférieures à 300°C et à 5% poids de Na_2O . Toutefois, l'or n'est pas exclusivement transporté dans des solutions liquides, mais peut aussi l'être dans des phases gazeuses. Williams-Jones et Heinrich (2005) ont conclu que le transport de l'or menant à la formation des gisements aurifères magmatiques-hydrothermaux peut se faire sous forme de complexe HCl dans les vapeurs. Les températures mesurées sont comprises entre 400 et 900°C, soit nettement supérieures à celles identifiées dans les solutions liquides.

3 LES MÉTHODES EXISTANTES DE CARACTÉRISATION DE L'ALTÉRATION

De nombreuses méthodes allant des plus simples au plus complexes existent pour étudier l'altération. Certaines sont de simples ratios d'éléments (e.g., indice albite, indice séricite ; Franklin, 1997), alors que d'autres sont des diagrammes binaires et ternaires construits à partir de données géochimiques sur les éléments majeurs (e.g., Box-Plot, ACNK). Par une approche mathématique, certaines méthodes consistent à calculer des minéraux hydrothermaux et des indices associés (e.g., NORMAT, CONSONORM), et d'autres permettent de quantifier les apports et lessivages des fluides au cours du métasomatisme (e.g., bilan de masse). Une étude exhaustive de la plupart de ces méthodes a été faite par Trépanier (2011). Les paragraphes ci-dessous en résument les principales caractéristiques.

3.1 Les ratios d'éléments (indices unaires)

Le **Tableau 2** présente les indices unaires utilisés pour caractériser les altérations en contexte aurifère. Les indices développés par Kishida et Kerrich (1987) pour le gisement aurifère de Kerr-Addison sont simples à calculer, cependant fortement influencés par les lithologies (**Figure 3A**). Trépanier (2011) conclut qu'il est possible d'identifier positivement le métasomatisme en connaissant le protholite non altéré. Toutefois, le caractère dépendant aux lithologies rend l'utilisation de ces indices peu pertinente dans le cas d'une comparaison de roches altérées provenant de lithologies différentes. Par ailleurs, ces indices ne renseignent pas sur l'intensité d'une altération puisqu'ils ne font que comparer des valeurs entre elles.

L'indice de saturation en carbonate ($CO_2/CaO+FeO+MgO$) est indépendant des lithologies (**Figure 3B**) et indique l'intensité de la carbonatation. Sa valeur varie de 0 à 1. La quantité de carbonates qu'il est possible de former dépend de la stochéométrie, c'est-à-dire de la disponibilité de Ca, Fe, et Mg dans la roche en fonction du CO_2 . Ainsi il ne peut pas y avoir plus de CO_2 que la somme de $CaO + FeO + MgO$.

Tableau 2. Indices unaires en contexte aurifère (d'après Kishida et Kerrich, 1987).

Indice	Formule
Saturation en albite	Na / Al molaire
Saturation en séricite	3*K / Al molaire
Saturation en albite-séricite	(3*K+Na) / Al molaire
Saturation en carbonate	CO ₂ / (CaO+MgO+FeO) molaire
Discrimination des carbonates	CO ₂ / CaO molaire

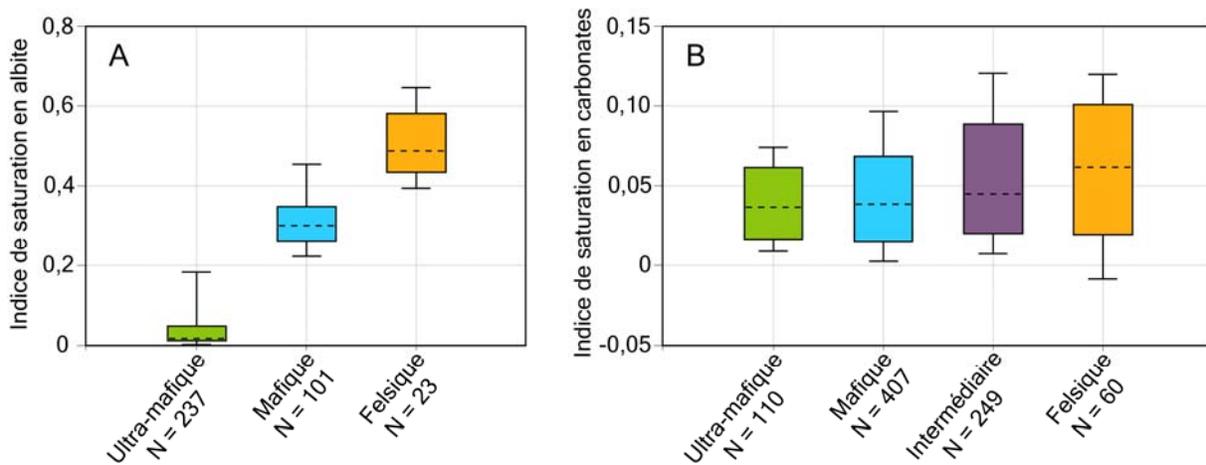


Figure 3. A) Boîte à moustaches des indices de saturation en albite selon la lithologie. La dépendance de l'indice aux lithologies est forte. Les échantillons utilisés sont des roches fraîches. B) Boîte à moustaches des indices de saturation en carbonate selon la lithologie. Peu à pas d'influence de la lithologie sur l'indice de saturation en carbonate. Les échantillons utilisés sont des roches fraîches.

3.2 Les diagrammes binaires et ternaires d'éléments majeurs

Les diagrammes d'éléments majeurs utilisent les concentrations de certains oxydes pour indiquer une tendance d'altération.

La **Figure 4A** présente le diagramme Box-Plot des altérations développées en contexte SMV (Large et al., 2001). L'indice CCP (Chlorite-Carbonate-Pyrite) et l'indice d'altération sont comparés, ce qui permet d'illustrer les altérations en contexte SMV tout en indiquant s'il s'agit d'une altération hydrothermale ou diagénétique. L'encadré au centre du diagramme représente le domaine des roches fraîches. Une modification des champs de roches fraîches (felsiques à ultramafiques) est proposée par Trépanier (2011) dans la version 3.5 de LITHOMODELEUR.

Le diagramme Box-Plot des altérations a l'avantage d'identifier une tendance d'altération à partir d'une lecture directe de la lithogéochimie. Le désavantage est que la position d'un échantillon, donc une tendance d'altération, peut être biaisée par un lessivage d'un élément, ce qui indiquera une tendance d'altération erronée. Par ailleurs, la localisation d'un échantillon dans les champs des roches fraîches n'indique pas nécessairement qu'il n'est pas altéré. Finalement, l'effet de la lithologie est limité car il faut connaître la nature de la roche altérée (e.g., mafique, felsique) pour pouvoir bien identifier la tendance d'altération.

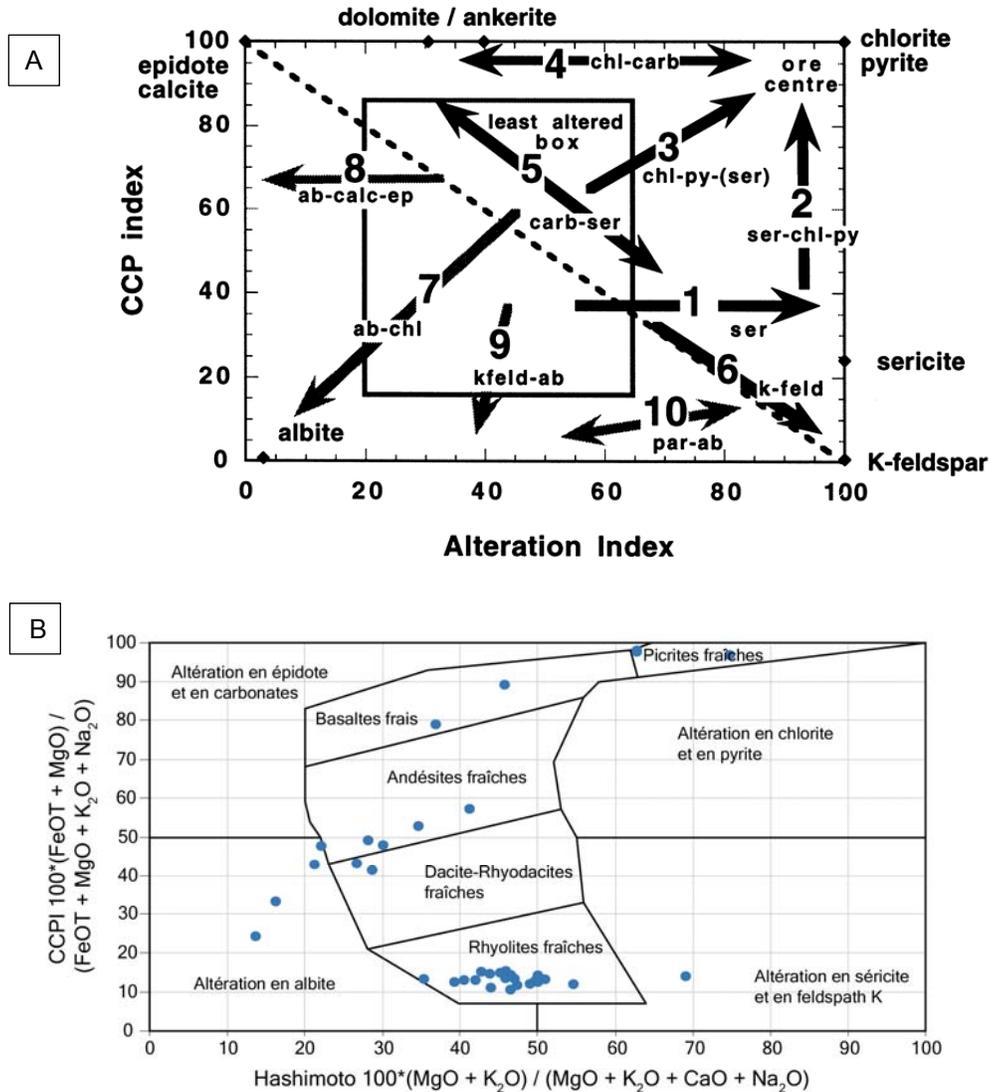


Figure 4. A) Diagramme Box-Plot original (Large et al., 2001). Index CCP = $100 \frac{(MgO+FeO)}{(MgO+FeO+Na_2O+K_2O)}$, Index d'altération = $100 \frac{(K_2O+MgO)}{(K_2O+MgO+Na_2O+CaO)}$. Les champs des roches fraîches occupent une boîte au centre du diagramme; les flèches numéro 1, 2, 3, 4, 5, 6 indiquent les processus hydrothermaux; les flèches 7, 8, 9, 10 indiquent les processus de diagenèse. B) Diagramme Box-plot modifié par Trépanier (2011). La forme, la position, et la nature des roches plus fraîches ont été précisées.

Un second outil est le diagramme ternaire ACNK (Figure 5; Nesbitt et Young, 1984, 1989) qui est représenté par les pôles Al_2O_3 molaire, $CaO+Na_2O$ molaire, et K_2O molaire. De la même manière que le Box-Plot des altérations, le diagramme ACNK utilise la lithogéochimie sans transformation et permet d'identifier des tendances d'altération en connaissant la nature du protholite. L'avantage du diagramme ACNK est son utilisation simple. Le désavantage, à l'instar du Box-Plot des altérations, est qu'il est nécessaire de connaître la nature du protholite afin d'interpréter proprement la tendance d'altération. Par ailleurs, ce diagramme n'indique ni l'intensité de l'altération ni le processus métasomatique.

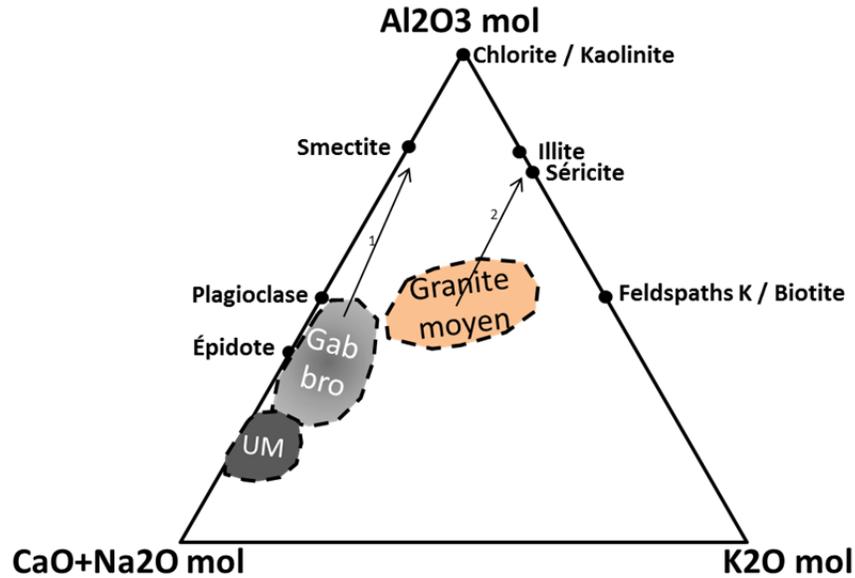


Figure 5. Diagramme ternaire ACNK modifié d'après Nesbitt et Young (1984, 1989). Les proportions molaires sont indiquées à chaque pôle. Les champs des lithologies felsiques, mafiques, et ultramafiques sont indiqués. Les flèches indiquent les tendances d'altérations : (1) profil d'altération argileuse d'un gabbro-basalte; (2) profil d'altération potassique à séricite pour un granite.

3.3 Minéralogie normative

La méthode NORMAT (Piché et Jébrak, 2004) utilise la technique des minéraux normatifs pour caractériser l'altération. Cette norme calcule des minéraux hydrothermaux alumineux et des indices d'altération associés pour illustrer les altérations à séricite (ISER) et chlorite (ICHLO) entre autres. Cette approche est efficace pour détecter les minéraux d'altération en contexte SMV de type Noranda. Cependant, les indices d'altération sont dépendants des lithologies (Trépanier, 2011) et le résultat sous forme de minéral d'altération formé ne renseigne pas sur le processus d'altération à partir de la roche fraîche.

Les normes CONSONORM LG et HG développées par Trépanier (2013) et Mathieu (2014) permettent, à partir d'une analyse chimique, de calculer la minéralogie qu'une roche devrait avoir si elle est en équilibre chimique dans les conditions d'un faciès métamorphique spécifique. Elles permettent en outre de calculer le CO_2 et plusieurs indices d'altération. L'indice d'altération chlorite-talc-carbonate ($\text{Chlorite} + \text{Talc} + \text{Calcite} - \text{Chlorite}_{\text{CO}_2=0} - \text{Talc}_{\text{CO}_2=0}$) / (Tous Mx Ca-Mg-Fe) illustre l'altération distale dans les gisements orogéniques, et l'indice d'altération séricite-carbonate ($\text{Séricite} + \text{Carbonates} - \text{Séricite}_{\text{CO}_2=0}$) / (Tous Mx Ca-Mg-Fe+Orthose+Séricite) représente l'altération orogénique proximale. Le calcul des indices d'altération par la CONSONORM montre également une certaine dépendance à l'égard des lithologies (**Figure 6**).

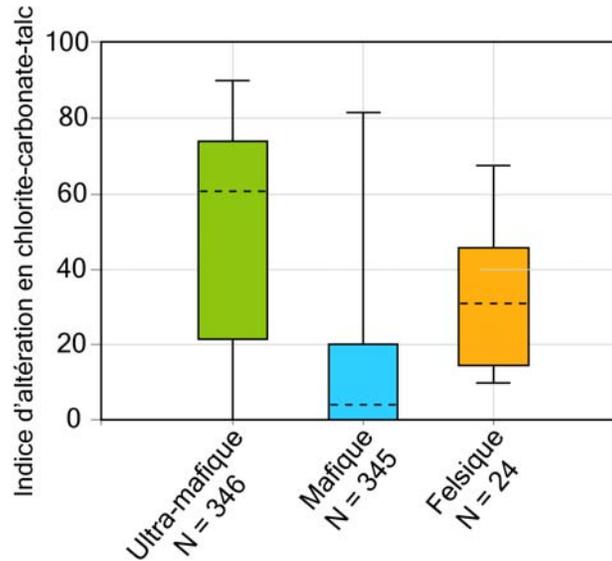


Figure 6. Indice d'altération chlorite-carbonate-talc selon les lithologies calculé avec la CONSONORM. Échantillons frais. L'effet de la lithologie est souligné par la variabilité de la valeur de l'indice (Trépanier, 2013).

3.4 Méthode des bilans de masse

La méthode des bilans de masse compare le poids d'une composante (e.g., K_2O) dans une roche fraîche avec le poids de cette même composante dans une roche métasomatisée. Cette méthode permet de quantifier les gains/pertes réels d'éléments chimiques lors du métasomatisme en tenant compte des gains de masse/volume possibles de la roche. Les premiers travaux de Grant (1986) ainsi que MacLean et Kranidiotis (1987) nécessitaient de connaître la composition du protholite frais afin d'en calculer le métasomatisme. C'est la méthode des bilans de masse par précurseur unique. Trépanier (2011) a proposé une méthode par réseaux neuronaux qui permet de modéliser un précurseur frais pour chaque échantillon analysé. C'est la méthode des bilans de masse par modélisation des précurseurs.

Avec les bilans de masse par précurseur unique, il est possible d'obtenir une quantification du métasomatisme pour tous les éléments, qu'ils soient majeurs ou traces. Avec la méthode des bilans de masse par précurseur modélisé le calcul produit un résultat qui exprime le métasomatisme seulement pour les éléments majeurs. Les résultats de calcul de bilan de masse par précurseur unique et modélisé fournissent des informations quantitatives en valeur pourcentage et/ou poids absolu (gr/100gr de précurseur).

Selon Trépanier (2011), l'avantage des bilans de masse par précurseur unique est le calcul rapide des changements de masse en tenant compte de l'effet de fermeture des analyses. Les désavantages sont la nécessité de connaître la composition d'une roche fraîche non métasomatisée, unique et homogène, et d'avoir des éléments immobiles analysés (e.g., TiO_2 , Al_2O_3 , Zr). La méthode des précurseurs modélisés permet d'obtenir une composition de précurseur pour chaque échantillon analysé. L'inconvénient est que cette méthode par précurseurs modélisés n'est applicable qu'en environnement igné, et est surtout performante pour les roches subalcalines. Par ailleurs, cette méthode nécessite que certains éléments traces immobiles soient analysés (e.g., Zr obligatoire; Cr, Y, Th, Nb optionnels).

Globalement pour les deux méthodes, précurseur unique et modélisé, l'avantage majeur en comparaison des autres outils est leur indépendance par rapport aux lithologies, et la possibilité de quantifier l'effet hydrothermal. Bien que l'identification de minéraux d'altération soit surtout une chasse gardée de la Norme (NORMAT et CONSONORM), avec les bilans de masse il est tout à fait possible de suggérer la cristallisation de minéraux d'altération selon la valeur des gains métasomatiques. Par exemple, pour une

roche ayant des gains en potassium de 8gr/100gr de précurseur, il est raisonnable de supposer la cristallisation de séricite ou de feldspath potassique au faciès schiste vert. Le **Tableau 3** résume les avantages et désavantages des outils de caractérisation du métasomatisme.

Tableau 3. Sommaire des principaux outils avec leurs avantages et désavantages (d'après Trépanier, 2011).

Outils	Avantages	Désavantages
Indice de saturation (albite, séricite, carbonate) Kishida et Kerrich (1987)	<ul style="list-style-type: none"> • Simple à calculer • Un seul nombre en résultat 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance aux lithologies (sauf pour la saturation en carbonate) • Pas d'information sur l'intensité de l'hydrothermalisme (sauf pour la saturation en carbonate)
Minéraux NORMATifs (NORMAT, CONSONORM) Piché et Jébrak (2004) ; Trépanier et al. (2015) ; Mathieu et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation du CO₂ • Efficace pour détecter les minéraux d'altération en contexte SMV 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance des indices d'altération aux lithologies • Indices d'altération applicables en environnement SMV seulement
Diagramme des éléments majeurs (Box-Plot, ACNK) Large et al. (2001) ; Nesbitt et Young (1984, 1989)	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'identifier une tendance d'altération 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance limitée aux lithologies • Pas d'information sur l'intensité de l'hydrothermalisme • Pas indicateur du processus métasomatique
Bilans de masse précurseur unique et précurseur modélisé Grant (1986) ; MacLean et Kranidiotis (1987) ; Trépanier (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Quantifier l'hydrothermalisme par gain/perte • Pas de contraintes des lithologies, facile d'utilisation avec LITHOMODELEUR 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite l'analyse de certains éléments traces (Zr, Y, Cr), et connaissance d'un précurseur frais pour les roches alcalines • Ne permet pas de déterminer le type de minéral formé • Roches ignées sub-alcalines

3.5 Exemples d'application de caractérisation des altérations

La **Figure 7** illustre deux cas de caractérisation des altérations en contexte de gisement aurifère.

La **Figure 7A** est un profil latéral, perpendiculaire à la Kerr Fault, un couloir de déformation qui contient l'essentiel du gisement de Kerr-Addison (Kishida et Kerrich, 1987). L'indice séricite (3K/Al) semble se calquer sur la distribution de l'or qui présente des anomalies dans la zone de *flow ore* et *carbonate ore*. La ressemblance avec le profil de l'or est moins vraie pour l'indice de saturation en albite. Pour ce qui est de l'indice de saturation en carbonate, mis à part une distribution anormalement forte dans la zone de *flow ore* et *carbonate ore*, il n'y a pas de correspondance avec le profil de l'or à l'extérieur de la zone de faille. La variabilité des indices le long du profil latéral illustre le contrôle lithologique qui affecte ces méthodes (sauf pour l'indice de carbonatation). En effet, au sud et dans le couloir de déformation se trouvent des laves mafiques à ultramafiques, alors qu'au nord de celui-ci dominent les roches sédimentaires du Groupe de Timiskaming.

La **Figure 7B** présente une distribution de certains indices d'altération dans le gisement de Bronzewing, Western Australia (Eilu et al., 2001). La lithologie homogène permet dans ce cas une utilisation pertinente des indices d'altération. Pour cet exemple, il semble qu'une forte discrimination des carbonates accompagnée d'un indice séricite élevé soient les paramètres vecteurs des zones minéralisées.

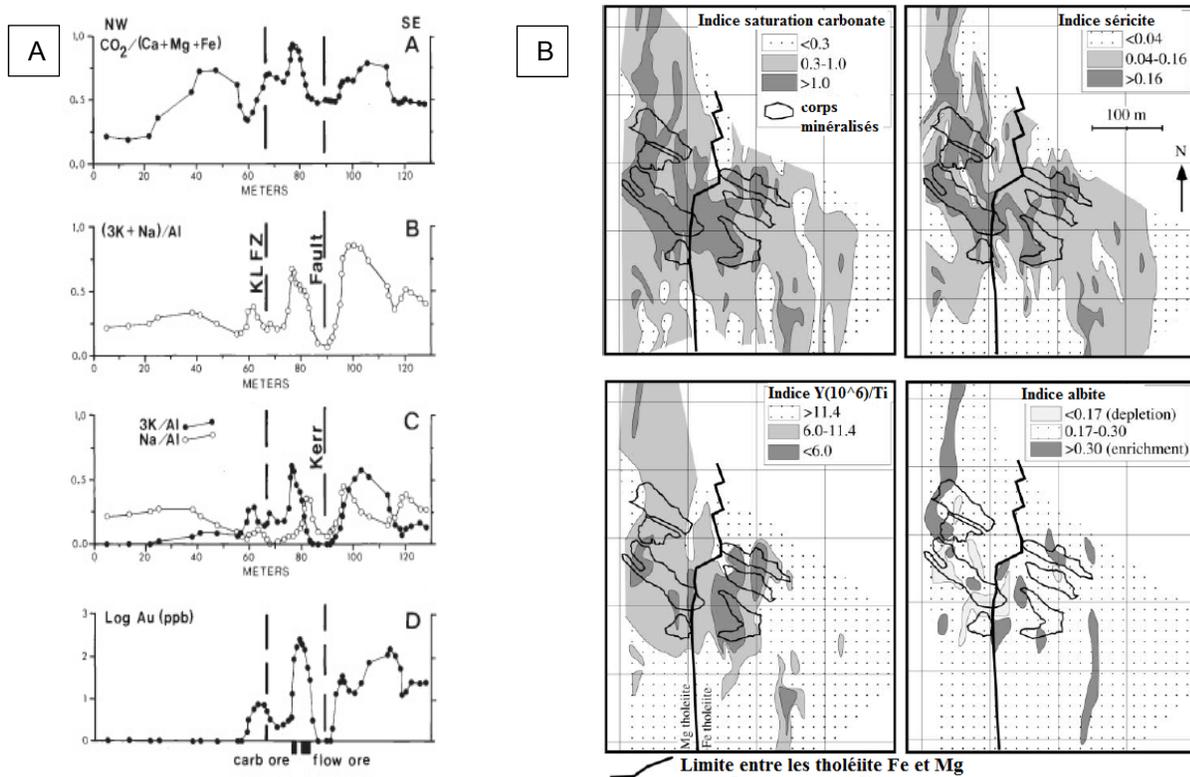


Figure 7. Distribution d'indice d'altération. A) Profil latéral perpendiculaire au cisaillement qui contient l'essentiel des zones minéralisées du gisement de Kerr-Addison, le *flow ore* et le *carbonate ore* (Kishida et Kerrich, 1987). Les indices albite (Na/Al), séricite (3K/Al), et carbonates sont reportés en fonction de la distribution de l'or. B) Distribution des indices d'altération dans le gisement de Bronzewing, Western Australia (modifié de Eilu et al., 2001), en environnement de lithologie homogène.

4 DONNÉES ET ÉTAPES DU PROJET

L'Abitibi joue un rôle majeur en terme de concentration de gisements d'or et de production d'or. En effet, 81% de l'or canadien provenant de gisements de veines de quartz aurifère est issu de l'Abitibi – 4470 tonnes métriques (Dubé et Gosselin, 2007). De nombreux travaux géologiques dans cette sous-province fournissent une grande quantité de données lithogéochimiques. L'Abitibi apparaît donc comme la région idéale pour l'étude. Afin de regarder les altérations en contexte aurifère, l'étude s'est focalisée sur des gisements/mines d'or du type orogénique et associés à des intrusions.

Initialement, une grande quantité de données lithogéochimiques (29 520 analyses) provenant du SIGÉOM, de Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation et de la base de données interne du CONSOREM a été traitée avec le logiciel LITHOMODELEUR (version 3.5.4) afin d'identifier les échantillons répondant aux critères de roches ignées, altérées, et minéralisées. Les échantillons sélectionnés ont une teneur en or supérieure à 1 g/t Au, une minéralisation représentative du gisement, et sont situés dans un rayon de 2 km autour du gisement concerné. Le logiciel permet de reconnaître le protholite et le type d'altération en utilisant différents modèles de traitement géochimique. Les modèles ont permis d'isoler 405 analyses répondant aux critères pour 56 mines-gisements. (**Figure 8**).

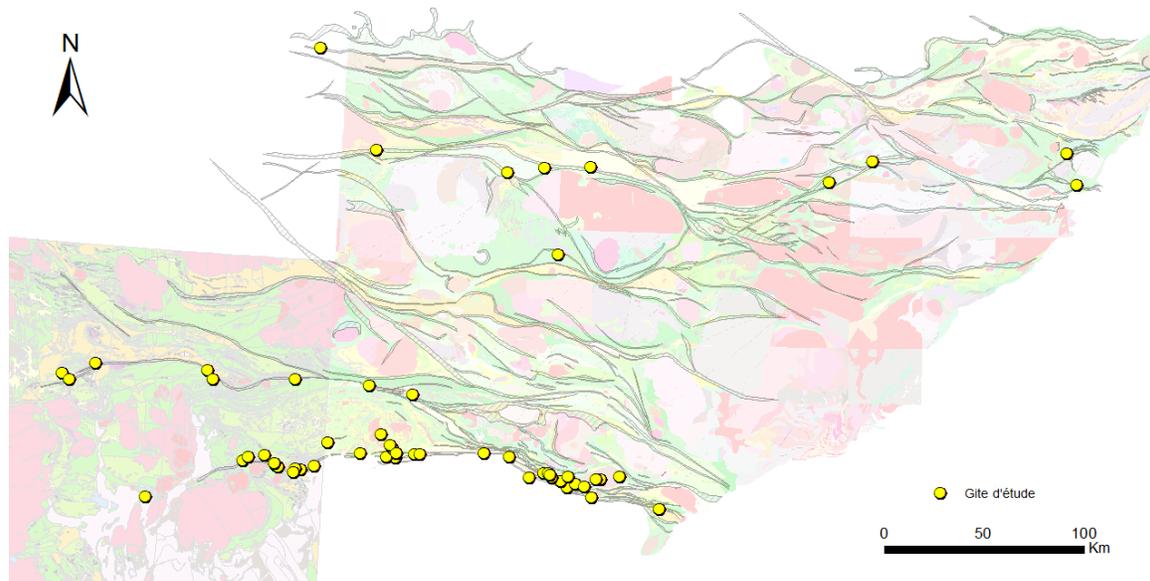


Figure 8. Gisements/mines d'or retenus pour le projet, 56 au total. Les couleurs indiquent les lithologies (SIGÉOM, Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation); les bandes grises indiquent les couloirs de déformation (zones de déformation Abitibi version 3, CONSOREM).

Après l'identification de 56 sites d'étude, un travail de compilation de la littérature a été fait à partir de littérature scientifique et de travaux gouvernementaux. Cette compilation a permis de documenter les altérations proximales associées à la minéralisation, ainsi que le style de minéralisation, l'environnement géologique, et la teneur-tonnage du gisement/mine.

Plusieurs impératifs ont dû être pris en compte dans ce projet. Tout d'abord, obtenir des informations lithogéochimiques de qualité et en bonne quantité représente un défi important. Idéalement l'étude doit se faire avec :

- 1) Des analyses de qualité comprenant les éléments majeurs, des éléments traces, et l'or;
- 2) Une bonne répartition spatiale de ces analyses;
- 3) Une bonne représentativité des échantillons.

Forcément, ces critères ne pourront pas être toujours respectés et les données auront certaines limitations. L'exemple du gisement de Kerr-Addison est utilisé ici pour illustrer ce propos. Pour ce gisement, seul l'*albitite ore* est représenté par notre échantillonnage; le *flow ore* et le *carbonate ore* ne sont pas ou trop peu présents. Ainsi, seul ce type de minerai sera utilisé pour représenter l'ensemble du gisement, ce qui implique forcément un certain biais.

À la suite de la compilation d'information sur les gisements et d'intégration des données lithogéochimiques, les étapes de calculs métasomatiques et des indices de carbonatation ont été effectuées. La modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux a été préférée pour la majorité des échantillons; cependant, dans le cas de roches ayant des affinités alcalines il a fallu déterminer la composition de roches fraîches pour le calcul des bilans de masse par précurseur unique (seize gisements). Les résultats de gains et pertes sont rapportés en poids absolus, c'est-à-dire en gramme par 100 grammes de précurseur.

5 TRAITEMENTS ET ANALYSES

5.1 Regard sur la compilation de la littérature

Des informations sur les 56 mines-gisements d'or provenant de la compilation de la littérature permettent de proposer une représentation des altérations proximales dans un diagramme de teneur versus tonnage (**Figure 9**). Les gisements se distribuent en champs relativement distincts selon la nature de leur altération dominante. Les gisements altérés en séricite ont de plus fortes teneurs (> 5 g/t Au) par rapport aux gisements altérés en albite (< 5 g/t Au). Les altérations potassiques et sodiques sont bien dissociées en termes de teneur. Pour les altérations à carbonates, les gisements dessinent un champ intermédiaire entre les champs des altérations potassiques et sodiques en termes de teneur (entre 4 et 8 g/t Au).

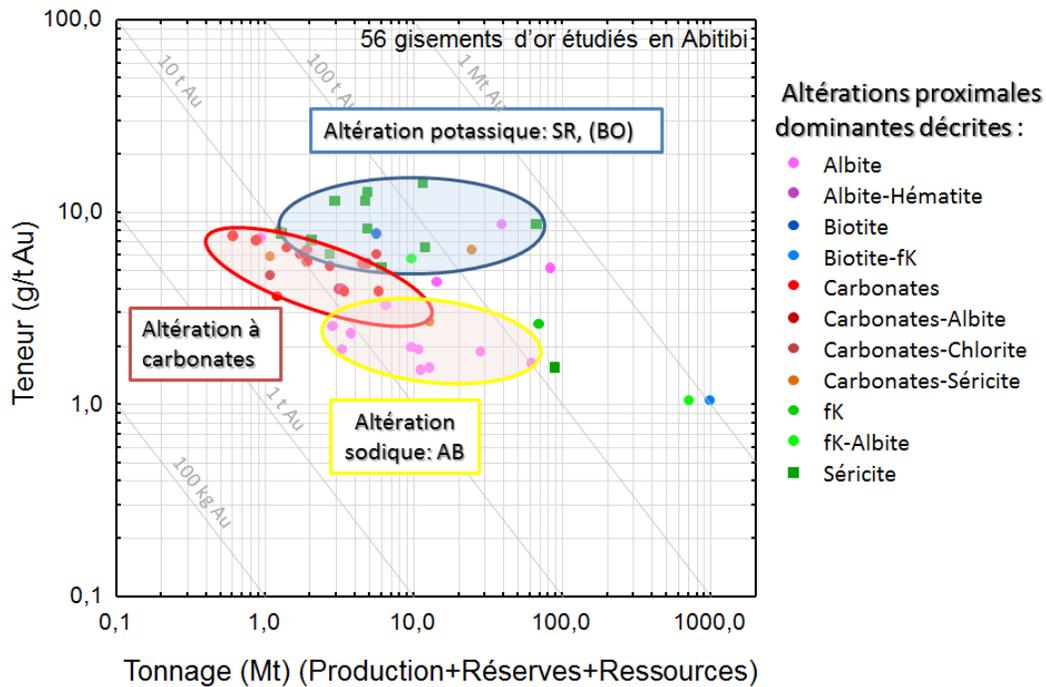


Figure 9. Diagramme teneur-tonnage selon le type d'altération proximale associée à la minéralisation aurifère pour 56 gisements d'or en Abitibi. Deux zones distinctes ressortent : l'altération à séricite à plus forte teneur et l'altération à albite à plus faible teneur.

5.2 Test de confiance des résultats

Avec un défi de représentativité des données, il apparaît nécessaire de tester les résultats des calculs de bilan de masse afin de vérifier s'ils corroborent les altérations décrites dans la littérature. Pour que la vérification ait un sens, il faut considérer qu'un gain métasomatique se traduit par la cristallisation d'un minéral d'altération. Le **Tableau 4** indique que dans 100% des gisements pour lesquels l'albite-tourmaline est l'altération principale associée à la minéralisation aurifère, des gains métasomatiques en Na_2O ont été obtenus. De la même façon, dans 89% des gisements ayant une altération proximale associée à la minéralisation décrite comme étant à séricite, feldspath potassique, ou biotite, les calculs de bilans de masse indiquent des gains en K_2O . Ces hauts pourcentages indiquent que les résultats sont conformes aux minéraux d'altération reconnus et donnent une bonne confiance aux résultats de l'étude.

Tableau 4. Pourcentage de gisements dans lesquels l'altération proximale dominante sodique ou potassique (associée à la minéralisation aurifère) est associée à des gains métasomatiques en Na₂O ou K₂O.

	Albite-tourmaline (N=21)	Séricite-fK-biotite (N=18)
Gain Na ₂ O	100%	x
Gain K ₂ O	x	89%

5.3 Analyses par composantes principales

L'Analyse par Composantes Principales (A.C.P.) est une méthode descriptive permettant de traiter simultanément un grand nombre de variables. Le problème est le suivant : lorsqu'on étudie un grand nombre de variable quantitative, comment peut-on faire un graphique global qui soit le plus représentatif possible de la réalité? La difficulté vient du fait que les individus ne sont pas représentés dans un plan mais dans un espace à n dimensions. L'A.C.P. permet de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité (Baccini, 2010). Concrètement, l'A.C.P. permet de visualiser dans un graphique la position des échantillons les uns par rapport aux autres, et d'établir des corrélations entre ces échantillons. La **Figure 10** illustre simplement le principe de l'A.C.P.

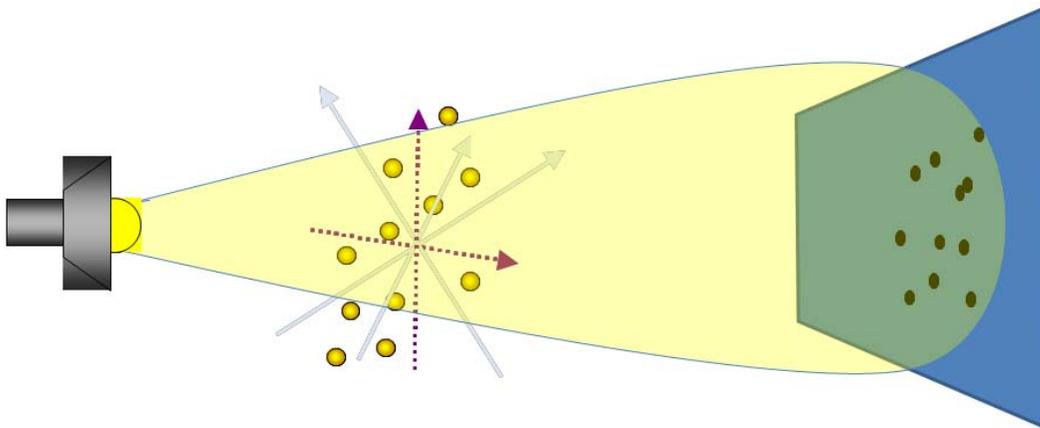


Figure 10. Illustration schématique du principe de l'A.C.P. Il s'agit de projeter sur un plan à deux dimensions les différentes composantes (d'après <https://studies2.hec.fr/jahia/Jahia/tenenhaus/pid/1300>).

La **Figure 11** présente le résultat de l'A.C.P. pour les bilans de masse du Na₂O, du K₂O, du CaO, du MgO, et du Fe₂O₃, et pour le CO₂, au regard des principales composantes 1 et 2. Ces résultats sont obtenus à partir des échantillons ayant des valeurs en or supérieures à 1 g/t Au. Pour éviter le biais de représentativité dû à une quantité supérieure de données pour un gisement par rapport aux autres, ce qui influencerait la distribution des individus, une quantité homogène de données par gisement a été considérée. L'A.C.P. présente une distribution hétérogène des individus selon trois pôles distincts : le pôle CO₂-CaO-MgO-Fe₂O₃, le pôle K₂O, et le pôle Na₂O. Le pôle CO₂-CaO-MgO-Fe₂O₃ pourrait illustrer la carbonatation ou la chloritisation. Kishida et Kerrich (1987) indiquent cependant que la carbonatation est le résultat d'un apport de CO₂, mais pas nécessairement de gain en Ca, Fe, ou Mg. Le pôle K₂O pourrait illustrer l'altération potassique (e.g., séricite, feldspath potassique), et le pôle Na₂O pourrait témoigner de la cristallisation de minéraux d'altération sodique (e.g., albite). La composante 1, qui explique 40,8% de la variance de la population, est dominée par la carbonatation et la chloritisation. Sur cette composante K₂O et Na₂O ont une valeur près proche de zéro, alors que CO₂ tend à s'éloigner de zéro. Les altérations potassiques et sodiques sont compatibles avec l'altération à carbonate. La composante 2, avec 28,1% de la variance, met en opposition les pôles Na₂O et K₂O, ce qui suggère que ces deux altérations sont incompatibles.

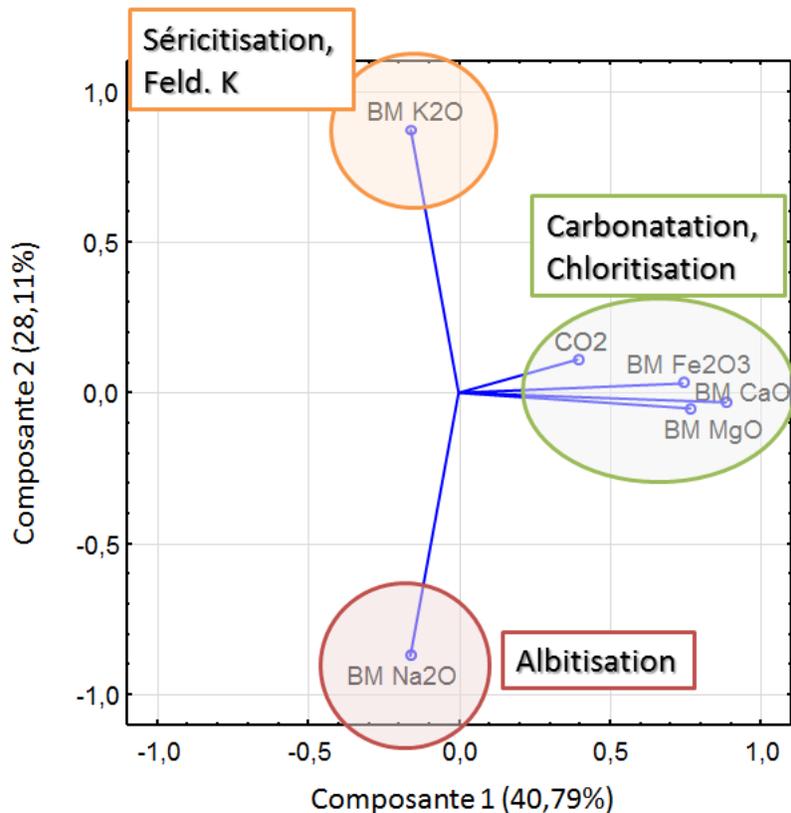


Figure 11. Analyse en composantes principales sur les bilans de masse en CaO, MgO, Fe₂O₃, K₂O, et Na₂O. Résultats présentés selon les composantes 1 et 2. Le nombre entre parenthèses est la variance.

5.4 Relation bilan de masse K₂O et Na₂O

L'opposition des bilans de masse K₂O et Na₂O illustrée par l'A.C.P. (**Figure 11**) nécessite de regarder plus en détails la distribution des échantillons minéralisés selon ces deux paramètres. La **Figure 12** représente cette distribution des échantillons altérés et minéralisés (> 1 g/t Au). Parmi toutes les données, deux gisements sont distingués, Kerr-Addison et Casa Berardi. Dans les deux cas, les échantillons minéralisés indiquent une distribution inverse des bilans de masse Na₂O et K₂O, ce qui est attendu compte tenu de l'opposition du Na₂O et K₂O selon la composante 2 (**Figure 11**). L'association gain K₂O – perte Na₂O, ou l'inverse, est représentative dans plus de 70% des cas pour les gisements d'or d'Abitibi. Dans 20% des cas ce sont deux gains; gain K₂O avec gain Na₂O. Cependant, il faut préciser qu'on ne trouve jamais deux forts gains ensemble, seulement un fort gain avec un faible gain. Finalement, deux pertes, perte K₂O et perte Na₂O ne représentent seulement que 10% de la distribution. Ces deux pertes illustrent l'absence d'altération potassique et sodique; elles sont peu répandues en contexte aurifère.

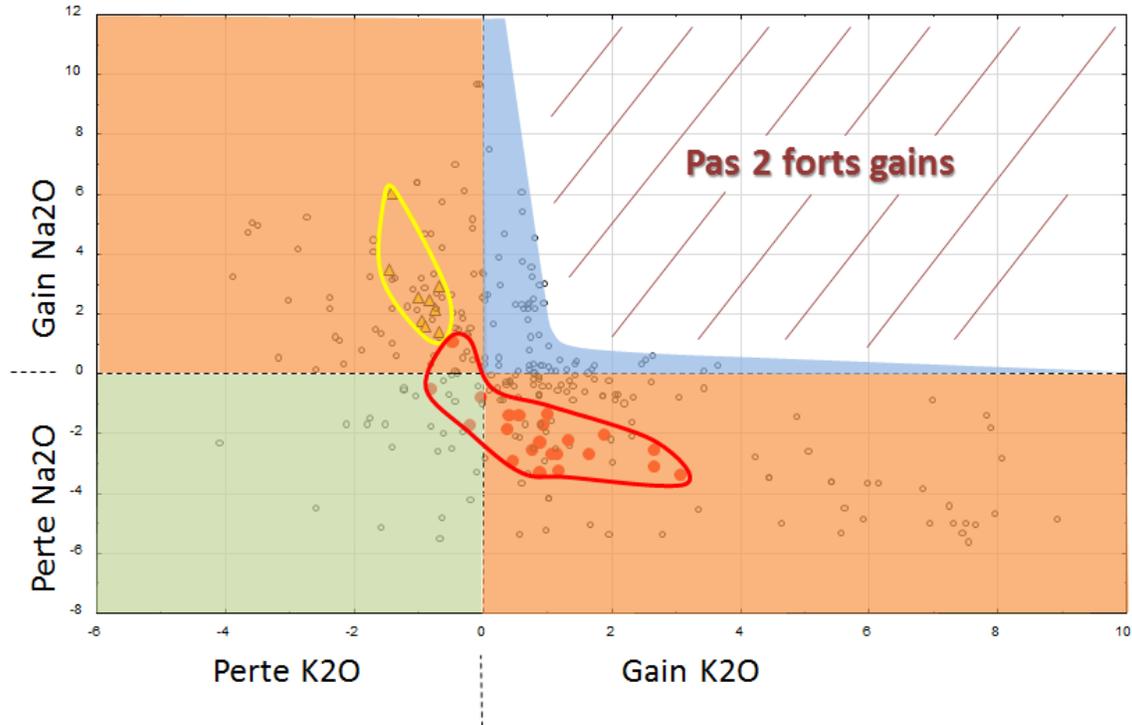


Figure 12. Diagramme binaire des bilans de masse en K_2O et Na_2O en valeur absolue (gr/100gr). L'enveloppe jaune illustre le champ des échantillons minéralisés de Kerr-Addison (*albitite ore*); l'enveloppe rouge illustre le champ des échantillons minéralisés de Casa Berardi. Les cercles sont d'autres gisements d'or.

5.5 Signature hydrothermale des gisements d'or

Les **Figures 11** et **12** illustrent l'opposition du métasomatisme K_2O et Na_2O . Les gains en K_2O et Na_2O témoignent respectivement d'une altération potassique et sodique. En rajoutant un troisième paramètre, la saturation en carbonate par exemple, il est possible de représenter les principales altérations en contexte aurifère non-volcanogène à partir de paramètres indépendants des lithologies. Les **Figures 13** et **14** sont des diagrammes binaires illustrant des bilans de masse en K_2O et en Na_2O en abscisse, et l'indice de saturation en carbonate ($CO_2/CaO+FeO+MgO$) en ordonnée. Ces diagrammes permettent de représenter la signature hydrothermale relativement complète pour les gisements puisqu'à la fois les gains et les pertes sont illustrés. L'intérêt de ces diagrammes est de pouvoir caractériser rapidement les trois différents types d'altération dans les zones minéralisés (échantillons > 1g/t Au dans le présent cas) par rapport aux échantillons peu ou pas minéralisés.

La **Figure 13A** et **B** présente les résultats pour les gisements de Kerr-Addison et de Beattie. À Kerr-Addison (**Figure 13A**) les échantillons minéralisés > 0,5 g/t Au (minerai *albitite ore*, Smith et al., 1993) se distinguent clairement des autres échantillons. La signature hydrothermale du gisement de Kerr-Addison témoigne d'une perte en potassium, d'un gain significatif en sodium (de 1 à 6 gr/100gr de précurseur), et d'une intense carbonatation (supérieure à 0,7). Cette très forte carbonatation est le paramètre discriminant pour les échantillons minéralisés. La signature propre à ces échantillons suggère que plusieurs phases hydrothermales peuvent être impliquées. Ce polyphasage hydrothermal est reconnu par Kishida et Kerrich (1987).

À Beattie, les échantillons minéralisés sont aussi associés à un champ distinct sur les diagrammes (**Figure 13B**). Il est possible de représenter 70% des échantillons minéralisés dans une zone de forts

gains potassiques (entre 4 et 9 gr/100gr de précurseur). Bigot et Jébrak (2015) reconnaissent que la séricite est largement répandue dans des parties minéralisées du gisement. Une zone représentant 85% de la distribution des échantillons minéralisés est aussi identifiée pour de fortes pertes en sodium (de -3,5 à -6 gr/100gr). La carbonatation est significative mais n'est pas le paramètre le plus discriminant des échantillons minéralisés de Beattie. La signature distincte des altérations illustre, comme à Kerr-Addison, que les fluides minéralisateurs étaient chimiquement différents des fluides ayant seulement altéré les roches. En effet, Bigot et Jébrak (2015) proposent une première phase minéralisatrice associée à une source externe probablement sédimentaire (Groupe de Porcupine), puis un second événement hydrothermal minéralisateur ayant une composante magmatique.

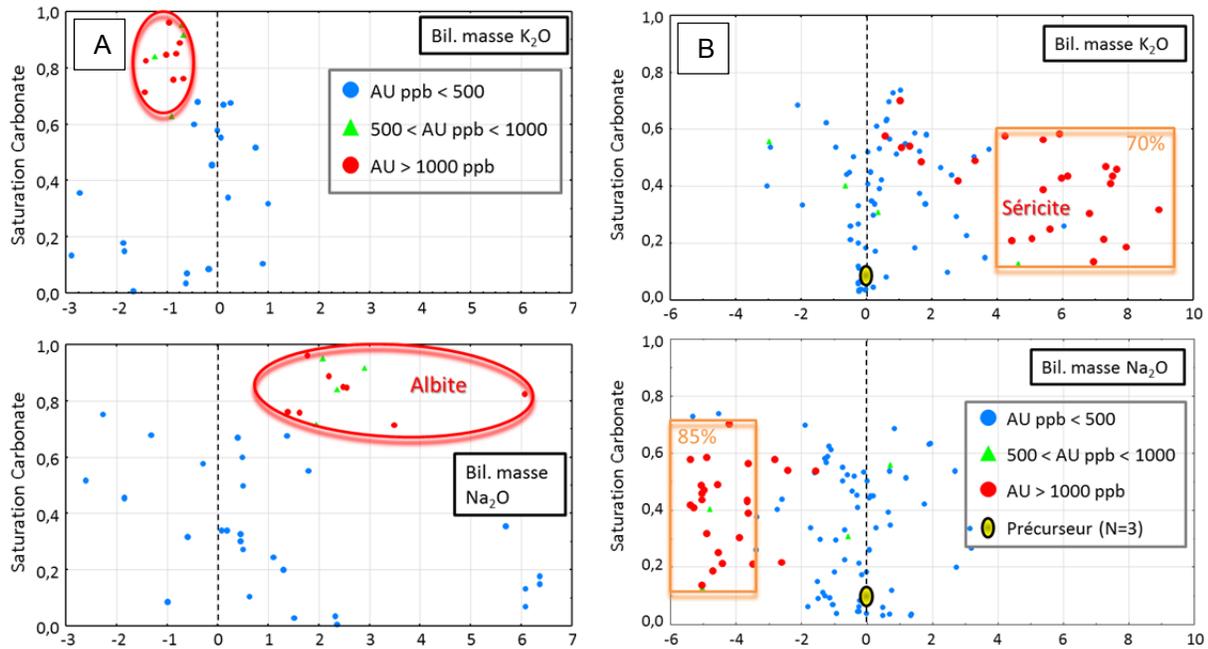


Figure 13. Diagrammes montrant les trois paramètres du métasomatisme : la saturation en carbonate ($\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}$) en ordonnée, les bilans de masse K_2O et Na_2O rapportés en valeur absolue (gr/100gr) en abscisse. A) Kerr-Addison (précurseur modélisé). B) Beattie (précurseur unique).

La signature hydrothermale complète (gain et perte) a été interprétée avec les diagrammes pour les cinquante-six gisements d'or du projet. Ces résultats sont rapportés dans l'annexe 1. La **Figure 14** présente les signatures complètes pour certains gisements d'or en Abitibi.

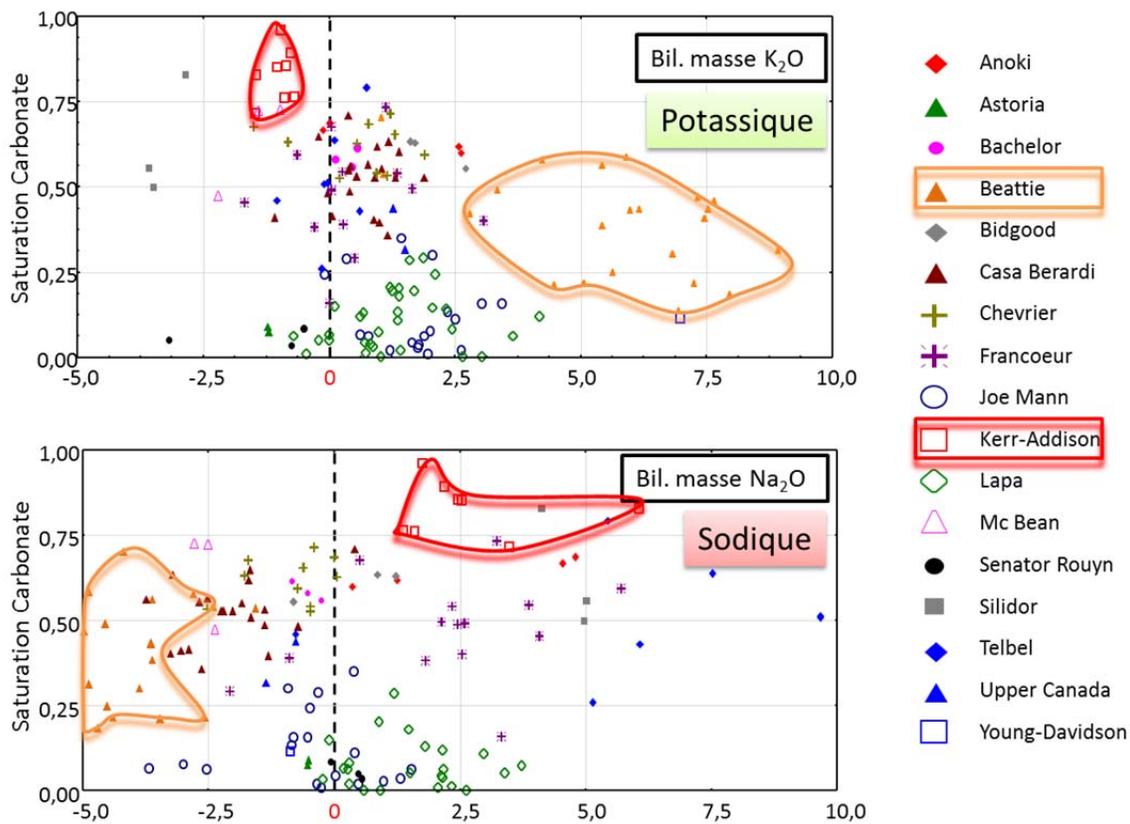


Figure 14. Exemple de certains gisements d'or en Abitibi dont les échantillons minéralisés (> 1g/t Au) ont une signature hydrothermale distincte des échantillons non-minéralisés. Des enveloppes rouges et oranges illustrent les champs des gisements de Kerr-Addison et Beattie respectivement.

5.6 Champs hydrothermaux en Abitibi

En connaissant les signatures hydrothermales des gisements il est possible de définir des champs hydrothermaux en Abitibi (**Figure 15A, B, C**). Les champs sont définis à partir des paramètres qui illustrent les altérations majeures en contexte aurifère, c'est-à-dire les bilans de masse en potassium et en sodium, et l'indice de saturation en carbonate. Afin de définir des champs « crédibles », nous considérons au minimum trois gisements pour former un champ hydrothermal.

La carbonatation (Figure 15A): L'intensité de la carbonatation est déterminée d'après l'indice de saturation en carbonate ($CO_2/CaO+FeO+MgO$), et le type de carbonate d'après l'indice de discrimination des carbonates (CO_2/CaO). Dans le nord de l'Abitibi, aucun champ de carbonatation n'apparaît clairement, en revanche sept zones sont définies le long des Failles Porcupine-Destor et Cadillac-Larder Lake. La zone de Timmins et le segment Holt McDermott - Yvan Vézina ont les mêmes signatures en carbonate, à savoir une carbonatation dominée par l'ankérite-dolomite avec une intensité forte à modérée. Le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake, la zone de Cadillac Ouest a une signature en carbonate identique à la zone de Timmins, à savoir une forte carbonatation en ankérite-dolomite. La zone de Larder Lake, excluant Kerr-Addison est identifiée comme étant à calcite d'intensité surtout faible comme le segment de Rouyn Est – Lapa. La large zone allant de Canadian Malartic à Marban consiste en une carbonatation modérée en calcite. Finalement l'est de Val-d'Or est reconnu comme étant un champ d'une faible intensité surtout en calcite.

Le métasomatisme sodique (Figure 15B) : Cinq zones de gains en Na_2O sont définies à partir de l'intensité du métasomatisme. Dans le nord de l'Abitibi, le segment Telbel - Veza consiste en de forts gains en sodium. Le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake, la zone de Kirkland Lake est marquée par des gains faibles à modérés en sodium, alors que le segment Cheminis - Augmitto témoigne d'un intense métasomatisme sodique. Immédiatement à l'est, des pertes sont identifiées dans la zone Rouyn Est. Finalement, quasiment toute la partie est de la Faille de Cadillac-Larder Lake consiste en des gains plus ou moins importants en sodium.

Le métasomatisme potassique (Figure 15C) : À l'instar du métasomatisme sodique, la zone Telbel-Vezza dans le nord de l'Abitibi se distingue par des pertes potassiques. Le long de la Faille Porcupine-Destor, les zones de Timmins et Holt McDermott - Yvan Vézina sont marquées par des gains modérés à forts en potassium. Le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake, l'hydrothermalisme dans la région de Kirkland Lake consiste en des gains modérés à forts en K_2O , alors que des pertes sont reconnues dans la zone de Larder Lake. La zone de Rouyn a subi de fortes pertes en potassium, alors que des gains sont identifiés dans la zone Lapa-Malartic-Camflo. Finalement, la zone Marban est reconnue pour ses pertes en potassium.

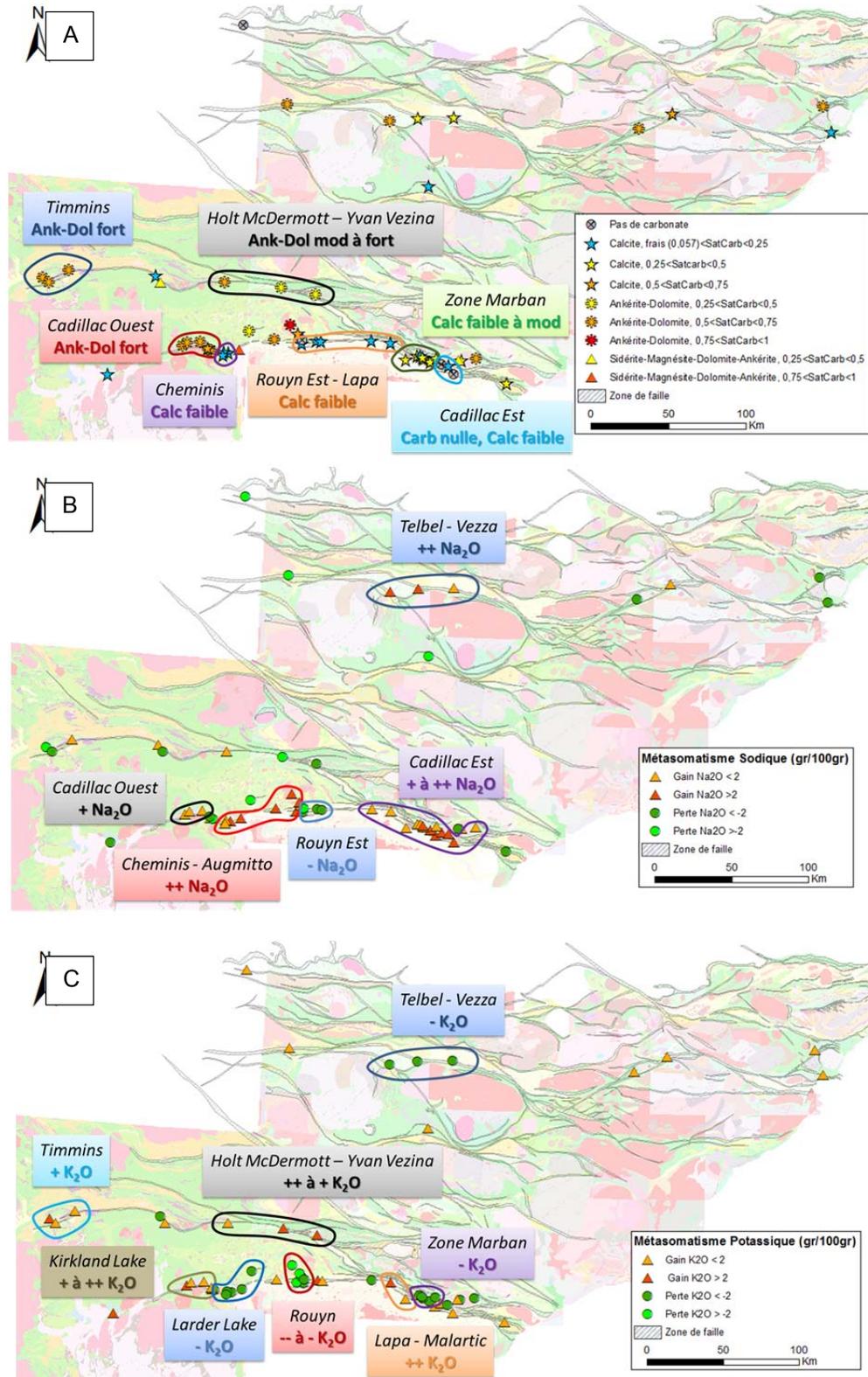


Figure 15. Portrait hydrothermal de l'Abitibi pour des gisements d'or non-volcanogènes. A) Intensité de la carbonatation d'après l'indice de saturation en carbonate ($\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}$), et type de carbonates d'après l'indice de discrimination des carbonates (CO_2/CaO). B) Métasomatisme sodique absolu (gr/100gr de précurseur). C) Métasomatisme potassique absolu (gr/100gr de précurseur).

A partir des 56 gisements aurifères étudiés, un portrait de l'hydrothermalisme est proposé en unifiant les signatures de carbonatation, de métasomatisme sodique, et de métasomatisme potassique (**Figure 16**). Le champ Telbel-Vecza est reconnu dans le nord de l'Abitibi (**Figure 16A**) comme représentant une zone de carbonatation modérée en calcite-dolomite, des pertes en potassium, et de forts gains en sodium. Le long de la Faille Porcupine-Destor (**Figure 16B**), à l'ouest le champ de Timmins témoigne d'une forte carbonatation en ankérite accompagnée de gains en potassium, alors qu'à l'est le champ de Duparquet illustre une carbonatation modérée en ankérite-dolomite avec de forts gains en potassium et des pertes en sodium. La Faille de Cadillac-Larder Lake présente une grande complexité hydrothermale par la superposition de nombreux champs (**Figure 16B**). À l'ouest, le champ de Cadillac Ouest témoigne d'une carbonatation modérée à forte en ankérite-dolomite, au sein de laquelle se trouve un champ réduit de forts gains en potassium. Un peu à l'est le champ de Cheminis constitue une zone de faible carbonatation en calcite qui se trouve à l'intérieur d'une plus large zone de pertes en potassium (champ Mc Bean-Kerr Addison). Une zone s'étendant de Cheminis jusqu'à Rouyn témoigne de forts gains en sodium, alors que tout le champ de Rouyn représente des pertes significatives en potassium. La partie est de Rouyn comprend des pertes en sodium. Un champ allant de Rouyn Est jusqu'à Lapa a subi une carbonatation de faible intensité en calcite. Les gisements de Lapa, Canadian Malartic, et Camflo définissent un champ de forts gains potassiques à l'intérieur d'un plus large champ de gains sodiques s'étendant du gisement de Bouscadillac jusqu'à Orenada. La zone Marbanite a subi un lessivage en potassium avec une carbonatation modérée en calcite. Cette carbonatation modérée inclut les gisements de Canadian Malartic et Camflo. Finalement, dans la partie est de la Faille de Cadillac-Larder Lake une carbonatation de faible intensité est reconnue.

En représentant tous les paramètres, gains et pertes, le portrait de l'hydrothermalisme associé à la minéralisation aurifère apparaît d'une grande complexité (**Figure 16B**).

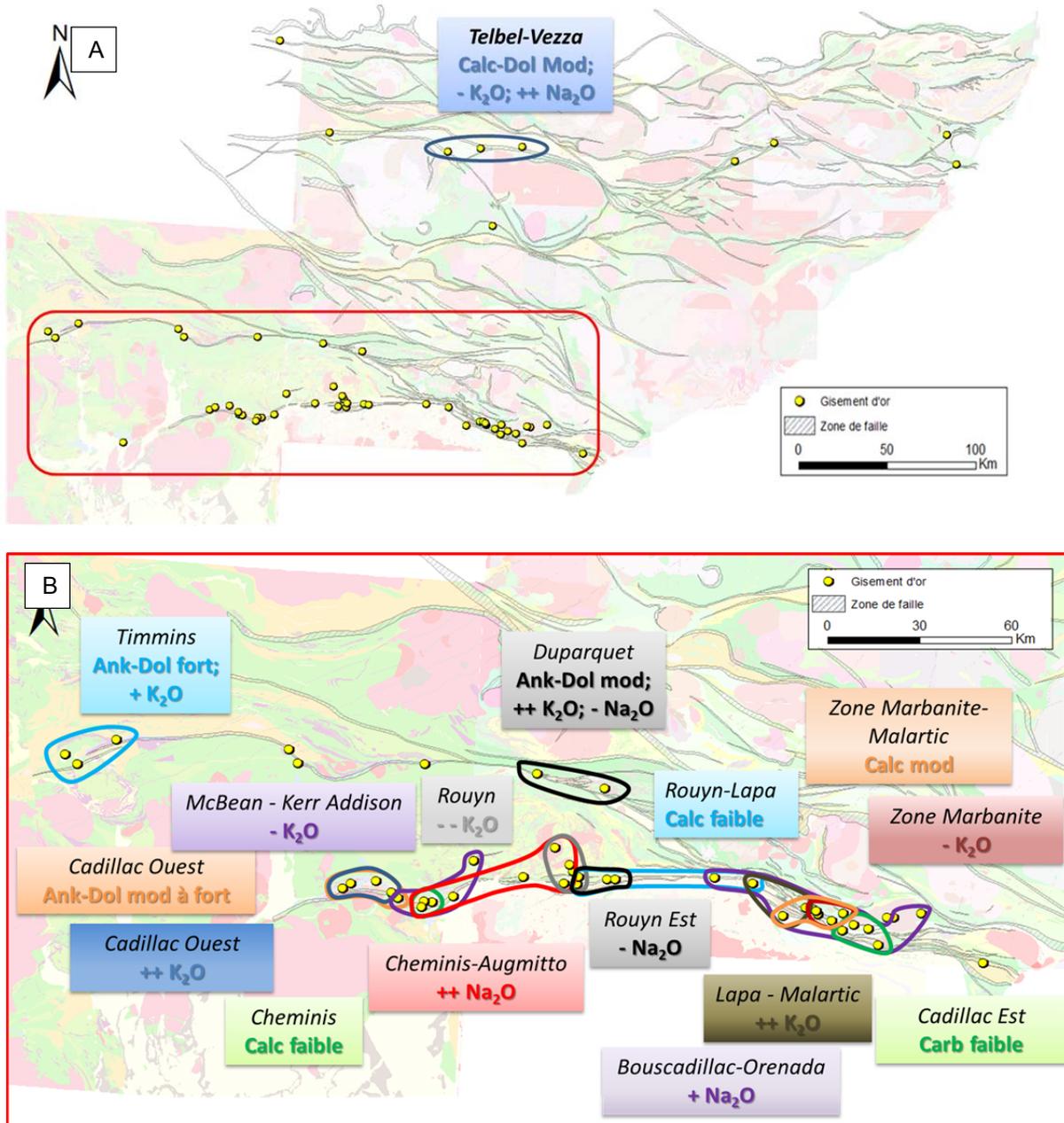


Figure 16. Portrait de l'hydrothermalisme associé à la minéralisation aurifère à partir des paramètres de carbonatation, et de métasomatisme sodique et potassique. A) Synthèse à l'échelle de l'Abitibi, la zone Telbel-Vezza dans le nord de l'Abitibi est définie. B) Vue rapprochée du rectangle rouge de la figure A. Zone des Failles Porcupine-Destor et Cadillac-Larder Lake.

6 NOUVEAUX DIAGRAMMES DISCRIMINANTS ET APPLICATIONS

Avec les contraintes sur les lithologies, le développement de nouvelles méthodes passe nécessairement par l'utilisation de bilans de masse et de l'indice de saturation en carbonate.

Les diagrammes (**Figures 13, 14**) présentés dans la partie 5.5 pourraient être suffisants pour caractériser l'altération en contexte aurifère puisqu'ils utilisent les trois paramètres requis (bilan de masse en K_2O et Na_2O , et indice de saturation en carbonate). Cependant, ils sont contraignants car ils impliquent d'utiliser deux diagrammes; bilan de masse du potassium versus indice de saturation, et bilan de masse du sodium versus indice de saturation. La volonté d'unifier les trois paramètres en un seul diagramme implique donc de développer un nouvel outil qui illustre les paramètres hydrothermaux dominants associés à la cristallisation de minéraux d'altération, c'est-à-dire les gains métasomatiques. Cela permet ainsi d'associer l'intensité du métasomatisme (la chimie) aux minéraux d'altération (la minéralogie). Par ailleurs, le portrait hydrothermal très complexe de la Faille de Cadillac-Larder Lake (**Figure 16B**) pourrait être simplifié en illustrant seulement les paramètres hydrothermaux dominants.

Cela a abouti à la réalisation de deux nouveaux diagrammes. Le premier, nommé *Altération SatCarbKNa*, représente sous forme binaire la saturation des carbonates, et les bilans de masse en potassium et en sodium. Le second diagramme, nommé *Altération DiscrCarbKNa*, représente la discrimination des carbonates en fonction des bilans de masse en potassium et en sodium.

6.1 Méthode pour la réalisation des diagrammes

Les gains métasomatiques se matérialisent par la cristallisation de minéraux d'altération, alors que les pertes ne traduisent pas la création de minéraux. Ainsi, le choix est fait de se concentrer sur les gains pour caractériser l'altération. Un problème se pose pour les faibles valeurs de gain, à savoir à partir de quel seuil considère-t-on significatif un gain pour la cristallisation d'un minéral d'altération? Pour cela on utilise une approche statistique dans laquelle les gains de bilans de masse de potassium et de sodium sont rapportés selon leur fréquence cumulée (**Figure 17 A, B**). La distribution des données indique une rupture de pente, un point d'inflexion pour une valeur de 0,25gr/100gr. Cette valeur seuil apparaît significative en termes de cristallisation de minéraux d'altération pour les gains en potassium et en sodium. Les gains inférieurs à cette valeur seuil ne sont pas considérés comme significatifs.

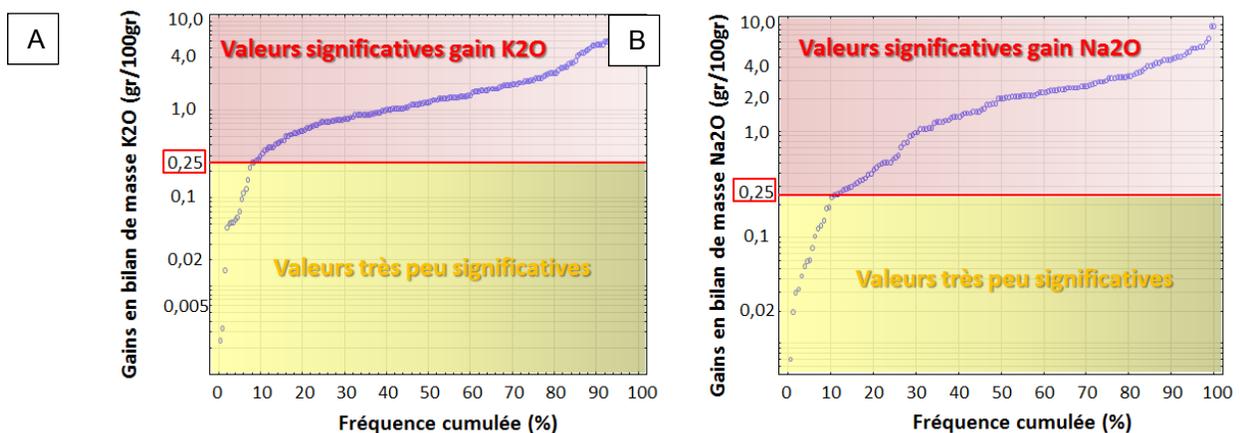


Figure 17. Distribution des gains métasomatiques (gr/100gr) selon leur fréquence cumulée. A) Gain en potassium. B) Gain en sodium. Dans les deux diagrammes, il y a une rupture de pente pour des valeurs de 0,25gr/100gr, un seuil fixé statistiquement comme étant significatif en termes d'altération.

6.2 Diagramme *Altération SatCarbKNa*

Ce diagramme représente l'indice de saturation en carbonate ($\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}$) en ordonnée (valeur de 0 à 1), et un rapport des bilans de masse K_2O /bilans de masse Na_2O en abscisse.

Pour tous les bilans de masse négatifs et pour tous les gains de bilan de masse inférieurs à 0,25gr/100gr de précurseur, une valeur standard de 0,25 est attribuée. Ainsi, quatre situations sont possibles (**Figure 18**) :

- 1) Un gain en potassium supérieur à 0,25gr/100gr et une perte en sodium ou un gain en sodium inférieur à 0,25gr/100gr, le rapport est supérieur à 1.
- 2) Un gain en sodium supérieur à 0,25gr/100gr avec une perte en potassium ou un gain inférieur à 0,25 gr/100gr, le rapport est inférieur à 1.
- 3) Deux pertes en potassium et sodium, ou bien deux gains en potassium et sodium inférieurs à 0,25gr/100gr, ou bien une perte et un gain inférieurs à 0,25gr/100gr. Dans ce cas le rapport est de $0,25/0,25=1$; les échantillons se distribuent uniquement selon l'axe des ordonnées pour une valeur d'abscisse de 1.
- 4) Deux gains supérieurs à 0,25gr/100gr. Dans ce cas-ci la plus forte valeur domine, le rapport est soit supérieur ou inférieur à 1, mais pas égal à 1. Rappelons que deux forts gains n'existent pas ensemble, c'est surtout un fort gain avec un faible gain.

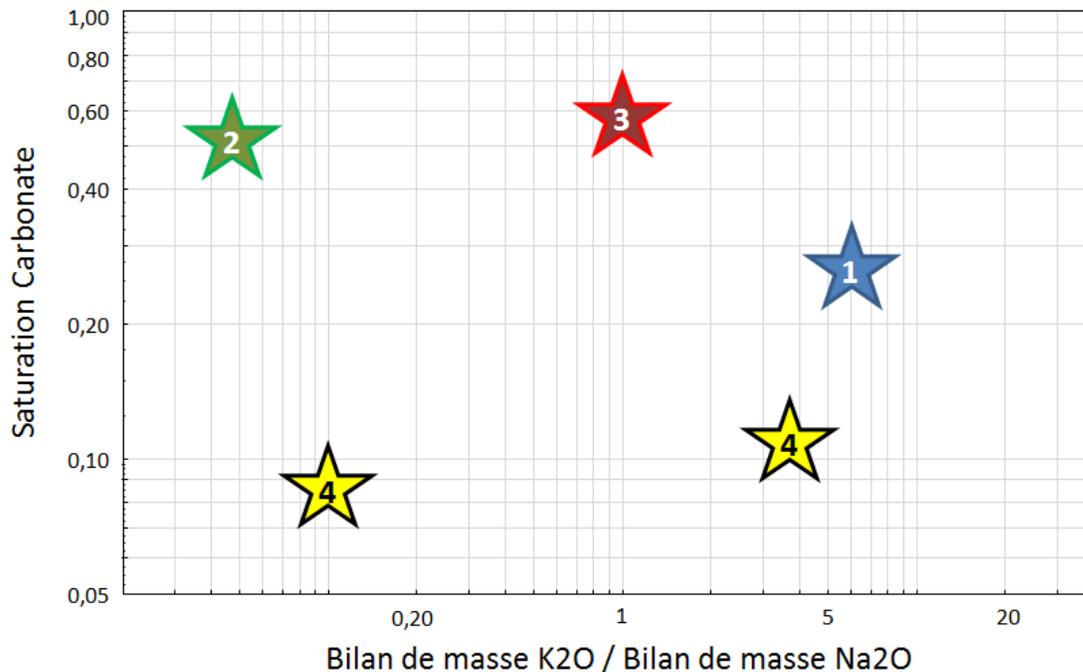


Figure 18. Diagramme *Altération SatCarbKNa* avec les quatre scénarios possibles. 1) Un gain en potassium supérieur à 0,25 gr/100gr avec une perte en sodium ou un gain en sodium inférieur à 0,25gr/100gr. 2) Un gain en sodium supérieur à 0,25gr/100gr avec une perte en potassium ou un gain inférieur à 0,25gr/100gr. 3) Deux pertes en potassium et sodium, ou bien deux gains en potassium et sodium inférieurs à 0,25gr/100gr, ou bien une perte et un gain inférieurs à 0,25gr/100gr. 4) Deux gains supérieurs à 0,25gr/100gr. Dans ce cas-ci la plus forte valeur domine, le rapport sera soit supérieur ou inférieur à 1, mais pas égal à 1.

En plaçant des échantillons provenant de gisements d'or pour lesquels l'altération dominante est bien connue, il est possible de reconnaître des zones dans le diagramme selon le type d'altération dominante, qu'il soit potassique, sodique, ou à carbonate. La **Figure 19** indique que pour des valeurs supérieures à 1, l'altération potassique à séricite, feldspath potassique et biotite est présente; pour des valeurs inférieures à 1 c'est l'altération sodique qui est présente. La carbonatation se reconnaît pour des valeurs inférieures et supérieures à 1 en abscisse, et devient plus intense vers les hautes valeurs en ordonnée. Elle est reconnue seule lorsque le bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O est égal à 1.

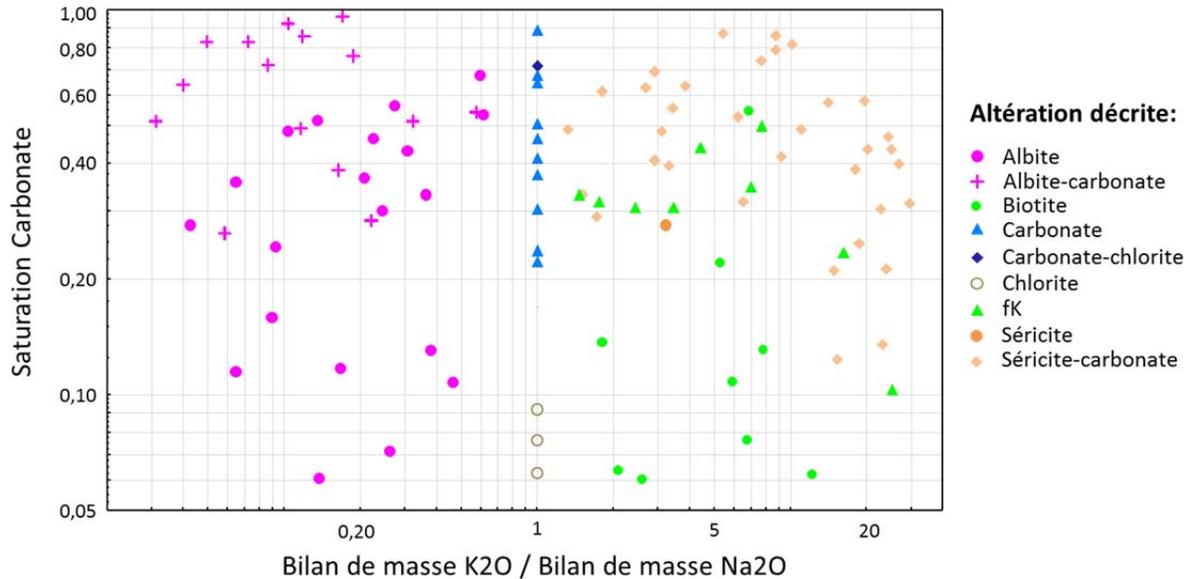


Figure 19. Diagramme *Altération SatCarbKNa* avec les altérations reconnues provenant d'échantillons minéralisés dans des gisements d'or de l'Abitibi. Trois zones sont identifiées : 1) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O inférieur à 1, altération sodique dominante; 2) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O supérieur à 1, altération potassique dominante; 3) bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O égal à 1, altération à carbonate seulement.

Dans le diagramme *Altération SatCarbKNa*, l'axe des ordonnées indique en toute circonstance l'intensité de la carbonatation. Dans la majorité des cas, l'axe des abscisses indique l'intensité des altérations soit potassiques ou sodiques. En effet dans plus de 70% des 56 gisements étudiés il y a qu'un seul des deux gains qui est documenté. Lorsque le rapport bilan de masse K_2O /bilan de masse Na_2O représente deux gains (20% des cas), le diagramme illustre seulement la dominance d'une des deux altérations et non l'intensité. La **Figure 20** synthétise le diagramme *Altération SatCarbKNa*. L'annexe 2 présente la méthode pour utiliser ce diagramme qui est disponible avec la nouvelle version de LITHOMODELEUR 3.6.0.

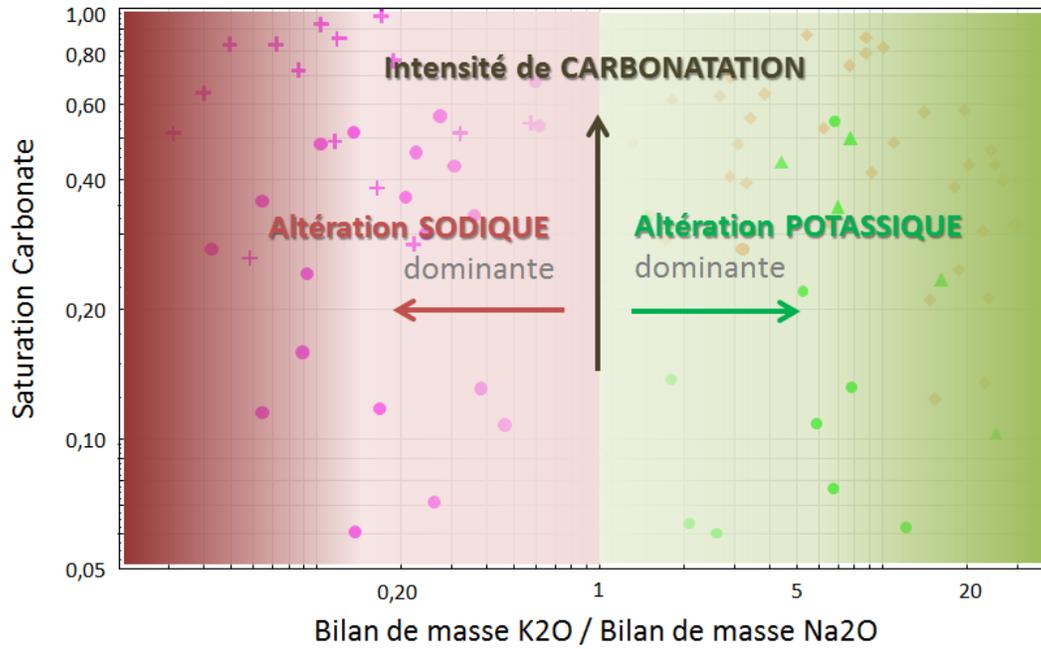


Figure 20. Concept du diagramme *Altération SatCarbKNa* avec les champs d'altération.

6.3 Diagramme *Altération DiscrCarbKNa*

Le principe est identique au diagramme précédent pour ce qui est de l'axe des abscisses. La différence porte sur l'axe des ordonnées qui représente toujours la carbonatation, mais c'est le type de carbonate qui y est représenté d'après le ratio CO_2/CaO . Cinq zones sont reconnues selon les valeurs sur l'axe des ordonnées d'après l'approche des minéraux normatifs dans LITHOMODELEUR (**Figure 21**) : de 0 à 0,25 aucun carbonate n'existe parce qu'il n'y a pas suffisamment de CO_2 pour en permettre la cristallisation; de 0,25 à 1,25 c'est le champ de cristallisation de la calcite; de 1,25 à 1,75 la calcite cristallise avec l'ankérite et la dolomite; de 1,75 à 2,25 la calcite disparaît, seules l'ankérite et la dolomite cristallisent; finalement au-delà de 2,25 c'est le champ de cristallisation des carbonates magnésiens, la sidérite-magnésite-ankérite-dolomite.

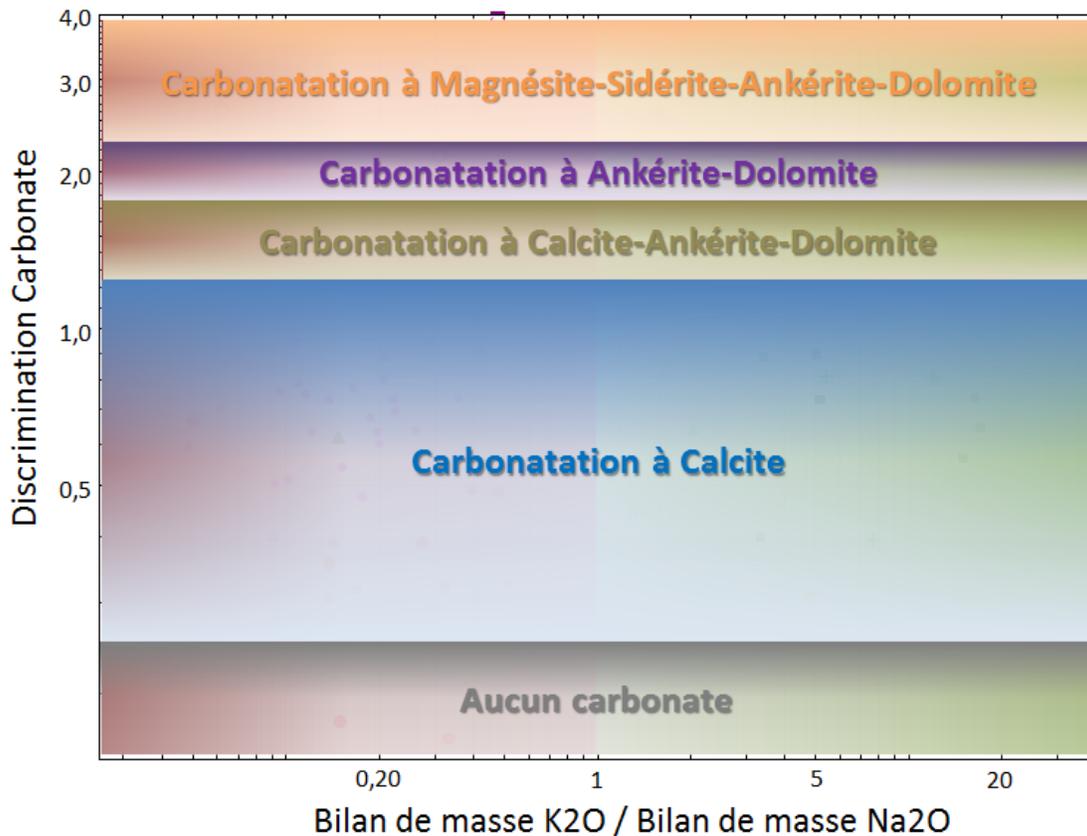


Figure 21. Cinq zones avec quatre paliers de carbonatation. De 0 à 0,25 aucun carbonate; de 0,25 à 1,25 calcite; de 1,25 à 1,75 calcite-ankérite-dolomite; de 1,75 à 2,25 ankérite-dolomite; supérieur à 2,25 magnésite-sidérite-ankérite-dolomite.

Le diagramme est moins robuste que le précédent car la discrimination des carbonates peut être influencée en partie par les lithologies, notamment pour les roches riches en Fe-Mg généralement ultramafiques. Néanmoins il permet de déterminer les types de carbonate en plus de déterminer l'altération potassique ou sodique. Il est complémentaire au diagramme *Altération SatCarbKNa* par son approche plus minéralogique. L'annexe 2 présente la méthode pour utiliser ce diagramme qui est disponible avec la nouvelle version de LITHOMODELEUR 3.6.0.

6.4 Typologie des gisements

À partir des deux diagrammes proposés, il est désormais possible d'y placer des échantillons de gisements et d'identifier la signature géochimique dominante. La **Figure 22** présente les résultats. Les meilleures signatures de gisements d'or sont représentées dans le diagramme. Pour les autres, bien que la signature soit identifiée, les échantillons sont plus dispersés sur le diagramme.

Ces huit gisements ont une signature hydrothermale propre à leurs échantillons minéralisés. Ces champs identifiés dans la **Figure 22** représentent l'empreinte hydrothermale des minéralisations dans les gisements. Ces champs d'altération ne représentent pas nécessairement l'intégralité des échantillons minéralisés. Par exemple, le champ du gisement de Beattie représente 78% des échantillons minéralisés, Douay 86%, et Silidor 100%.

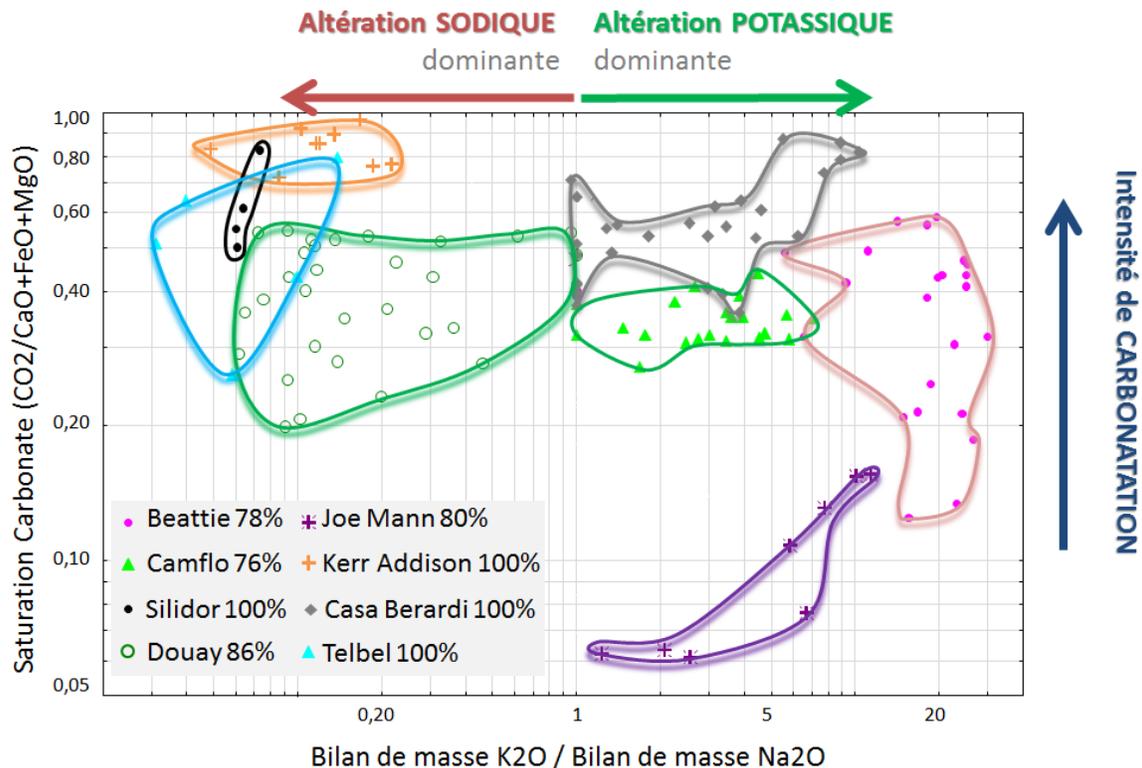


Figure 22. Diagramme *Altération SatCarbKNa* montrant les champs d'altération pour certains gisements d'or en Abitibi. Les pourcentages indiquent la valeur de représentativité du champ par rapport à l'ensemble des échantillons minéralisés du gisement.

6.5 Exemple d'application du diagramme *Altération SatCarbKNa* sur un segment de la Faille de Cadillac-Larder Lake

Dans le but de valider le diagramme *SatCarbKNa*, un test est effectué le long de la Faille Cadillac – Larder Lake, sur le segment Mc Bean – Kerr Addison en Ontario. Les bilans de masse et la saturation en carbonate sur des échantillons ignés, altérés, et non minéralisés (inférieur à 200 ppb Au) sont comparés sur la **Figure 23** aux échantillons minéralisés (supérieur à 1 g Au/t).

Parmi les échantillons utilisés la majorité montre une altération sodique d'intensité variable avec une carbonatation modérée. Aucun des échantillons non-minéralisés de ce segment n'a la signature hydrothermale des échantillons minéralisés des gisements de Kerr Addison et de Mc Bean.

Cette approche permet donc de vectoriser efficacement l'altération vers des zones minéralisées. Tout en respectant l'aspect sectoriel et le contexte géologique, il est possible de comparer la signature hydrothermale de ses échantillons avec celle de gisements d'or connus, et de reconnaître des zones d'altération favorables selon la signature hydrothermale.

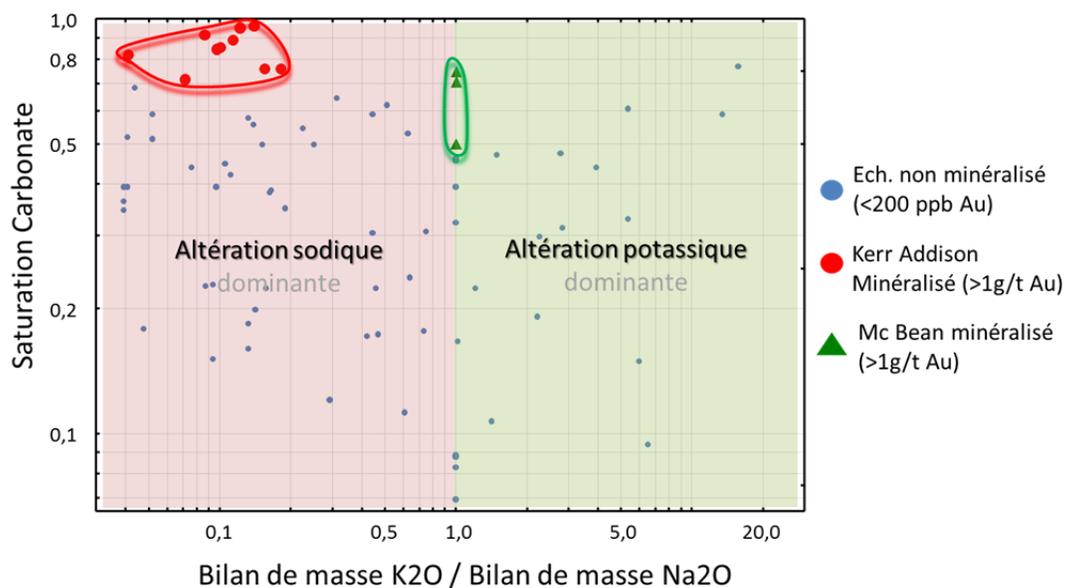


Figure 23. Test des signatures hydrothermales des échantillons le long du segment Mc Bean – Kerr Addison (en bleu), en comparaison avec l’empreinte minéralisée de deux gisements (Kerr-Addison en rouge; Mc Bean en vert).

7 NOUVEAU PORTRAIT HYDROTHERMAL EN ABITIBI

Le portrait hydrothermal proposé à la **Figure 16B** illustre la grande complexité des systèmes hydrothermaux associés à la minéralisation aurifère le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake. Une approche basée sur l'utilisation des deux diagrammes développés dans la présente étude permet de simplifier les champs en ne distinguant que les paramètres dominants associés à la cristallisation de minéraux d'altération (**Figure 25**). Le diagramme *Altération SatCarbKNa* est divisé en 6 zones (**Figure 24**) : altération sodique avec une forte carbonatation, altération sodique avec une carbonatation faible à modérée, forte carbonatation, carbonatation faible à modérée, altération potassique avec une forte carbonatation, et altération potassique avec une carbonatation faible à modérée. En positionnant tous les échantillons minéralisés des 56 mines-gisements étudiés dans ce diagramme, il est désormais possible d'attribuer une signature d'altération dominante à chaque gisement.

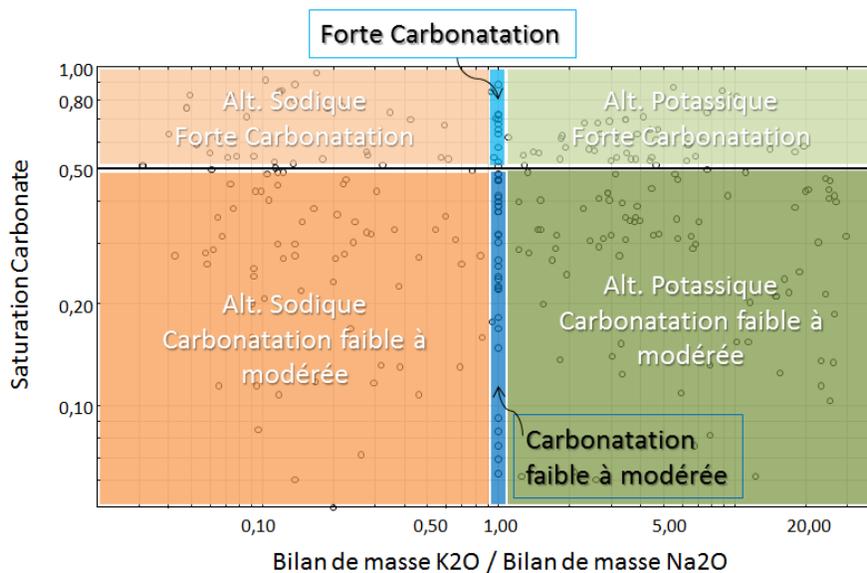


Figure 24. Approche pour caractériser les altérations dans des gisements aurifères en Abitibi. Les points représentent les échantillons minéralisés (supérieur à 1 g Au/t).

La **Figure 25** présente la projection spatiale de la nouvelle caractérisation hydrothermale des gisements d'or selon ce diagramme. De nouveaux champs hydrothermaux sont identifiés à partir des paramètres d'altération dominants.

Au total, neuf champs hydrothermaux sont définis en Abitibi selon cette approche. Le long de la Faille de Porcupine-Destor, les champs sont relativement similaires. Le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake, la partie ouest est caractérisée par une altération potassique avec une carbonatation forte en ankérite-dolomite. Un peu à l'est, le secteur de Cheminis représente une zone d'altération sodique avec une faible carbonatation en calcite. Une zone étendue depuis Kerr Addison jusqu'à Rouyn est dominée par les altérations sodiques avec de fortes carbonatations. Immédiatement à l'est, le champ Rouyn Est témoigne seulement d'une carbonatation faible en calcite. Dans la partie est de la Faille de Cadillac-Larder Lake, le champ de Lapa-Malartic-Camflo est reconnu par une dominance des altérations potassiques accompagnées de carbonatation en calcite faible à modérée. Finalement, la région de Val-d'Or illustre un champ d'altération sodique et de faible carbonatation en calcite.

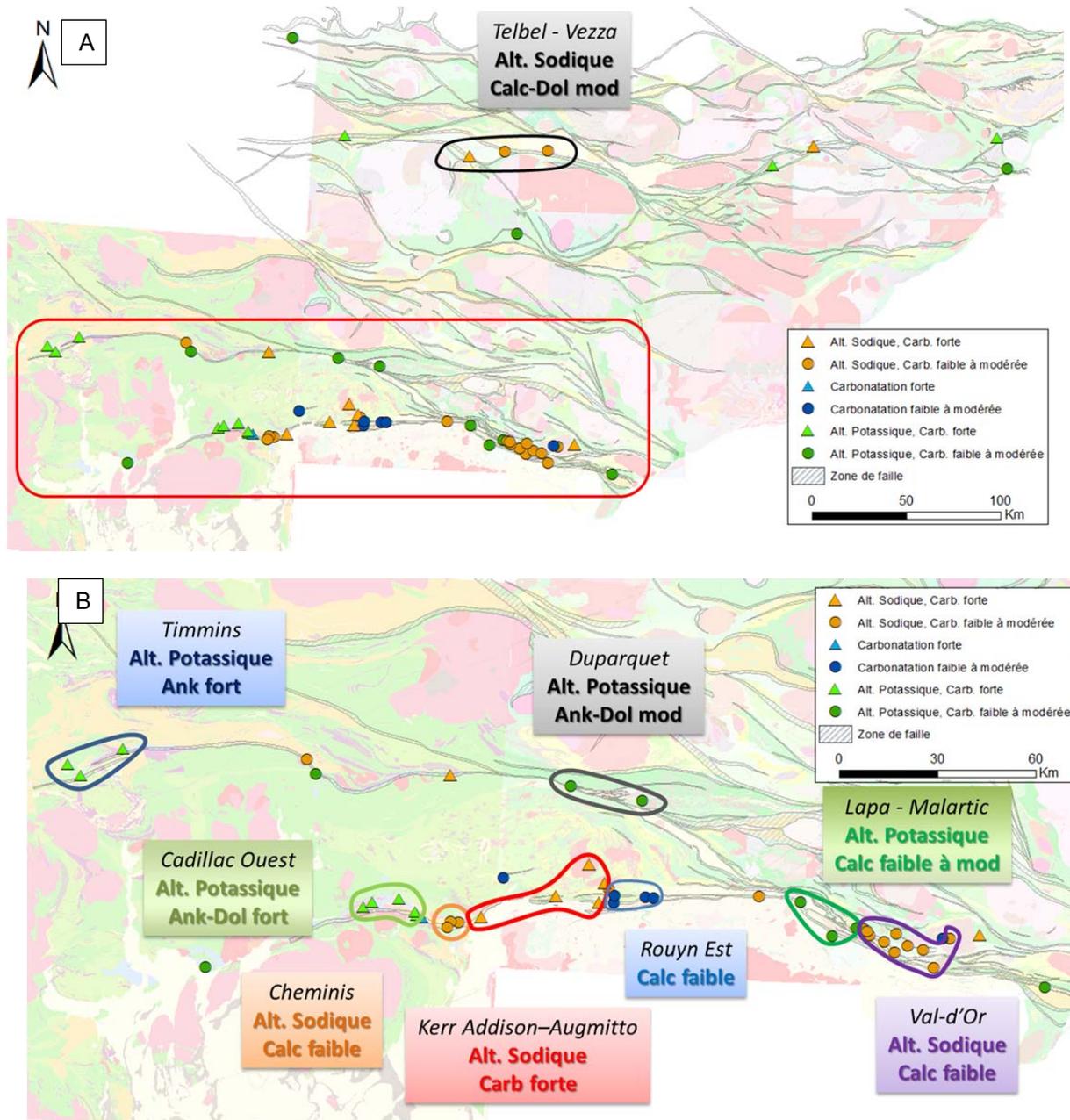


Figure 25. A) Nouveau portrait hydrothermal des altérations associées à l'or en Abitibi. B) Vue rapprochée sur les Failles de Cadillac-Larder Lake et de Porcupine-Destor.

7.1 Comparaison et discussion

Les champs hydrothermaux identifiés le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake à partir de données quantitatives peuvent être comparés avec les champs identifiés par une approche descriptive (projet 2011-01 et 2012-01). Cette approche descriptive repose sur une compilation de la minéralogie des altérations d'après la littérature. La **Figure 26** présente cette comparaison. De façon globale, la concordance entre les deux approches est plutôt bonne. Dans la partie ouest de la Faille de Cadillac-Larder Lake, les champs d'albitite et de forte carbonatation dans la région de Kerr-Addison sont aussi identifiés par l'approche quantitative. Dans la partie est de la Faille de Cadillac-Larder Lake, les zones à microcline et biotite de Lapa-Malartic peuvent être liées au champ potassique de Lapa-Malartic, et le champ à albite et tourmaline à la zone sodique de Val d'Or.

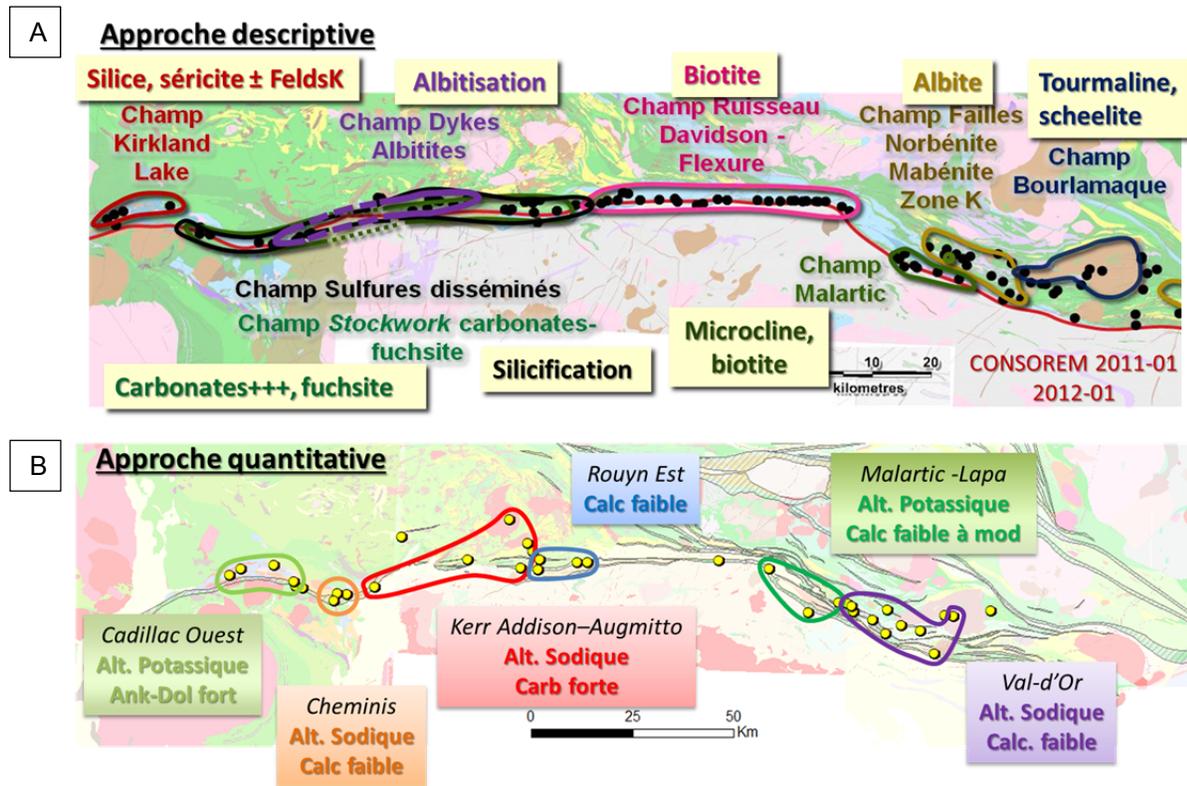


Figure 26. Champs géologiques (A – approche descriptive) versus champs hydrothermaux (B – approche quantitative) le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake.

8 CONCLUSIONS

L'innovation est nécessaire pour rendre l'exploration plus performante. Pour répondre à cette exigence, deux nouveaux diagrammes géochimiques de caractérisation des altérations en contexte aurifère non-volcanogène ont été développés. Ces deux diagrammes utilisent deux indices de carbonatation (indice de saturation : $\text{CO}_2/\text{CaO}+\text{FeO}+\text{MgO}$; indice de discrimination : CO_2/CaO), et un rapport de bilan de masse K_2O sur bilan de masse Na_2O . L'utilisation des bilans de masse en contexte aurifère est inusitée. En effet, la plupart des travaux de caractérisation des altérations pour des gisements à partir des bilans de masse étaient appliqués aux systèmes SMV. Ces diagrammes discriminants sont robustes car indépendants des lithologies, et illustrent les trois altérations dominantes en contexte aurifère ; la carbonatation, l'altération potassique et l'altération sodique. L'intérêt de la représentation sur des diagrammes binaires est d'évaluer efficacement l'intensité des trois altérations dominantes en contexte aurifère, et d'associer des minéraux d'altération. Des champs discriminants des minéralisations aurifères pour plusieurs gisements d'or sont identifiés. Ainsi, il est désormais possible de comparer les signatures hydrothermales d'échantillons minéralisés en or avec celles de gisements d'or connus. Cela permet de mieux vectoriser l'exploration à partir de données géochimiques.

Une autre innovation de ce projet est la réalisation d'une carte de champs hydrothermaux en Abitibi. À l'instar des projets CONSOREM 2011-01 et 2012-01 (Rafini, 2014), il est possible de faire des associations de gisements à partir de données géochimiques. La méthodologie du projet basée sur une approche quantitative, notamment les bilans de masse, offre un regard différent sur l'hydrothermalisme en Abitibi. Les champs hydrothermaux le long de la Faille de Cadillac-Larder Lake présentent une grande complexité hydrothermale lorsque les pertes et les gains métasomatiques sont considérés. En se concentrant seulement sur le métasomatisme associé à la cristallisation de minéraux d'altération, donc les gains métasomatiques, le portrait hydrothermal est bien plus évident et les champs distincts.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu les chercheurs du CONSOREM pour les discussions constructives. Réal Daigneault, Stéphane Faure, Sylvain Rafini, Lucie Mathieu, Dominique Genna ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Je tiens à remercier Sylvain Trépanier pour ses précieux conseils en géochimie et avec LITHOMODELEUR. Je remercie Lucie pour l'intégration des outils sous LITHOMODELEUR, et Julie Menier pour la relecture et l'organisation du document.

RÉFÉRENCES

- Baccini, A., 2010. Statistique Descriptive Multidimensionnelle, Institut de mathématique de Toulouse. Université Paul Sabatier, 33 p.
- Bigot, L., Jébrak, M., 2015. Gold mineralization at the syenite-hosted Beattie gold deposit, Duparquet, Neoproterozoic Abitibi Belt, Canada: *Economic Geology*, v. 110, p. 315-335.
- Colvine, A.C., Andrews, A.J., Cherry, M.E., Durocher, M.E., Fyon, A.J., Lavigne, Jr., Macdonald, A.J., Soussan Marmont, Poulsen, K.H., Springer, J.S., Troop D.G., 1984. An Integrated Model for the Origin of Archean Lode Gold Deposits. Ontario Geological Survey, Open File Report 5524, 98 p.
- Colvine, A.C., 1988. Archean Lode Gold Deposits in Ontario: Ontario Geological Survey. Miscellaneous Paper 139, 136 p.
- Dubé, B., Gosselin, P., 2007. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Special Publication No. 5, p. 49-73.
- Eilu, P., Mikucki, E. J., Dugdale, A. L., 2001. Alteration zoning and primary geochemical dispersion at the Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia: *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 13-31.
- Franklin, J. M., 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration. In *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration* A.G. Gubins, éditeur, 191-208.
- Grant, J.A., 1986. The Isocon Diagram: A simple solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration. *Economic Geology*, v. 81, p. 1976-1982.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Robert, F., Hart, C. J. R., 2003. Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance. *Economic Geology*, v. 98, p. 1-29.
- Huston, D.L., Large, R.R., 1989. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulfide deposits. *Ore Geology Review*, v. 4, p.171-200.
- Kishida, A., Kerrich, R., 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology*, v. 82, p. 649-690.
- Lang, J. R., Baker, T., 2001. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 477-489.
- Large, R., Gemmill, J.B., Paulick, H., Huston, D., L., 2001. The Alteration Box Plot: A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Lithogeochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology*, v. 96, p. 957-971.
- MacLean, W.H., Kranidiotis, P. 1987. Immobile Elements as Monitors of Mass Transfer in hydrothermal Alteration: Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Québec. *Economic Geology*, v 82, p. 951-962.
- Mathieu, L., 2014. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase I. Rapport, Projet CONSOREM 2013-04, 73 p.

- Mathieu L., Trépanier S. et Daigneault R., 2016. CONSONORM_HG : a new method of norm calculation for mid- to high-grade metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, v.34, 1-15.
- Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation 2005. Integrated GIS compilation of geospatial data from the Abitibi greenstone belt, northeastern Ontario: Discover Abitibi Initiative; Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release—Data 186.
- Nesbitt, H.W., Young, M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 1523-1534.
- Nesbitt, H.W., Young, M., 1989. Formation and Diagenesis of Weathering Profiles. *The Journal of Geology*, v. 97, No. 2, p. 129-147.
- Piché, M., Jébrak, M., 2004. NORMATIVE minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 82, p. 59-77.
- Rafini, S., 2014. Typologie des minéralisations aurifères associées à la Faille Cadillac. Rapport, Projet CONSOREM 2011-01 et 2012-01, 45 p.
- Robert, F., 1986. Archean Gold-Bearing Quartz Veins at the Sigma Mine, Abitibi Greenstone Belt, Quebec: Part II. Vein Paragenesis and Hydrothermal Alteration. *Economic Geology*, v. 81, p. 593-616.
- Robert, F., 2001. Syenite associated disseminated gold deposit in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 505-516.
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R., Zhou, X., 2007. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types: Ore Deposits and Exploration Technology. In "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, 2007, p. 691-711.
- Romberger, S. B., 1986, The Solution Chemistry of Gold Applied to the Origin of Hydrothermal Deposits: *Canad. Inst. Mining Special*, v. 38, p. 168-186.
- Smith, J.R., Spooner, E.T.C., Broughton, D.W., Ploeger, F.R., 1993. Archean Au-Ag-(W) Quartz Vein/Disseminated mineralisation within the Larder Lake - Cadillac Break, Kerr Addison - Chesterville System, North East Ontario, Canada. Ontario Geoscience Research Grant Program, Grant No. 364; Ontario Geological Survey, Open File Report 5831, 310 p.
- Stanley, C.R., Madeisky, H.E., 1994. Lithogeochemical Exploration for Hydrothermal Ore Deposits Using Pearce Element Ratio Analysis. In Lentz, D.R., ed., *Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems*. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p.193-211.
- Trépanier, S., 2011. Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. Projet CONSOREM 2008-07, 209 p.
- Trépanier, S., 2013. Norme LITHOMODELEUR. Projet CONSOREM 2011-04, 91 p.
- Trépanier S., Mathieu L. et Daigneault R., 2015. CONSONORM-LG : New Normative Minerals and Alteration Indexes for Low-Grade Metamorphic Rocks. *Economic Geology*, v. 110, 2127-2135.
- Williams-Jones, A. E., Heinrich, C. A., 2005. 100th Anniversary Special Paper: Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, v. 100, p. 1287-1312.

ANNEXE 1 – SIGNATURES HYDROTHERMALES DES GISEMENTS D'OR À PARTIR DES DONNÉES D'ÉCHANTILLONS MINÉRALISÉS (> 1G/T AU)

Informations générales		Approche quantitative (résultats du projet 2013-07)					Caractérisation de l'altération dominante avec l'outil Altération SatCarbKNa
Gisement	Type de carbonate dominant	Intensité de carbonatation (0 à 1)	Bilan de masse Na ₂ O (gr/100gr)	Bilan de masse K ₂ O (gr/100gr)	Bilan de masse Fe ₂ O ₃ (gr/100gr)	Bilan de masse MgO (gr/100gr)	
Anoki	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	2 < Gain K ₂ O < 5	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Gain MgO < 2	Altération potassique, forte carbonatation
Astoria	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Perte Na ₂ O < -2	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO > 5	Carbonatation faible à modérée
Augmitto	Ankérinite-Dolomite-Magnésite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O > 5	-2 < Perte K ₂ O < -5	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation forte
Bachelor	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Beattie	Ankérinite-Dolomite	0,25 à 0,5	Perte Na ₂ O > -5	2 < Gain K ₂ O < 5	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Beaufor	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	Gain MgO < 2	Altération sodique, forte carbonatation
Bidgood	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO > 5	Altération potassique, forte carbonatation
Bouscadillac	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Camflo	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Gain MgO < 2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Canadian Malartic	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Casa Berardi	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Cheminis	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	2 < Gain Na ₂ O < 5	Perte K ₂ O < -2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	-2 < Perte MgO < -5	Altération sodique, carbonatation faible à modérée

Informations générales	Approche quantitative (résultats du projet 2013-07)						
Gisement	Type de carbonate dominant	Intensité de carbonatation (0 à 1)	Bilan de masse Na₂O (gr/100gr)	Bilan de masse K₂O (gr/100gr)	Bilan de masse Fe₂O₃ (gr/100gr)	Bilan de masse MgO (gr/100gr)	Caractérisation de l'altération dominante avec l'outil Altération SatCarbKNa
Chevrier	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Chimo	Calcite	0,25 à 0,5	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Dassen	Ankérite-Dolomite	0,25 à 0,5	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Carbonatation faible à modérée
DetourLake	Pas de carbonate	Frais (0,057)	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO > 5	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Douay	Calcite	0,25 à 0,5	2 < Gain Na ₂ O < 5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Elder	Ankérite-Dolomite	0,75 à 1	2 < Gain Na ₂ O < 5	-2 < Perte K ₂ O < -5	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < Gain MgO < 5	Altération sodique, forte carbonatation
Ferderber	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	Perte MgO > -5	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Francoeur Wasamac	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	2 < Gain Na ₂ O < 5	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération sodique, forte carbonatation
Geant Dormant	Calcite	frais (0,057) à 0,25	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Glimmer	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Goldex	Absence de données	Absence de données	Gain Na ₂ O > 5	Gain K ₂ O < 2	Absence de données	Perte MgO < -2	Altération sodique
Hollinger	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	-2 < Perte Na ₂ O < -5	2 < Gain K ₂ O < 5	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	Gain MgO < 2	Altération potassique, forte carbonatation
Holt-McDermott	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < gain MgO < 5	Altération sodique, forte carbonatation
Hoyle Pond	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	-2 < Perte MgO < -5	Altération potassique, forte carbonatation
Jacola	Pas de carbonate	Frais (0,057)	2 < Gain Na ₂ O < 5	Gain K ₂ O < 2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée

Informations générales	Approche quantitative (résultats du projet 2013-07)						
Gisement	Type de carbonate dominant	Intensité de carbonatation (0 à 1)	Bilan de masse Na₂O (gr/100gr)	Bilan de masse K₂O (gr/100gr)	Bilan de masse Fe₂O₃ (gr/100gr)	Bilan de masse MgO (gr/100gr)	Caractérisation de l'altération dominante avec l'outil Altération SatCarbKNa
Joe Mann	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Kerr Addison	Sidérite-Magnésite-Dolomite-Ankérite	0,75 à 1	2 < Gain Na ₂ O < 5	Perte K ₂ O < -2	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	Gain MgO < 2	Altération sodique, forte carbonatation
Kiena	Sidérite-Magnésite-Dolomite-Ankérite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O > 5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Gain MgO > 5	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Kierens	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Lac Herbin	Sidérite-Magnésite-Dolomite-Ankérite	0,25 à 0,5	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO > -5	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
LacShorrt	Calcite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération sodique, forte carbonatation
Lapa	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	2 < Gain K ₂ O < 5	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Macassa	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	2 < Gain K ₂ O < 5	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Marban	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Mc Bean	Ankérite-Dolomite	0,5 à 0,75	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < gain MgO < 5	Forte carbonatation
McWatters	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Perte Na ₂ O < -2	2 < Gain K ₂ O < 5	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
New Rouyn Merger O'Neil	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Norlartic	Calcite	0,25 à 0,5	2 < Gain Na ₂ O < 5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée

Informations générales		Approche quantitative (résultats du projet 2013-07)					
Gisement	Type de carbonate dominant	Intensité de carbonatation (0 à 1)	Bilan de masse Na₂O (gr/100gr)	Bilan de masse K₂O (gr/100gr)	Bilan de masse Fe₂O₃ (gr/100gr)	Bilan de masse MgO (gr/100gr)	Caractérisation de l'altération dominante avec l'outil Altération SatCarbKNa
Omega	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	Perte MgO < -2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Orenada	Pas de carbonate	Frais (0,057)	2 < Gain Na ₂ O < 5	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Paymaster	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Raven River	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	Perte Fe ₂ O ₃ < -2	Perte MgO < -2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Ross	Sidérite-Magnésite-Dolomite-Ankérinite	0,25 à 0,5	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	-2 < Perte Fe ₂ O ₃ < -5	-2 < Perte MgO < -5	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
Senator Rouyn	Pas de carbonate	Frais (0,057)	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Sigma Lamaque	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	2 < Gain Na ₂ O < 5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Gain MgO < 2	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Silidor	Calcite	0,5 à 0,75	2 < Gain Na ₂ O < 5	-2 < Perte K ₂ O < -5	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < gain MgO < 5	Altération sodique, forte carbonatation
Siscoe	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < gain MgO < 5	Altération sodique, carbonatation faible à modérée
Stadacona	Pas de carbonate	Frais (0,057)	-2 < Perte Na ₂ O < -5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	2 < gain MgO < 5	Carbonatation faible à modérée
Sylvanite	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O < 2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Perte MgO < -2	Altération potassique, forte carbonatation
Telbel	Ankérinite-Dolomite	0,5 à 0,75	Gain Na ₂ O > 5	Perte K ₂ O < -2	Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération sodique, forte carbonatation
Upper Canada	Calcite	0,5 à 0,75	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O < 2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	Gain MgO < 2	Altération potassique, forte carbonatation
VeZZaGoldMine	Calcite	0,25 à 0,5	Gain Na ₂ O < 2	Perte K ₂ O < -2	2 > Gain Fe ₂ O ₃ > 5	-2 < Perte MgO < -5	Altération sodique, carbonatation faible à modérée

Informations générales	Approche quantitative (résultats du projet 2013-07)						
Gisement	Type de carbonate dominant	Intensité de carbonatation (0 à 1)	Bilan de masse Na₂O (gr/100gr)	Bilan de masse K₂O (gr/100gr)	Bilan de masse Fe₂O₃ (gr/100gr)	Bilan de masse MgO (gr/100gr)	Caractérisation de l'altération dominante avec l'outil Altération SatCarbKNa
Young-Davidson	Calcite	Frais (0,057) à 0,25	Perte Na ₂ O < -2	Gain K ₂ O > 5	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée
YvanVezina	Ankérite-Dolomite	0,25 à 0,5	Perte Na ₂ O < -2	2 < Gain K ₂ O < 5	Gain Fe ₂ O ₃ < 2	Perte MgO < -2	Altération potassique, carbonatation faible à modérée

ANNEXE 2 – MÉTHODOLOGIE D'UTILISATION DES OUTILS SOUS LITHOMODELEUR (VERSION 3.6.0)

Procédure d'intégration des données

Plusieurs étapes préalables à l'utilisation des outils sont essentielles afin d'obtenir des résultats corrects.

1 – Identification géochimique : Après avoir obtenu les résultats des analyses lithogéochimiques du laboratoire, la première étape consiste à identifier la nature de la roche, c'est-à-dire le protholite et le degré de fraîcheur ou d'altération.

- a. Soit cette information est déterminée par l'observation visuelle de l'échantillon (bon contrôle de l'information);
- b. Soit l'observation de l'échantillon n'est pas possible, ou possible mais la certitude est faible. Dans ce cas, il faut utiliser les ressources de LITHOMODELEUR (3.6.0). Dans *Analyses*, appliquer l'*identification des protholites sédimentaires versus ignés*. Cela permet d'exclure les roches sédimentaires. Sur les roches ignées, appliquer le *modèle de traitement LOI_Piercey_SchisteVert* pour déterminer le protholite et le degré de fraîcheur ou d'altération.

2 – Bilans de masse : Lorsque les roches ignées et altérées sont identifiées, faire les calculs de bilan de masse sous LITHOMODELEUR (3.6.0). S'assurer au préalable que les colonnes sont bien définies dans l'onglet *configuration*, notamment pour les oxydes. Si le protholite est alcalin (surtout pour les syénites et les monzonites) il faut identifier une roche fraîche comme référence, puis appliquer les calculs de bilan de masse par précurseur unique (onglet *Analyses*). Si le protholite n'est pas alcalin, utiliser la modélisation des précurseurs.

Avertissement résultats de bilan de masse – VALEURS : toujours utiliser les bilans de masse en valeur absolue (gr/100gr), pas en pourcentage car LITHOMODELEUR crée les outils à partir des valeurs absolues. La modélisation des précurseurs produit automatiquement les deux types de bilan de masse, absolu et relatif. Ainsi dans ce cas il n'y a pas de problème car pour placer les échantillons dans les nouveaux outils, LITHOMODELEUR va directement chercher la valeur absolue. Pour les bilans de masse par précurseur unique, il faut s'assurer que lors du calcul des bilans de masse, la case bilan de masse absolu soit cochée afin que le bilan de masse produit soit en valeur absolue et non en pourcentage.

Avertissement résultats de bilan de masse - NOMS : le nom de la colonne des bilans de masse doit être sous la forme « B_K2O_BM_ABS », « B_Na2O_BM_ABS »... Pour cela s'assurer que lors du calcul des bilans de masse, le *préfixe des champs de bilans* dans *bilan de masse par modélisation des précurseurs* soit indiqué B_. Pour le cas de bilans de masse par précurseur unique, même en modifiant le préfixe des champs on ne peut pas obtenir une structure de nom comme mentionnée précédemment. Dans ce cas il faut modifier le nom de la colonne directement sous Access.

3 – Carbonatation : Le CO₂ est essentiel dans la création des outils. LITHOMODELEUR utilise automatiquement CO₂ analysé pour calculer les indices de carbonatation, et donc pour construire les outils. Si dans les analyses lithogéochimiques le CO₂ est analysé alors il n'y a rien à modifier. En revanche, si le CO₂ n'est pas présent dans l'analyse, il faut le déterminer par la norme CONSOREM (CO₂ NORMATif) ou par les réseaux neuronaux (CO₂_RN) sous LITHOMODELEUR dans *Diagrammes/Indices*, puis *Calculer les indices unaires*, puis *Calcul du CO₂ par réseaux neuronaux*.

Avertissement - CO₂ : LITHOMODELEUR ne reconnaît que le nom « CO₂ » pour créer l'outil. Cela implique que si des calculs de CO₂ sont nécessaires (autre que CO₂ analysé), il faut changer le nom de la colonne CO₂_RN, ou CO₂ NORMATif, par CO₂. Lors du calcul du CO₂_RN, dans *Nom du champ qui stockera la valeur*, écrire CO₂. Pour le CO₂ NORMATif, il faut changer le nom sous Access. Par ailleurs,

l'outil ne prend en compte seulement les valeurs de CO₂ strictement positives, donc il faut s'assurer que ce soit le cas dans la banque de données.

4 - **Diagrammes** : Une fois que tous ces paramètres de bilans de masse et de CO₂ sont calculés et bien nommés, on peut présenter les échantillons dans les diagrammes. Il faut alors aller dans *Diagrammes/Indices*, puis *Diagramme prédéfinis*, puis sélectionner les outils *Au Altération SatCarbKNa* et *Au Altération DiscrCarbKNa*.

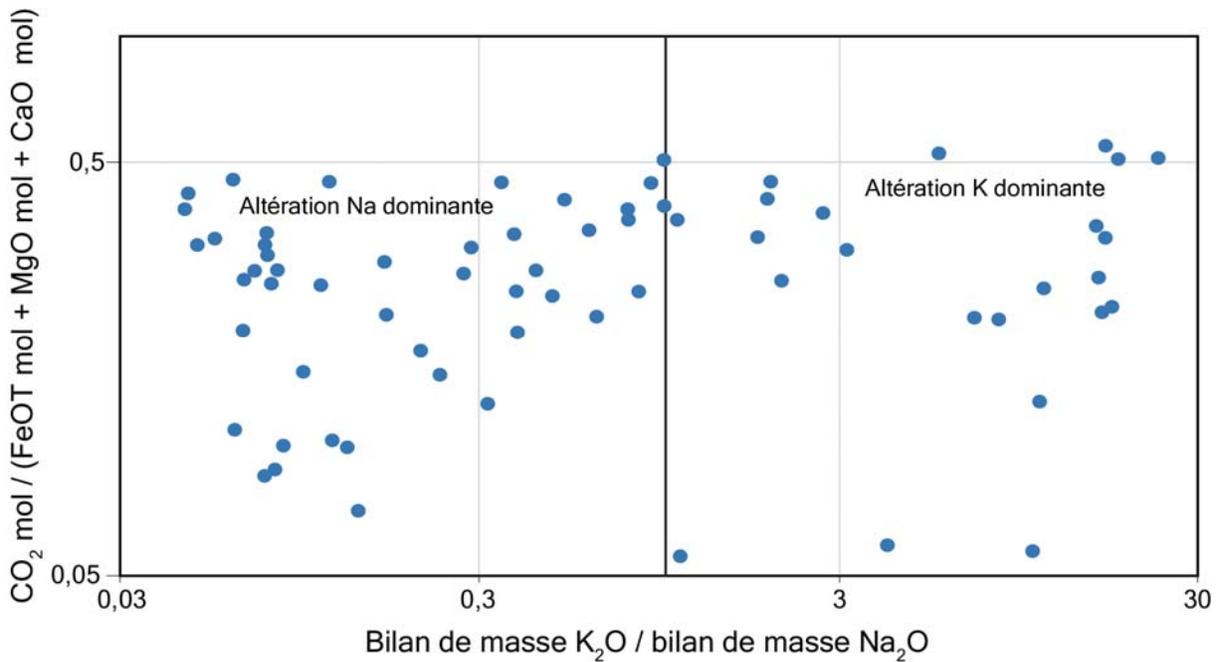


Figure A2-1. Outil *Au Altération SatCarbKNa* qui illustre les intensités des altérations sodiques (bilan de masse K₂O/bilan de masse Na₂O < 1), potassique (bilan de masse K₂O/bilan de masse Na₂O > 1), et à carbonate (de 0 à 1).

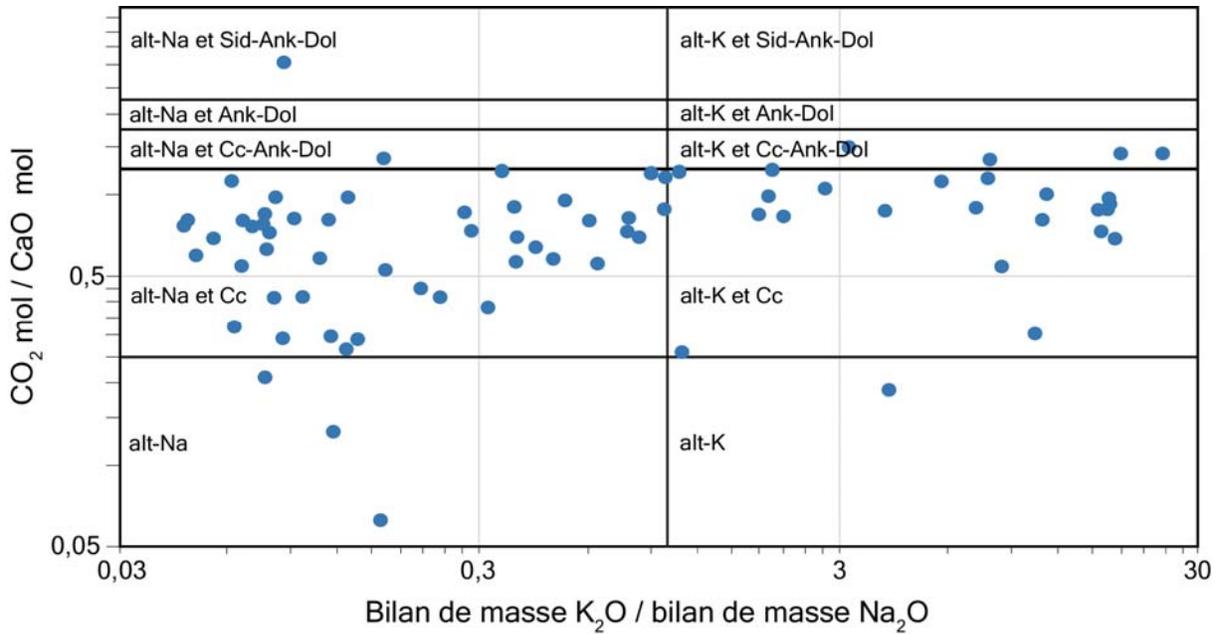


Figure A2-2. Outil *Au Altération DiscrCarbKNa* qui illustre les intensités des altérations sodiques (bilan de masse K_2O /bilan de masse $Na_2O < 1$), potassique (bilan de masse K_2O /bilan de masse $Na_2O > 1$), et le type de carbonate.

5 - Sauvegarde : Une fois les données intégrées dans les outils, cliquer sur *Sauvegarder les champs dans la base de données* afin qu'ils soient ajoutés à la table Access.

Pour associer des données aux champs des gisements d'or, il faut se rapporter à la **Figure 22** du présent rapport.

ANNEXE 3 – UTILISATION DES ÉLÉMENTS TRACES MOBILES POUR CARACTÉRISER L'ALTÉRATION DANS LES PLUTONS FELSIQUES

1. Introduction

Une approche novatrice de caractérisation des altérations consiste à utiliser les éléments traces mobiles qui ont des affinités avec des minéraux d'altérations pour tenter de caractériser l'altération. Ces éléments accompagnateurs pourraient permettre de discriminer les altérations précisément (e.g., séricite, feldspath potassique). Cependant, certaines limites s'appliquent à cette approche, notamment les lithologies qui influencent grandement les concentrations des éléments mobiles.

2. Méthodologie

Premièrement, il importe d'identifier les éléments mobiles et leurs associations avec des minéraux d'altération. La **Figure A3-1** présente les principaux éléments du tableau périodique selon leur solubilité, donc leur mobilité. Le **Tableau A3-1** propose une synthèse des informations sur des éléments mobiles identifiés dans la **Figure A3-1**.

Parmi les éléments mobiles, le rubidium se concentre préférentiellement dans la muscovite, le strontium dans la calcite, et le lithium et le césium se concentrent à la fois dans le feldspath potassique et le mica (**Tableau A3-1**). Le barium n'est pas commode à utiliser pour développer une méthode de caractérisation des altérations car il peut se concentrer dans des minéraux de nature différente, à la fois potassique et calcique. Ainsi, le rubidium, le lithium, et le césium sont choisis pour illustrer les altérations à séricite et à feldspath potassique, et le strontium est sélectionné pour représenter les altérations à calcite.

Une des limites de cette approche est l'influence lithologique. En effet, les éléments mobiles sont très influencés par le type de lithologie. La **Figure A3-2** illustre la variation de concentration du rubidium et du strontium selon les lithologies. Cette variation entre les roches felsiques et mafiques témoigne surtout du degré de différenciation des roches. Ainsi, pour utiliser ces éléments il faut se focaliser sur un seul type d'unité. Dans notre cas nous avons une base de données exhaustive de lithogéochimie sur les syénites-monzonites provenant du projet CONSOREM 2011-02.

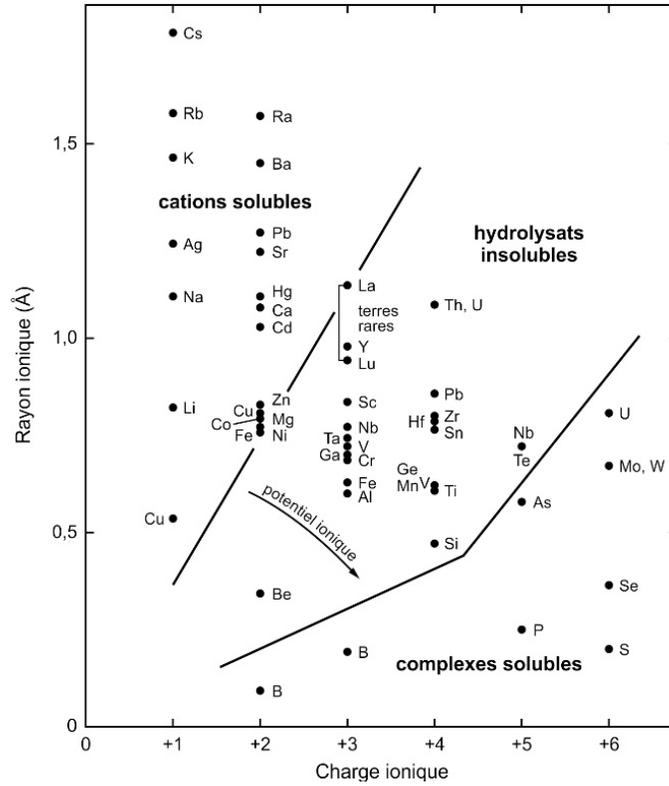


Figure A3-1. Solubilité des éléments. D'après Rose et al. (1979)¹ dans Jébrak et Marcoux (2008)².

Tableau A3-1. Information sur les éléments mobiles, d'après <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/>.

	Substitution	Minéral non-métallique accompagnateur	Type
Rubidium - Rb	Rb ⁺ avec K ⁺	muscovite, (mineur fK)	Métal alcalin; lithophile
Strontium - Sr	Sr ²⁺ avec Ca ²⁺ , K ⁺ , et Ba ²⁺	calcite-dolomite, barytine, (fK)	Métal alcalino-terreux; lithophile
Barium - Ba	Ba ²⁺ avec K ⁺ et Ca ²⁺	fK, calcite, plagioclase, barytine	Métal alcalino-terreux; lithophile
Lithium - Li	Li ⁺ avec K ⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺	fK, mica	Métal alcalin; lithophile
Lanthane - La	La ³⁺	biotite, apatite	Terre-Rare; lithophile
Plomb - Pb	Pb ²⁺ avec K ⁺	fK	Métal pauvre; chalcophile
Zinc - Zn	Zn ²⁺ avec Fe ²⁺ et Mg ²⁺	biotite	Métal de transition; chalcophile
Césium - Cs	Cs ⁺ avec K ⁺	fK, mica	Métal alcalin; lithophile

¹ Rose, A.W., Hawkes, H.E., Webb, S.J., 1979. Geochemistry and mineral exploration. Academic Press, 2nd édition, 657 p.

² Jébrak, M. et Marcoux, E., 2008. Géologie des ressources minérales. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. Québec, 667 p.

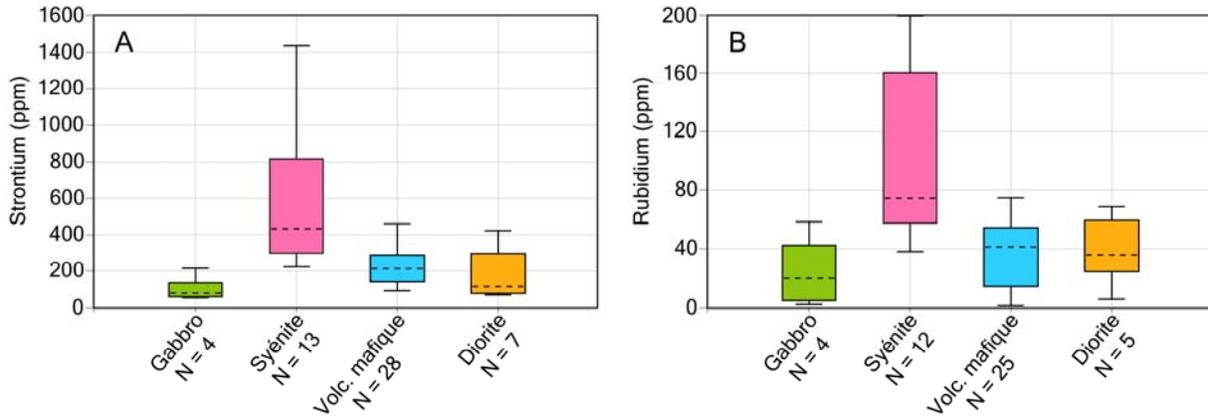


Figure A3-2. Concentration en élément mobile selon la lithologie. A) Strontium, B) Rubidium.

3. Réalisation

En considérant quatre éléments mobiles, Rb, Cs, Li, et Sr, qui accompagnent les minéraux d'altération potassique et les carbonates, on peut proposer un nouveau diagramme binaire dans lequel sont définis des champs d'altération (**Figure A3-3**). Ce diagramme présente en ordonnée un rapport de $(Rb+Cs+Li)/Sr$, et une concentration en Sr en abscisse. Le champ d'altération en séricite correspond à un rapport $(Rb+Cs+Li)/Sr$ supérieur à 0,4 et une concentration en Sr inférieure à 500 ppm. L'altération à feldspath potassique définit un champ compris entre 400 et 1000 ppm en Sr et un rapport $(Rb+Cs+Li)/Sr$ compris entre 0,2 et 0,5. Le champ des altérations en albite correspond à de faibles valeurs en Sr et un faible rapport $(Rb+Cs+Li)/Sr$. Compte tenu qu'aucun élément accompagnateur ne se concentre dans l'albite, ce résultat était attendu. Le champ de l'altération en calcite est surtout marqué par un rapport $(Rb+Cs+Li)/Sr$ inférieur à 0,2, et de fortes valeurs en Sr, typiquement supérieures à 500 ppm. Finalement il est possible d'identifier un champ dominant pour les syénites-monzonites fraîches; les valeurs en Sr sont comprises entre 500 et 1100 ppm, et le rapport $(Rb+Cs+Li)/Sr$ est inférieur à 0,2.

Bien que les champs ne soient pas exclusifs, il est possible de bien représenter les altérations dans les syénites-monzonites. Par ailleurs, on peut identifier les gisements d'or à partir des données dans le diagramme. La **Figure A3-4** indique la position des gisements d'or, et donc l'altération dominante qui leur est associée.

Cet outil peut être utilisé comme un indicateur des altérations dominantes en contexte de syénite-monzonite. Cependant, l'outil Altération SatCarbKNa est plus performant et plus polyvalent.

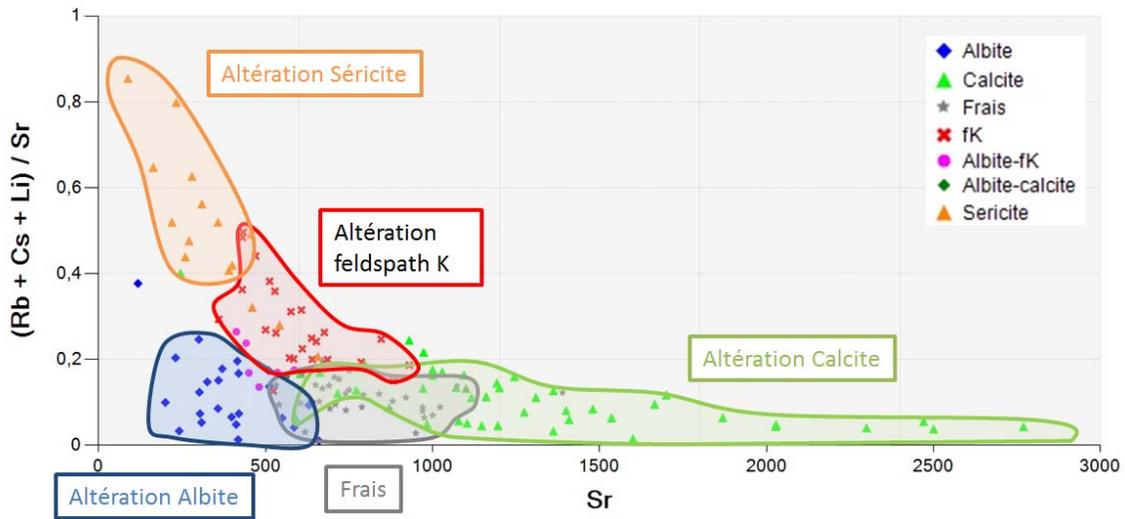


Figure A3-3. Nouvel outil-diagramme pour caractériser l'altération dans les syénites-monzonites à partir des éléments traces mobiles.

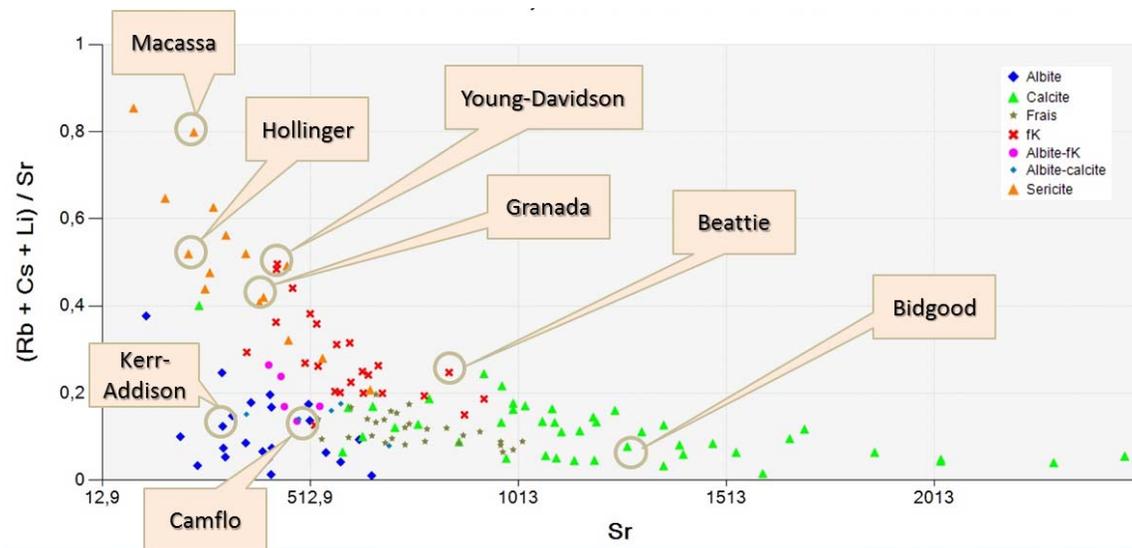


Figure A3-4. Outil-diagramme pour caractériser l'altération dans les syénites-monzonites à partir des éléments traces mobiles, avec les gisements d'or indiqués.