



**CONSOREM**

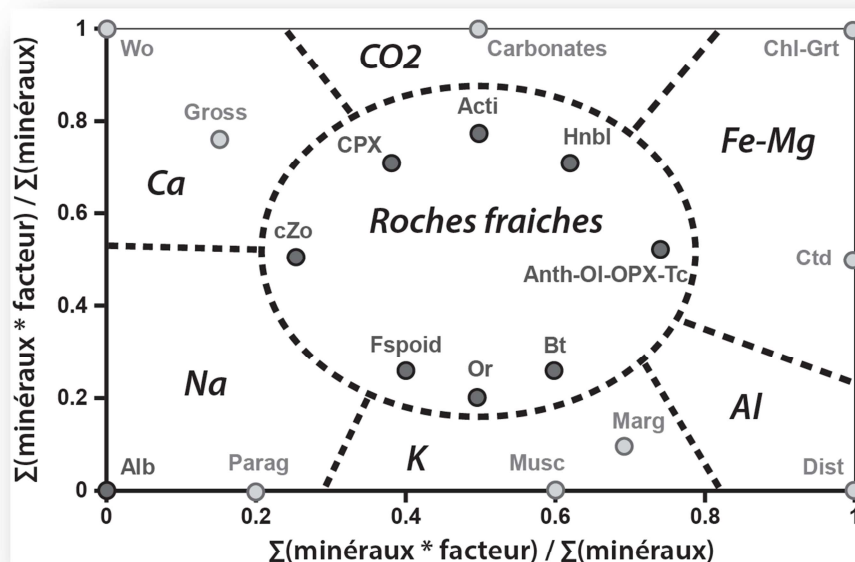
Consortium de recherche  
en exploration minérale

---

# CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES ET CHIMIQUES DES ALTÉRATIONS DANS LES ROCHES DE HAUT GRADE MÉTAMORPHIQUE – PHASE II

---

Projet 2014-01



Par : Lucie Mathieu Ph.D., géo.  
2016

---

## 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. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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

Mathieu, L., 2016. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase II. Rapport, Projet CONSOREM 2014-01, 160 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.

Courriel : [consorem@uqac.ca](mailto:consorem@uqac.ca)

Site Web: [www.consorem.ca](http://www.consorem.ca)

---

## RÉSUMÉ

---

Ce projet s'intéresse aux roches altérées par un fluide hydrothermal et métamorphisées à haut grade pendant ou après avoir été altérées. Le projet 2013-04 avait déjà permis de proposer un calcul normatif pour les roches de haut grade métamorphique. Dans le présent projet, différents diagrammes et indices sont proposés afin d'interpréter les paragenèses métamorphiques.

Ce projet a permis de développer 6 diagrammes dont l'un est général et les autres sont dédiés aux altérations spécifiques en Si, CO<sub>2</sub>, Ca, NaK-Al et FeMg-Al. Ces diagrammes permettent de visualiser les paragenèses métamorphiques, de comparer les échantillons entre eux et de déduire le/les principaux types d'altérations ayant affecté un ensemble donné de roches. De larges bases de données de roches fraîches, magmatiques et sédimentaires, ainsi que de nombreux exemples de roches altérées, ont permis de contraindre avec précision la position des différents types de roches sur les diagrammes de références.

Ce projet a également été l'occasion de proposer plusieurs indices d'altération, dont le calcul peut être personnalisé par l'utilisateur. Ces indices ont été systématiquement comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, ainsi qu'aux indices de la norme BasGrade, afin d'évaluer la pertinence et les performances des différentes méthodes. L'objectif principal du projet est cependant d'étendre l'utilisation des méthodes normatives aux roches de haut-grade. Les comparaisons ont également permis d'identifier les principaux minéraux marqueurs des différents types d'altérations.

Les minéraux marqueurs de l'altération dans les roches métamorphiques de haut grade sont :

- altération en Ca : **wollastonite** et **grossulaire** ou anorthite-lawsonite-clinozoisite lorsque le grossulaire n'est pas stable;
- altération en Si : **quartz**;
- altération en CO<sub>2</sub> : **carbonates**, ou **graphite** et silicates Fe-Mg-Ca;
- altération en Fe : **grenat-cordiérite**, ou oxydes de fer pour les cas extrêmes;
- altération en Mg : **cordiérite**;
- altération en Fe-Mg : la présence de minéraux à Al (cf. **aluminosilicates** ou **staurotide**, **chloritoïde**, **carpholite**, **spinnelle**) est possible, surtout si la destruction des feldspaths excède la quantité de Fe-Mg introduit dans la roche;
- altération en Na-K acide (lessivage et hydratation) : **micas blancs**, ou assemblage de 2/3 de **feldspaths alcalins** et de 1/3 d'**aluminosilicates** si les micas blancs ne sont pas stables;
- altération en Na-K (ajout de Na-K) : **feldspaths alcalins**;
- lessivage, argilisation : minéraux riches en Al;
- **biotite** : roches felsiques ayant subi une altération en Fe-Mg. La biotite reflète alors la composition felsique du protolithe frais;
- **anthophyllite** et autres minéraux à Fe-Mg : roches mafiques ayant subi, ou non, une altération. Ces minéraux reflètent alors la composition mafique du protolithe frais.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

Caractéristiques minéralogiques et chimiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase II .....	i
Avertissement .....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	x
1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS .....	1
2 REPRÉSENTER L'ALTÉRATION GRAPHIQUEMENT .....	2
2.1 Bases de données .....	3
2.1.1 Base de données des roches fraîches .....	3
2.1.2 Base de données des roches altérées .....	4
2.2 Diagramme général.....	6
2.2.1 Répartition des minéraux sur le diagramme général .....	6
2.2.2 Position des roches fraîches sur le diagramme général .....	7
2.2.3 Position des roches altérées sur le diagramme général .....	7
2.3 Diagramme CO <sub>2</sub> .....	11
2.3.1 Répartition des minéraux sur le diagramme CO <sub>2</sub> .....	11
2.3.2 Position des roches fraîches sur le diagramme CO <sub>2</sub> .....	11
2.3.3 Position des roches altérées sur le diagramme CO <sub>2</sub> .....	11
2.4 Diagramme Ca.....	16
2.4.1 Répartition des minéraux sur le diagramme Ca.....	16
2.4.2 Position des roches fraîches sur le diagramme Ca .....	16
2.4.3 Position des roches altérées sur le diagramme Ca .....	17
2.5 Diagramme FeMg .....	21
2.5.1 Répartition des minéraux sur le diagramme FeMg .....	21
2.5.2 Position des roches fraîches sur le diagramme FeMg .....	21
2.5.3 Position des roches altérées sur le diagramme FeMg .....	22
2.6 Diagramme NaK .....	28
2.6.1 Répartition des minéraux sur le diagramme NaK .....	28
2.6.2 Position des roches fraîches sur le diagramme NaK .....	29
2.6.3 Position des roches altérées sur le diagramme NaK .....	29
2.7 Diagramme Si .....	36
2.7.1 Répartition des minéraux sur le diagramme Si .....	36
2.8 Liste des principaux minéraux marqueurs des altérations .....	42
2.9 Représentation théorique des différents types d'altérations sur les diagrammes.....	45
3 INDICES D'ALTÉRATION.....	52
3.1 Principe général .....	52
3.2 Principe de calcul du Fact 2 .....	52
3.3 Indice CO <sub>2</sub> .....	54
3.4 Silicification et indice Si.....	55
3.5 Indice Ca.....	57
3.6 Altérations Fe et Mg .....	58
3.7 Indices Na et K.....	59
3.8 Diagramme général.....	60
4 ÉTUDE DE CAS .....	61
4.1 Dépôt d'Au de Casa Bérardi, Abitibi .....	61

4.2	VMS de Horne, Abitibi.....	64
4.3	Glenwood dome, Rouyn-Noranda, Abitibi .....	67
4.4	VMS de Kristineberg, Suède .....	70
4.5	VMS de New Insc0, Abitibi .....	72
4.6	VMS de Persévérance, Abitibi.....	75
4.7	VMS de Neves Corvo, Espagne.....	78
4.8	VMS de Sturgeon Lake, Ontario.....	81
4.9	VMS de Montauban, Grenville .....	82
4.10	VMS de Houg-tou-shan, Chine.....	85
4.11	VMS du bloc d'Arunta, Australie.....	88
4.12	VMS de Winston Lake.....	90
4.13	VMS de Déri, Inde.....	93
4.14	VMS de Coulon, Baie James .....	95
4.15	Dépôt de Comptois, Abitibi (Au ou VMS?).....	102
4.16	Dépôt d'or de Challenger, Australie.....	105
4.17	Dépôt d'or de Hemlo, Ontario.....	108
4.18	IOCG de Kwyjibo, Québec .....	111
4.19	VMS de Hackett River, Nunavut.....	116
4.20	Au-Mo porphyre des plutons Taschereau-Launay .....	120
5	FAMILLES D'ALTÉRATIONS.....	124
5.1	Dépôts de type SMV .....	124
5.2	Les IOCG.....	126
5.3	Les porphyres Cu-Mo-(Au).....	127
5.4	Les épithermaux .....	129
6	CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....	132
	RÉFÉRENCES.....	135
	ANNEXE A.....	8
	ANNEXE B.....	5

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Diagramme de Large et al. (2001), pour l'interprétation de l'altération à partir des éléments majeurs à l'aide de l'indice « CCP » (indice Chlorite-carbonate-pyrite) et de l'indice « Alteration » (indice Ishikawa).....	8
Figure 2 : Exemple de répartition des minéraux sur le diagramme général du faciès 7AMP500 de la norme HautGrade.....	8
Figure 3 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme général.....	9
Figure 4 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme général.....	10
Figure 5 : distribution des minéraux du diagramme CO <sub>2</sub> .....	13
Figure 6 : diagramme CO <sub>2</sub> pour le faciès SV350, représentant la base de données des roches fraîches.....	13
Figure 7 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme CO <sub>2</sub> . Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.....	14
Figure 8 : Distribution des roches de la base de données altérée sur le diagramme CO <sub>2</sub> . Le code couleur correspond à l'indice ALT_CARBS_SV350.....	15
Figure 9 : Répartitions des minéraux sur les diagrammes Ca des faciès SV350 (a) et 7AMP500 (b).....	17
Figure 10 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme Ca.....	18
Figure 11 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Ca. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.....	19
Figure 12 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Ca. Le code couleur correspond aux gains/pertes de Ca (B_CaO_BM_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).....	20
Figure 13 : Répartition des minéraux du diagramme FeMg.....	23
Figure 14 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme FeMg.....	24
Figure 15 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.....	25
Figure 16 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond à l'indice ALT_CHLO_SV350.....	26
Figure 17 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond aux gains/pertes en Fe et Mg (B_Fe2O3T_BM_ABS + B_MgO_BM_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).....	27
Figure 18 : Répartition des minéraux du diagramme NaK.....	31
Figure 19 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme NaK.....	32
Figure 20 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.....	33
Figure 21 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond à l'indice ALT_SER_SV350 + ALT_PARAG_SV350.....	34

Figure 22 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond aux gains/pertes en Na et K (B_K2O_BM_ABS + B_Na2O_BM_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).....	35
Figure 23 : Répartition des minéraux du diagramme Si.....	38
Figure 24 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme Si.....	39
Figure 25 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Si. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.....	40
Figure 26 : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Si. Le code couleur correspond aux gains/pertes de Ca (B_SiO2_BM_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).....	41
Figure 27 : Représentation des principaux minéraux caractéristiques des altérations en Fe-Mg, Na-K et Ca sur une vue éclatée du tétraèdre FM-NK-Ca-Al du faciès 5AMP670 (cf. Mathieu 2014).....	45
Figure 28 : Schéma décrivant la méthode de calcul du Fact2.....	53
Figure 29 : Indice CO <sub>2</sub> calculé sur les données de la syénite de Beattie (Bourdeau 2013, Bigot 2012), pour les méthodes BasGrade et HautGrade.....	55
Figure 30 : Indice Si calculé sur les données compilées par le projet Consorem 2009-03 (Lafrance 2009).....	56
Figure 31 : Indice Ca calculé sur les données compilées par le projet Consorem 2009-03 (Lafrance 2009).....	58
Figure 32 : Diagramme général (a) et diagramme CO <sub>2</sub> (b) pour les roches de la région de Casa Bérardi échantillonnées par Nabil (2005, 2006).....	63
Figure 33 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les indices de la norme BasGrade et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	64
Figure 34 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme NaK (c) pour les roches du VMS de Horne échantillonnées par MacLean et Hoy (1991).....	66
Figure 35 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	67
Figure 36 : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du dôme de Glenwood échantillonnées par Genna et al. (2011).....	69
Figure 37 : Boîte à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Genna et al. (2011).....	70
Figure 38 : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de Kristineberg échantillonnées par Hannigton et al. (2003) et Barrett et al. (2005).....	71
Figure 39 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	72
Figure 40 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de New Inscro échantillonnées par Liaghat et MacLean (1995).....	74
Figure 41 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	75
Figure 42 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c), diagramme Si (d) et diagramme Ca (e) pour les roches du VMS de Persévérance.....	77
Figure 43 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	78

Figure 44 : Diagramme général (a), diagramme CO <sub>2</sub> (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du VMS de Neves Corvo échantillonnées par Relvas et al. (2006).....	80
Figure 45 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	81
Figure 46 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Sturgeon Lake échantillonnées par Franklin et al. (1991).....	82
Figure 47 : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme Si (c) et diagramme FeMg (d) pour les roches du VMS de Montauban échantillonnées par Bernier et MacLean (1993), Prabhu et Webber (1984).....	84
Figure 48 : Boîtes à moustaches et diagramme binaire comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	84
Figure 49 : Diagramme général (a) et diagramme FeMg (b) pour les roches du VMS de Hougthousean échantillonnées par Zheng et al. (2011).....	86
Figure 50 : a-b) Boîte à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Gu et al. (2007); c-d) Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	87
Figure 51 : a-c) Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS du bloc d'Arunta échantillonnées par Warren et Shaw (1985); d) Boîte à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Warren et Shaw (1985).....	89
Figure 52 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Winston Lake échantillonnées par Osterberg (1993) et classées selon le type d'altération.....	91
Figure 53 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Winston Lake échantillonnées par Osterberg (1993) et classées selon la lithologie de leurs protolithes.....	92
Figure 54 : Diagramme binaire comparant les altérations FeMg quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ». ....	92
Figure 55 : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches des VMS de Déri échantillonnées par Tiwary et Deb (1997). ....	94
Figure 56 : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices Fe et Mg calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Tiwary et Deb (1997).....	95
Figure 57 : Diagramme binaire TAS comparant la classification des roches établie par Virginia sur la base du rapport Zr/Ti à la composition des précurseurs modélisés par la méthode des bilans de masse par modélisation des précurseurs. Ces roches appartiennent à une lignée sub-alcaline, probablement calco-alcaline d'après le contexte géodynamique. ....	96
Figure 58 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia.....	97
Figure 59 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c), diagramme Si (d) et diagramme CO <sub>2</sub> (e) pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia. ..	100
Figure 60 : Diagramme NaK pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia, représentant les valeurs des bilans de masse pour les gains/pertes en Na-K (a), et les valeurs des indices Na et K. ....	101
Figure 61 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	101



Figure 62 : Diagramme général (a), diagramme Si (b), diagramme NaK (c), diagramme FeMg (d) et diagramme Ca (e) pour les roches du dépôt de Comptois échantillonnées par Dupré (2010).....	104
Figure 63 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	105
Figure 64 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du gisement d'or de Challenger échantillonnées par McFarlane et al. (2007), Tomkins and Mavrogenes (2002). .....	107
Figure 65 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	107
Figure 66 : Diagramme général pour les roches du gisement d'or de Hemlo échantillonnées par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985) et Heiligmann et al (2008).....	109
Figure 67 : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches du gisement d'or de Hemlo échantillonnées par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985) et Heiligmann et al (2008).....	110
Figure 68 : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985), Heiligmann et al. (2008). .....	111
Figure 69 : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du gisement Kwyjibo échantillonnées par Clark et al. (2005), SIGEOM et SOQUEM. ....	114
Figure 70 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	115
Figure 71 : Diagramme binaire comparant les indices Fe et Ca calculés grâce à la méthode « HautGrade ».....	115
Figure 72 : Diagramme binaire comparant la minéralogie de 10 échantillons décrite en lames minces (SOQUEM – communication personnelle de Serge Perreault en 2014) aux proportions des minéraux normatifs du faciès 7AMP700.....	116
Figure 73 : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du VMS de Hackett River échantillonnées par Glencore. ....	119
Figure 74 : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des protolithes proposée dans la base de données de Glencore.....	120
Figure 75 : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du porphyre de Taschereau-Launay échantillonnées par Jébrak et Doucet (2002). ....	122
Figure 76 : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».....	123
Figure A-1 : Représentation schématique de divers types d'altération (chloritisation, biotitisation, altération Na-K) sur les six diagrammes d'altération.	8
Figure A-2 : Représentation schématique de divers types d'altération acides sur les six diagrammes d'altération.	2
Figure A-3 : Représentation schématique de divers types d'altération (altérations Na-Ca et propylitique, épidotisation, carbonatation) sur les six diagrammes d'altération.	3
Figure A-4: Représentation schématique d'altération de type skarn sur les six diagrammes d'altération.	4

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Liste des dépôts et des données sources de la base de données des roches altérées. ....	5
Tableau 2 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	62
Tableau 3 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	65
Tableau 4 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	68
Tableau 5 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	71
Tableau 6 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	73
Tableau 7 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	76
Tableau 8 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	79
Tableau 9 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	83
Tableau 10 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	86
Tableau 11 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	89
Tableau 12 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	91
Tableau 13 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	94
Tableau 14 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	99
Tableau 15 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	103
Tableau 16 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	106
Tableau 17 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	109
Tableau 18 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	113
Tableau 19 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	118
Tableau 20 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération. ....	121
Tableau 21 : Techniques recommandées pour quantifier les différents types d'altérations. ....	134

---

## 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

---

La prospection dans des terrains de haut grade métamorphique est confrontée à de nombreux défis. L'un de ces défis concerne la reconnaissance des unités lithologiques et de leur minéralogie particulière. Les espèces minérales présentes dans les assemblages de haut-grade sont moins habituelles que celles reconnues en terrain de bas grade et pour lesquels les modèles d'exploration sont généralement bien établis. Si l'identification des protolithes est un enjeu, la reconnaissance des altérations hydrothermales (c.-à-d. l'empreinte de plusieurs types de gisement), l'est également. En contexte métamorphique, les roches altérées développent des paragenèses spécifiques qu'il faut pouvoir reconnaître et interpréter dans un contexte d'exploration.

L'objectif de ce travail est double :

- procurer une méthode permettant d'identifier et de quantifier l'altération hydrothermale dans des roches de tous grades, à partir des éléments majeurs (c.-à-d. que la méthode sera utilisable même si l'analyse des éléments traces n'est pas disponible);
- produire un corpus des minéraux caractéristiques des altérations Si, C, Fe, Mg, Na, K et Ca à différents grades métamorphiques.

Le projet 2013-04 a permis de mettre en place un calcul normatif pour les minéraux de haut grade métamorphique (phase I; Mathieu, 2014). Le présent projet a pour objectif de proposer des diagrammes et des indices pour faciliter l'identification et la quantification des altérations hydrothermales subies par les roches de haut grade métamorphique.

Après avoir présenté les diagrammes définis pendant ce projet et compilé les minéraux et assemblages typiques des différentes roches altérées et fraîches, des indices d'altération seront proposés. Ensuite, plusieurs diagrammes et indices seront testés sur de nombreux cas d'étude.

---

## 2 REPRÉSENTER L'ALTÉRATION GRAPHIQUEMENT

---

Un calcul normatif produit un grand nombre de données. Ces données sont multiples : 1) présence ou absence d'une phase; 2) proportion des phases présentes; et 3) assemblages de phases. Une telle diversité de données ne peut pas être interprétée avec des méthodes statistiques simples (boîtes à moustaches ou autres).

Pour cette raison, le premier objectif du projet est de traduire les données types de phase, mode et paragenèse en un point unique pouvant être représenté graphiquement. Le point ainsi obtenu pourra être facilement comparé à d'autres points et ainsi faciliter l'interprétation des bases de données de grandes tailles.

Les diagrammes proposés sont au nombre de six :

- diagramme général – représentant tous les types d'altérations;
- diagramme CO<sub>2</sub> – pour la carbonatation;
- diagramme Ca – pour l'altération Ca;
- diagramme FeMg – pour la chloritisation, et tous autres ajouts de Fe et/ou Mg à la roche;
- diagramme NaK – pour la séricitisation, et tous autres ajouts importants de Na et/ou K;
- diagramme Si – pour la silicification.

Ces diagrammes sont tous adaptés ou repris 17 fois, pour chacun des 17 faciès de la norme HautGrade ou CONSONORM\_HG (Mathieu, 2014; Mathieu et al., 2016) et 3 fois pour chacun des 3 faciès de la norme Consorem, BasGrade ou CONSONORM\_LG (Trépanier, 2011; Trépanier et al., 2015). Ces adaptations se font selon un même modèle de diagramme, mais en tenant compte minéraux particuliers à chacun des faciès modélisés par les normes.

Les axes des différents de diagrammes ont la structure suivante :

- les axes sont des rapports, ce qui permet une dispersion des points entre 0 et 1. Les diagrammes ont donc tous la même échelle;
- le dénominateur de ces rapports correspond à la somme de tous les minéraux représentés, ce qui permet de contraindre la valeur des axes à  $\leq 1$ ;
- le numérateur de ces rapports est la somme de tous les minéraux représentés qui sont chacun multipliés par un facteur allant de 0 à 1, ce qui permet de répartir les minéraux sur le diagramme.

Aussi, dans ce rapport, il sera fait mention des faciès des normes HautGrade et BasGrade. Ces faciès ont les noms suivants :

- Norme BasGrade :
  - SV (Schistes verts) : faciès SV350 (2,5 kbar, 350°C) et SV450 (2,5 kbar, 450°C);
  - AMP (Amphibolites) : AMP575 (2 kbar, 575°C).

- Norme HautGrade :
  - SV (Schistes verts) : faciès 5SV400 (5 kbar, 400°C);
  - SB (Schistes bleus) : faciès 5SB450 et 10SB350, pour 5 kbar et 10 kbar, et 450°C et 350°C;
  - AMP (Amphibolites) : 3AMP675, 4AMP600, 5AMP670, 6AMP600, 7AMP500, 7AMP600, 7AMP700, 10AMP700, pour 3 kbar, 4 kbar, 5 kbar, 6 kbar, 7 kbar, 7 kbar, 6,5 kbar, et 10 kbar, et 675°C, 600°C, 670°C, 600°C, 500°C, 600°C, 700°C, et 700°C.

## 2.1 Bases de données

Avant de présenter les diagrammes, deux bases de données, une pour les roches fraîches (magmatiques et sédimentaires) et la seconde pour des roches altérées par des fluides hydrothermaux, sont présentées. Ces données ont permis de tester la pertinence des différents diagrammes proposés et sont abondamment représentées ci-dessous.

Dans cette section, on utilisera une base de données de roches fraîches afin de positionner les principaux protolithes sur les diagrammes, ainsi qu'une base de données de roches altérées pour positionner les différentes altérations. Notez que ces roches altérées sont classées par gisements et présentées individuellement dans la dernière partie de ce rapport (cf. section 4).

### 2.1.1 Base de données des roches fraîches

La base de données des roches fraîches comprend des données des analyses de roches magmatiques du GEOROC, et des données de roches sédimentaires et de sédiments provenant de différentes sources : SedDB, USGS Alaska et plusieurs turbidites du Supérieur du SIGEOM compilées à l'occasion du projet Consorem 2009-09 (Longuépée et Trépanier, 2009).

Ces bases de données ont été obtenues de la façon suivante :

- téléchargement ou compilation des données provenant des différentes sources. Seules les données ayant au moins les résultats analytiques pour les éléments majeurs ont été conservées;
- diverses opérations ont permis d'harmoniser les champs des différentes bases de données et de les réunir dans une base de données unique;
- lorsque la PAF (Perte Au Feu) est absente, elle est recalculée à partir des volatils analysés. Si FeO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ne sont pas analysés, ils sont estimés à partir de Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub>, en utilisant des rapports Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> (%pds) allant de 0,2 (roches mafiques) à 0,4 (roches felsiques), ou égal à 0 (sédiments riches en carbonates) ou à 0,5 (autres types de sédiments);
- re-calcul du TOTAL lorsqu'il est absent, et suppression des roches ayant des totaux >110 ou <90. Pour les sédiments (cf. sources SedDB et USGS Alaska), il n'y a ni PAF ni volatils ni TOTAL analysés. Pour ces données, le TOTAL a été fixé à 100 %pds, et la PAF a été estimée en soustrayant la somme des oxydes à ce TOTAL;
- pour les données du GEOROC : les noms des roches du GEOROC ont été comparés à la position des analyses dans le diagramme R1-R2 (De La Roche et al.,

1980). Seules les données pour lesquelles le nom GEOROC correspondait à celui déduit du diagramme R1-R2 ont été conservées dans la base de données. Notez que les roches intrusives et extrusives sont regroupées au sein des mêmes groupes, car les différences chimiques sont faibles et locales entre ces deux types de roches;

- les roches ont été classées en différents groupes. Les roches sédimentaires ou les sédiments sont regroupés en dunes, turbidites, sédiments de lac, etc. Les roches magmatiques sont regroupées en 37 groupes (cf. groupes basalte-gabbro, rhyolite-granite, etc.);
- la base de données obtenue contient 24 638 résultats analytiques correspondant à des sédiments et roches sédimentaires auxquels s'ajoutent 80 134 résultats analytiques correspondant à des roches magmatiques.

La base de données des roches fraîches contient trop d'entrées pour être facilement manipulable. La plupart de ces analyses sont d'ailleurs redondantes (d'un point de vue chimique), ce qui rend cette base de données inutilement grande.

Dans cette section, la composition chimique la plus typique des différents groupes de roches sera déduite afin de pouvoir être représentée sur les diagrammes proposés ci-dessous. Nous nous intéressons aux valeurs médianes, et non aux valeurs marginales qui seront retirées des différents groupes. Pour le groupe gabbro-basalte par exemple, la procédure utilisée est la suivante :

- calcul de la médiane pour chacun des oxydes majeurs;
- pour chaque oxyde, comme  $\text{SiO}_2$  par exemple, conservation des données égales à la médiane de  $\text{SiO}_2 \pm 1$  écart type;
- en répétant cette opération sur chaque oxyde, un peu plus de 10% des données du groupe gabbro-basalte sont conservées;
- en répétant ces opérations sur chaque groupe, on obtient une base de données contenant 1 214 échantillons de sédiments et roches sédimentaires, et 11 125 échantillons de roches magmatiques.

La base de données finale servira de référence. Pour la suite de cette section, toutes les normes ont été calculées sur ces données avec  $\text{CO}_2$  estimé de façon normative.

### **2.1.2 Base de données des roches altérées**

La base de données des roches altérées par des fluides hydrothermaux regroupe des analyses provenant de différents types de gisements partout dans le monde. Ces données ont été, pour la plupart, obtenues à partir d'articles scientifiques. Seules les données pour lesquelles les auteurs des articles avaient interprété le type d'altération ont été intégrées à cette base de données. La base de données des roches altérées contient 1 078 entrées (cf. **tableau 1**).

Les données de cette base ont été harmonisées: 1) calcul de TOTAL et PAF lorsqu'absent ; 2) modélisation de FeO et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lorsque seul  $\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  est disponible. Les différentes normes ont ensuite été calculées avec  $\text{CO}_2$  estimé de façon normative.

Le lecteur est reporté à la section 4 de ce rapport pour une étude plus approfondie de chacun des gisements de la base de données des roches altérées; i.e. description des précurseurs frais et des types d'altérations.

Tableau 1 : Liste des dépôts et des données sources de la base de données des roches altérées.

Référence	Type	Dépôt	n
Bernier et MacLean (1993)	VMS	Montauban, Grenville	25
Prabhu et Webber (1984)	VMS	Montauban, Grenville	5
CONSOREM (Nabil, 2005)	VMS	Casa-Berardi	15
Lafrance (2009)	VMS	Noranda camp	135
Nadeau, communication personnelle (Longuépée et Trépanier, 2009)	VMS	Montauban, Grenville	29
Galley et al. (2000)	VMS	Ansil, Rouyn-Noranda	5
Hannigton et al. (2003)	VMS	Kristineberg, Sweden	8
Liaghat et MacLean (1995)	VMS	New Insko, Noranda	27
Franklin et al. (1991)	VMS	Sturgeon Lake, Ontario	15
Osterberg (1993)	VMS	Winston Lake	219
Relvas et al. (2006)	VMS	Neves Corvo, IPB, Espagne	20
Tiwary et Deb (1997)	VMS	Deri VMS	10
Warren et Shaw 1985	VMS	Arunta block, Australie	30
Zheng et al. (2011)	VMS	Hongtoushan, Chine	51
Serge Perreault (SOQUEM), communication personnelle	IOCG	Kwyjibo	8
SIGEOM, 2014	IOCG	Kwyjibo	48
Clark et al. (2005)	IOCG	Kwyjibo	9
Bigot (2012)	Au	Syénite altérée de Beattie	39
Bourdeau (2013) - compilation	Au	Syénite fraîche de Beattie	7
Tomkins et Mavrogenes (2002)	Au	Challenger, Australie	12
Dupré (2010)	Au	Comtois, Abitibi	68
Martin (2012)	Au	Young Davidson (syénite)	231
McFarlane et al. (2007)	Au	Challenger, Australie	62

## 2.2 Diagramme général

Le diagramme général permet de représenter un ensemble d'échantillons et de déduire le ou les types d'altérations les plus intenses subies par ces roches. Si les échantillons n'ont subi qu'un seul type d'altération, alors celle-ci ressortira clairement. Dans les cas plus rares où les échantillons ont subi 2 ou 3 types d'altérations dans des proportions équivalentes, alors il sera plus difficile d'interpréter chacune de ces altérations à partir du diagramme général, et il est alors recommandé d'utiliser les diagrammes présentés ci-après.

L'intérêt du diagramme général est de dresser le portrait d'ensemble d'une population. La position et la forme d'un nuage de points, sur ce diagramme, renseignent sur l'altération principale subie par une série de données.

### 2.2.1 Répartition des minéraux sur le diagramme général

Sur le diagramme général, la position des minéraux est inspirée des champs du diagramme de Large et al. (2001) (**figure 1**). Ainsi, les minéraux ont été répartis pour que les roches faiblement altérées se positionnent au centre du diagramme général tandis que les roches altérées se positionnent à la périphérie.

Les minéraux du diagramme général sont répartis de la façon suivante (**figure 2**) :

- les minéraux communs dans les roches fraîches ont été placés en cercle au centre;
- les minéraux communs dans les roches altérées ont été placés à la périphérie;
- coin en haut à gauche : minéraux communs dans les roches riches en Ca (wollastonite ou calcite, grossulaire, etc.);
- coin en bas à gauche : minéraux communs dans les roches riches en Na (albite, etc.);
- en bas au centre : minéraux communs dans les roches riches en K (biotite, muscovite, feldspath-K);
- coin en bas à droite : minéraux communs dans les roches riches en Al (aluminosilicates);
- coin en haut à droite : minéraux communs dans les roches riches en Fe, Mg et Al (cordiérite, chlorite, grenat, etc.);
- en haut au centre : minéraux communs dans les roches riches en CO<sub>2</sub> (carbonates et graphite).



## 2.2.2 Position des roches fraîches sur le diagramme général

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes généraux (pour les 20 faciès des normes BasGrade et HautGrade; Trépanier et al., 2015; Mathieu et al., 2016), on observe des similitudes entre les répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper ces diagrammes selon les faciès suivants :

- SV350, SV450 (**figures 3-a, 4-a**);
- AMP575, 10AMP700, 6AMP600, 7AMP600, 9GRA800 (**figures 3-b, 4-b**);
- 3AMP675, 4AMP600, 5AMP670, 7AMP500, 10GRA950, 3GRA800, 4GRA750, 5GRA900, 6GRA750 (**figures 3-c, 4-c**);
- 7AMP700, 5SV400, 10SB350, 9SB450 (**figures 3-d, 4-d**)

Malgré les variations observées d'un faciès à l'autre, les roches fraîches se répartissent sur le diagramme général de la façon suivante (**figure 3**) :

- les roches magmatiques sont observées depuis le coin inférieur gauche (roches felsiques) jusqu'au centre du diagramme (roches mafiques);
- les roches magmatiques ultramafiques sont observées dans le coin supérieur droit. Leur dispersion reflète la grande variabilité chimique de ce groupe qui est très mal défini par le seul critère « roches pauvres en SiO<sub>2</sub> »;
- les sédiments clastiques sont observés au centre ou en bas au centre des diagrammes généraux, et les sédiments riches en CO<sub>2</sub> sont observés en haut au centre des diagrammes.

## 2.2.3 Position des roches altérées sur le diagramme général

La base de données des roches altérées permet de confirmer que les différents types d'altérations se répartissent comme prédit sur le diagramme général :

- altération Na : coin en bas à gauche;
- altération Ca : coin en haut à gauche à centre du diagramme;
- altération K : en bas au centre ou au centre du diagramme;
- altération Fe-Mg et Fe-Mg-K : depuis le centre vers le coin en haut à droite;
- altération Fe-CO<sub>2</sub> : au centre à en bas à gauche. Il pourrait s'agir d'altérations faibles (hématisation et carbonatation?), qui sont difficiles à caractériser avec ce diagramme seul;
- Silicification : variable, le diagramme général n'est pas adapté à ce type d'altération, car le quartz n'y est pas représenté (ni sur le diagramme ni dans le dénominateur des rapports des axes).

Le diagramme général est adapté à la discrimination des altérations fortes en Na, K, Fe-Mg, Ca et Al (cf. lessivage). Il est tout à fait adapté aux dépôts associés à des altérations intenses et bien zonées (cf. SMV par exemple). Pour des altérations moins intenses et plus complexes (cf. association de plusieurs types d'altérations dans les mêmes roches), les diagrammes présentés aux sections suivantes permettent une meilleure identification des altérations.

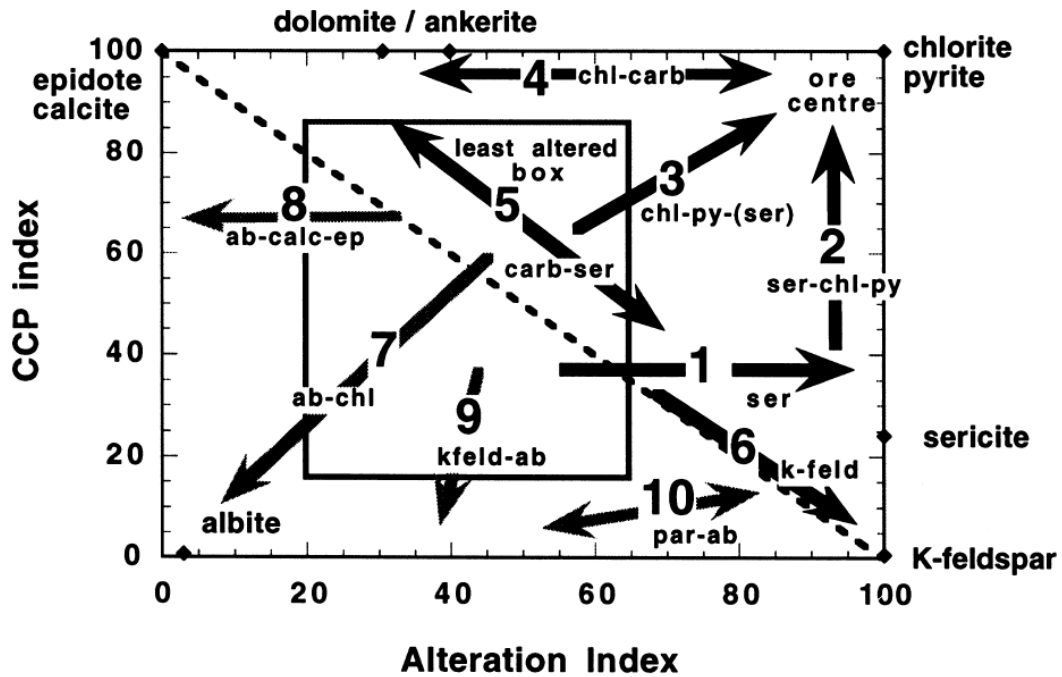


Figure 1 : Diagramme de Large et al. (2001), pour l'interprétation de l'altération à partir des éléments majeurs à l'aide de l'indice « CCP » (indice Chlorite-carbonate-pyrite) et de l'indice « Alteration » (indice Ishikawa).

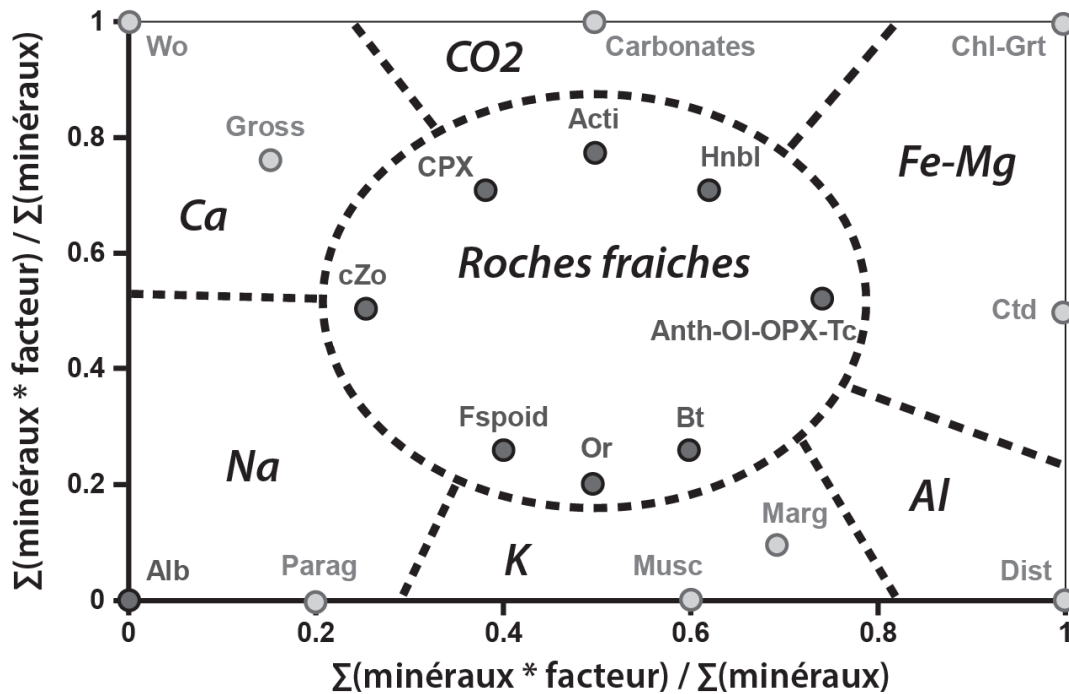
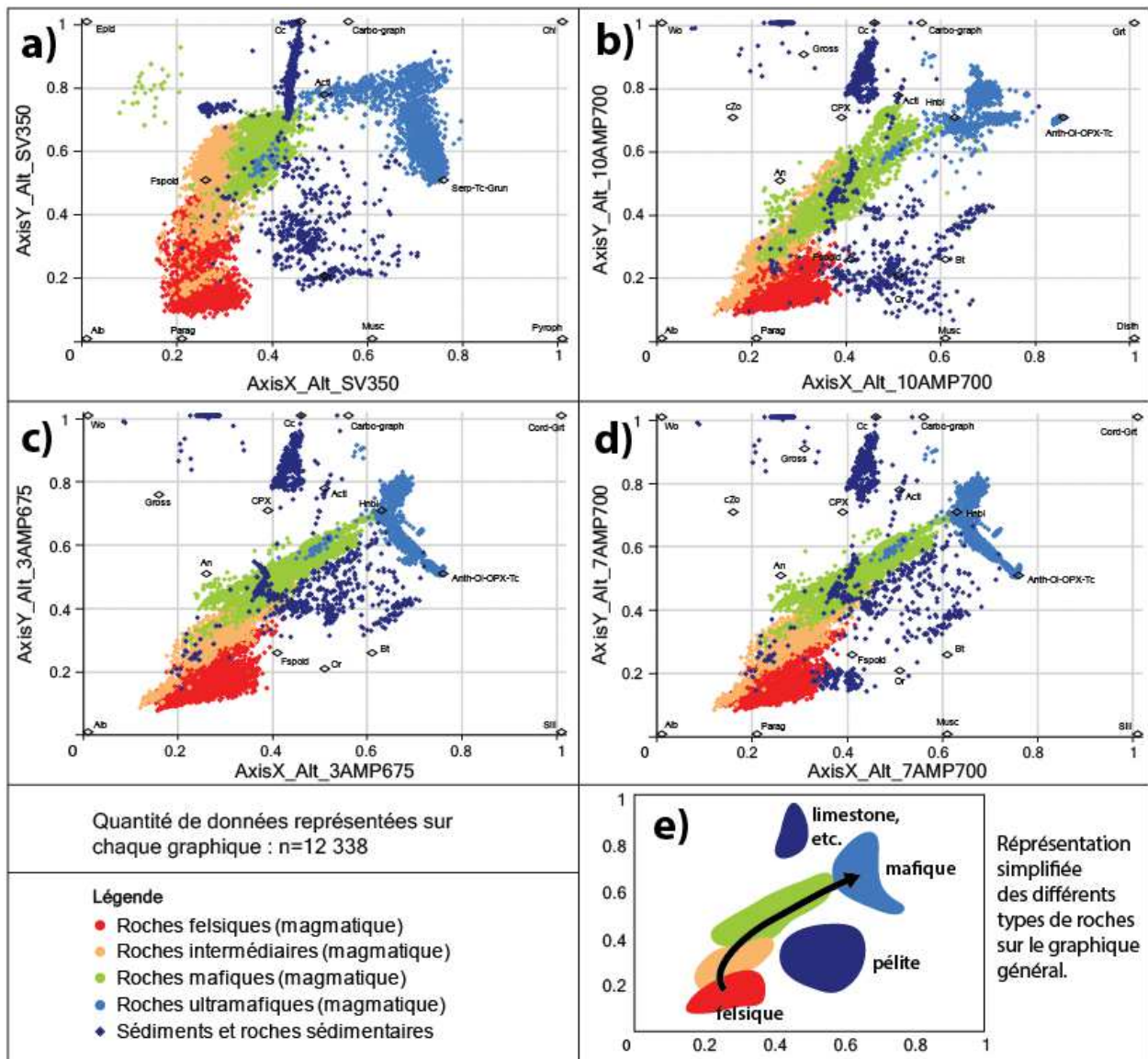
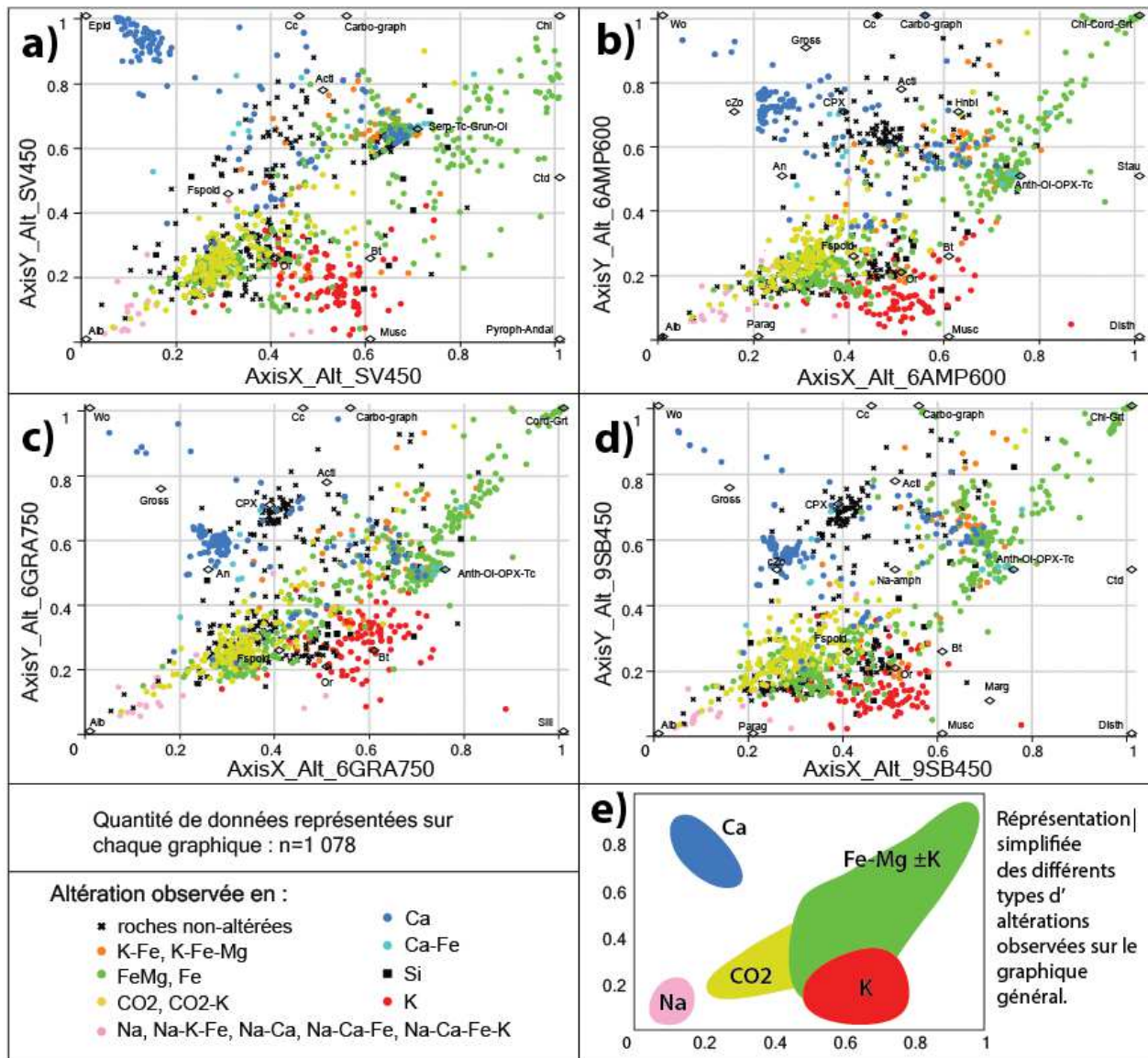


Figure 2 : Exemple de répartition des minéraux sur le diagramme général du faciès 7AMP500 de la norme HautGrade.



**Figure 3 :** Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme général.



**Figure 4 :** Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme général.

## 2.3 Diagramme CO<sub>2</sub>

### 2.3.1 Répartition des minéraux sur le diagramme CO<sub>2</sub>

Le diagramme CO<sub>2</sub> a été conçu pour faciliter l'identification de la carbonatation et du type de carbonates présents (cf. carbonates à Ca, Fe ou Mg), qui peut être une donnée importante lorsque l'on souhaite interpréter le degré de la carbonatation (cf. Trépanier 2008).

Le diagramme CO<sub>2</sub> est basé sur le même principe que celui sur lequel l'indice ALT\_CARBS\_SV350 de la norme BasGrade est basé (Trépanier 2011; Trépanier et al., 2015), qui avait lui-même été déduit de l'indice IPAF de NORMAT (Piché et Jébrak, 2004).

Ces indices sont un rapport entre tous les carbonates et tous les autres minéraux à Ca-Mg-Fe des différentes normes :

- ALT\_CARBS\_SV350 : (Calcite + Ankérite + Dolomite + Magnésite + Sidérite) / (Tous Ca-Mg-Fe) (Trépanier, 2011; Trépanier et al., 2015).

Sur le diagramme CO<sub>2</sub>, le total des minéraux Fe-Mg-Ca est positionné dans le coin inférieur gauche, et les carbonates ainsi que le graphite sont répartis en périphérie, dans les coins non occupés par les minéraux Ca-Fe-Mg (**figure 5**). Le diagramme est quasiment le même pour les 20 faciès considérés, avec le graphite pouvant être présent ou absent selon les faciès.

### 2.3.2 Position des roches fraîches sur le diagramme CO<sub>2</sub>

À l'exception des turbidites du Supérieur, la base de données des roches fraîches ne contient que des roches non-métamorphisées. Le métamorphisme étant un processus isochimique pour la plupart des éléments, exception faite des volatils (cf. les roches perdent d'autant plus de CO<sub>2</sub> lorsque la température augmente qu'elles en contenaient peu au départ), il ne fait aucun sens de représenter les roches fraîches sur les diagrammes CO<sub>2</sub> des faciès de haut grade. Ainsi, seul le diagramme SV350 est présenté dans cette section (**figure 6**).

Ce diagramme montre que les roches magmatiques felsiques et ultramafiques contiennent suffisamment de volatils pour que la norme en déduise des carbonates (**figure 6**). Pour les roches felsiques, ces carbonates normatifs pourraient refléter une mauvaise estimation de FeO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui, en faussant le calcul des oxydes, de la PAF (« Perte au feu ») et des volatiles pourrait conduire à une mauvaise estimation de la quantité de carbonates. Pour les roches ultramafiques, certaines contiennent de grandes quantités de volatiles, parfois exprimées sous la forme de carbonates magmatiques (cf. roches alcalines en particulier).

Les sédiments carbonatés sont aussi riches en carbonates normatifs de type calcite et dolomite principalement. Notez que ceci est vrai pour tous les faciès calculés (non présentés ici), sauf pour les faciès des granulites, pour lesquels la dolomite cède le pas sur le graphite.

### 2.3.3 Position des roches altérées sur le diagramme CO<sub>2</sub>

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes CO<sub>2</sub> (pour les 20 faciès considérés), on observe des similitudes entre les

répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper les diagrammes CO<sub>2</sub> selon les faciès suivants :

- SV350 et SV450 (**figures 7-a, 8-a**);
- AMP575, répartition particulière qui montre une différence de calcul des carbonates entre les normes HautGrade et BasGrade (**figures 7-b, 8-b**);
- 5GRA900 et 3GRA800 (**figures 7-c, 8-c**);
- 5SV400, 9SB450, 10SB350 et 7AMP500 (**figures 7-d, 8-d**);
- Tous les autres faciès (**figures 7-e, 8-e**).

Lorsque l'on observe la répartition des altérations observées par les auteurs qui ont publié les différents types de données, on peut faire les observations suivantes (**figure 7**) :

- la moitié supérieure gauche du diagramme, cf. la partie située au-dessus de la ligne  $x=y$  environ, est occupée par des roches ayant des altérations en CO<sub>2</sub> observées. Ces roches riches en carbonates contiennent calcite, magnésite, ankérite et dolomite normatives principalement (cf. Ca- et Ca-Mg-carbonates);
- la partie inférieure droite du diagramme CO<sub>2</sub> est occupée par des roches ayant des altérations observées en Fe, Mg et/ou K. Les carbonates normatifs sont principalement la sidérite et l'ankérite, qui reflètent la richesse en Fe-Mg de ces roches. Il est possible que ces roches très altérées contiennent des carbonates non-observés par des auteurs dont l'attention était accaparée par les fortes altérations en K-Fe-Mg.

L'indice ALT\_CARBS\_SV350 de la norme BasGrade (Trépanier 2011) a ensuite été calculé pour la base de données des roches altérées. Il est observé ainsi que (**figure 8**) :

- les diagrammes SV350 et SV450 reflètent parfaitement cet indice (**figure 8-a**);
- le diagramme AMP575 reflète moins bien cet indice, car seule la calcite est calculée pour ce faciès (**figure 8-b**);
- les diagrammes de la norme HautGrade (**figures 8-c, -d, -e**) reflètent relativement bien cet indice. Cependant, la norme HautGrade (Mathieu et al., 2016) a une plus grande tendance à calculer des carbonates à Fe-Mg, même pour des roches identifiées comme faiblement carbonatées par l'indice ALT\_CARBS\_SV350. Ceci reflète des différences dans le calcul des carbonates entre les normes BasGrade et HautGrade (cf. Trépanier, 2011; Mathieu, 2014).

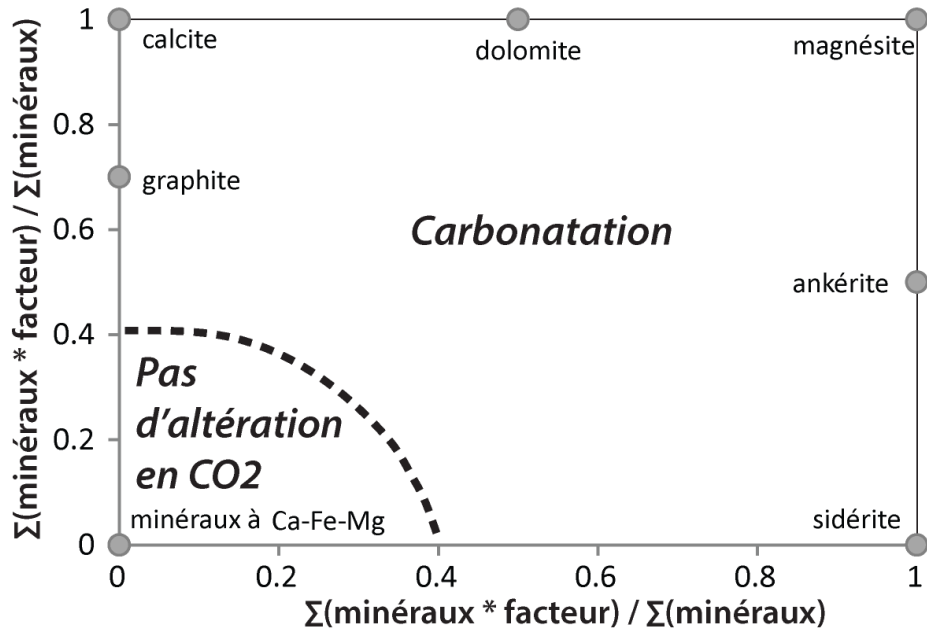


Figure 5 : distribution des minéraux du diagramme CO<sub>2</sub>.

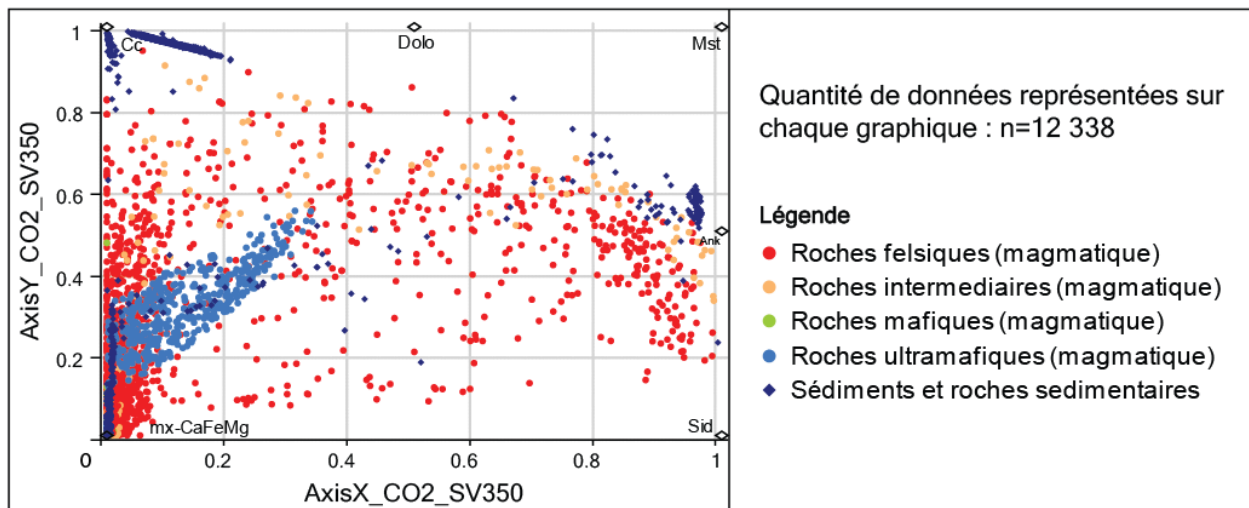
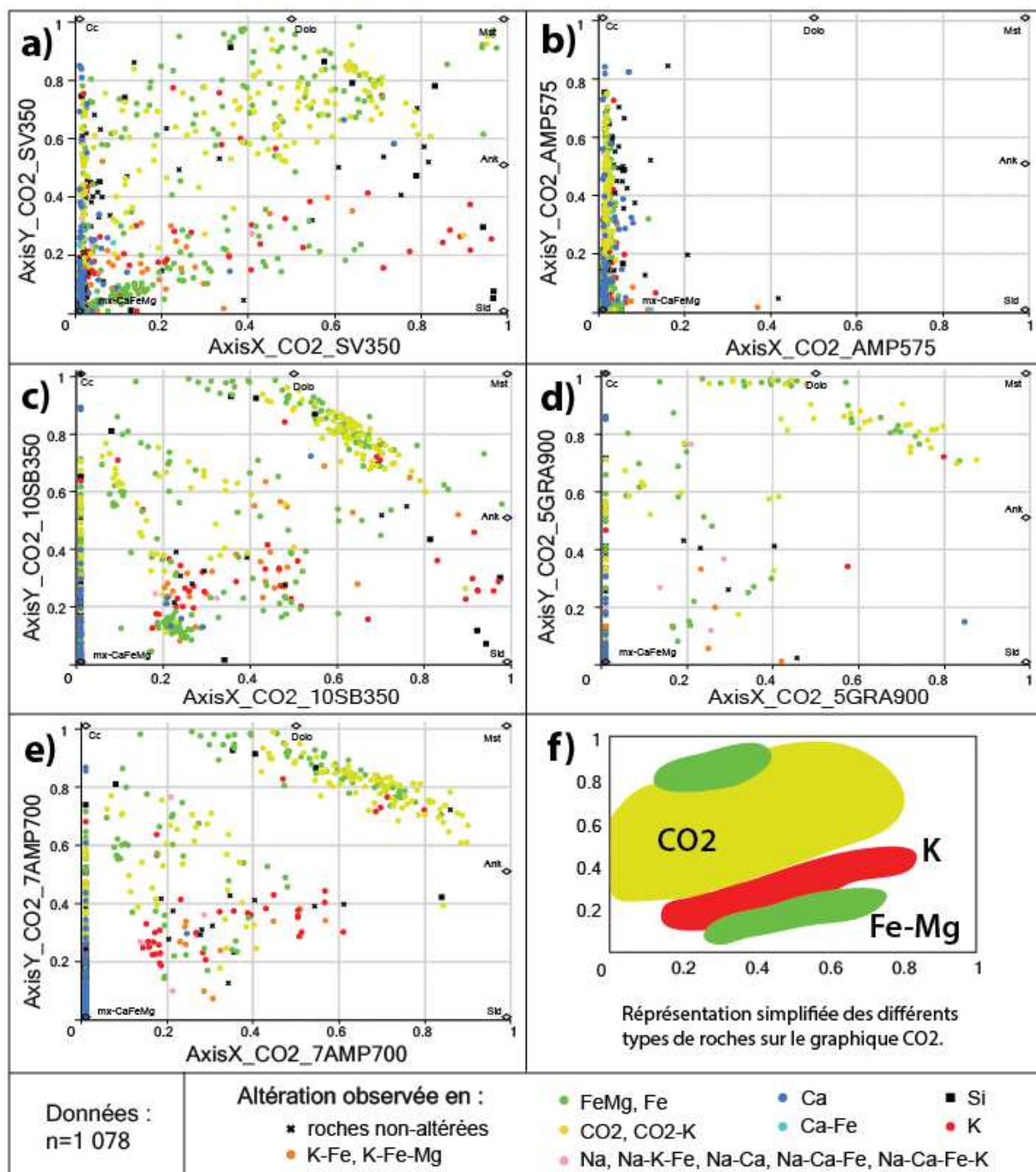
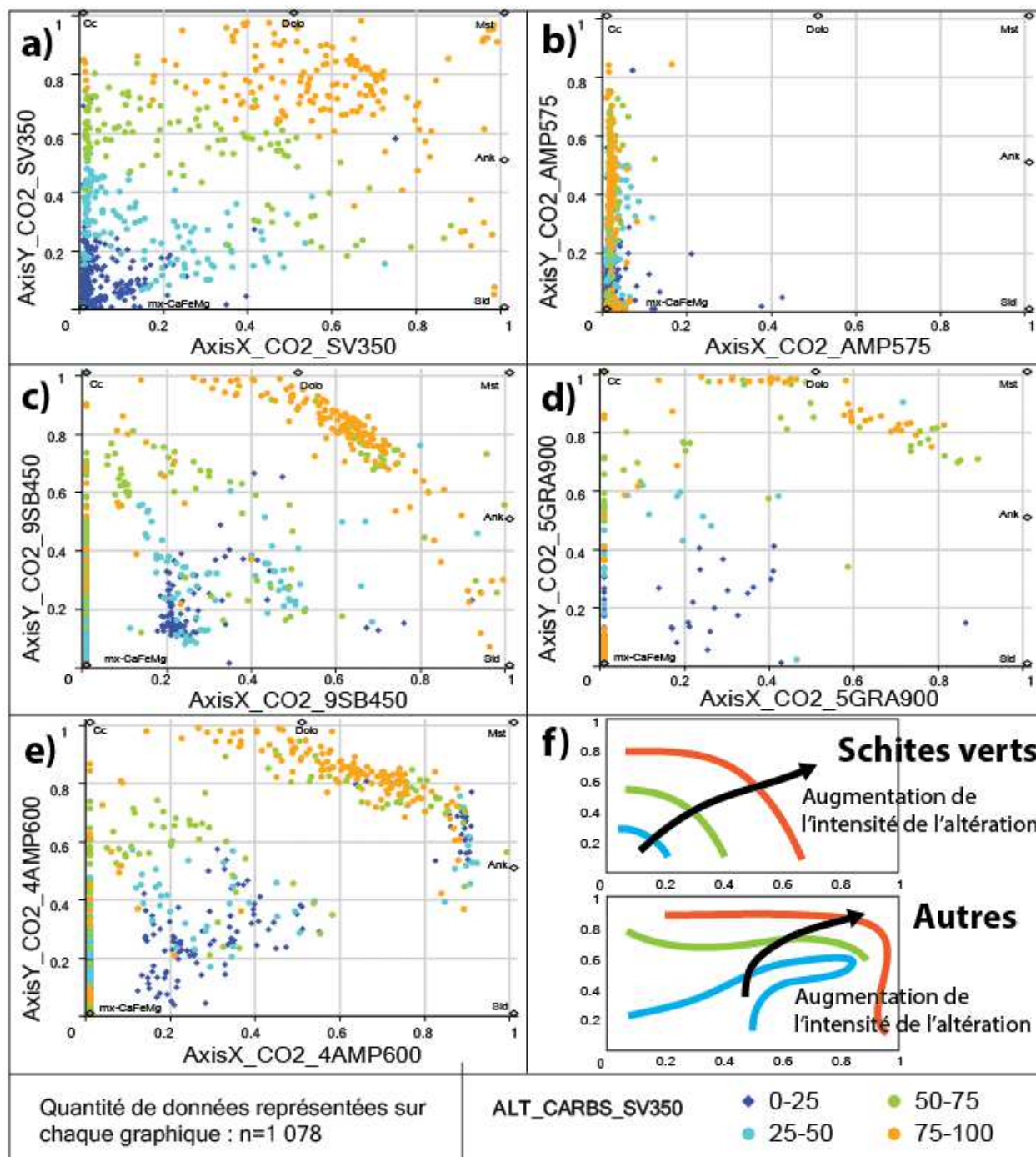


Figure 6 : diagramme CO<sub>2</sub> pour le faciès SV350, représentant la base de données des roches fraîches.



**Figure 7 :** Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme CO<sub>2</sub>. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.





**Figure 8 :** Distribution des roches de la base de données altérée sur le diagramme CO<sub>2</sub>. Le code couleur correspond à l'indice ALT\_CARBS\_SV350.

## 2.4 Diagramme Ca

### 2.4.1 Répartition des minéraux sur le diagramme Ca

Le diagramme Ca est similaire au diagramme CO<sub>2</sub>, en cela qu'il compare les proportions de tous les minéraux contenant du Ca aux minéraux n'en contenant pas. Ainsi, les minéraux à Ca sont positionnés en périphérie du diagramme, sur tout le diagramme à l'exception du coin inférieur gauche. Les silicates ne contenant pas de Ca, quant à eux, sont regroupés dans le coin inférieur gauche du diagramme (**figure 9**).

Ainsi, les roches non altérées en Ca se concentreront dans le coin inférieur gauche du diagramme, tandis que les roches altérées en Ca se répartiront sur l'ensemble du diagramme.

Les diagrammes, Ca varient d'un faciès à l'autre (cf. **figure 9**). Ces diagrammes représentent les minéraux Ca suivants :

- calcite, pour les faciès de bas grade uniquement (**figure 9-a**);
- wollastonite, grossulaire, margarite, épidote : minéraux peu fréquents dans les roches fraîches, et qui sont donc de bons marqueurs de l'altération Ca (**figure 9-b**);
- clinopyroxène, actinote, hornblende, anorthite, lawsonite, clinozoisite : minéraux qui reflètent plus souvent le caractère mafique d'un magma qu'une véritable altération en Ca.

### 2.4.2 Position des roches fraîches sur le diagramme Ca

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes Ca (pour les 20 faciès considérés), on observe des similitudes entre les répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper les diagrammes Ca selon les faciès suivants :

- SV350 et SV450 (**figure 10-a**);
- 7AMP500, 10SB350, 9SB450 et 5SV400 (**figure 10-b**);
- 3GRA800, 5GRA900 et 6GRA750 (**figure 10-c**);
- Tous les autres faciès (**figure 10-d**).

Pour les faciès de haut grade, les roches fraîches se concentrent dans le coin inférieur gauche du diagramme Ca, comme prévu (cf. section 2.4.1). Les roches magmatiques felsiques se concentrent à proximité du point ( $x=0, y=0$ ), car ces roches sont naturellement moins riches en Ca que les roches magmatiques mafiques.

Pour les faciès SV350 et SV450, la répartition des roches fraîches est relativement similaire à leurs distributions sur les diagrammes de plus haut grade. Les roches felsiques se concentrent à proximité du point de coordonnées (0, 0), et les roches mafiques à ultramafiques se concentrent dans la partie gauche centrale du diagramme.

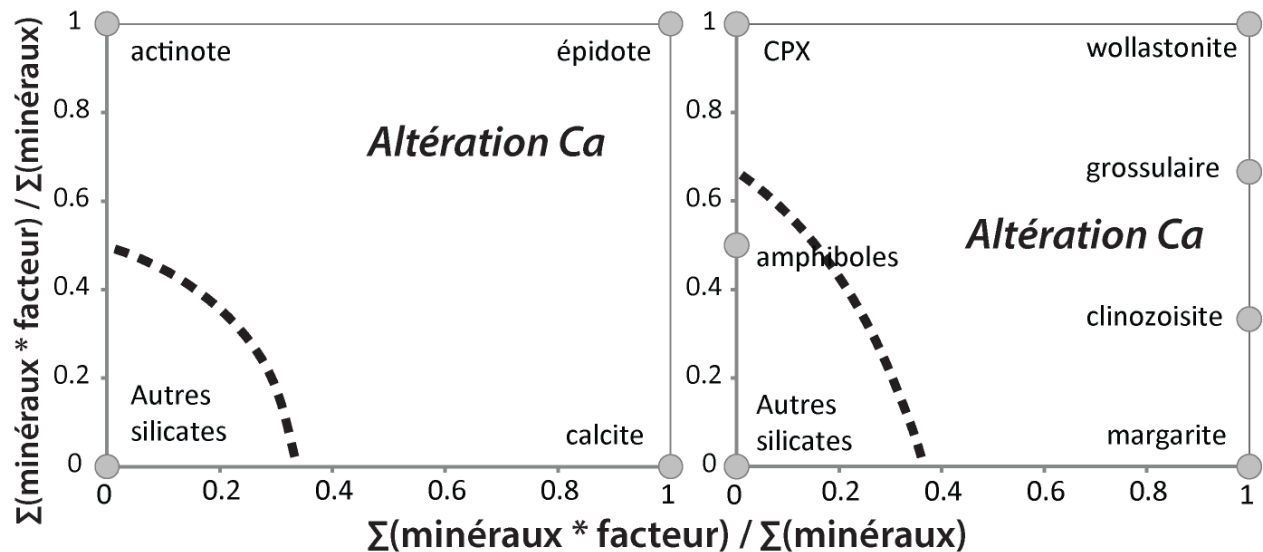
Pour tous les faciès, les sédiments riches en carbonates ont tendance à se rapprocher du pôle calcite, ou du pôle wollastonite à plus haut grade. Il sera donc difficile de distinguer une altération en Ca dans ce type de roches.

### 2.4.3 Position des roches altérées sur le diagramme Ca

Lorsque l'on s'intéresse à la répartition des altérations observées par les auteurs qui ont publié les différents types de données, on peut faire les observations suivantes (**figure 11**) :

- dans des conditions de faible grade métamorphique (cf. faciès SV350 et SV450), l'altération en Ca est caractérisée par la formation de grandes quantités d'épidotes, et les points se rapprochent ainsi du pôle épidote de coordonnées (1; 1) sur ces diagrammes (**figure 11-a**);
- à plus haut grade, l'altération Ca est marquée par la formation d'anorthite ou de lawsonite, de clinozoisite et de grossulaire principalement, avec ± de wollastonite selon les cas (**figure 11-b, -c, -d**). La wollastonite est plutôt abondante aux faciès pour lesquels le grossulaire est instable;
- dans les roches mafiques, une altération faible en Ca formera une surabondance de clinopyroxènes et d'amphiboles plutôt que de former de la wollastonite.

Le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008) a ensuite été calculé pour la base de données des roches altérées. On observe ainsi que les roches non altérées en Ca se concentrent au pôle des roches non-altérées de coordonnées (0; 0), et que les roches ayant des valeurs positives et élevées du paramètre « B\_CaO\_BM\_ABS » se répartissent sur le reste du diagramme, indiquant un bon accord entre les bilans de masse et le diagramme Ca (**figure 12**).



**Figure 9** : Répartitions des minéraux sur les diagrammes Ca des faciès SV350 (a) et 7AMP500 (b).

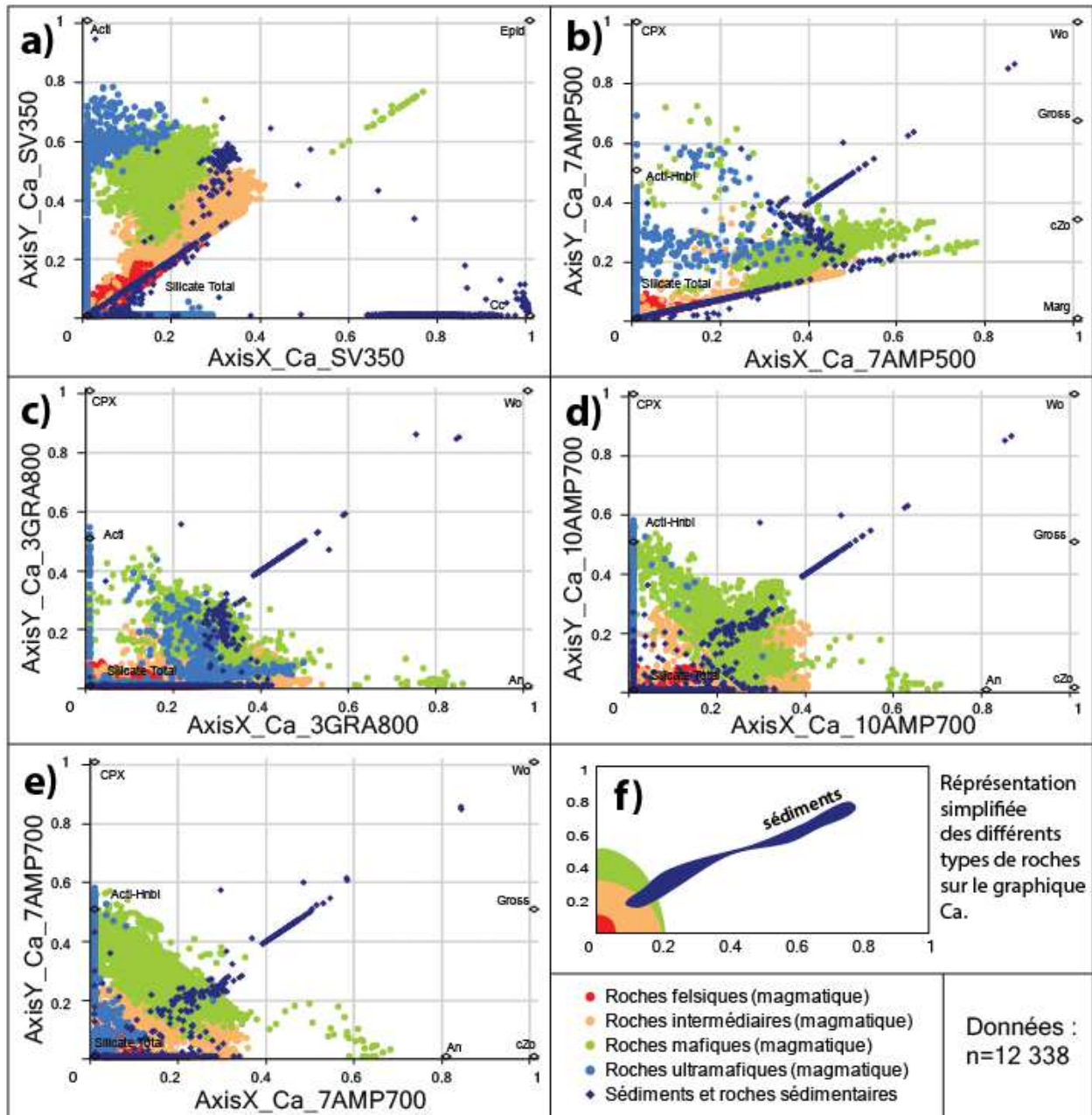
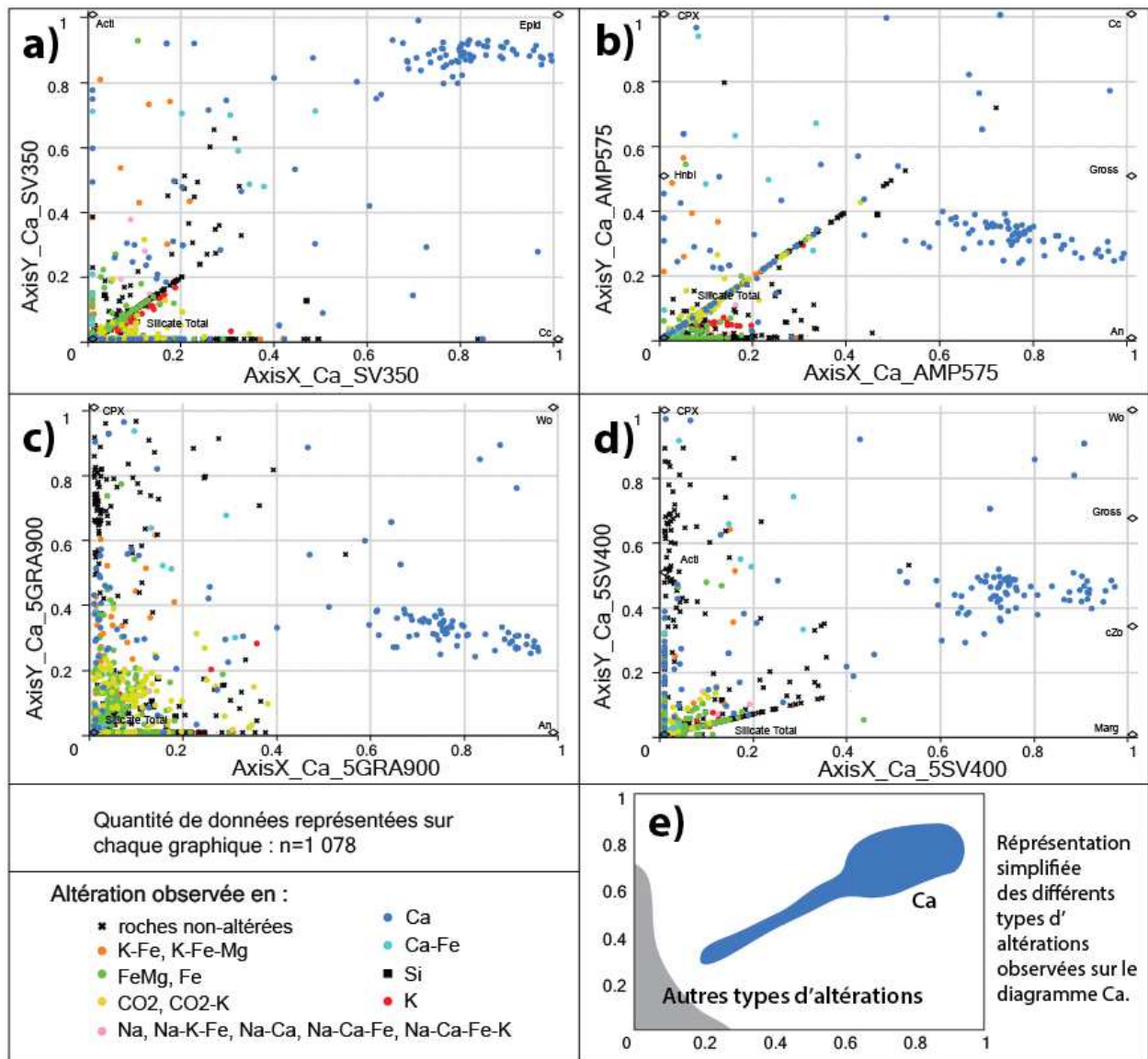
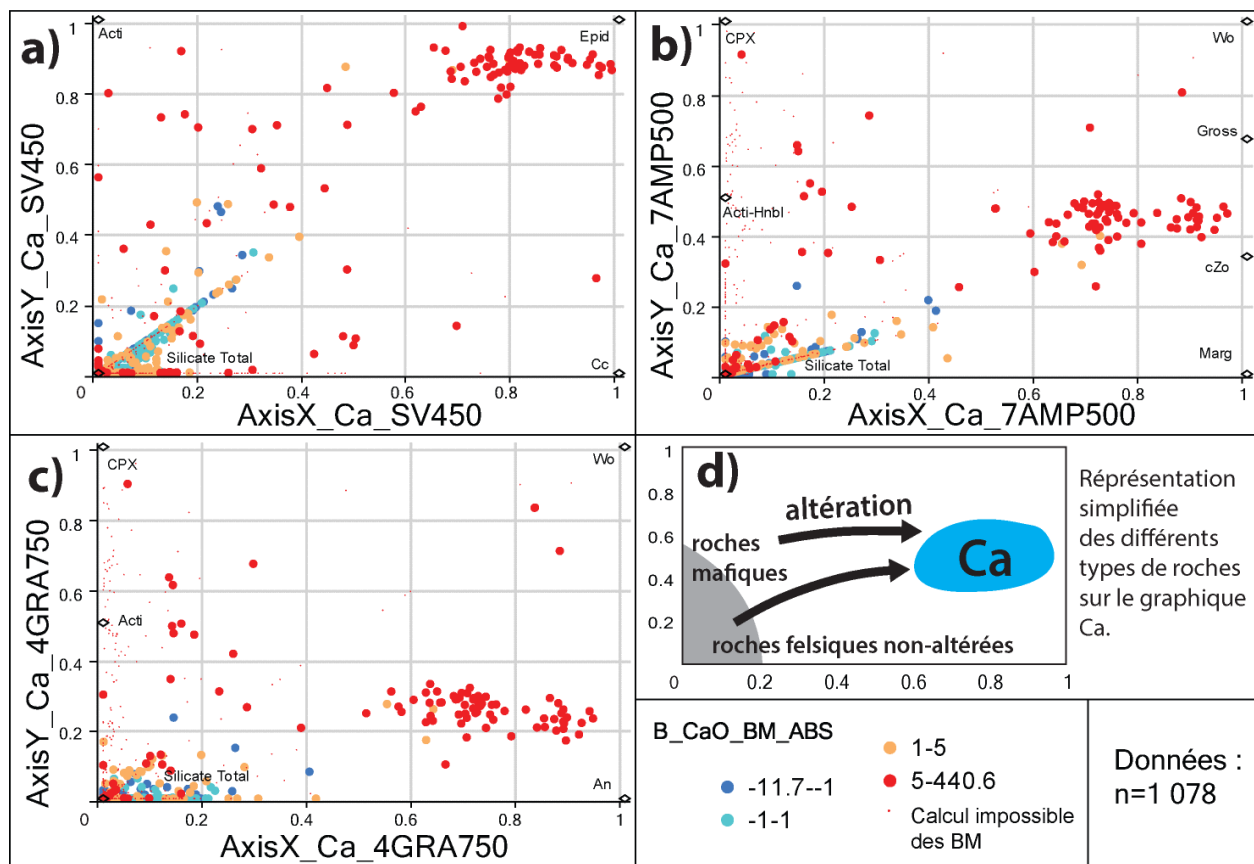


Figure 10 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme Ca.



**Figure 11** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Ca. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.



**Figure 12** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Ca. Le code couleur correspond aux gains/pertes de Ca (B\_CaO\_BM\_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).

## 2.5 Diagramme FeMg

### 2.5.1 Répartition des minéraux sur le diagramme FeMg

L'altération Fe-Mg peut correspondre à l'ajout de Fe seul, dans le cas de la formation des unités de magnétite et/ou hématite des IOCG par exemple. Plus souvent, l'altération Fe-Mg est caractérisée par un ajout de Fe et/ou Mg et une augmentation relative de la quantité de Al suite à la destruction des feldspaths. Les minéraux caractéristiques de cette altération contiennent ainsi du Fe, du Mg et de l'Al (cf. chlorite, cordiérite, grenat, etc.).

Le diagramme FeMg représente tous les minéraux des différentes normes qui contiennent de l'Al et/ou du Fe et/ou du Mg. Les minéraux communs dans les roches fraîches (cf. feldspaths, olivine, etc.) sont placés dans la moitié inférieure gauche du diagramme, afin de restreindre les roches fraîches dans cette partie du diagramme (**figure 13**).

Les minéraux plus caractéristiques des roches altérées ont été placés dans la partie supérieure droite du diagramme (**figure 13**). Le pôle d'altération maximale en Fe-Mg est situé aux coordonnées (0,8; 0,8) et les aluminosilicates en (1; 1).

Ceci permet de déterminer si l'altération est caractérisée par un ajout important de Fe-Mg à la roche, ou si elle est plutôt caractérisée par un lessivage des protolithes frais (**figure 13**).

### 2.5.2 Position des roches fraîches sur le diagramme FeMg

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes FeMg (pour les 20 faciès considérés), on observe des similitudes entre les répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper les diagrammes FeMg selon les faciès suivants :

- SV350 et SV450 (**figure 14-a**);
- AMP575 (**figure 14-b**);
- 7AMP500, 5SV400, 9SB450, 10SB350 (**figure 14-c**);
- 10GRA950, 3GRA800, 4GRA750, 5GRA900, 6GRA750, 9GRA800 (**figure 14-d**);
- 10AMP700, 3AMP675, 4AMP600, 5AMP670, 6AMP600, 7AMP600, 7AMP700 (**figure 14-e**).

Sur ces diagrammes, les roches magmatiques les plus felsiques sont proches du pôle de coordonnées (0; 1), qui correspond aux feldspaths alcalins. Les roches mafiques se situent entre ce pôle et le pôle des minéraux calciques, de coordonnées (1; 0). Les roches mafiques et ultramafiques contiennent aussi des minéraux à Fe, Mg et/ou Si (olivine, talc, OPX, etc.), et se rapprochent donc du pôle de coordonnées (0; 0) (**figures 13, 14**).

Les roches sédimentaires sont soit riches en Ca (cf. sédiments riches en carbonates), et se rapprochent alors du pôle de coordonnées (1; 0), soit riches en Na, K et Al (cf. pélites, etc.), et se répartissent alors dans la partie supérieure du diagramme (**figures 13, 14**).

Notez que la plupart des roches fraîches se concentrent dans la partie inférieure gauche du diagramme FeMg.

### 2.5.3 Position des roches altérées sur le diagramme FeMg

Lorsque l'on s'intéresse à la répartition des altérations observées par les auteurs qui ont publié les différents types de données (cf. base de données altérée), on peut faire les observations suivantes (**figure 15**) :

- les échantillons présentant des altérations en Ca se concentrent à proximité du pôle des minéraux Ca, de coordonnées (1; 0);
- les altérations en CO<sub>2</sub> se concentrent au pôle des feldspaths alcalins, de coordonnées (0; 1), uniquement parce que les roches en question sont des syénites. Les roches présentant une carbonatation pourraient, en fait, se répartir sur l'ensemble du diagramme FeMg;
- les altérations en K sont observées dans la partie supérieure du diagramme, à proximité du pôle des micas blancs, de coordonnées (0,3; 1);
- les roches altérées en Fe-Mg se rapprochent du pôle chlorite, grenat, cordiérite et Fe-oxydes, de coordonnées (0,8; 0,8). Ces roches se répartissent soit entre les pôles (0; 1) et (0,8; 0,8) lorsque leurs protolithes avaient une composition felsique, soit entre les pôles (0; 0) et (0,8; 0,8) lorsque leurs protolithes avaient une composition mafique.

Pour les faciès 7AMP500, 5SV400, 9SB450, 10SB350, SV350 et SV450, une partie des roches contiennent des aluminosilicates normatifs, et les échantillons se répartissent entre les pôles (0,8; 0,8) et (1; 1) (**figure 15**). Pour ces faciès, la chlorite est stable et est le principal marqueur de l'altération Fe-Mg.

La chlorite a un rapport (Fe + Mg)/Al plus élevé que la cordiérite et le grenat, qui marque l'altération Fe-Mg dans les faciès de plus haut grade. Ainsi, si la chlorite est stable dans un faciès, elle s'accapare beaucoup de Fe et de Mg et la quantité d'Al excédentaire doit être accommodée soit par des minéraux riches en Al et pauvres en Fe-Mg (cf. staurotide, spinelle, etc.), soit par des aluminosilicates. Si la cordiérite et/ou le grenat sont stables, par contre, la quantité de « Al excédentaire » est moindre.

Ainsi, la formation de minéraux comme la staurotide ou les aluminosilicates est soumise à certaines contraintes de P-T, mais est également soumise à de fortes contraintes compositionnelles. Notez que ces minéraux seront peu communs ou présents en faibles quantités dans des roches ayant subi une altération en Fe et Mg, et que leurs proportions sera beaucoup plus importantes dans des roches ayant subi, par exemple, une argilisation poussée avant un épisode de métamorphisme.

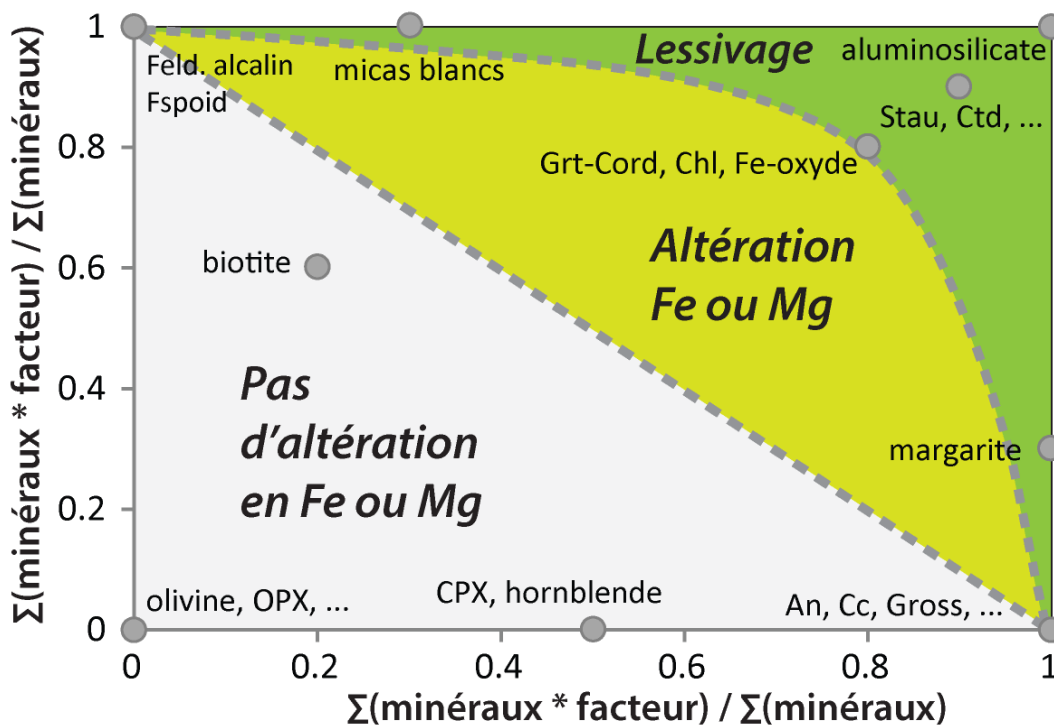
L'indice ALT\_CHLO\_SV350 de la norme BasGrade (Trépanier 2011) a ensuite été calculé pour la base de données des roches altérées. On observe ainsi que (**figure 16**) :

- la répartition des valeurs hautes et basses de cet indice est similaire sur tous les diagrammes FeMg, quel que soit le faciès utilisé;
- les valeurs hautes de l'indice ALT\_CHLO\_SV350 se rapprochent du pôle de coordonnées (0,8; 0,8), en partant des pôles (0; 1) ou (0; 0), selon que les protolithes frais avaient une composition plutôt felsique ou mafique.



Le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008) a ensuite été calculé pour la base de données altérée (**figure 17**). On observe que :

- les gains les plus importants en Fe et Mg sont observés dans les roches ayant des protolithes mafiques (cf. roches situées entre les pôles (0; 0) et (0,8; 0,8)). Les roches felsiques situées à proximité du pôle (0; 1) ont des gains/pertes en Fe et Mg négligeables;
- les roches situées à proximité du pôle (1; 0), et présentant une forte altération en Ca (cf. **figure 15**), présentent également des pertes en Fe et Mg d'après les bilans de masse.



**Figure 13** : Répartition des minéraux du diagramme FeMg.

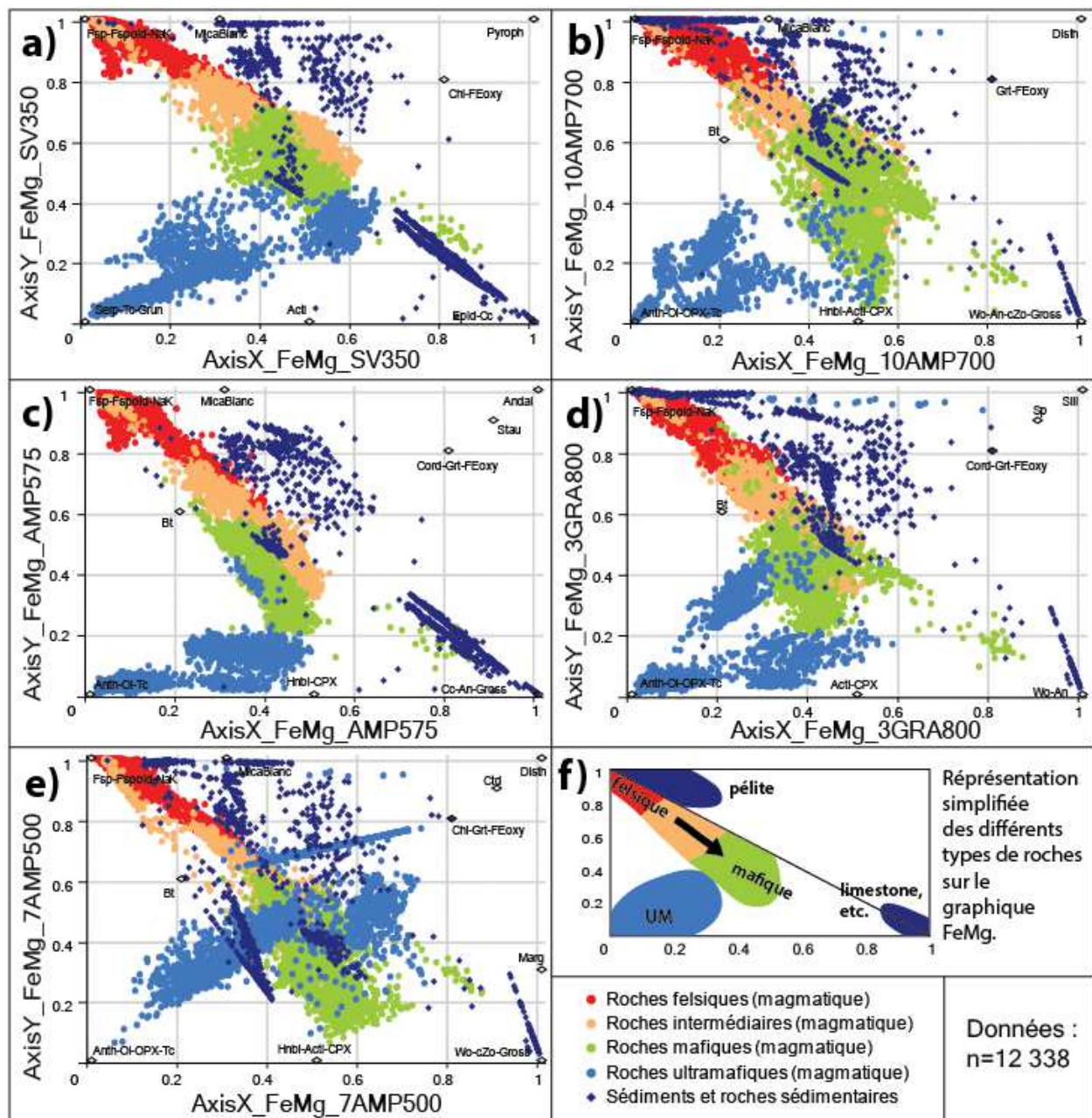
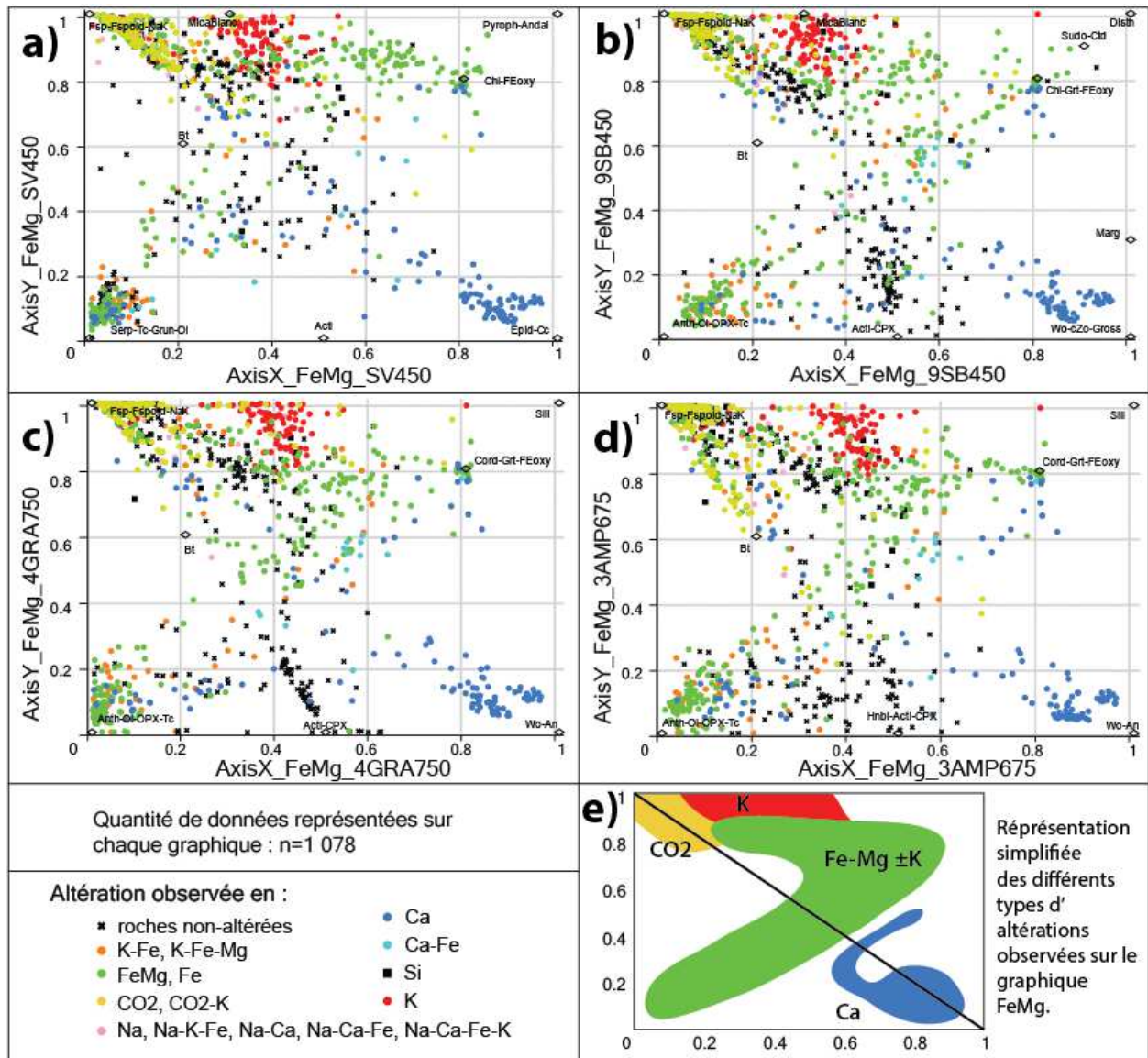
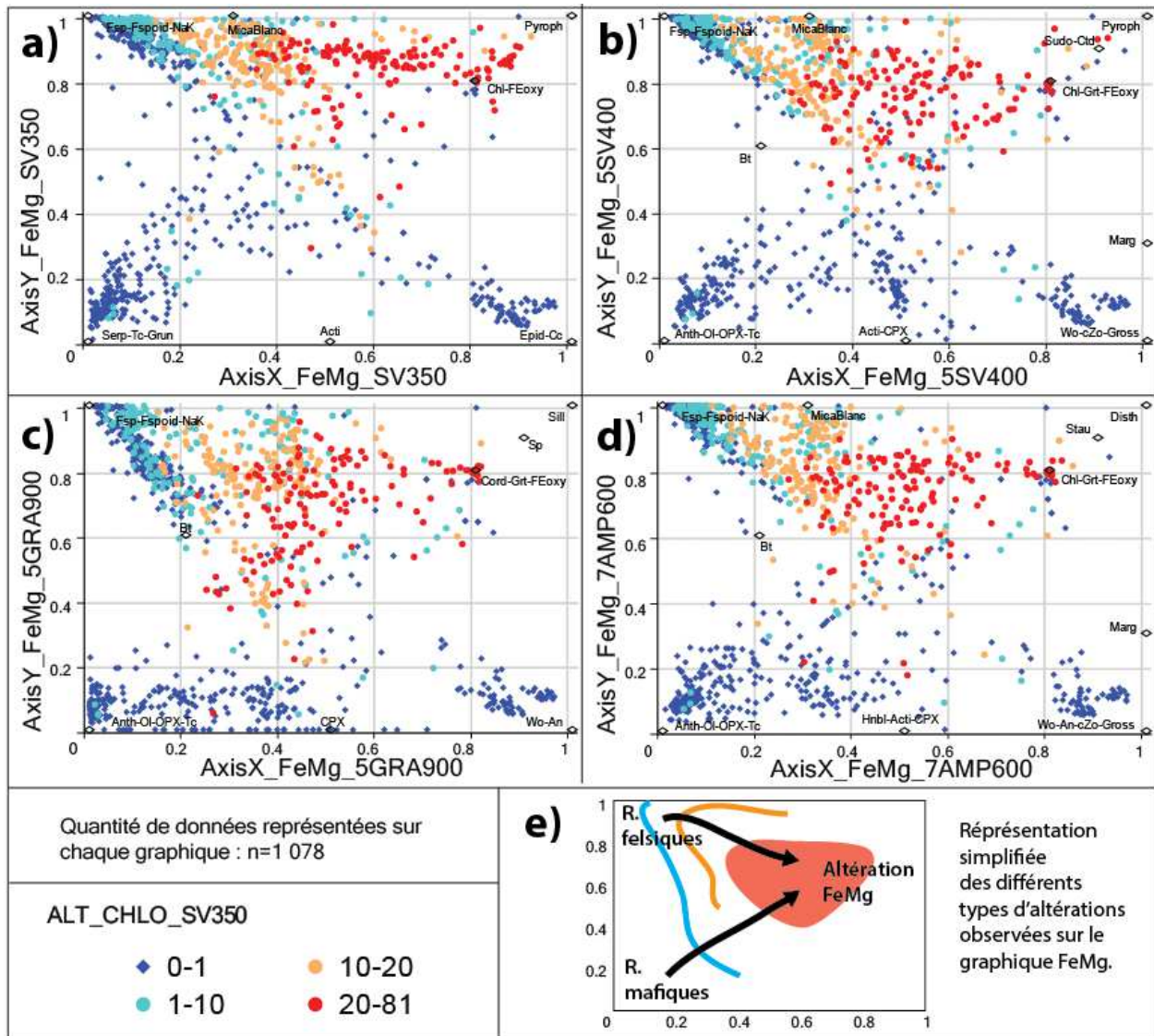


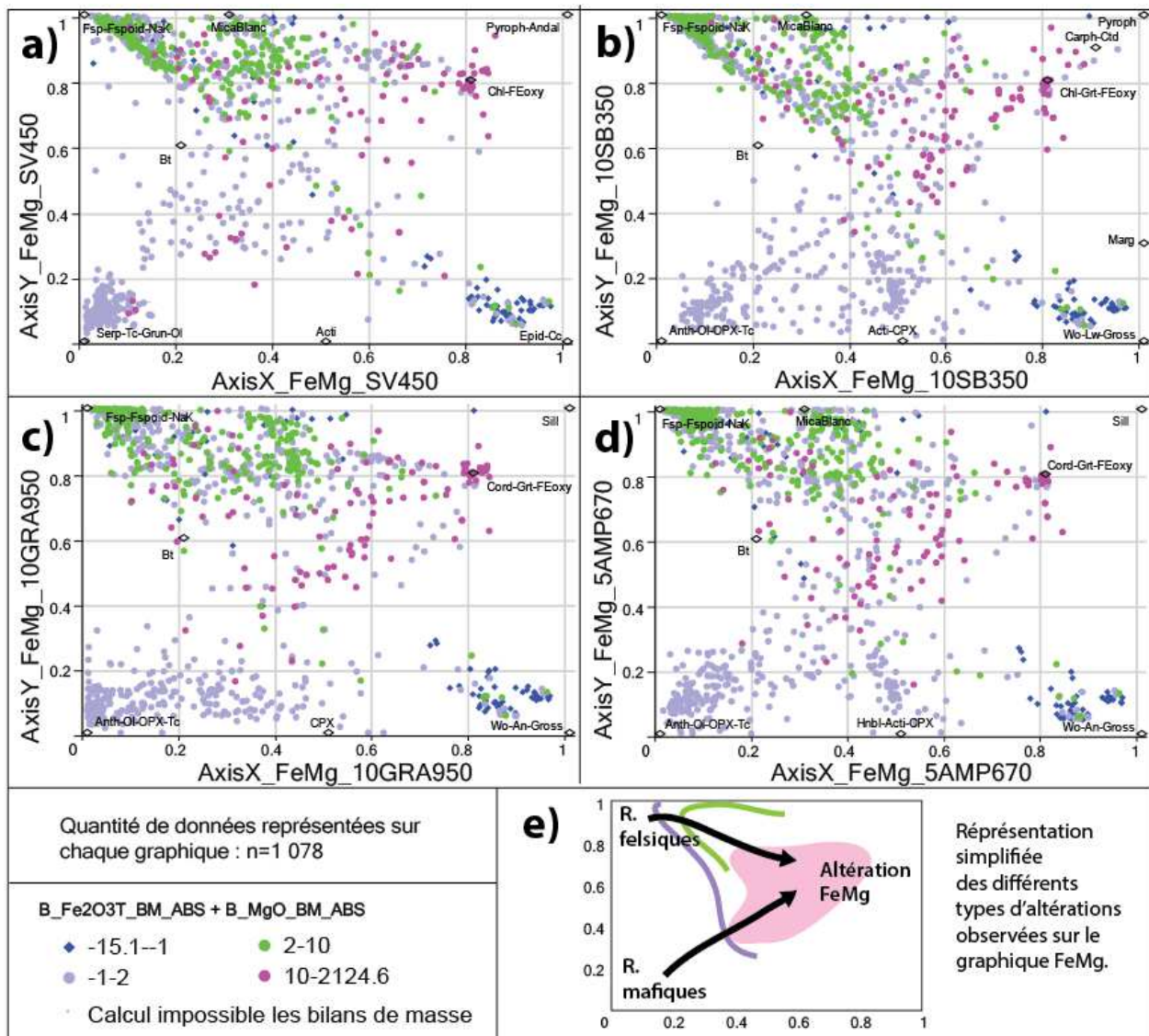
Figure 14 : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme FeMg.



**Figure 15** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.



**Figure 16** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond à l'indice ALT\_CHLO\_SV350.



**Figure 17** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme FeMg. Le code couleur correspond aux gains/pertes en Fe et Mg (B\_Fe2O3T\_BM\_ABS + B\_MgO\_BM\_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).

## 2.6 Diagramme NaK

### 2.6.1 Répartition des minéraux sur le diagramme NaK

À faible température, le principal minéral marqueur de l'altération en Na et/ou K est le mica blanc<sup>1</sup> (cf. muscovite et paragonite principalement).

Les micas blancs contiennent principalement du Na, du K et plus de Al que les feldspaths alcalins. Ainsi, il existe deux types d'altérations Na-K :

1) **Altération Na-K** : ajout de Na et/ou K, qui forme de la biotite dans les roches mafiques et/ou une surabondance de feldspaths alcalins et de sels (sylvite et halite) dans divers types de roches. Ce type d'altération peut aussi se manifester par l'échange de K contre du Na, ou *vice versa*, au sein de feldspaths alcalins.

2) **Altération Na-K acide ou lessivage** : lessivage et hydratation qui détruisent les feldspaths alcalins et forme des micas blancs. Ce type d'altération peut être un simple lessivage, ou peu s'accompagner d'un ajout de Na-K à la roche.

Notez que pour les roches felsiques, il est possible de retirer un peu de Na-K par lessivage et former des micas blancs, mais ce type d'altération n'est plus tout à fait une altération Na-K au sens « ajout de Na-K à la roche ». Pour les roches mafiques, un ajout de Na-K semble indispensable à la formation d'importantes quantités de micas blancs.

Le diagramme NaK est bâti sur le même principe que le diagramme FeMg, et il ne représente que des minéraux contenant au moins du Na-K et/ou de l'Al (**figure 18**). Les minéraux fréquents dans les roches fraîches (cf. feldspaths, olivine, etc.) sont placés dans la moitié inférieure gauche du diagramme, afin de restreindre les roches fraîches à cette partie du diagramme (**figure 18**).

Les minéraux plus caractéristiques des roches altérées ont été placés dans la partie supérieure droite du diagramme (**figure 18**). Le pôle d'altération maximale en Na-K, représenté par biotite, micas blancs et sels, est situé aux coordonnées (0,8; 0,8) et les aluminosilicates en (1; 1). Ceci permet de déterminer si l'altération est caractérisée par un ajout important de Na-K à la roche, ou si elle est plutôt caractérisée par un lessivage des protolithes frais et par une augmentation relative de la quantité d'Al (**figure 18**).

---

<sup>1</sup> Note sur le terme **séricite** : il s'agit d'une texture. Le terme désigne généralement de petits cristaux de muscovite et ± de paragonite. Le terme n'ayant rien à voir avec les espèces minérales standards ou normatives, il ne sera pas utilisé dans ce rapport.

### **2.6.2 Position des roches fraîches sur le diagramme NaK**

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes FeMg (pour les 20 faciès considérés), on observe des similitudes entre les répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper les diagrammes FeMg selon les faciès suivant :

- SV350 et SV450 (**figure 19-a**);
- 10GRA950, 3GRA800, 5GRA900 (**figure 19-b**);
- 7AMP500, 5SV400, 10SB350, 9SB450 (**figure 19-c**);
- 3AMP675, 4AMP600, 5AMP670, 6AMP600, 7AMP700 (**figure 19-d**);
- AMP575, 10AMP700, 7AMP600, 4GRA750, 6GRA750, 9GRA800 (**figure 19-e**).

Sur ces diagrammes, les roches magmatiques les plus felsiques sont proches du pôle de coordonnées (1; 0), qui correspond aux feldspaths alcalins. Les roches mafiques se situent entre ce pôle et le pôle des minéraux calciques, de coordonnées (0; 0). Les roches mafiques et ultramafiques contiennent aussi des minéraux à Fe, Mg et/ou Si (olivine, talc, OPX, etc.), et se rapprochent donc du pôle de coordonnées (0; 1) (**figures 18, 19**).

Les roches sédimentaires sont soit riches en Ca (cf. sédiments riches en carbonates), et se rapprochent alors du centre du diagramme NaK (**figures 18, 19**).

Notez que la plupart des roches fraîches se concentrent dans la partie inférieure gauche du diagramme NaK.

### **2.6.3 Position des roches altérées sur le diagramme NaK**

Lorsque l'on représente la base de données de roches altérées sur le diagramme NaK, on peut observer que les roches dans lesquelles des altérations en Na et/ou K ont été observées (**figure 20**) présentent des valeurs élevées de l'indice ALT\_MUSC\_SV350 + ALT\_PARAG\_SV350 de la norme BasGrade (Trépanier, 2011; Trépanier et al., 2015) (**figure 21**); il s'agit donc principalement d'altérations Na-K acides. Ces roches altérées en Na-K se répartissent de façon différente, selon les faciès (**figure 20, 21**) :

- Type (1) : 6AMP600, 7AMP500, 7AMP600, 7AMP700, 9SB450, 10SB350, 5SV400 (**figure 20-a, 21-a**);
- Type (2) : 4AMP600, 5AMP670, SV350, SV450, AMP575, 10AMP700 (**figure 20-b, -c, 21-b, -c**);
- Type (3) : 3AMP675, 3GRA800, 9GRA800, 10GRA950, 6GRA750, 5GRA800, 4GRA750 (**figure 20-d, 21-d**).

Les observations suivantes peuvent être faites pour ces différents faciès (**figures 20, 21**) :

- type (1) : les roches altérées en Na-K (acide) sont proches du pôle de coordonnées (0,8; 0,8), et sont riches en micas normatifs (cf. micas blancs principalement). Ces roches présentent une « séricitisation » typique des roches faiblement métamorphisées;
- type (2) : intermédiaire entre les types (1) et (3). L'altération en Na-K (acide) conduit à la formation de micas blancs, de feldspaths alcalins et d'aluminosilicates;
- type (3) : faciès pour lesquels les micas blancs ne sont pas stables. Dans ces roches, les altérations en Na-K (acide) sont caractérisées par la formation d'environ (2/3) de feldspaths alcalins et d'environ (1/3) d'aluminosilicates, et de parfois un peu de biotite si ce minéral est stable au faciès considéré. Notez que l'altération en Na-K ne se traduit pas par la seule formation de feldspaths alcalins à haut grade, et que des aluminosilicates sont observés dans ces roches altérées.

Aussi, et pour tous les faciès, les roches pour lesquelles des altérations Fe-Mg ont été observées (**figure 20**) se rapprochent parfois du pôle (0,8; 0,8). Ces roches ont probablement subi des altérations en Fe-Mg et en K, conduisant à la formation, entre autres, de biotite.

Le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008) a ensuite été calculé pour la base de données des roches altérées. La répartition de valeurs hautes de  $B_{K2O\_BM\_ABS} + B_{Na2O\_BM\_ABS}$  est la suivante (**figure 22**) :

- les bilans de masse indiquent un gain maximal en Na-K pour les roches situées à proximité du pôle (0; 1), c.-à-d. pour les roches les plus riches en feldspaths alcalins;
- la formation de micas blancs n'est ainsi pas détectée par les bilans de masse, possiblement parce qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter beaucoup de Na-K à une roche pour former des micas blancs; le lessivage et l'hydratation étant des processus plus importants;
- il est également possible que le calcul des bilans de masse soit imprécis, surtout pour le K. Notez, par exemple, que les bilans de masse aient été calculés pour les syénites de la base de données des roches altérées, bien que ce calcul ne soit pas adapté à tous les types de roches alcalines (Trépanier 2012).

Les bilans de masse par modélisation des précurseurs ne sont pas adaptés pour l'identification de l'altération de type « Na-K acide ». Par contre, ils détectent les gains/pertes en Na-K, et sont donc adaptés à l'identification de l'altération de type « Na-K ».



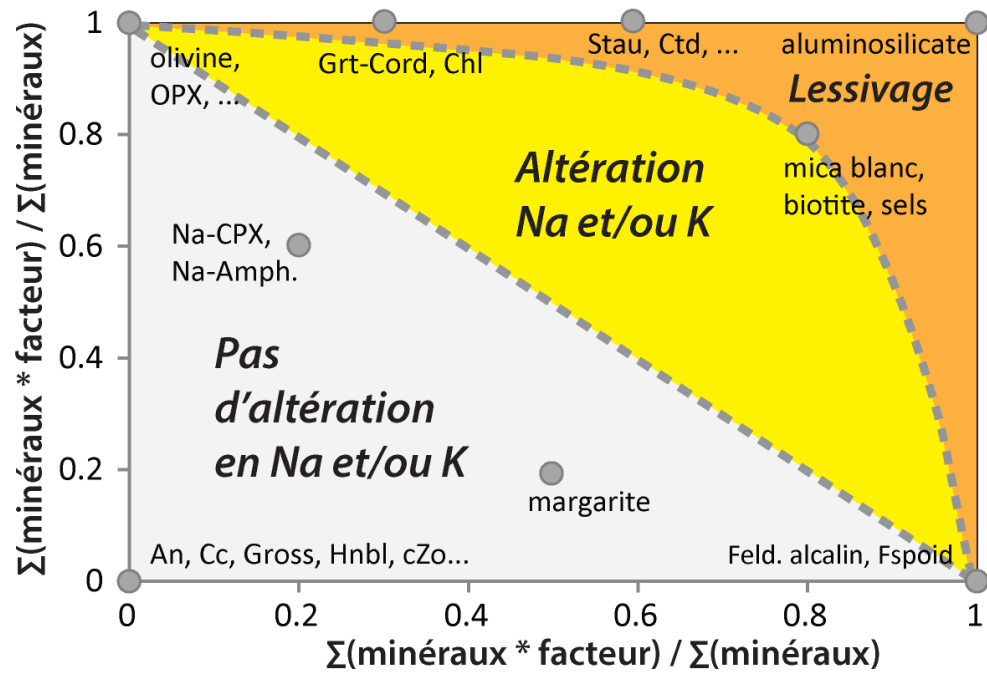
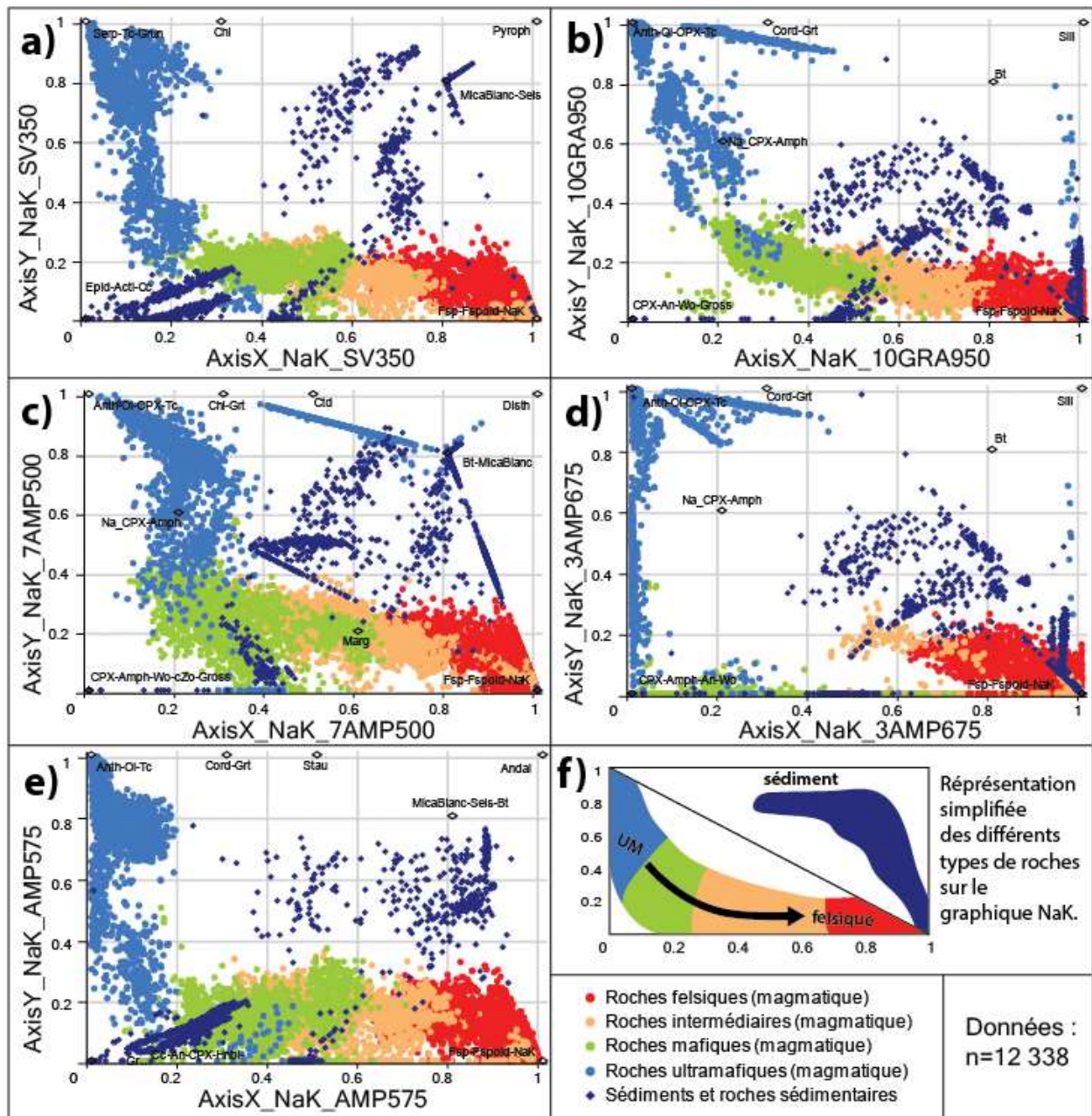
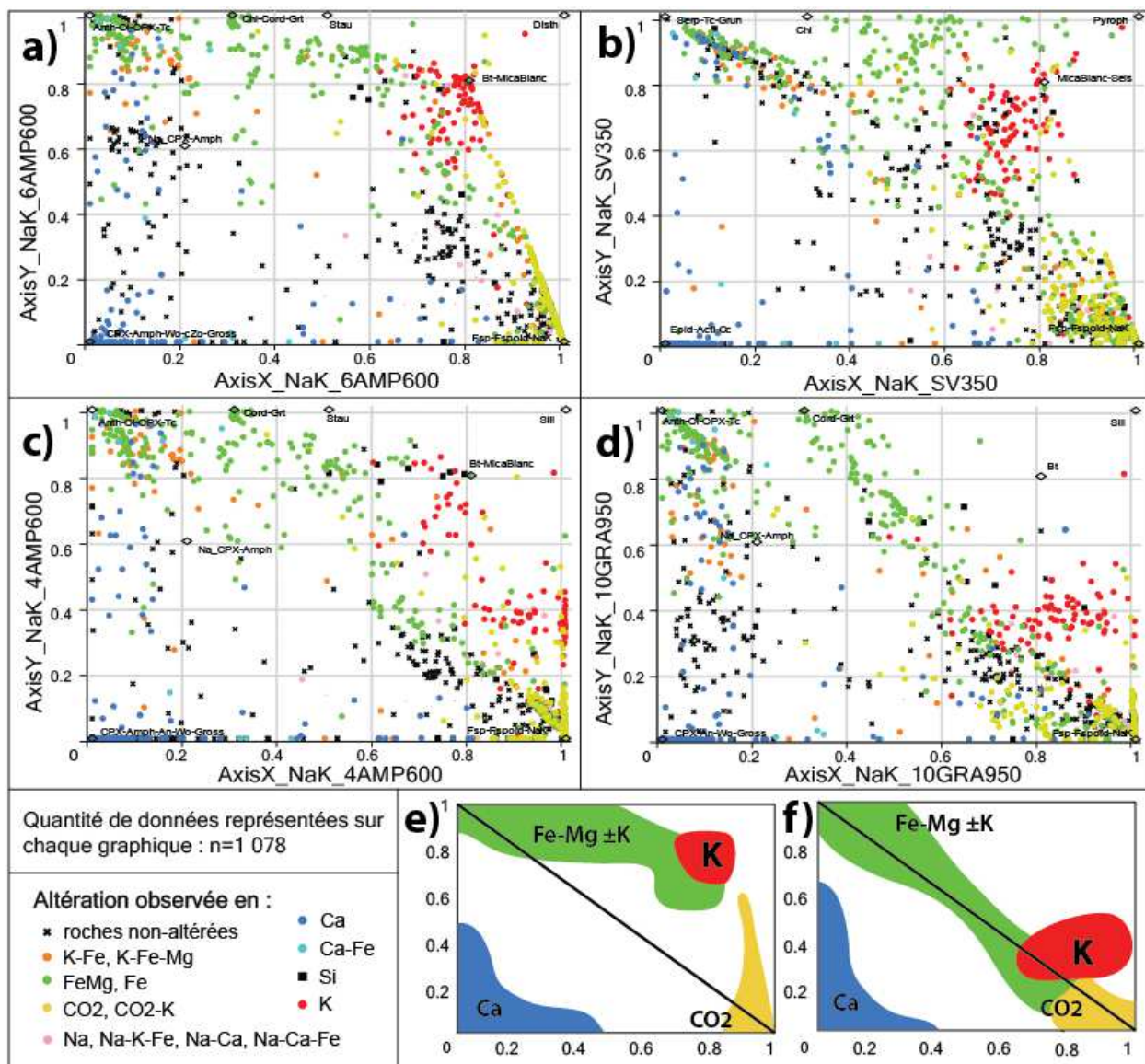


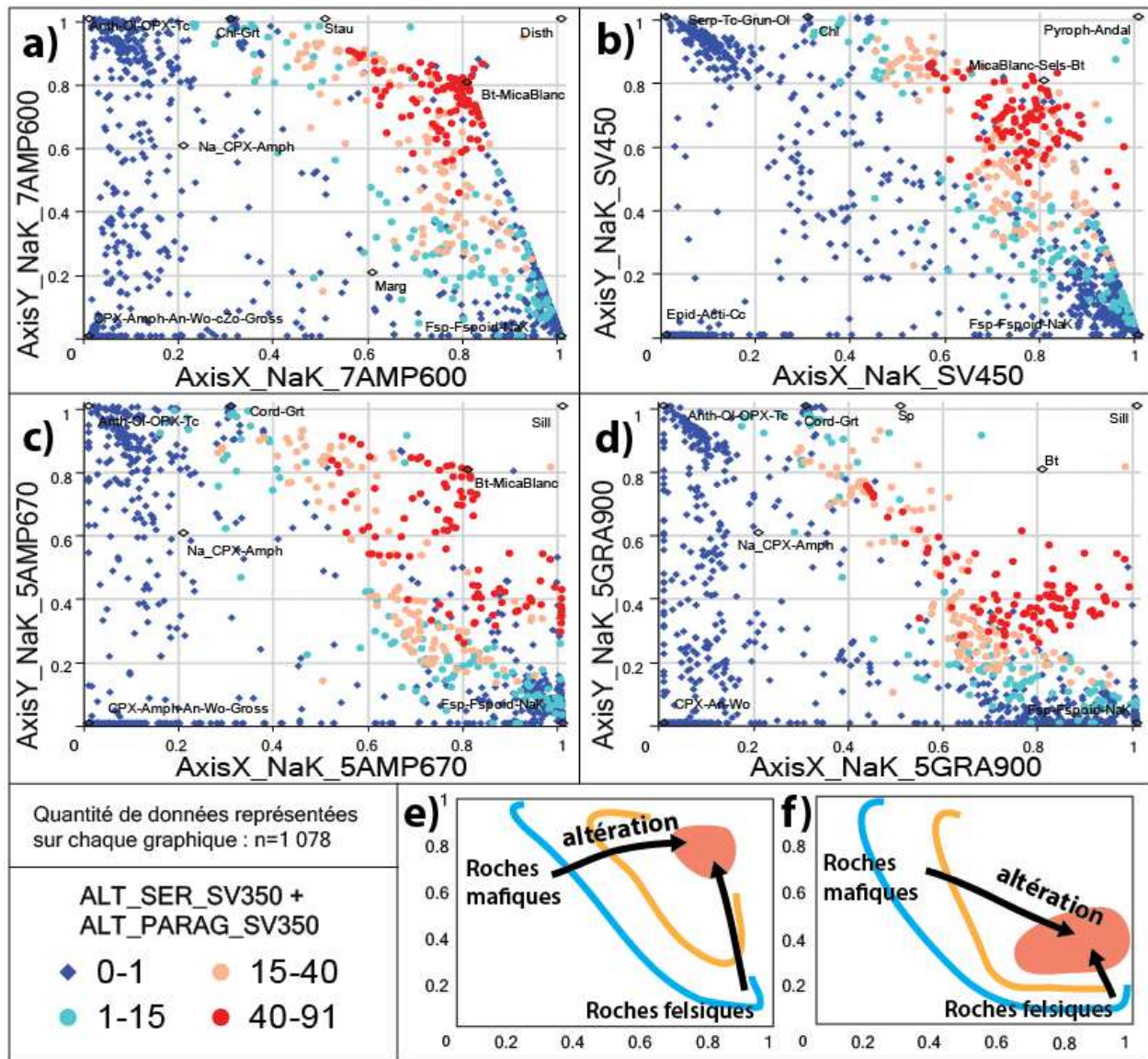
Figure 18 : Répartition des minéraux du diagramme NaK.



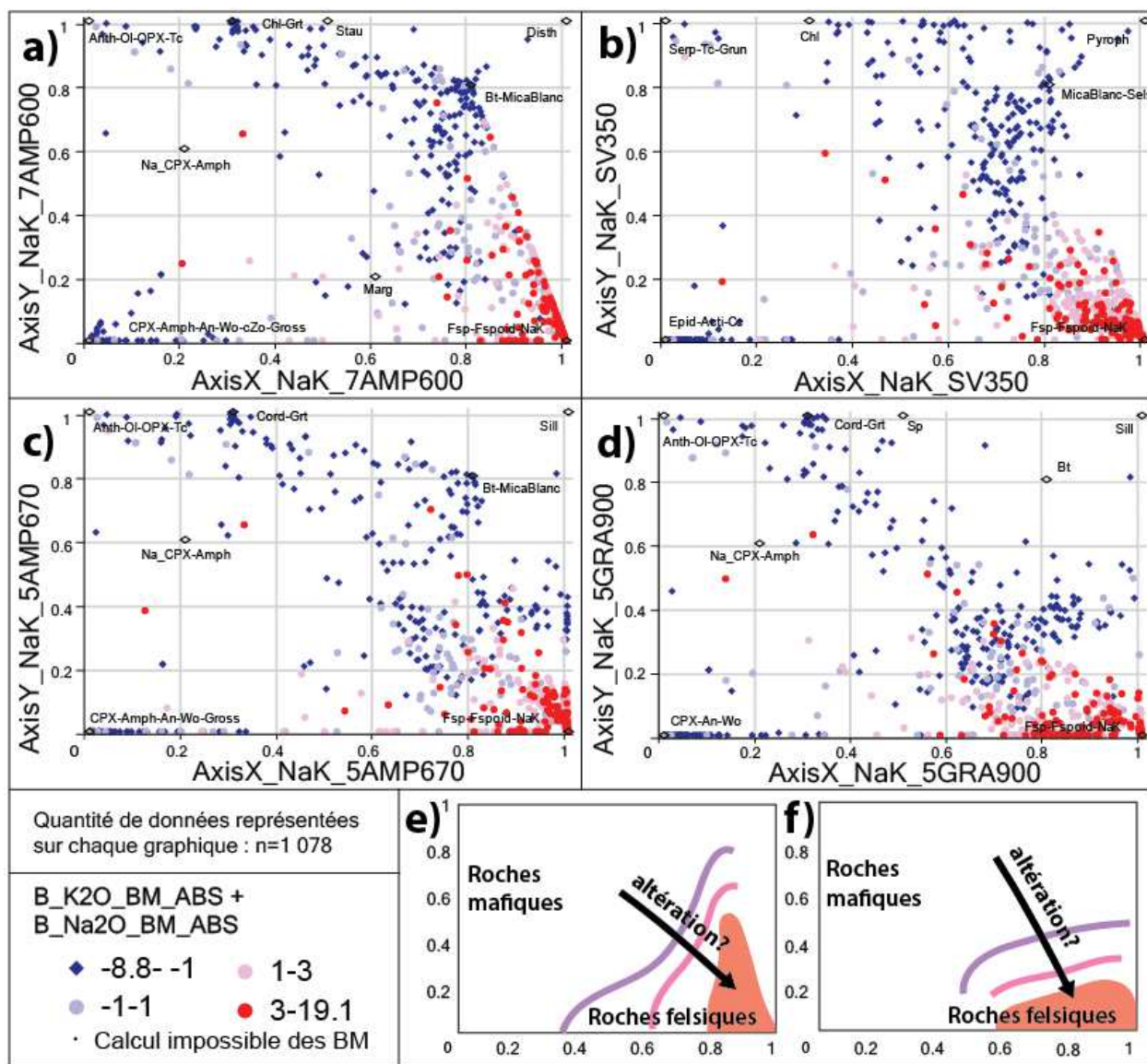
**Figure 19** : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme NaK.



**Figure 20** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.



**Figure 21** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond à l'indice ALT\_SER\_SV350 + ALT\_PARAG\_SV350.



**Figure 22** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme NaK. Le code couleur correspond aux gains/pertes en Na et K (B\_K2O\_BM\_ABS + B\_Na2O\_BM\_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).

## 2.7 Diagramme Si

### 2.7.1 Répartition des minéraux sur le diagramme Si

La reconnaissance de la silicification et de son opposé, la perte en silice, est difficile, mais importante, car elle peut renseigner sur l'acidité du système hydrothermal. En effet, les fluides acides ont tendance à lessiver divers éléments majeurs et à rendre la précipitation du quartz possible, ce qui fait augmenter la quantité de  $\text{SiO}_2$  dans la roche. Les fluides plus basiques (cf. altérations alcalines, etc.) ont tendance à faire augmenter la quantité de Na-K (ou de Ca, Mg) dans une roche et faire diminuer la proportion de quartz, ou à dissoudre la silice qui se combine possiblement avec Na, K, Ca et Mg pour former des feldspaths et autres silicates.

La silicification est une altération difficile à quantifier avec les minéraux normatifs, car elle est marquée uniquement par un ajout de quartz; un minéral qui est par ailleurs abondant dans de nombreuses roches non altérées. Le diagramme Si est construit en 2 parties (**figure 23**) :

- la partie inférieure gauche, qui regroupe tous les silicates des normes BasGrade et HautGrade;
- le coin supérieur droit, dédié au quartz.

Ce diagramme est conçu pour représenter des échantillons ayant des protolithes de compositions proches. En représentant ces roches sur le diagramme Si, l'utilisateur pourra identifier un « point de départ », correspondant à la position du précurseur frais sur le diagramme Si, et pourra évaluer si l'allongement du nuage de points traduit plutôt un gain ou une perte en Si suite au processus d'altération (**figure 23**).

Position des roches fraîches sur le diagramme Si.

Lorsque la base de données des roches fraîches est représentée sur chacun des 20 diagrammes Si (pour les 20 faciès considérés), on observe des similitudes entre les répartitions des différentes populations sur certains diagrammes. Il est ainsi possible de regrouper les diagrammes Si selon les faciès suivants :

- SV350, SV450, AMP575 (**figure 24-a**);
- 3AMP675, 4AMP600, 5AMP670, 6AMP600, 7AMP600, 7AMP700, 10AMP700 (**figure 24-b**);
- 3GRA800, 5GRA900, 6GRA750, 9GRA800, 10GRA950, 4GRA750 (**figure 24-c**);
- 5SV400, 7AMP500, 9SB450, 10SB350 (**figure 24-d**).

Sur le diagramme Si, les roches mafiques se situent dans le coin inférieur gauche, et les roches felsiques se situent dans la partie inférieure au centre du diagramme, ou ont tendance à se rapprocher du pôle quartz de coordonnées (1; 1).

Les sédiments riches en carbonates sont proches du pôle des minéraux calciques, de coordonnées (0; 0). Les roches sédimentaires plus pélitiques se situent entre les pôles des feldspaths alcalins de coordonnées (0,5; 0) et le pôle du quartz de coordonnées (1; 1).

Les roches magmatiques ultramafiques, quant à elles, se situent dans la partie supérieure gauche à centrale du diagramme Si. Ainsi, ces roches se rapprochent du pôle (0; 1), car elles sont riches en minéraux à Fe-Mg (cf. olivines, OPX, etc.). Les roches ultramafiques se rapprochent également du pôle quartz de coordonnées (1; 1). En fait, ces roches ne contiennent pas ou peu de quartz (veines?), mais elles sont parfois riches en carbonates qui accommodent une partie de Fe, Mg et Ca de ces roches. Les carbonates n'étant pas représentés sur les diagrammes Si, les roches ultramafiques se répartissent parfois à des endroits inattendus.

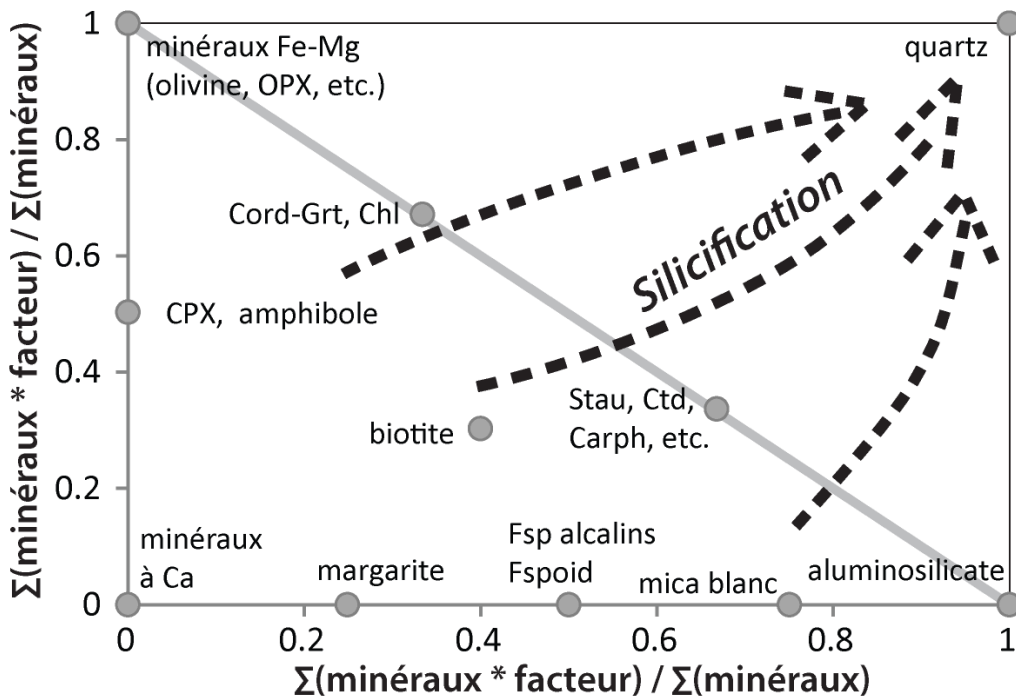
Position des roches altérées sur le diagramme Si.

Les observations suivantes sont faites à partir de la base de données de roches altérées (**figure 25**) :

- les roches altérées en Si, Ca, CO<sub>2</sub>, Fe-Mg et K forment des nuages de points allongés vers le pôle quartz de coordonnées (1; 1);
- toutes ces altérations s'accompagnent donc d'une variation de la quantité de quartz, qui est soit due à : 1) des ajouts/pertes de Si provoqués par le processus d'altération; ou à 2) des augmentations/diminutions de la quantité de quartz selon que les minéraux de l'altération consomment plus ou moins de silice pour se former.

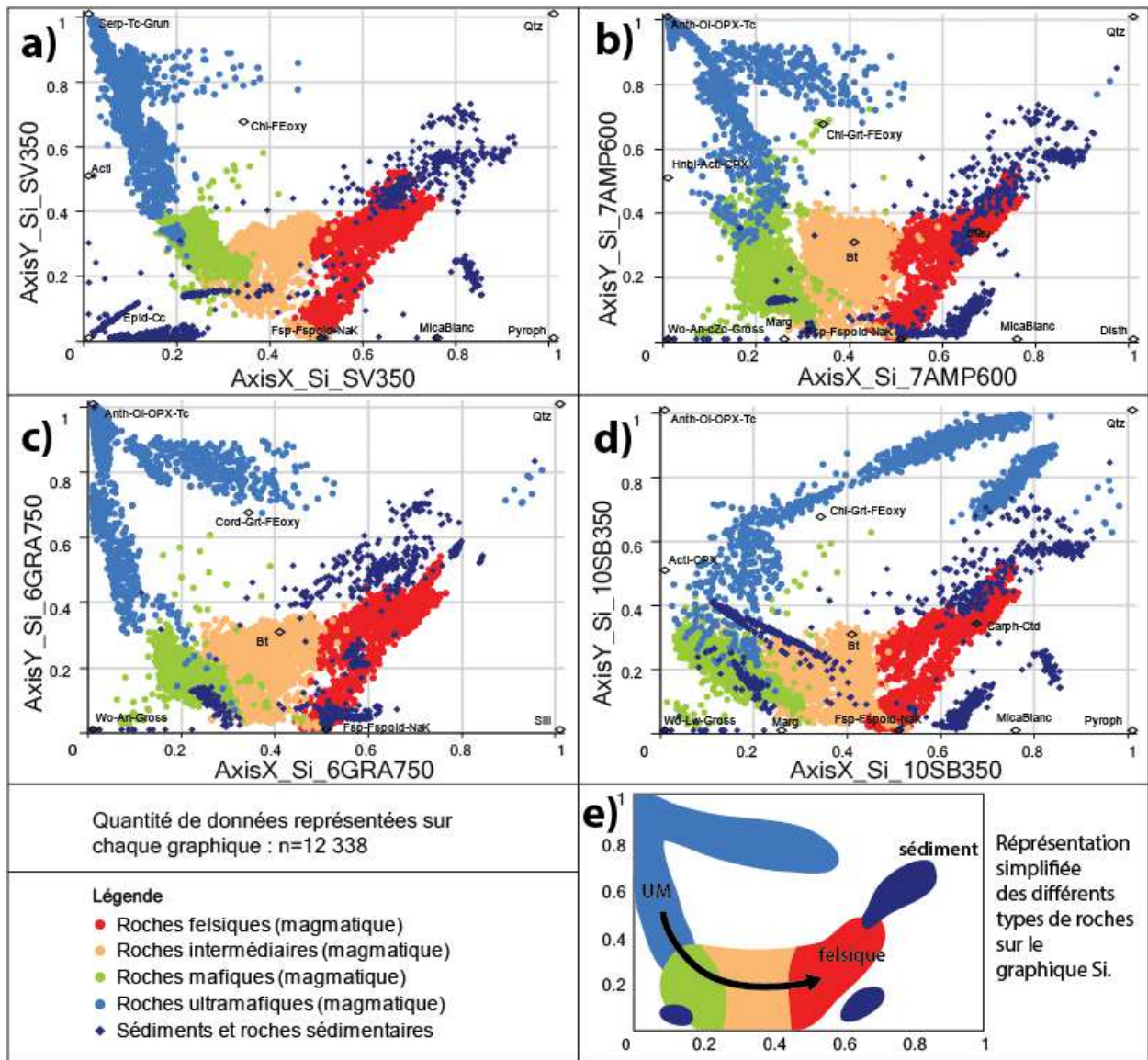
Le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008) a ensuite été calculé pour la base de données des roches altérées, et les valeurs de B\_SiO<sub>2</sub>\_BM\_ABS se répartissent de la façon suivante (**figure 26**) :

- les gains maximaux en Si sont communément situés à proximité du pôle quartz de coordonnées (1; 1);
- l'éirement des nuages de points est la principale information fournie par ce diagramme, car la position des protolithes frais et des roches les plus altérées varient d'un dépôt à l'autre.

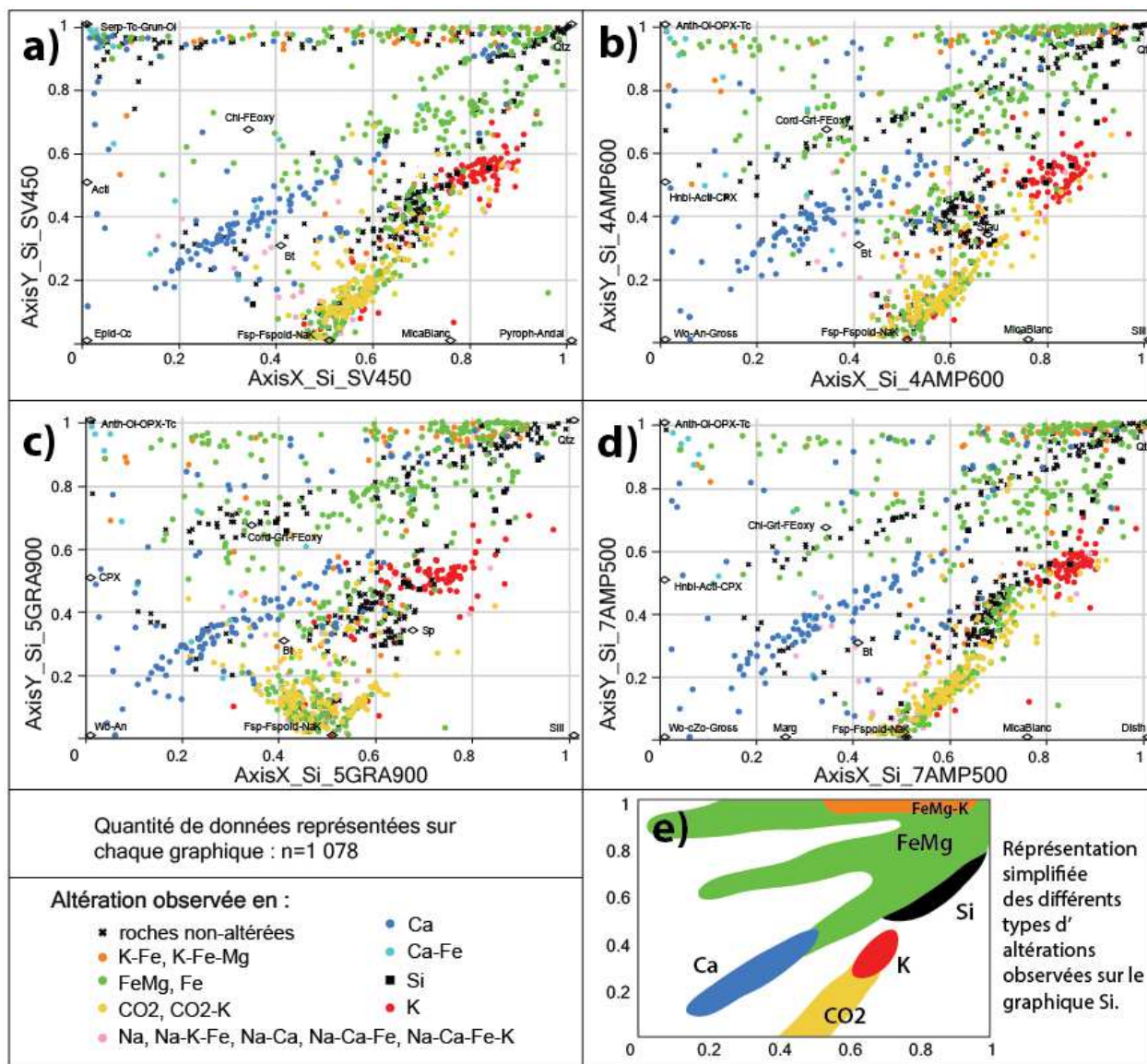


**Figure 23** : Répartition des minéraux du diagramme Si.

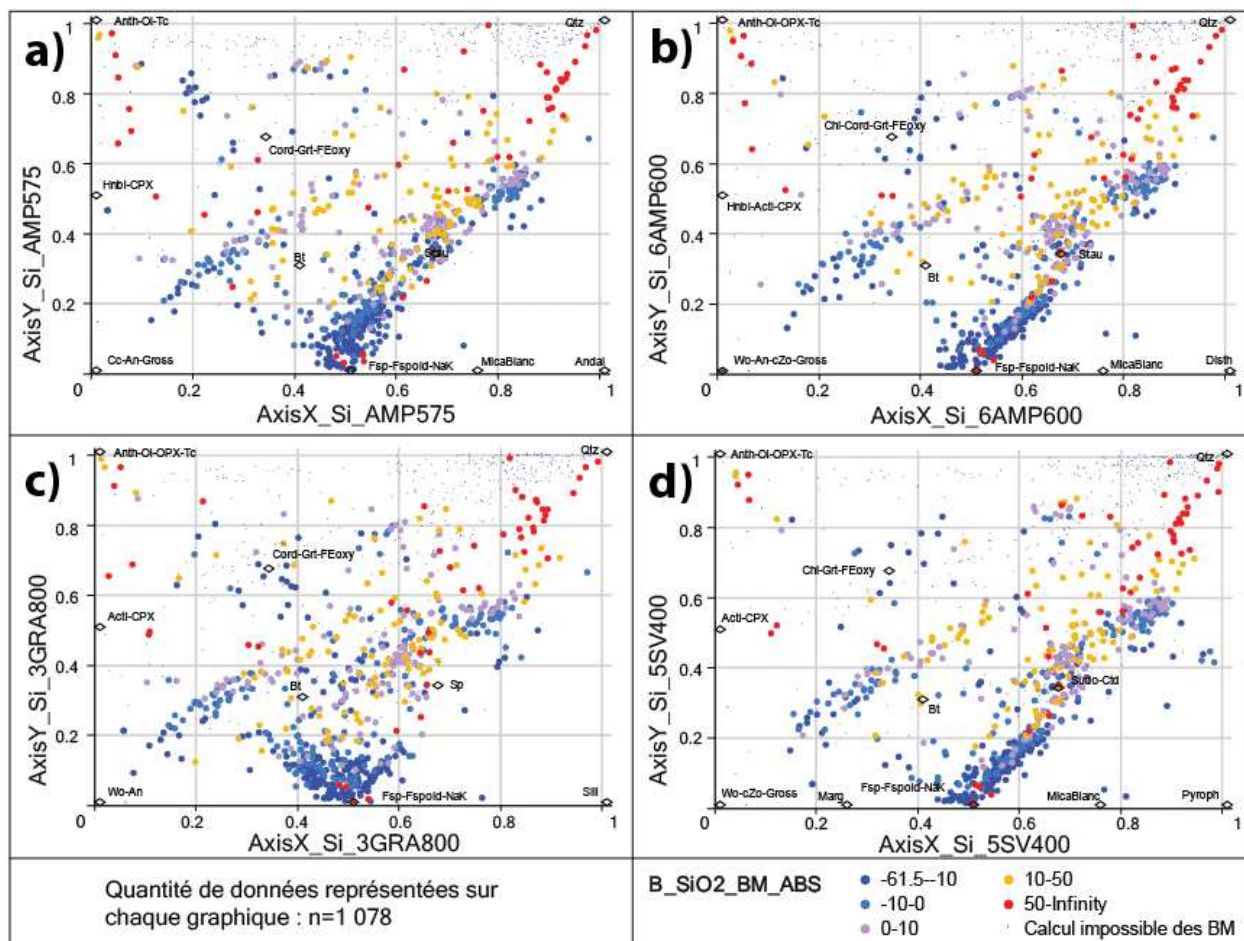




**Figure 24** : Distribution des roches de la base de données des roches fraîches sur le diagramme Si.



**Figure 25 :** Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Si. Le code couleur correspond à la classification des altérations d'après les auteurs qui ont publié ces données.



**Figure 26** : Distribution des roches de la base de données des roches altérées sur le diagramme Si. Le code couleur correspond aux gains/pertes de Ca (B\_SiO<sub>2</sub>\_BM\_ABS) selon le bilan de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008).

## 2.8 Liste des principaux minéraux marqueurs des altérations

La représentation des bases de données de roches fraîches et altérées sur les différents diagrammes d'altération nous permet de lister les paragenèses principales des principaux groupes de roches de la croûte.

Pour les roches non altérées, on observe principalement les minéraux suivants :

- roches mafiques : minéraux à Fe-Mg (cf. olivine, OPX, talc, etc.), à Ca-Fe-Mg (amphiboles, CPX), à Ca (anorthite ou lawsonite, etc.) et Na (cf. albite du plagioclase);
- roches felsiques : feldspaths alcalins abondants;
- roches magmatiques de tous types : micas, aluminosilicates et autres minéraux à Al possibles, mais présents en faibles quantités;
- roches sédimentaires de type « pélite » : micas et aluminosilicates, ± feldspaths;
- Roches sédimentaires riches en Ca : carbonates abondants, ou minéraux riches en Ca lorsque l'augmentation de la température dévolatilise les roches les moins riches en CO<sub>2</sub>.

Ces paragenèses peuvent être rapprochées de celles des principaux groupes de roches des faciès amphibolites et granulitiques, qui sont les suivants (cf. recommandations de l'IUGS; IUSGS-SCMR, 2007) :

- roches mafiques du faciès amphibolite : « **amphibolites** », qui sont des roches à amphibole et plagioclase (albite-anorthite) principalement, pouvant contenir des clinopyroxènes, etc.;
- roches felsiques du faciès amphibolite : « **roches quartzofeldspathiques** », qui sont des roches à quartz et feldspaths, pouvant contenir une gamme variée d'autres phases;
- roches faciès des granulites : « **granulites** » et « **granulites mafiques** », qui sont des roches à quartz et feldspaths, contenant d'autres minéraux pauvres en H<sub>2</sub>O (cf. pyroxènes, grenats, etc.). La formation d'orthopyroxènes et la diminution de la quantité de minéraux hydratés est la principale différence entre les faciès amphibolites et granulites.

Pour les roches altérées par un fluide hydrothermal, les principales paragenèses énumérées ci-dessus peuvent subir d'importantes modifications, qui sont listées ci-dessous.

L'altération en CO<sub>2</sub> (« **carbonatation** ») est caractérisée par les minéraux suivants :

- formation de carbonates de Ca et de Mg : pour les altérations faibles;
- formation de carbonates de Fe et de Mg : pour les altérations plus importantes, ou pour les roches les plus mafiques;
- ces observations recoupent celles déjà faites par de nombreux auteurs (cf. Nabil, 2005; Nabil, 2006; Trépanier, 2008).

L'altération en **Ca** (altérations « **propylitique** », « **zéolitique** », « **épidotisation** ») est caractérisée par les minéraux suivants (**figure 27**) :

- faciès schistes verts : formation d'épidote et ± de calcite;
- faciès de plus haut grade : clinozoïsite, anorthite et/ou lawsonite, accompagnés de grossulaire, ou de wollastonite si le grossulaire est instable au faciès considéré;
- formation de clinopyroxènes et d'amphiboles seuls : possibles, surtout pour les roches mafiques faiblement altérées en Ca. Lorsque l'altération est plus intense, et surtout si elle s'accompagne d'un lessivage, ce sont plutôt des minéraux à Al et/ou Ca qui se forment (cf. grossulaire par exemple).

L'altération en **Fe-Mg** (« **chloritisation** ») est caractérisée par les minéraux suivants (**figure 27**) :

- cette altération correspond à un gain en Fe et Mg, et à un gain relatif en Al dû à la destruction des feldspaths, ou à une perte relative de la quantité d'Al si l'ajout de Fe-Mg est très important. Elle conduit donc à la formation de minéraux à Fe, Mg et/ou Al, parfois très riches en Fe-Mg (cf. chlorite);
- principaux minéraux marqueurs : chlorite (bas grade) ou cordiérite et grenat (haut grade);
- les principaux minéraux marqueurs de l'altération Fe-Mg peuvent côtoyer soit des minéraux à Fe-Mg (anthophyllite, olivine, OPX, etc.) dans les roches à protolithes mafiques, soit des feldspaths alcalins pour des roches ayant des protolithes felsiques. Ces minéraux, l'anthophyllite en particulier, ne sont donc pas des marqueurs de l'altération, mais plutôt des reflets de la composition initiale en Fe-Mg du protolithe frais (sauf dans les cas extrêmes où l'ajout de Fe-Mg a été très important par rapport à la quantité de Al présent);
- les minéraux riches en Al (cf. aluminosilicates, staurotide, chloritoïde, carpholite, spinelle, etc.) peuvent également se former, notamment si le lessivage excède légèrement les gains en Fe-Mg, ou si la chlorite est stable au faciès considéré (cf. section 2.5.3). Notez que ces minéraux seront communément présents, au moins en faibles quantités, dans des roches pour lesquelles l'altération principale est de type Fe-Mg.

L'altération en Na-K acide (« séricitisation », altération « phyllique », « albitisation », « altération potassique ») est caractérisée par les minéraux suivants (**figure 27**) :

- cette altération peut correspondre à un gain en Na-K, mais sa caractéristique principale est plutôt le lessivage (destruction des feldspaths, augmentation de la quantité relative d'Al) et l'hydratation conduisant à la formation de micas;
- **micas blancs (muscovite et paragonite)** : ce sont les minéraux emblématiques de l'altération Na-K (acide). Pour les faciès de hautes températures, ces minéraux ne sont plus stables et sont remplacés par des assemblages d'aluminosilicates et de feldspaths alcalins;

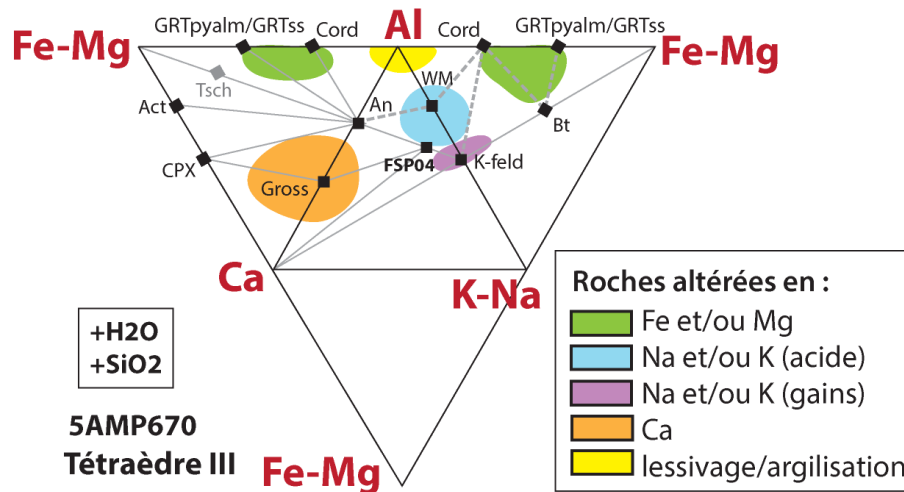
- les **aluminosilicates** peuvent être présents pour tous les faciès, notamment si le lessivage est suffisamment intense. Notez que ces minéraux seront toujours présents, au moins en faibles quantités, dans des roches pour lesquelles l'altération principale est de type Na-K (acide);
- altération détectée par les indices de la norme SV350 (cf. indices ALT\_SER\_SV350 et ALT\_PARA\_SV350).

L'altération en **Na-K** (« **albitisation** », « **altération potassique** ») est caractérisée par les minéraux suivants (**figure 27**) :

- cette altération correspond à un gain en Na-K, accompagné ou non d'un lessivage peu prononcé;
- **albite, orthose** : principaux minéraux marqueurs d'un ajout de Na-K à une roche. Une autre conséquence de cette altération pourrait être la diminution de la quantité de quartz, car  $\text{SiO}_2$  sera utilisé par le feldspath en formation. La formation des feldspaths est également dépendante de la quantité d'Al présent dans une roche, et les excès de Na-K pourraient être accommodés par la formation de sels dans certains cas;
- échange de Na-K au sein de l'albite et de l'orthose : type d'altération Na-K très difficile à quantifier, car ces effets sont très discrets;
- **halite, sylvite** : minéraux présents dans les 3 faciès de la norme bas grade uniquement (Trépanier, 2011). Un ajout important de Na-K pourrait conduire à la formation de ces minéraux. D'après les données examinées ci-dessous, ce cas de figure semble rarement se présenter dans les dépôts hydrothermaux, et ces minéraux seront ainsi toujours absents ou présents en quantités mineures dans les calculs normatifs;
- **biotite** : ce minéral caractérise plutôt les roches ayant subi des altérations Fe-Mg  $\pm$ K, ou des roches ayant des protolithes felsiques dont le K n'a pas été lessivé et a été incorporé par la biotite suite à une altération Fe-Mg. Une altération intense en K semble incapable de produire de grandes quantités de biotite d'après les données examinées ci-dessus;
- Altération détectée plutôt par les méthodes de bilan de masse.

L'altération en **Si** (« **silicification** ») forme du quartz, ou ces équivalents siliceux (cf. opale, calcédoine, etc.) lorsque les fluides sont acides. D'autres fluides, qui ajoutent Ca, Fe, Mg, Na ou K aux roches, peuvent faire diminuer la quantité de quartz, car la silice sera consommée par les différents silicates de Ca, Fe, Mg, K et/ou Na. Ce type d'altération est commun et peut survenir dans tous types de roches, pour tous types de dépôts. La silicification ne peut être identifiée, avec les minéraux normatifs, qu'en comparant la quantité de quartz normatifs des roches altérées et fraîches.

Enfin, l'altération en **Al** (« **argilisation** »), qui correspond à un lessivage important, ne fait pas l'objet d'un diagramme particulier puisqu'elle peut être traitée à l'aide des diagrammes FeMg et NaK. Cette altération pourra former des minéraux qui caractérisent les altérations Ca, Na-K, ou Fe-Mg, selon les cas (**figure 27**). Sa caractéristique principale sera que les roches concernées contiendront de grandes quantités d'aluminosilicates, de micas blancs (cf. muscovite, paragonite et margarite) ou de minéraux à Al-Fe-Mg (cf. staurotide, etc.).



**Figure 27** : Représentation des principaux minéraux caractéristiques des altérations en Fe-Mg, Na-K et Ca sur une vue éclatée du tétraèdre FM-NK-Ca-Al du faciès 5AMP670 (cf. Mathieu 2014).

## 2.9 Représentation théorique des différents types d'altérations sur les diagrammes

Les principaux types d'altérations hydrothermales ont été représentés sur les différents diagrammes d'altération (cf. annexe A). Cet exercice théorique sera ensuite confronté aux exemples naturels présentés dans la dernière partie de ce rapport (voir section 4). Pour une liste des principales altérations hydrothermales le plus communément observées sur le terrain, et qui sont synthétisées ci-dessous, voir Thompson et Thompson (2012).

### 1) Chloritisation – Fe-Mg

La représentation schématique de la chloritisation est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-1 (annexe A). Elle correspond à la formation de chlorite à bas grade, et à la destruction des feldspaths. Les roches altérées peuvent aussi contenir des micas blancs, de la biotite, du quartz, etc. La chloritisation consiste en un ajout de Fe-Mg accompagné d'une perte de Ca-Na-K et d'un gain relatif d'Al en provenance des feldspaths.

La combinaison de Fe-Mg et d'Al forme de la chlorite pour une vaste gamme de rapport (Fe+Mg)/Al, car ce groupe minéral comprend des espèces riches en Fe-Mg (daphnite) et d'autres plus riches en Al (amésite).

Lorsque le grade métamorphique augmente, des quantités variables de grenats (rapport (Fe+Mg)/Al élevé) et de cordiérites (rapport (Fe+Mg)/Al faible) se forment. Les roches de haut grade peuvent aussi contenir des minéraux riches en Al (aluminosilicates, staurotide, etc.) ou riches en Fe-Mg (anthophyllite, etc.).

Sur les diagrammes FeMg et général, cette altération se manifeste par des tendances s'allongeant vers le coin supérieur droit des diagrammes. Sur le diagramme NaK, les nuages de points s'allongent et s'orientent vers la partie supérieure centrale du diagramme. Les diagrammes Ca et CO<sub>2</sub> n'ont pas de tendances apparentes, sauf si la chloritisation accompagne d'autres types d'altération.

Quant au diagramme Si, les tendances peuvent varier. La chlorite est un minéral pauvre en Si, et la chloritisation peut provoquer la formation de quartz, notamment à partir de la silice produite par la destruction du feldspath par exemple. Le grenat et la cordiérite, par contre, sont plus riches en quartz que la chlorite, et en contiennent environ autant que le feldspath. La présence de ces minéraux devrait entraîner la formation de tendances définies sur le diagramme Si.

## 2) Biotitisation – Fe-Mg-(K)

La représentation schématique de la biotitisation est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-1 (annexe A). Dans les roches de bas grade, la biotitisation forme des roches riches en biotite et contenant chlorite, quartz, etc. La biotitisation peut provenir d'une chloritisation peu intense de roches felsiques : si le potassium du protolithe n'est pas lessivé, il peut se coupler à Al et Fe-Mg pour former de la biotite. La biotitisation peut aussi correspondre à un faible ajout de K à des roches de composition mafique (cf. roches initialement mafiques ou roches chloritisées). Enfin, la biotite n'étant pas stable dans les faciès de très bas grades, elle est souvent associée aux zones de haute température des VMS par exemple (dans le cas des gisements de bas grade).

Sur les diagrammes d'altérations, les tendances seront très similaires à celles de la chloritisation, mais les nuages de points seront moins étirés. Si la biotitisation est intense, les tendances peuvent se diriger vers le pôle biotite des différents diagrammes (cf. annexe A-1).

La biotitisation ne doit pas être confondue avec les paragneiss (cf. méta-sédiments) naturellement riches en biotite. Cependant, si la roche est un paragneiss, aucune tendance ne se formera sur les diagrammes, ce qui peut permettre de les différencier des roches ayant subi une altération.

## 3) Hématitisation, etc. – Fe

La formation d'unités riches en oxydes de fer (cf. magnétite et/ou hématite le plus souvent) reflète une altération intense qui introduit le fer et fait partir tous les autres éléments présents. Cette altération peut former toute une gamme de roches silicatées contenant des proportions variables d'oxydes de fer ainsi que des roches ne contenant que des oxydes de fer, par remplacement ou par « veining ».



Sur les diagrammes d'altération, les tendances seront similaires à ceux de la chloritisation. La différence principale sera observée sur le diagramme Si, sur lequel les nuages de points seront très allongés et seront dirigés vers le pôle de coordonnées (0; 0) (cas pour lesquels les oxydes de fer auront complètement remplacé les silicates).

#### 4) Altération K et/ou Na (gains) – Na-K

La représentation schématique de l'altération potassique est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-1 (annexe A).

L'altération potassique forme des roches riches en orthose pouvant contenir du quartz et de la muscovite. L'albitisation forme des roches riches en albite pouvant contenir chlorite, micas, parfois amphiboles. L'altération de type « adularia » forme également de l'orthose accompagné de quartz, muscovite et argiles. Ces altérations forment des roches riches en feldspaths alcalins, quel que soit le grade métamorphique.

Ce type d'altération forme des nuages de points peu allongés sur les diagrammes d'altération. Si le protolithe a une composition mafique, la composition des roches altérées pourrait se rapprocher de celles des roches felsiques. Si le protolithe est felsique, sa composition pourrait se rapprocher de celle d'une roche magmatique felsique alcaline. Sur le diagramme Si, on pourra observer une diminution du quartz si la silice de ce minéral s'est couplée à Na-K pour former des feldspaths.

#### 5) Séricitisation – Na-K-Al

La représentation schématique de la séricitisation est illustrée sur les diagrammes d'altération disponibles de l'annexe A-2 (annexe A).

La séricitisation peut se manifester par le remplacement des feldspaths par de petits minéraux de micas blancs (muscovite et/ou paragonite). Cette altération correspond à une augmentation relative de la quantité d'Al (cf. perte d'une partie de Na-K et Si) et par une hydratation. Il s'agit donc d'une altération « acide », et non d'un ajout de K dans la plupart des cas. Notez que la séricitisation sera d'autant plus prononcée que la roche initiale était riche en Na-K; i.e. que le protolithe était felsique.

Sur le diagramme général et celui de Si, la séricitisation formera des tendances relativement courtes se dirigeant vers la partie inférieure (centre-droit) des diagrammes. Sur le diagramme NaK, les tendances seront longues et se dirigeront vers le pôle (0,8; 0,8). Sur le diagramme FeMg, les tendances seront courtes et se dirigeront vers la partie centrale supérieure du diagramme. Aucune tendance ne devrait être observées sur les diagrammes Ca et CO<sub>2</sub>.

## 6) Argilisation (intermédiaire, avancée) – Al

La représentation schématique de l'argilisation est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-2 (annexe A).

L'argilisation est une altération acide plus ou moins intense (cf. catégories intermédiaire et avancée), qui forme des roches riches en argiles, aluminosilicates, quartz et parfois micas. L'argilisation peut être vue comme une séricitisation intense, qui lessive tous les alcalins en plus de lessiver la plupart des autres éléments majeurs.

Sur les diagrammes d'altération, les tendances sont donc plus longues que celles associées à la séricitisation. Sur le diagramme général et celui de Si, les tendances se dirigent vers le coin inférieur droit des diagrammes. Sur les diagrammes NaK et FeMg, les tendances se dirigent vers le coin supérieur droit.

## 7) Greisenification – Si-Al

La représentation schématique de la greisenification est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-2 (annexe A).

D'après la définition de l'IUGS, un greisen est une roche constituée de muscovite, quartz, topaze (Al), etc. La formation de greisen provoquera, sur les différents diagrammes d'altération, des tendances très similaires à celles de l'argilisation. La seule différence sera observée sur le diagramme Si, où les roches se dirigeront vers la partie centrale droite du diagramme, car les greisens contiennent plus de quartz que les roches fortement argilisées.

## 8) Silicification, « Vuggy silica » - Si

La représentation schématique de la silicification est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-2 (annexe A).

La silicification provoque une augmentation de la quantité de quartz. Dans les cas extrêmes, des quartzites à aluminosilicates peuvent se former. La silicification provoquera, sur les différents diagrammes d'altération, des tendances très similaires à celles de l'argilisation. La seule différence sera observée sur le diagramme Si, où les roches se dirigeront vers le pôle du quartz (partie supérieure droite du diagramme).

La silicification ne doit pas être confondue avec les paragneiss riches en quartz (cf. méta-grès). Cependant, si la roche est un paragneiss, aucune tendance ne se formera sur les diagrammes, ce qui peut permettre de les différencier des roches ayant subi une altération.

## 9) Altération Silici-carbonate - Si-Ca-C

La représentation schématique de l'altération silici-carbonate est illustrée sur les diagrammes d'altération disponibles à l'annexe A-2 (annexe A).

Cette altération est très similaire à la silicification, et se manifestera par les mêmes tendances sur tous les diagrammes. La seule différence est la formation de carbonates, qui se manifestera par une tendance sur le diagramme CO<sub>2</sub> à bas grade, ou par une tendance sur le diagramme Ca à haut grade. En effet, à haut grade, les carbonates ne sont pas stables en présence de grandes quantités de quartz et les roches concernées contiendront plutôt du quartz et des Ca-silicates que du quartz et des carbonates.

L'altération Si-Ca ne doit pas être confondue avec les paragneiss quartzofeldspathiques. Cependant, si la roche est un paragneiss, aucune tendance ne se formera sur les diagrammes, ce qui peut permettre de les différencier des roches ayant subi une altération.

### 11) Épidotisation – Ca

La représentation schématique de l'épidotisation est illustrée sur les diagrammes d'altération disponibles à l'annexe A-3 (annexe A).

Cette altération est marquée par la formation d'épidote. L'épidote clinozoïsite a une composition très proche de celle de l'anorthite, et l'épidotisation pourrait correspondre au remplacement du feldspath par l'épidote au faciès des schistes verts. Cependant, la formation de roches riches en épidotes nécessite un échange de matière marqué par la perte de la plupart des éléments majeurs et par un gain de Ca et de H<sub>2</sub>O.

Les tendances montrent des nuages de points généralement allongés sur les différents diagrammes d'altération. Sur le diagramme général, les nuages de points s'allongent vers la partie centrale gauche du diagramme. Sur le diagramme NaK, ils se dirigeront vers le pôle (0; 0). Sur le diagramme FeMg, ils se dirigeront vers le pôle (1; 0) et vers le pôle (1; 1) sur le diagramme Ca. Sur le diagramme Si, les tendances se dirigeront vers le pôle (0; 0), sauf si l'altération est de type épidote-quartz, auquel cas une augmentation de quartz sera également observée (cf. pôle de coordonnées (1; 1)).

### 10) Altération sodique-calcique – Na-Ca

La représentation schématique de l'altération sodique-calcique est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-3 (annexe A).

L'altération Na-Ca forme des roches riches en albite et actinote, pouvant contenir clinopyroxène, quartz, épidote, etc. Lorsque le précurseur frais est felsique, l'altération Na-Ca aura tendance à rapprocher sa composition de celle d'une roche mafique. Lorsque le précurseur est mafique, l'ajout de Na-Ca y fera augmenter la quantité de plagioclases présents. Aussi, l'altération albite-oligoclase, i.e. une altération Na-Ca commune dans les systèmes IOCG, est davantage caractérisée par une augmentation de la quantité de plagioclases que par une augmentation de la quantité d'amphiboles.

L'altération Na-Ca forme différentes tendances relativement courtes sur les diagrammes d'altération, et ces tendances s'orientent vers un point situé environ entre les protolithes frais mafiques et felsiques.

#### 11) Altération propylitique – Ca-Fe-Mg

La représentation schématique de l'altération propylitique est illustrée sur les diagrammes d'altération de à l'annexe A-3 (annexe A).

L'altération propylitique forme des roches à chlorite, épidote, albite et calcite principalement. À haut grade, cet assemblage pourra être remplacé par des minéraux Fe-Mg-Al (grenat, cordiérite, etc.) et des plagioclases.

L'altération propylitique peut être vue comme un assemblage entre une altération Fe-Mg (chloritisation) et une altération Ca (épidotisation). Sur les différents diagrammes d'altération, les tendances se dirigeront vers des positions intermédiaires entre le pôle Fe-Mg (chloritisation maximale) et le pôle Ca (épidotisation maximale).

#### 12) Carbonatation – C

La représentation schématique de la carbonatation est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-3 (annexe A).

La carbonatation est un ajout de CO<sub>2</sub> qui forme des carbonates, parfois également de la chlorite et de la muscovite. La carbonatation ne déplace pas les éléments majeurs, sauf peut-être dans les cas extrêmes pour lesquels des horizons constitués exclusivement de carbonates se forment.

Les tendances seront généralement courtes sur la plupart des diagrammes, et pourront se rapprocher des pôles à chlorite-muscovite pour les roches de bas grade uniquement (diagrammes NaK, FeMg et Si). Sur le diagramme général, les tendances pourront se diriger vers le pôle carbonate, situé en haut au centre du diagramme, si le grade métamorphique est bas et/ou que la roche est très riche en carbonates.

Selon le grade métamorphique et l'intensité de la carbonatation, un long nuage de points se dirigeant vers la partie supérieure droite du diagramme CO<sub>2</sub> sera observé, ou bien un nuage de points limité pourra être observé sur le diagramme Ca. En effet, si la carbonatation a été faible, l'augmentation du grade métamorphique va dévolatiliser les roches et l'épisode de carbonatation ne sera plus détectable. Si la carbonatation a été intense, les unités concernées deviendront des marbres à haut grade.

La carbonatation est communément une altération très étendue touchant la quasi-totalité des roches d'un gisement. Le métamorphisme de haut grade aura pour effet principal de briser cette continuité, en faisant disparaître les carbonates des roches les plus pauvres en carbonates, et en mettant en valeur les roches les plus carbonatées, qui deviendront des horizons granoblastiques qui ne doivent pas être confondus avec les marbres.

### 13) Skarnification

La représentation schématique de la skarnification est illustrée sur les diagrammes d'altération de l'annexe A-4 (annexe A).

Les skarns sont généralement constitués de grenat (grossulaire, andradite), clinopyroxène, wollastonite, amphibole et épidote. Les skarns magnésiens, quant à eux, sont plutôt riches en olivine et clinopyroxènes.

Les skarns sont, dans la majorité des cas, une unité riche en carbonates qui a subi un métamorphisme de contact. Il s'agit donc communément d'une unité sédimentaire (méta-calcaire, ...) ou d'une roche carbonatée, qui a subi une dévolatilisation. Il peut aussi s'agir d'une roche riche en silicate, qui perdra ses minéraux hydratés et pourra recevoir du CO<sub>2</sub> des fluides magmatiques.

Le magma peut aussi transmettre certains éléments à la roche métasomatisée (cf. Si, parfois CO<sub>2</sub>), et fait systématiquement perdre les minéraux hydratés (cf. perte de H<sub>2</sub>O).

Notez que le métamorphisme de haut grade ne dévolatilise généralement pas les roches riches en carbonates; les skarns sont une exception à cause de l'élévation importante de la température qui conduit à leurs formations.

Les nuages de points seront généralement longs sur les différents diagrammes, et partiront du pôle des carbonates pour se diriger vers des pôles correspondant à des assemblages de divers silicates. Les silicates du skarn seront riches en Ca ou en Fe-Mg, selon que le précurseur était plutôt riche en calcite ou en dolomite.

---

### 3 INDICES D'ALTÉRATION

---

#### 3.1 Principe général

Les indices d'altération proposés par ce projet sont des chiffres sans dimensions compris entre 0 et 100. Ils sont calculés selon le principe suivant :

$$\text{Indice} = \text{Fact1} * \text{Fact2} * 100 ; \text{ avec :} \quad (\text{équation 1})$$

- **Fact1** : compris entre 0 et 1, il s'agit d'un rapport entre les proportions de différents minéraux normatifs.

$$\text{Fact1} = (\%_{\text{mx\_marqueur\_de\_l'altération}}) / (\%_{\text{somme\_de\_plusieurs\_mx}}) \quad (\text{équation 2})$$

- **Fact2** : compris entre 0 et 1, ce facteur décrit la position de l'échantillon considéré sur l'un des diagrammes d'altération présentés précédemment. Il s'agit de la distance euclidienne entre l'échantillon et un pôle représentant le précurseur frais, calculée par rapport à un pôle d'altération maximale.

Les indices qui peuvent être calculés à partir des différents diagrammes d'altération sont les suivants :

- **diagramme Ca** : l'indice Ca est disponible, avec le Fact2 déduit du diagramme Ca;
- **diagramme Si** : l'indice Si est disponible, avec le Fact2 déduit du diagramme Si;
- **diagramme FeMg** : l'indice FeMg est disponible, avec le Fact2 déduit du diagramme FeMg;
- **diagramme NaK** : l'indice NaK est disponible, avec le Fact2 déduit du diagramme NaK;
- **diagramme CO<sub>2</sub>** : l'indice CO<sub>2</sub> est disponible, qui correspond au Fact1 seul (aucun Fact2 n'est calculé pour cet indice);
- **diagramme général** : les indices Ca, Si, FeMg, NaK et CO<sub>2</sub> sont disponibles, avec les Fact2 déduit du diagramme général.

#### 3.2 Principe de calcul du Fact 2

Le Fact2 est un chiffre compris entre 0 et 1 qui documente la position de chaque échantillon considéré sur les diagrammes d'altération. La position de l'échantillon est comparée à la position d'un précurseur frais (« *pôle frais* ») et à celle d'un pôle d'altération maximale (« *pôle altéré* »). Les coordonnées cartésiennes (x, y) du *pôle frais* et du *pôle altéré* sont définies par l'utilisateur (cf. section 3.9).

Plus un échantillon est proche du *pôle frais*, plus le Fact2 est proche de 0, et plus un échantillon est proche du *pôle altéré*, plus le Fact2 est proche de 1. Le détail du calcul du Fact2 est présenté ci-dessous.

Dans un premier temps, le code calcule les paramètres suivants :

- $dist\_Prec\_Pole$  : distance euclidienne entre le *pôle frais* et le *pôle altéré*;
- $dist\_Prec\_Echant$  : distance euclidienne entre le *pôle frais* et la position de l'échantillon considéré sur le diagramme utilisé;
- $dist\_Ech\_Pole$  : distance euclidienne entre le *pôle altéré* et la position de l'échantillon considéré sur le diagramme utilisé.

Le Fact2 est ensuite calculé, selon que l'une des trois conditions suivantes est respectée :

- Si ( $Dist\_Prec\_Echant < Dist\_Prec\_Pole$ ) et ( $Dist\_Prec\_Echant < Dist\_Ech\_Pole$ ), alors (**figure 29-a**) :

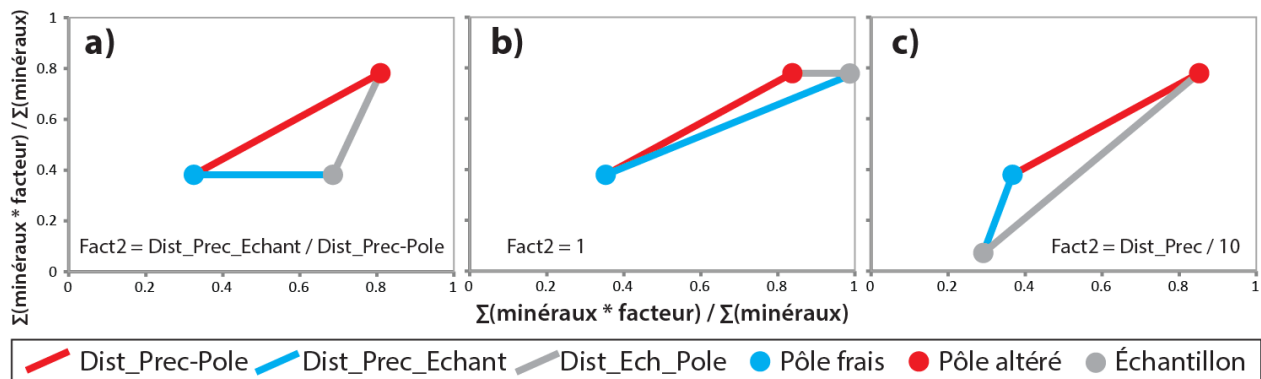
$$Fact2 = Dist\_Prec\_Echant / Dist\_Prec\_Pole \quad (\text{équation 3});$$

- Sinon, si le point est situé au-delà du *pôle altéré* (dans le détail, le code vérifie quatre conditions à cette étape) (**figure 29-b**) :

$$Fact2 = 1 \quad (\text{équation 4});$$

- Sinon, pour tous les autres cas (**figure 29-c**) :

$$Fact2 = Dist\_Prec\_Pole / 10 \quad (\text{équation 5}).$$



**Figure 28** : Schéma décrivant la méthode de calcul du Fact2.

### 3.3 Indice CO<sub>2</sub>

Cet indice correspond au Fact1, et ne nécessite donc pas le calcul du Fact2. L'indice CO<sub>2</sub> est similaire à l'indice ALT\_CARBS\_SV350 de la norme BasGrade (Trépanier 2011) et se calcule de la façon suivante :

$$\text{Indice CO}_2 = \frac{\sum \text{carbonates}}{\text{(somme de tous les carbonates et de tous les silicates à Ca-Mg-Fe)}} \quad (\text{équation 6})$$

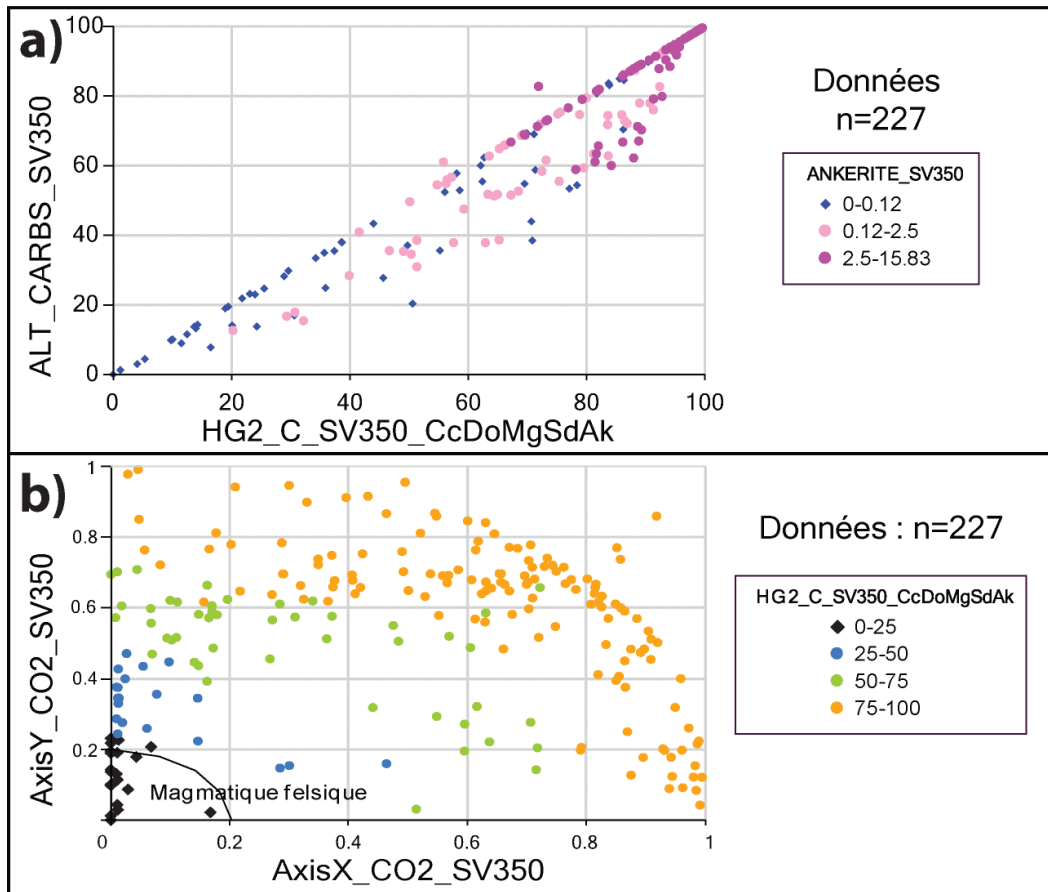
Cet indice diffère cependant de l'indice ALT\_CARBS\_SV350 en ceci que l'utilisateur peut choisir le ou les carbonates dont la somme permet de calculer le numérateur (cf. équation 6). Le dénominateur reste inchangé, quels que soient les choix faits par l'utilisateur concernant le numérateur.

Les indices CO<sub>2</sub> sont nommés de la façon suivante : HG2\_C\_3AMP675\_CcDo (exemple) :

- hG2 : HG pour « méthode HautGrade », avec le chiffre 2 indiquant que l'on n'utilise pas de diagramme particulier pour calculer cet indice (cf. absence de Fact2);
- C : pour carbonatation;
- 3AMP675 : nom du faciès, parmi les 20 disponibles;
- CcDo : minéraux marqueurs choisis par l'utilisateur pour le calcul du numérateur. Les minéraux disponibles sont : calcite (Cc), dolomite (Do), magnésite (Mg), sidérite (Sd), ankérite (Ak) et, pour certains faciès, graphite (Gp).

L'indice CO<sub>2</sub> a été calculé sur les données de la syénite de Beattie, pour le faciès SV350 (Bourdeau, 2013; Bigot, 2012) (**figure 30**). Ce calcul permet de montrer la forte corrélation entre les indices CO<sub>2</sub> calculés avec les méthodes BasGrade et HautGrade (**figure 30-a**), ainsi que de montrer la répartition des valeurs de l'indice HG2\_C\_SV350\_CcDoMgSidAk sur le diagramme CO<sub>2</sub> (**figure 30-b**).





**Figure 29** : Indice CO<sub>2</sub> calculé sur les données de la syénite de Beattie (Bourdeau 2013, Bigot 2012), pour les méthodes BasGrade et HautGrade.

### 3.4 Silicification et indice Si

Pour l'indice Si, le Fact1 ne peut pas être modifié par l'utilisateur, car le seul minéral marqueur de cette altération est le quartz. Le Fact1 correspond donc à :

$$\text{Fact 1} = \%_{\text{quartz}} / (\sum \text{ tous les silicates}) \quad (\text{équation 7})$$

Le Fact2 correspond à la position des échantillons par rapport à un *pôle frais* et à un *pôle altéré* définis par l'utilisateur en fonction de la forme que prend un nuage de points donné sur le diagramme Si (cf. **figure 31**). La position du *pôle frais* sera, le plus souvent, de coordonnées (0, 0), et le *pôle altéré* aura les coordonnées (1; 1) ; bien que ces valeurs puissent être adaptées en fonction des besoins.

Les indices Si sont nommés de la façon suivante : HG5\_Si\_3AMP675\_Qtz (exemple) :

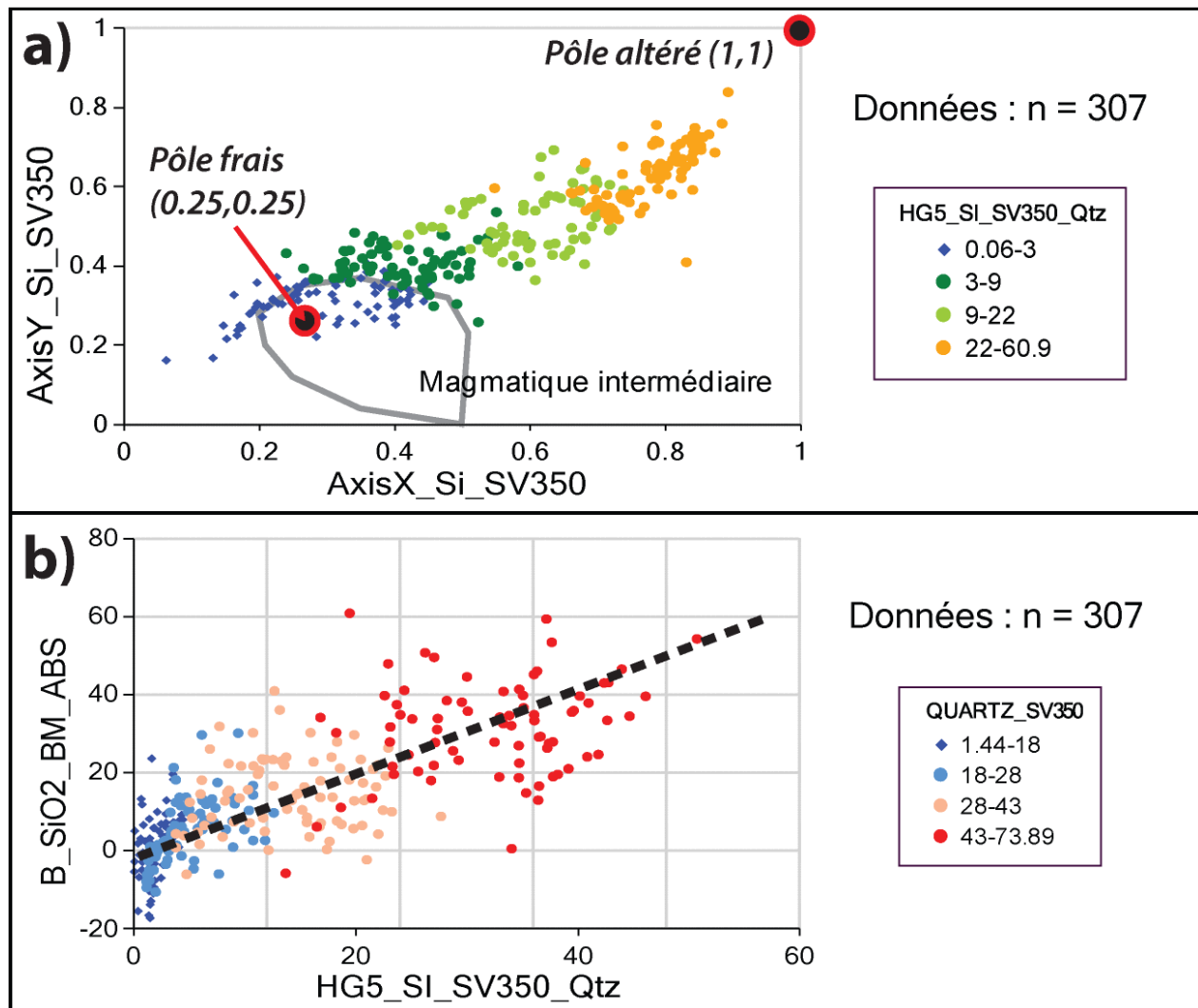
- HG5 : HG pour « méthode HautGrade », avec le chiffre 5 indiquant que l'on utilise la position que les points prennent sur le diagramme Si pour effectuer ce calcul;
- Si : pour silicification;
- 3AMP675 : nom du faciès, parmi les 20 disponibles;

- Qtz : pour quartz, le seul minéral marqueur de cette altération.

L'indice Si a été calculé pour les échantillons du camp de Noranda (cf. échantillons de X-Strata-Cu, Alexis et SIGEOM situés dans la zone à Qtz-épidote cartographiée par Santaguida (1999) ; données compilées pendant le projet Consorem 2009-03; Lafrance, 2009). Ces échantillons contiennent probablement des quantités variables de veines de quartz-épidotes.

Le calcul de l'indice Si indique une assez bonne corrélation entre l'indice HG5\_Si\_SV350\_Qtz et les bilans de masse par modélisation des précurseurs (cf. B\_SiO2\_BM\_ABS; Trépanier 2008) (**figure 31**).

Notons cependant que l'indice Si est très dépendant de la proportion de quartz, tandis que la méthode des bilans de masse ne s'intéresse pas directement aux excès de silice. Il est probable que les bilans de masse soient une méthode plus précise que l'indice Si.



**Figure 30** : Indice Si calculé sur les données compilées par le projet Consorem 2009-03 (Lafrance 2009).

### 3.5 Indice Ca

L'indice Ca nécessite le calcul de Fact1 et Fact2, qui ont les particularités suivantes :

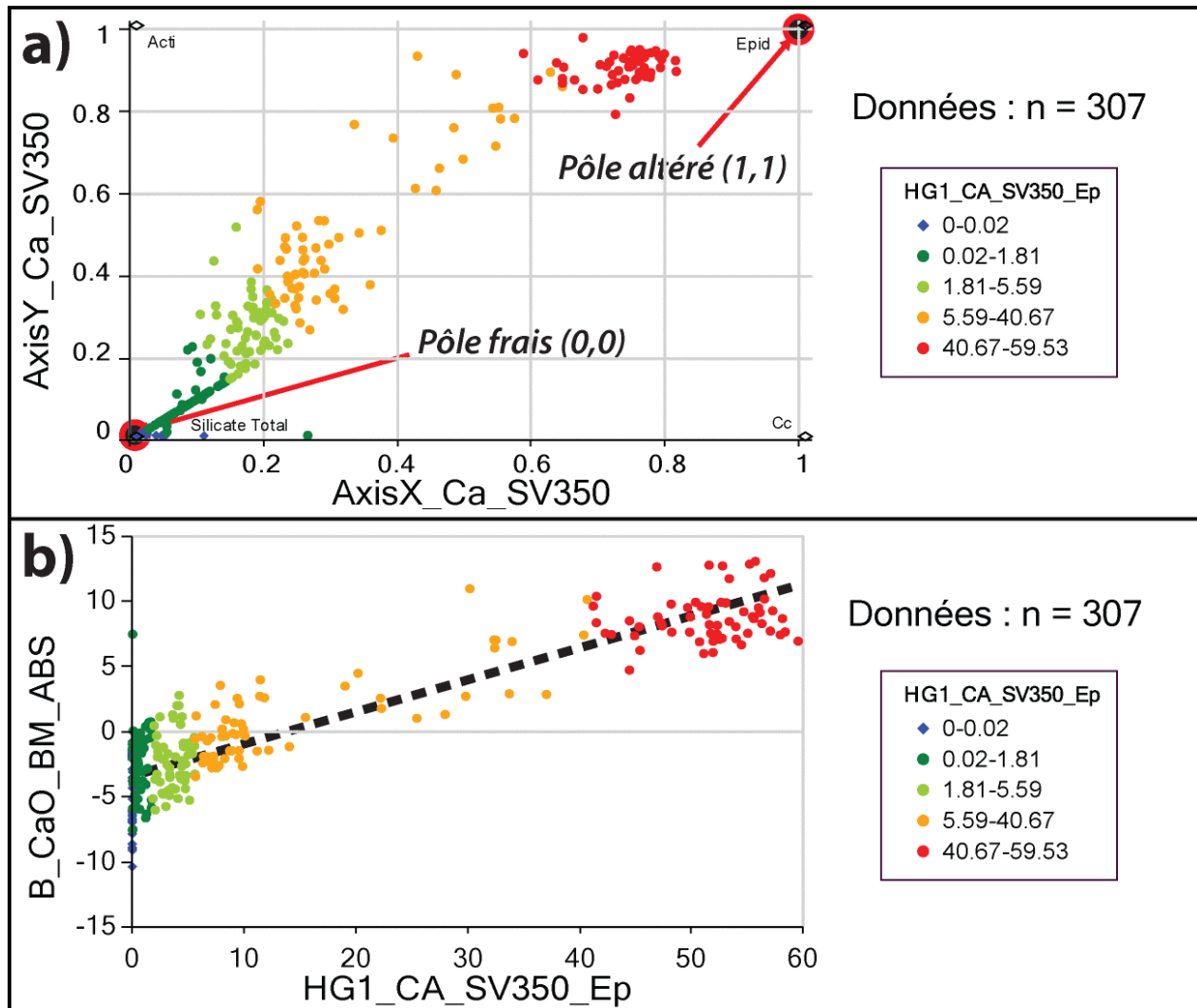
- fact1 : rapport entre des minéraux marqueurs de l'altération (cf. tous les minéraux riches en Ca représentés sur le diagramme Ca) et la somme de tous les silicates, à l'exception du quartz. La calcite est incluse à cette somme pour les faciès de la norme BasGrade uniquement, car la calcite remplace la wollastonite pour ces faciès;
- fact2 : position de l'échantillon par rapport à un pôle frais (les coordonnées (0; 0) sont recommandées) et un pôle altéré (coordonnées à choisir en fonction de la direction prise par le nuage de points).

Les indices Ca sont nommés de la façon suivante : HG1\_Ca\_3AMP675\_WoGr (exemple).

- HG1 : HG pour « méthode HautGrade », avec le chiffre 1 indiquant que l'on utilise la position que les points prennent sur le diagramme Ca pour effectuer ce calcul;
- Ca : pour altération Ca;
- 3AMP675 : nom du faciès, parmi les 20 disponibles;
- WoGr : minéraux marqueurs choisis par l'utilisateur pour le calcul du numérateur. Les minéraux possibles sont : wollastonite (Wo), anorthite et lawsonite (An), grossulaire (Gr), épidote (Ep), actinote (Ac), margarite (Ma), clinopyroxène (CPX), honblende (Hn), clinozoisite (cZo) et calcite (Cc). La calcite est disponible seulement pour les 3 faciès de BasGrade (SV350, SV450 et AMP575).

L'indice Ca a été calculé pour les échantillons du camp de Noranda (cf. échantillons de X-Strata-Cu, Alexis et SIGEOM situés dans la zone à Qtz-épidote cartographiée par Santaguida (1999) ; données compilées pendant le projet Consorem 2009-03; Lafrance, 20009). Ces échantillons contiennent probablement des quantités variables de veines de quartz-épidotes.

Le calcul de l'indice Ca indique une forte corrélation entre l'indice HG1\_CA\_SV350\_Ep et les bilans de masse par modélisation des précurseurs (cf. B\_CaO\_BM\_ABS; Trépanier, 2008) (**figure 32**). Ce calcul démontre également que l'altération, Ca est marquée essentiellement par l'épidote dans ces roches.



**Figure 31** : Indice Ca calculé sur les données compilées par le projet Consorem 2009-03 (Lafrance 2009).

### 3.6 Altérations Fe et Mg

Les indices Fe et Mg nécessitent le calcul de Fact1 et Fact2, qui ont les particularités suivantes :

- fact1 : rapport entre des minéraux marqueurs de l'altération (cf. tous les minéraux riches en Fe, Mg et/ou Al représentés sur le diagramme FeMg) et la somme de tous les silicates du faciès considéré, à l'exception du quartz et en incluant les oxydes de fer. Pour l'indice Fe, les minéraux contenant du Mg sont exclus de cette somme, et *vice versa* pour l'indice Mg;
- fact2 : position de l'échantillon par rapport à un pôle frais (les coordonnées (0; 0) ou (0, 1) sont recommandées, selon que les roches ont un précurseur mafique ou felsique) et un pôle altéré (les coordonnées (0,8; 0,8) ou (1; 1) sont recommandées, selon que l'altération est de type Fe-Mg ou qu'elle est dominée par le lessivage).

Les indices Fe et Mg sont nommés de la façon suivante : HG3\_Fe\_3AMP675\_OxGr (exemple).

- HG3 : HG pour « méthode HautGrade », avec le chiffre 3 indiquant que l'on utilise la position que les points prennent sur le diagramme FeMg pour effectuer ce calcul;
- Fe : pour altération Fe, ou Mg pour altération Mg;
- 3AMP675 : nom du faciès, parmi les 20 disponibles;
- OxGr : minéraux marqueurs choisis par l'utilisateur pour le calcul du numérateur. Les minéraux possibles sont :
  - staurolite (St), chloritoïde (Ct), spinel (Sp), aluminosilicates (Alu) (cf. lessivage);
  - chlorite (Ch), grenat (Gr), cordiérite (Cor) (cf. altération FeMg);
  - fe-oxydes (Ox) (cf. indice Fe uniquement);
  - carpholite (Car), sudoïte (Su) (cf. indice Mg uniquement).

Plusieurs exemples de calcul des indices Fe et Mg sont présentés ci-dessous (cf. section 4).

### 3.7 Indices Na et K

Les indices Na et K nécessitent le calcul de Fact1 et Fact2, qui ont les particularités suivantes :

- fact1 : rapport entre des minéraux marqueurs de l'altération (cf. tous les minéraux riches en K, Na et/ou Al représentés sur le diagramme NaK) et la somme de tous les silicates du faciès considéré, à l'exception du quartz. Pour l'indice K, les minéraux contenant du Na sont exclus de cette somme, et *vice versa* pour l'indice Na;
- fact2 : position de l'échantillon par rapport à un pôle frais (les coordonnées (1; 0), (0; 0) ou (0; 1) sont recommandées, selon que les roches ont un précurseur mafique ou felsique) et un pôle altéré (les coordonnées (0,8; 0,8) ou (1; 1) sont recommandées, selon que l'altération est de type Na-K ou qu'elle est dominée par le lessivage).

Les indices Na et K sont nommés de la façon suivante : HG4\_K\_3AMP675\_BtMu (exemple)

- HG4 : HG pour « méthode HautGrade », avec le chiffre 4 indiquant que l'on utilise la position que les points prennent sur le diagramme NaK pour effectuer ce calcul;
- K : pour altération K, ou Na pour altération Na;
- 3AMP675 : nom du faciès, parmi les 20 disponibles;
- BtMu : minéraux marqueurs choisis par l'utilisateur pour le calcul du numérateur. Les minéraux possibles sont :
  - Indice K : biotite (Bt), muscovite (Mu), orthose (Or), leucite (Le), sel sylvite (Sl);
  - Indice Na : albite (Ab), paragonite (Pa), néphéline (Ne), amphibole (Am), clinopyroxènes (Cpx), sel halite (Sl);
  - Indice Na et K : aluminosilicate (Alu).

Plusieurs exemples de calcul des indices Na et K sont présentés ci-dessous (cf. section 4).

### 3.8 Diagramme général

Pour ce diagramme, il est possible de calculer tous les indices décrits précédemment, à l'exception de l'indice Si (cf. le diagramme général ne représente pas le quartz). La méthode de calcul des indices et les minéraux marqueurs sont les mêmes que ceux énumérés ci-dessus.

Lorsque l'utilisateur utilise le diagramme général pour calculer les indices, il doit choisir :

- les coordonnées du *pôle frais*, qui sera le même pour tous les indices (sauf l'indice CO<sub>2</sub>, qui n'utilise pas le Fact2). Les coordonnées du *pôle frais* doivent être fonction de la forme que prend le nuage de points sur le diagramme considéré;
- les coordonnées des *pôles altérés*, qui vont différer d'un indice à l'autre. Les coordonnées recommandées sont : (1; 1) pour les indices Fe et Mg, (0; 0) l'indice Na, (0; 1) pour l'indice Ca et (0,6; 0,25) ou (0,7; 0), selon les cas, pour l'indice K.

---

## 4 ÉTUDE DE CAS

---

### 4.1 Dépôt d’Au de Casa Bérardi, Abitibi

Les roches situées à proximité du gisement de Casa Bérardi, Abitibi, n’ont pas subi d’épisode majeur de métamorphisme après leurs formations, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes de bas grade. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : projet Consorem 2005-04 et 2006-04 pour l’étude de la carbonatation (analyses de Nabil 2005, 2006);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport  $Fe_2O_3/Fe_2O_{3T}$  (%pds) = 0,2

Les roches analysées ont des protolithes variés (cf. roches volcaniques mafiques à felsiques, formations de fer, roches sédimentaires à graphite, dykes, veines). La carbonatation, qui était le sujet d’étude des projets Consorem 2005-04 et 2006-04, est communément la seule altération reportée pour ces roches ; bien qu’il soit signalé que quelques échantillons contiennent chlorite, épidote et/ou « séricite » (Nabil 2005, 2006).

Lorsque l’on représente les analyses sur le diagramme général, on observe une certaine dispersion des points (**figure 34-a**). Les roches ayant des protolithes felsiques sont observées dans la partie inférieure du diagramme, et les autres échantillons se rapprochent soit des pôles Fe-Mg, Ca ou, plus communément, du pôle CO<sub>2</sub> (**figure 34-a**). Le diagramme CO<sub>2</sub> confirme que les échantillons présentent des degrés de carbonatation variés, parfois très importants (**figure 34-b**).

Les indices d’altération ont ensuite été calculés à l’aide des paramètres résumés au **tableau 2**. Ces indices ont été comparés aux indices de la norme BasGrade, afin d’évaluer leurs pertinences (**figure 35**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **CO<sub>2</sub>** : altération la plus importante. Les indices calculés avec les méthodes BasGrade et HautGrade sont équivalents (**figure 35-a**);
- **Si** : la quantité de quartz est légèrement plus élevées dans les roches les plus carbonatées, probablement parce que les carbonates monopolisent une partie importante du Ca-Mg-Fe et libère-le Si des Ca-Fe-Mg-silicates altérés. Ce phénomène ressemble à une silicification, bien que le Si ne soit probablement pas apporté par les fluides;
- **Ca** : faible et concerne principalement les quelques roches qui contiennent peu de carbonates. Les roches non carbonatées contiennent plus de Ca-silicates que les autres, ce qui est normal et ne correspond pas à une altération Ca;
- **Fe-Mg** : la chloritisation est présente dans de nombreuses roches, où elle est marquée par un excès de chlorite. Les indices des normes BasGrade et HautGrade se corrèlent relativement bien (**figure 35-b**);

- **Na-K** : altération surtout présente dans les roches les plus intensément carbonatées. Cette altération est marquée par les micas blancs. Les indices des normes BasGrade et HautGrade se corrèlent plus ou moins bien, selon les cas (**figure 35-c**).

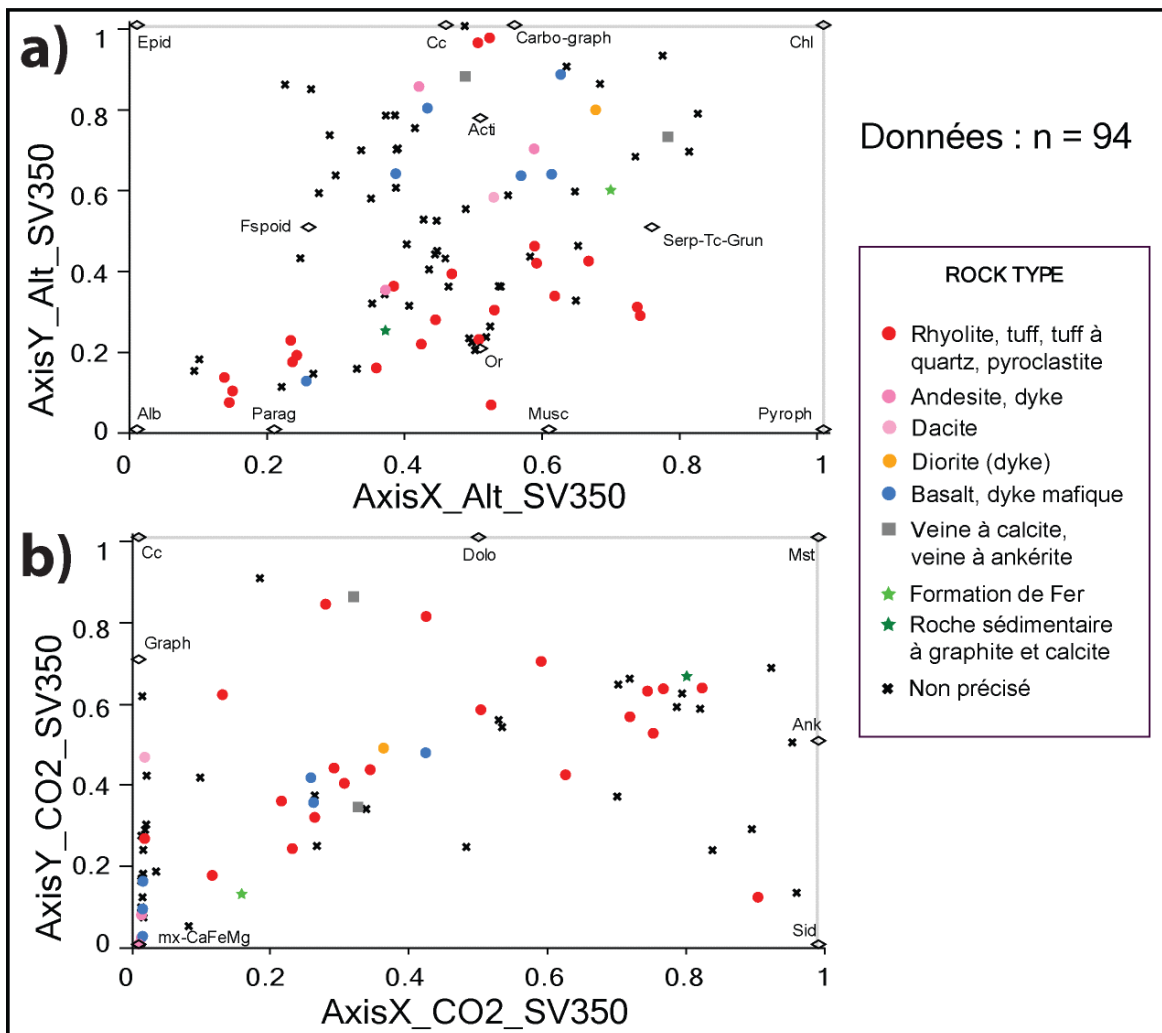
Les échantillons compilés ont principalement subi une carbonatation, les autres types d'altérations présentes étant marginales.

Les méthodes BasGrade et HautGrade produisent des résultats différents pour la chloritisation et la séricitisation, car les indices de la norme BasGrade sont calculés « SANS $\text{CO}_2$  » (cf. Trépanier 2011), alors que la méthode HautGrade prend en compte la paragenèse finale de la roche. Ceci démontre la supériorité de la méthode BasGrade au faciès des schistes verts. Le problème ne se pose plus à partir du faciès des amphibolites, à cause des particularités des réactions entre silicates et carbonates (cf. Mathieu 2014).

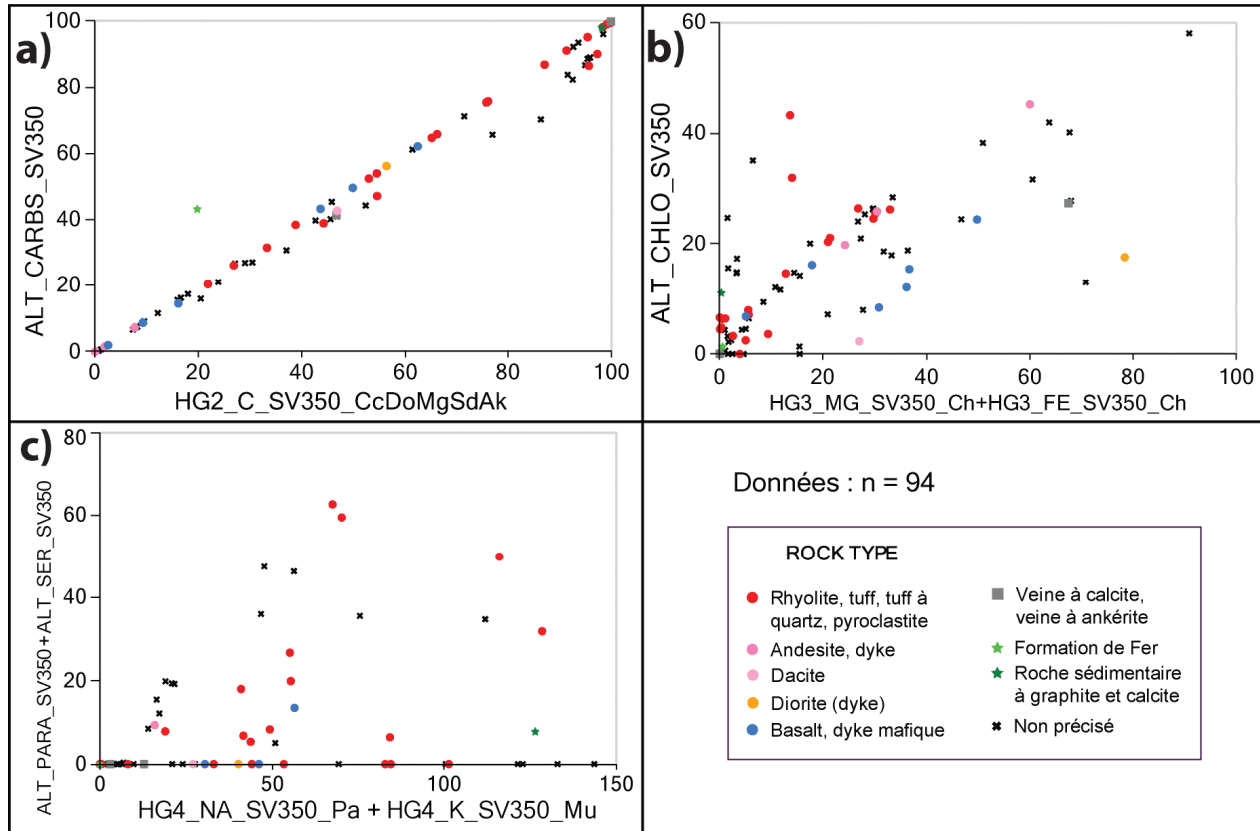
Tableau 2 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
1	Diagramme Ca	Épidote	(0; 0)	(1; 1)
2	Diagramme $\text{CO}_2$	Tous les carbonates	/	/
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	Quartz	(0; 0)	(1; 1)





**Figure 32 :** Diagramme général (a) et diagramme CO<sub>2</sub> (b) pour les roches de la région de Casa Bérardi échantillonnées par Nabil (2005, 2006).



**Figure 33** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les indices de la norme BasGrade et par les indices de la méthode « HautGrade ».

## 4.2 VMS de Horne, Abitibi

Le VMS de Horne, Abitibi, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : MacLean et Hoy (1991);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> (%pds) = 0.2.

Les roches analysées ont des protolithes volcaniques de compositions rhyolitiques et andésitiques, et ont subi des altérations en Na-K (cf. zone à quartz et « séricite ») et/ou en Fe-Mg (cf. zone à chlorite) (MacLean et Hoy 1991).

Lorsque l'on représente les points sur le diagramme général, on observe que les protolithes frais se situent dans la partie inférieure gauche du diagramme, et que les échantillons altérés se rapprochent des pôles d'altération en K et en Fe-Mg (**figure 36-a**). Ces deux types d'altération apparaissent très clairement sur les diagrammes FeMg (**figure 36-b**) et NaK (**figure 36-c**), où la position des roches sur les diagrammes est en accord avec le type d'altération observé par

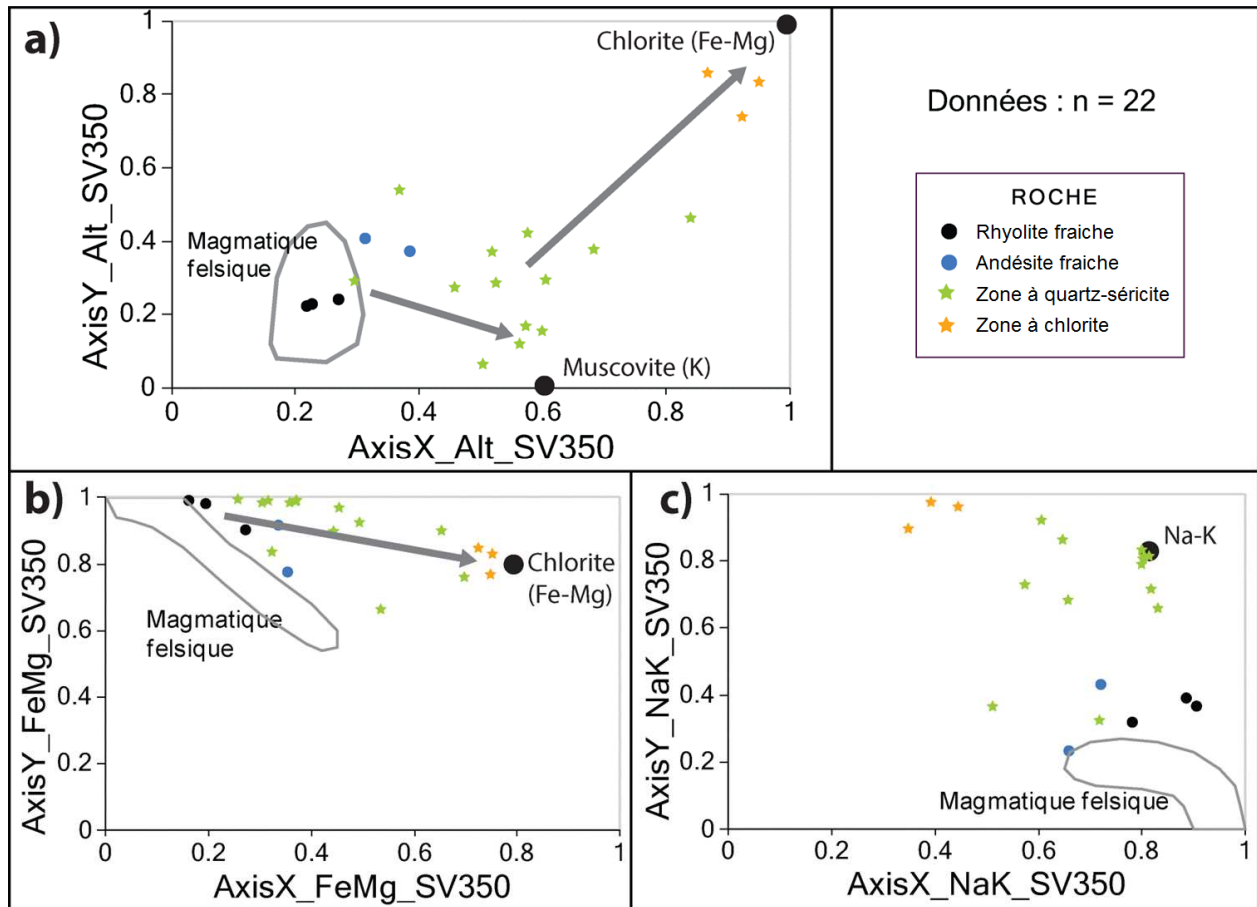
MacLean et Hoy (1991). Les autres diagrammes indiquent une altération faible en CO<sub>2</sub>, avec présence de Fe-carbonates principalement, une altération en Si marquée dans la zone à quartz-chlorite uniquement, et une absence d'altération en Ca.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 3**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 37**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

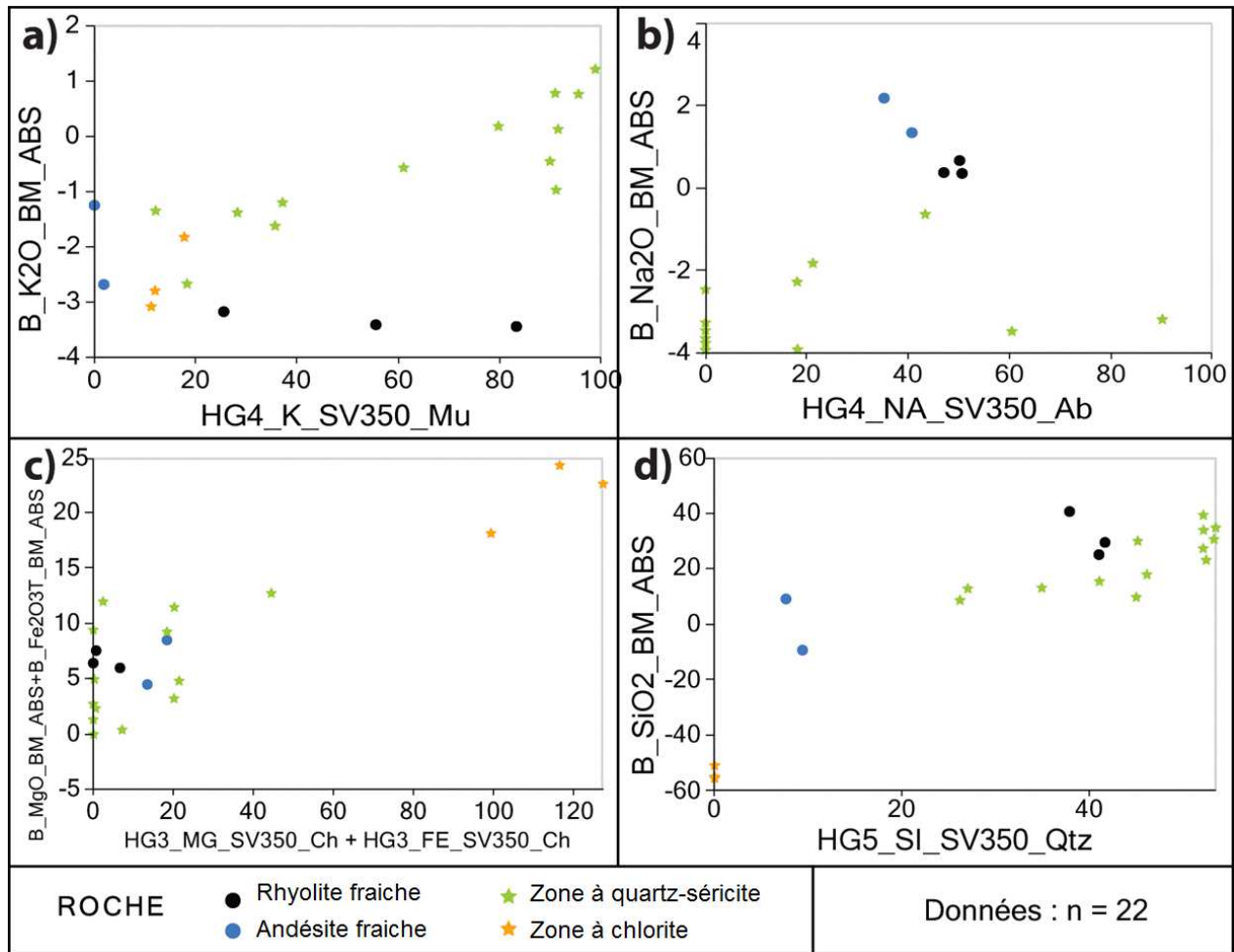
- **Si** : altération marquée dans la zone à quartz et « séricite ». L'indice Si se corrèle bien avec le résultat du calcul des bilans de masse par modélisation des précurseurs (**figure 37-d**);
- **Fe-Mg** : altération marquée dans la zone à chlorite. L'indice FeMg se corrèle bien avec le résultat du calcul des bilans de masse par modélisation des précurseurs (**figure 37-c**);
- **Na-K** : les indices ont été calculés avec différents minéraux marqueurs (cf. **tableau 3**). L'altération en Na-K est marquée par la présence de micas blancs (cf. **figure 36-c**), et l'indice qui utilise les micas blancs est probablement le plus juste. Par contre, la corrélation avec les bilans de masse ne s'observe que si le minéral marqueur utilisé est le feldspath alcalin (**figure 37-a, -b**), ce qui confirme que les bilans de masse sont sensibles aux gains en Na-K (cf. altération K, albitisation, etc.), et pas à la séricitisation (cf. section 2).

Tableau 3 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Feldspaths alcalins et micas blancs	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)



**Figure 34** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme NaK (c) pour les roches du VMS de Horné échantillonnées par MacLean et Hoy (1991).



**Figure 35** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

### 4.3 Glenwood dome, Rouyn-Noranda, Abitibi

Les altérations du dôme de Glenwood, Abitibi, n'ont pas subi d'épisodes majeurs de métamorphisme après leurs formations, et sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes hydrothermaux de sub-surface. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Genna et al. (2011);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 et  $\text{CO}_2$  normatif pour les quelques roches ayant PAF analysée, et rien pour les roches n'ayant ni  $\text{CO}_2$ , ni  $\text{H}_2\text{O}$ , ni PAF analysés.

Lorsque l'on représente les points sur les diagrammes d'altération, on observe que tous les types d'altération sont présents, à l'exception de la carbonatation qui n'a pas pu être évaluée à cause de l'absence du dosage des volatils (**figure 38**). Les altérations observées sont les suivantes :

- **diagramme Ca** : altération importante pour 2 roches seulement. Comme la carbonatation n'a pu être évaluée, l'altération en Ca pourrait avoir été mal estimée. Notez que la plupart des roches contiennent des quantités faibles d'épidote normative (anorthite non altérée?) (**figure 38-b**);
- **diagrammes NaK et FeMg** : ces altérations sont présentes dans les classes « least altered » et à « chlorite-séricite » de Genna et al (2011). Ces roches contiennent de la chlorite et des micas blancs normatifs (**figure 38-c, -d**). Les roches de la classe « séricite » contiennent, quant à elles, des quantités importantes de chlorite, de micas blancs, d'épidote et de pyrophyllite (cf. minéral Al), dénotant un fort lessivage côtoyant des altérations en Fe-Mg, Na-K et  $\pm$  Ca importantes (**figure 38-c, -d**);
- **diagramme Si** : les altérations en Na-K, Fe-Mg, Ca et surtout en Al (cf. lessivage) sont accompagnées d'une perte importante de Si (**figure 38-e**).

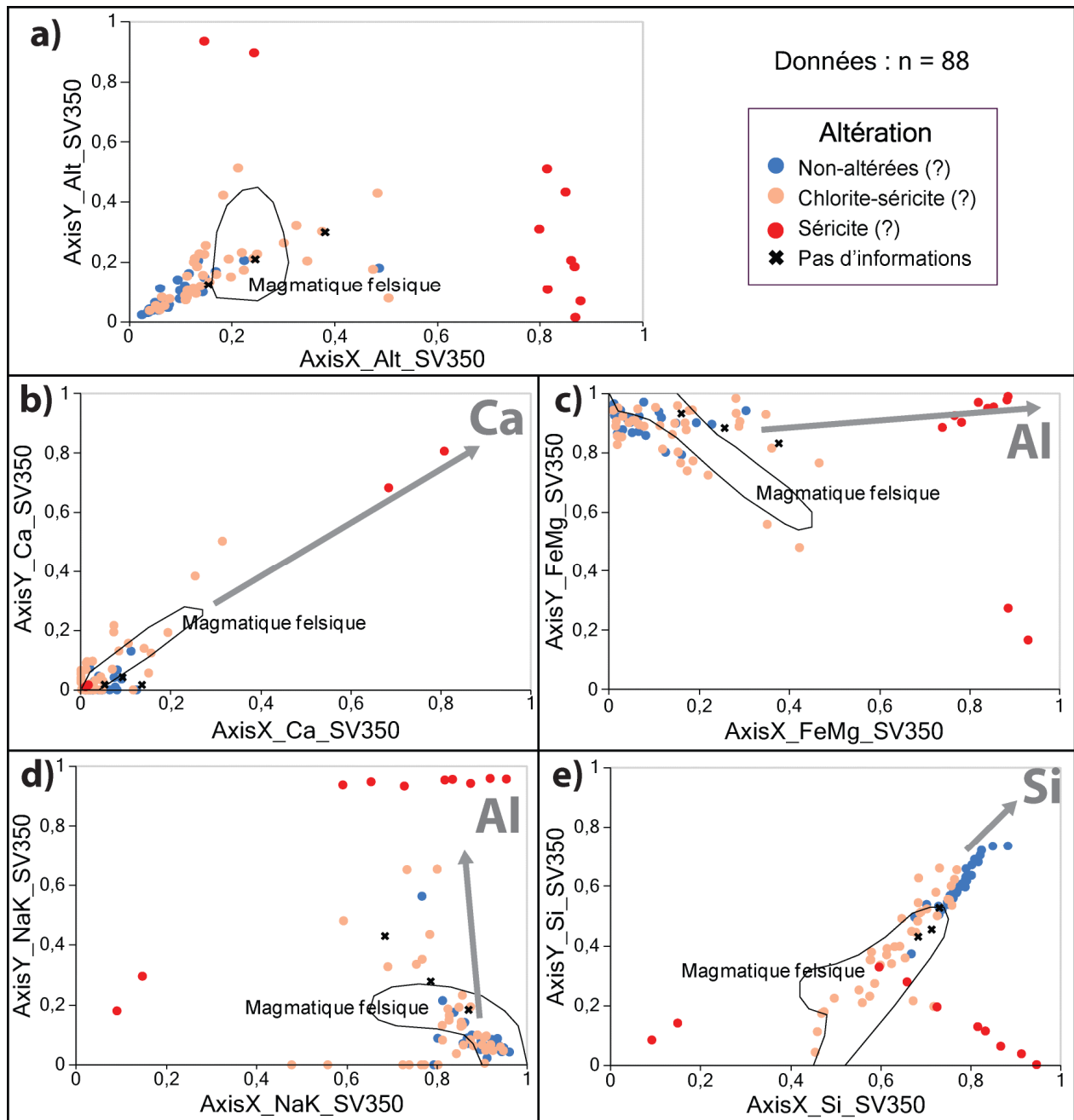
Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 4**. Ces indices ont ensuite été comparés aux classes établies par Genna et al. (2011), afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 39**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **classe « least altered » de Genna et al. (2011)** : les valeurs des indices d'altération sont les plus faibles, et ces roches correspondent donc probablement aux protolithes frais (**figure 39**);
- **classe « chlorite-séricite » de Genna et al. (2011)** : ces roches présentent des altérations faibles en NaK et FeMg d'après les indices d'altération (**figure 39**);
- **classes « séricite » et « ? » de Genna et al. (2011)** : ces roches présentent des altérations fortes en Na-K et/ou en Fe-Mg, accompagnées d'un lessivage important et d'une perte de Si (**figure 39**).

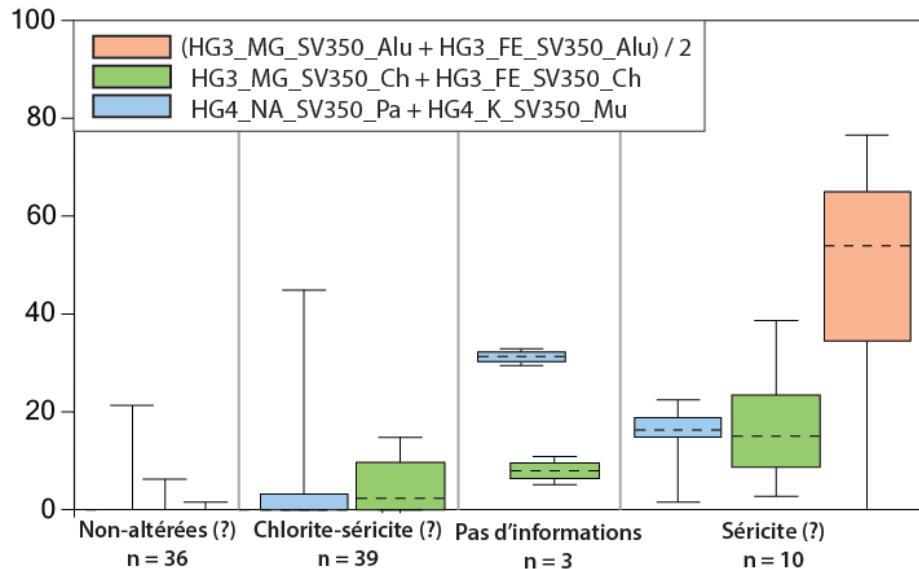
D'après ces données, l'altération principale semble être une altération acide, probablement responsable de la destruction d'une partie des feldspaths (altération épithermale ?).

Tableau 4 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
1	Diagramme Ca	Épidote	(0; 0)	(1; 1)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(1; 1)
3	Diagramme FeMg	Pyrophyllite	(0; 0)	(1; 1)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(1; 1)
5	Diagramme Si	quartz	(0,4; 0)	(1; 1)



**Figure 36** : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du dôme de Glenwood échantillonnées par Genna et al. (2011).



**Figure 37** : Boîte à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Genna et al. (2011).

#### 4.4 VMS de Kristineberg, Suède

Le VMS de Kristineberg, Suède, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Hannington et al. (2003), Barrett et al. (2005);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> (%pds) = 0,2 ou avec FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> analysés, selon les cas.

Lorsque l'on représente les points sur les diagrammes d'altération, on observe que les échantillons présentent des altérations marquées en Fe-Mg, Na-K et ± Si (**figure 40**). Aussi, trois roches présentent des altérations en Ca et CO<sub>2</sub>.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 5**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 41**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Si** : l'indice Si et les bilans de masse se corrént bien (**figure 41-b**);
- **FeMg** : la chloritisation est une altération intense marquée par la chlorite. Les indices Fe et Mg et les bilans de masse se corrént bien (**figure 41-a**);
- **NaK** : les indices ont été calculés avec différents minéraux marqueurs (cf. **tableau 5**). Aucune corrélation satisfaisante avec les bilans de masse n'a été obtenue, quelle que soit la méthode de calcul des indices utilisée. Les gains/pertes en K<sub>2</sub>O (cf. B\_K2O\_BM\_ABS) se corrént plus au moins à l'indice calculé avec la muscovite, et



les gains/pertes en Na<sub>2</sub>O (cf. B\_Na2O\_BM\_ABS) se corrént plus au moins à l'indice calculé avec l'albite. L'altération principale est donc une séricitisation, alors que les bilans de masse ne voient que les gains/pertes en Na-K.

Tableau 5 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Feldspaths alcalins et micas blancs	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)

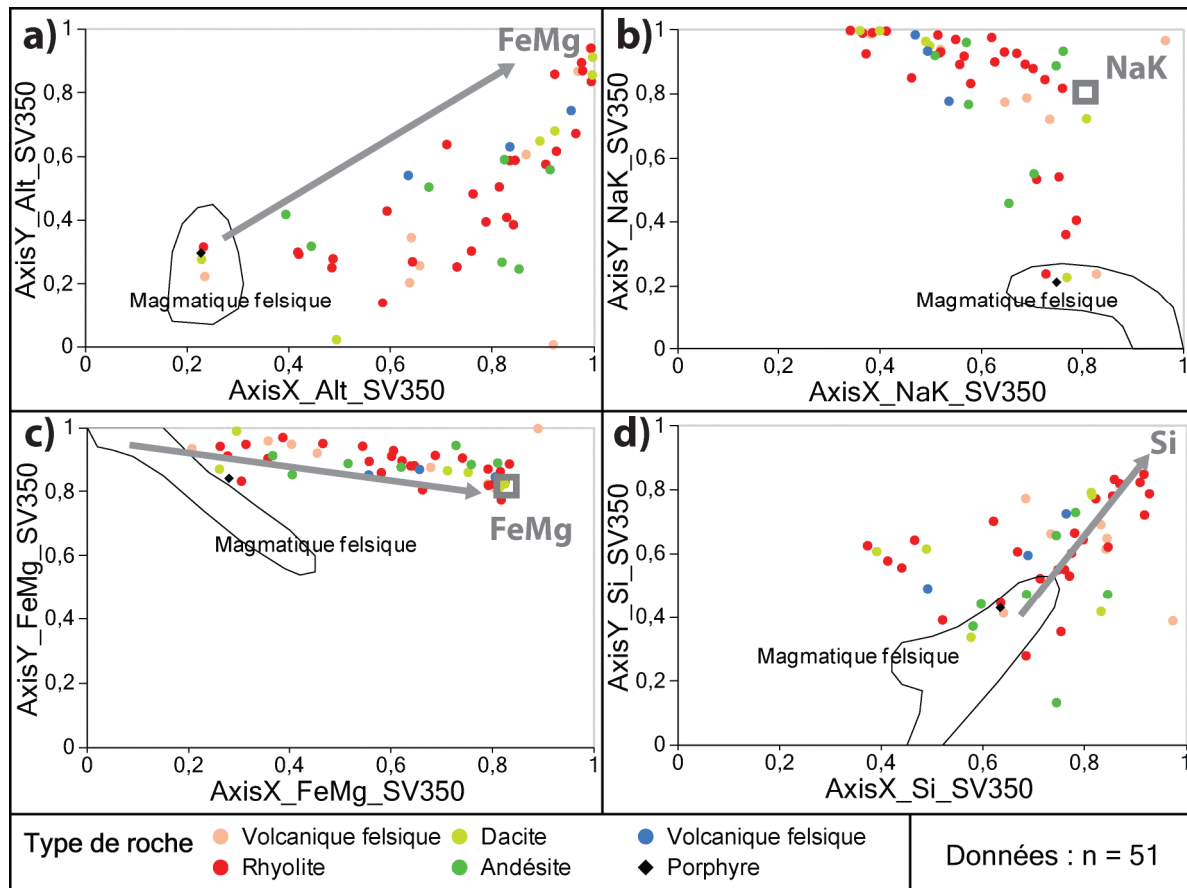
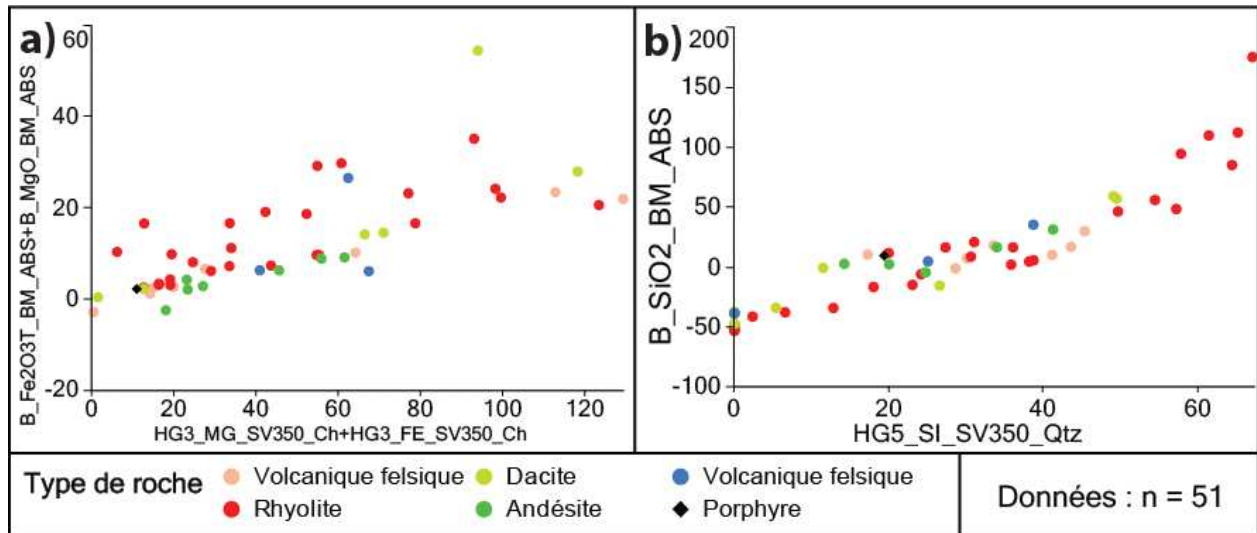


Figure 38 : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de Kristineberg échantillonnées par Hannington et al. (2003) et Barrett et al. (2005).



**Figure 39** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.5 VMS de New InSCO, Abitibi

Le VMS de New InSCO, Abitibi, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Liaghat et MacLean (1995);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 et  $\text{CO}_2$  normatif pour les quelques échantillons ayant la PAF analysée.

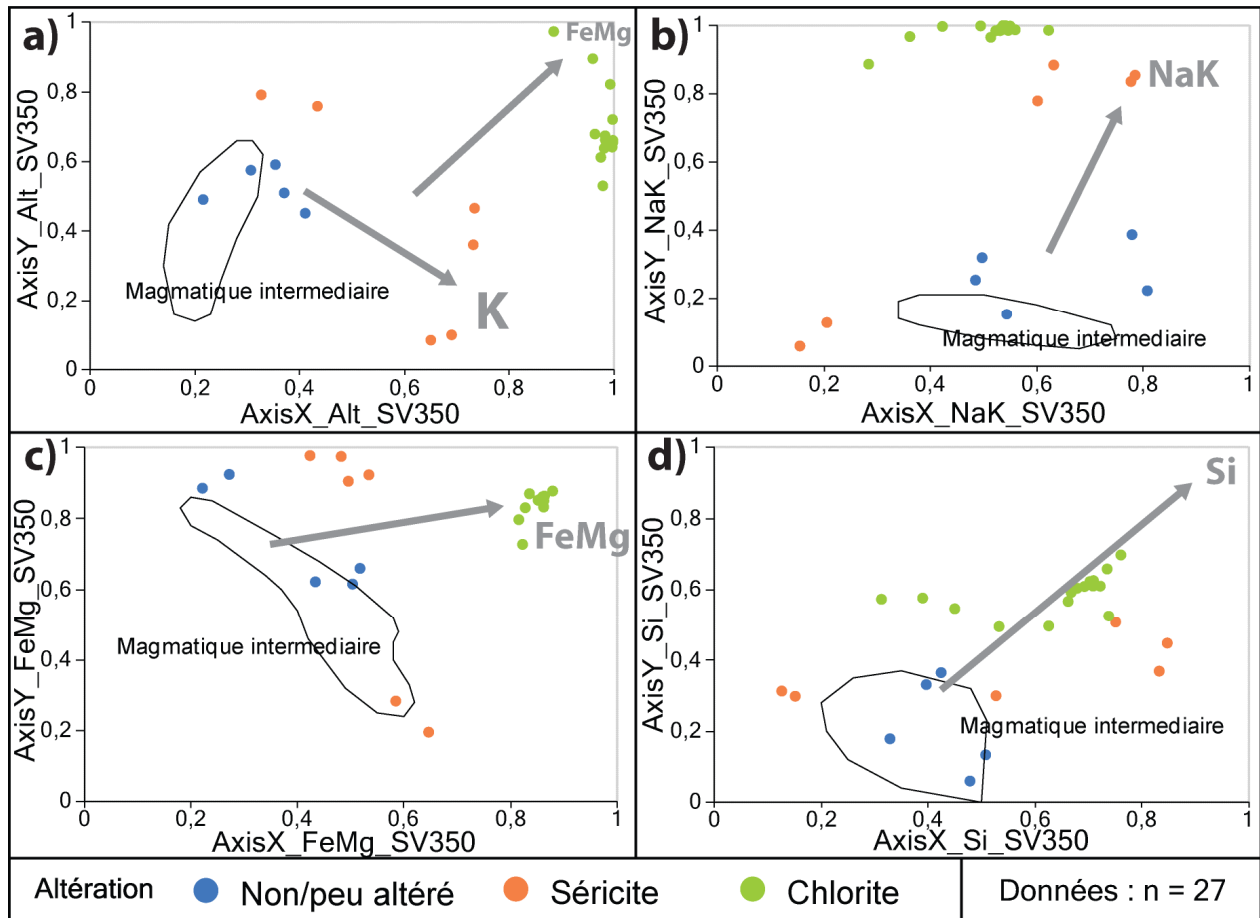
Lorsque l'on représente les points sur le diagramme général, on observe que les roches peu altérées se situent dans la partie gauche au centre du diagramme, et que les échantillons altérés se rapprochent des pôles d'altération à K et Fe-Mg (**figure 42-a**). Les altérations en Fe-Mg sont fortes pour les échantillons de la classe « chlorite » de Liaghat et MacLean (1995) (**figure 42-b**). Les altérations en Na-K sont fortes pour la classe « séricite » de Liaghat et MacLean (1995), sauf pour deux échantillons qui sont plutôt altérés en Ca (**figure 42-c**). Le diagramme Si indique que les roches altérées en Na-K et/ou en Fe-Mg sont plus riches en quartz que leurs protolithes frais (**figure 42-d**). Les altérations en Ca et  $\text{CO}_2$  sont faibles à inexistantes.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 6**. Ces indices ont ensuite été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 43**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

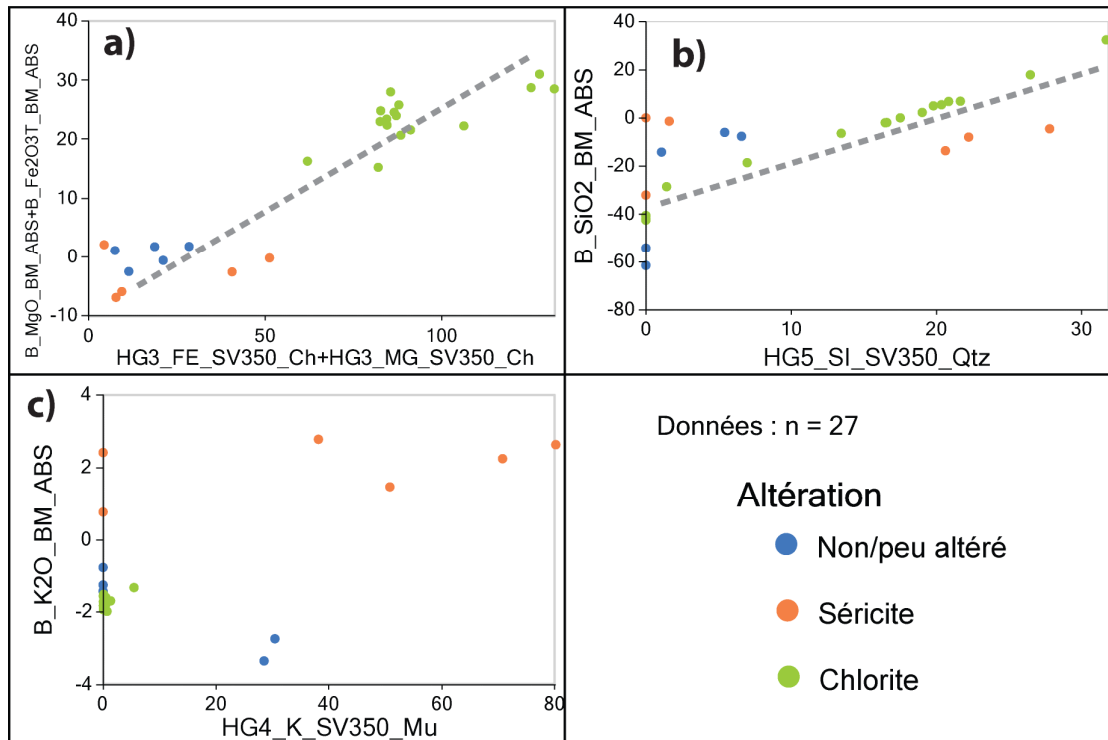
- **Si** : l'indice Si se corrèle bien avec les bilans de masse (**figure 43-b**);
- **Fe-Mg** : la chloritisation est une altération intense marquée par la chlorite. Les indices Fe et Mg et les bilans de masse se corrèlent bien (**figure 43-a**);
- **Na-K** : les indices ont été calculés avec différents minéraux marqueurs (cf. **tableau 6**). Seule une corrélation faible entre les gains/pertes en  $K_2O$  (cf. B\_K2O\_BM\_ABS) et l'indice calculé avec la muscovite a été obtenue (**figure 43-c**). L'altération NaK est une séricitisation, et non un gain en Na-K.

Tableau 6 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Feldspaths alcalins et micas blancs	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)



**Figure 40** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de New Inco échantillonnées par Liaghat et MacLean (1995).



**Figure 41** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.6 VMS de Persévérance, Abitibi

Le VMS de Persévérance, Abitibi, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Glencore Ltd., communication personnelle 2014;
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec  $CO_2$  normatif et rapport  $Fe_2O_3/Fe_2O_{3T}$  (%pds) = 0,2.

Les roches ont été classées par la nature de leurs protolithes frais (cf. felsique à mafique), et aucune information sur le type d'altération n'est disponible dans la base de données utilisée. Lorsque les roches sont représentées sur le diagramme général (**figure 44-a**), on observe que l'altération Fe-Mg domine, particulièrement dans les roches ayant un protolithe felsique, ce qui est confirmé par le diagramme FeMg (**figure 44-b**).

Les altérations en Ca,  $CO_2$  et Na-K sont faibles et concernent peu de roches (**figures 44-c, -e**). Les roches semblent aussi avoir gagné de la silice (**figure 44-d**). Cependant, les roches les plus riches en silice sont celles qui ont un protolithe frais felsique, ce qui indique une dépendance entre la lithologie du protolithe et la quantité de quartz de ces roches (**figure 44-d**).

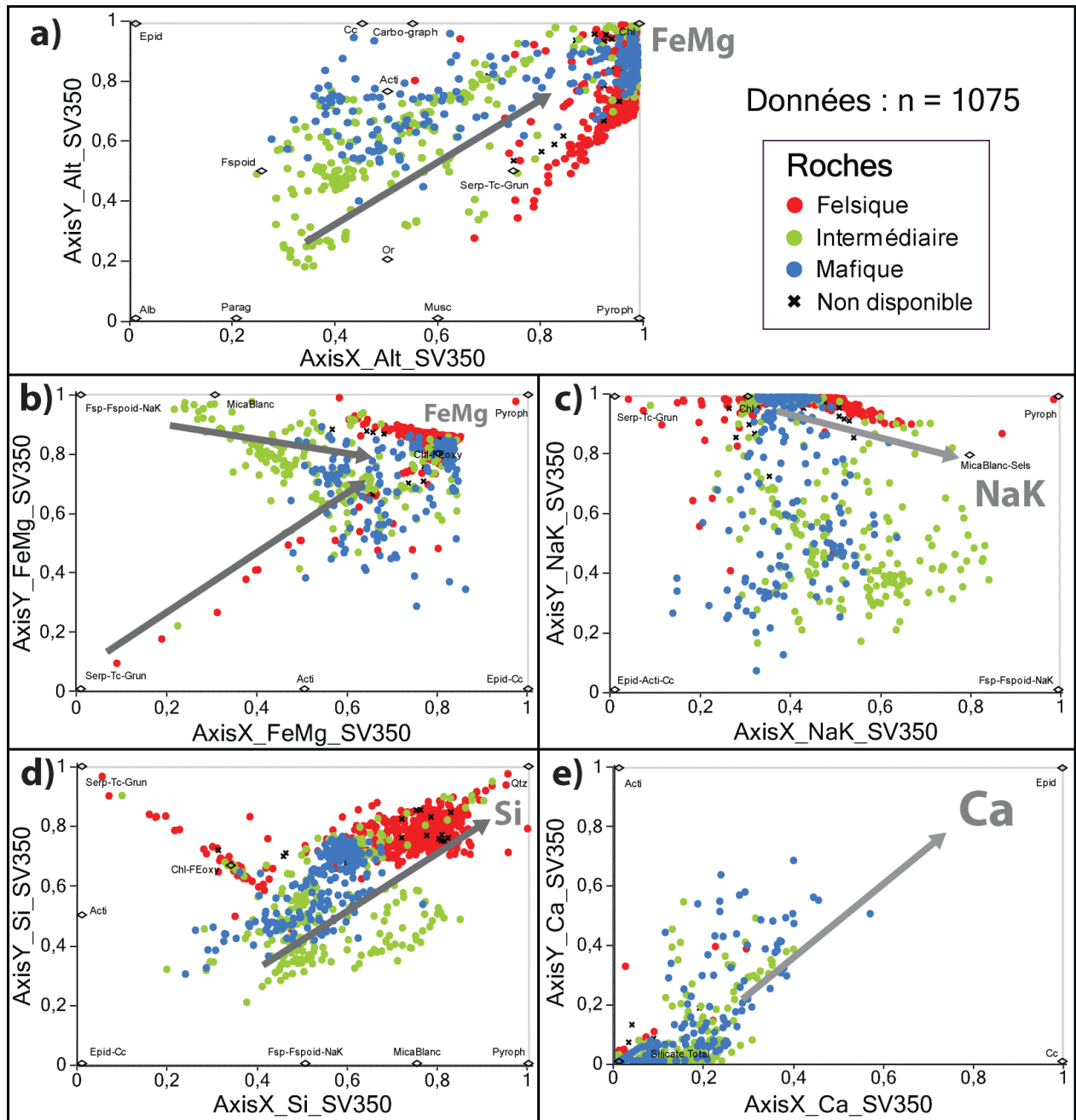
Ces différents diagrammes confirment la présence de protolithes de compositions initiales variées (cf. au minimum deux types de protolithes).

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 7**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 45**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

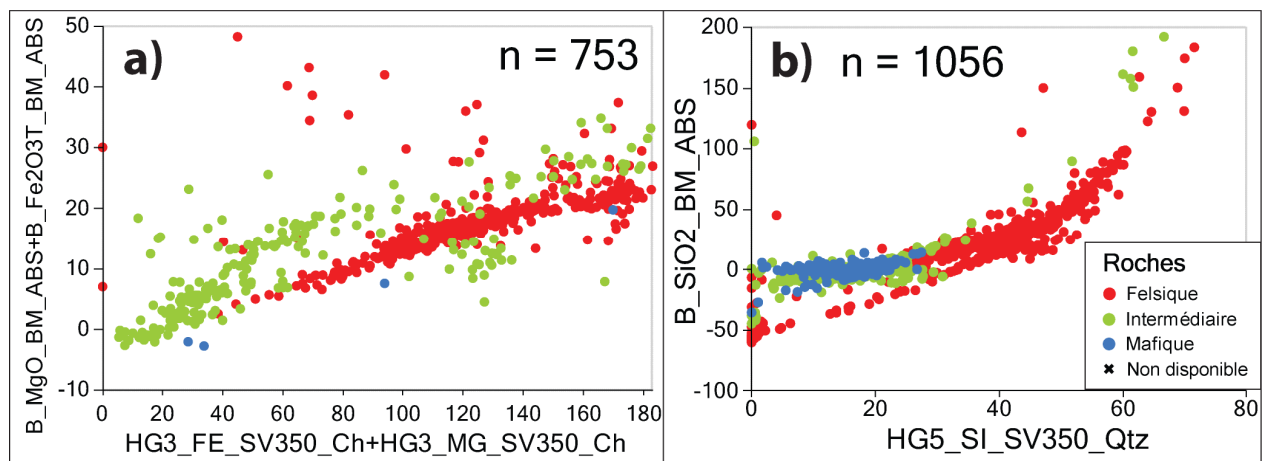
- **Si** : l'indice Si se corrèle bien avec les bilans de masse (**figure 45-b**);
- **Fe-Mg** : la chloritisation est une altération intense marquée par la chlorite. Les indices Fe et Mg et les bilans de masse se corrèlent bien (**figure 45-a**);
- **Na-K** : les indices ont été calculés avec différents minéraux marqueurs (cf. **tableau 6**). Seule une corrélation faible entre les gains/pertes en Na<sub>2</sub>O (cf. B\_Na2O\_BM\_ABS) et l'indice calculé avec l'albite a été obtenue. En fait, les altérations en Na-K ne sont pas significatives (cf. toujours < 2 g ou > -2 g d'après les bilans de masse), et les variations des valeurs des indices, faibles elles aussi, pourraient simplement refléter des variations de composition des protolithes frais, et non des altérations. La séricitisation est possiblement importante pour un nombre limité d'échantillons (**figure 44-c**).

Tableau 7 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
1	Diagramme Ca	Épidote	(0; 0)	(1; 1)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Feldspaths alcalins et micas blancs	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)



**Figure 42** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c), diagramme Si (d) et diagramme Ca (e) pour les roches du VMS de Persévérance.



**Figure 43** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.7 VMS de Neves Corvo, Espagne

Le VMS de Neves Corvo, Espagne, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Relvas et al. (2006);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  analysés et rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{T}}$  (%pds) = 0,2.

Les roches échantillonnées ont des protolithes frais volcaniques felsiques et intermédiaires, et ont subis des altérations en Na, K (cf. zones « séricite ») et en Fe-Mg (cf. zone « chlorite ») d'après Relvas et al. (2006). Les protolithes frais n'ont pas été échantillonnés, ce que confirme le diagramme général (**figure 46-a**).

Ces roches sont riches en chlorite et micas blancs, et pourraient avoir subi des altérations importantes en Na-K et/ou Fe-Mg. Les roches de la zone à « séricite » contiennent un peu de pyrophyllite, et celles de la zone à « chlorite » en contiennent beaucoup, ce qui indique un lessivage fort également visible sur les diagrammes NaK et FeMg (**figure 46-c, -d**). La carbonatation est aussi importante pour la plupart des roches (**figure 46-b**). La quantité de quartz est variable (**figure 46-e**), et pourrait refléter des taux de lessivage et/ou de silicification variables.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 8**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 47**).



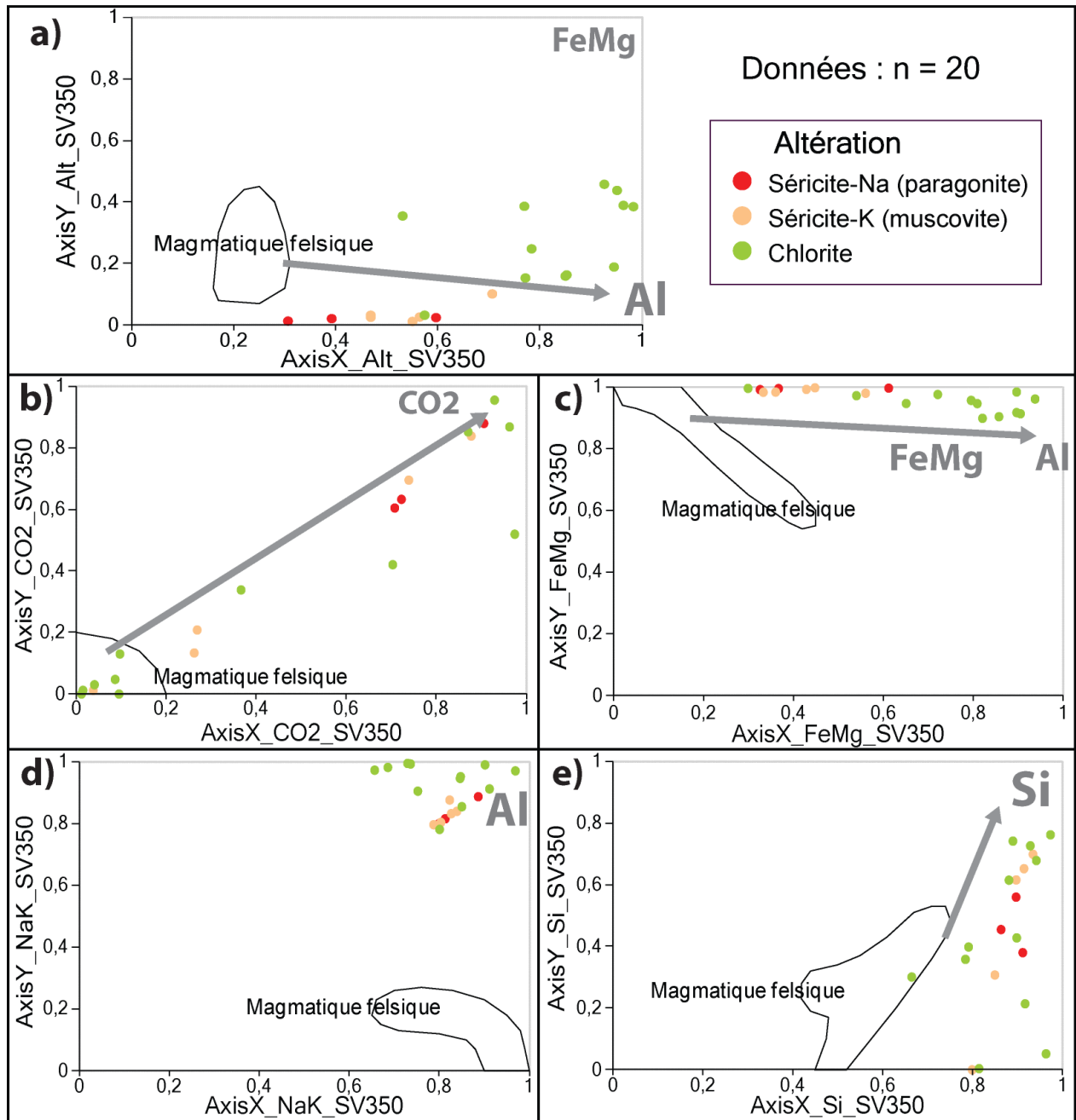
Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Si** : l'indice Si se corrèle bien avec les bilans de masse (**figure 47-b**);
- **Fe-Mg** : altération marquée par la chlorite, avec d'importantes quantités de pyrophyllite normative présentent dans les roches chloritisées. Les indices Fe et Mg calculés avec chlorite seule se corrèlent  $\pm$  bien aux bilans de masse. Les corrélations sont meilleures lorsque les minéraux marqueurs sont chlorite et pyrophyllite (**figure 47-a**);
- **Na-K** : les indices ont été calculés avec différents minéraux marqueurs (cf. **tableau 8**). Aucune corrélation n'a été obtenue, quels que soient les assemblages de minéraux marqueurs utilisés. Il est possible que ces roches aient subi un lessivage important, accompagné d'une hydratation ayant converti le peu de Na-K restant dans les roches en micas blancs. Ceci correspond à une séricitisation d'après les indices et les observations.

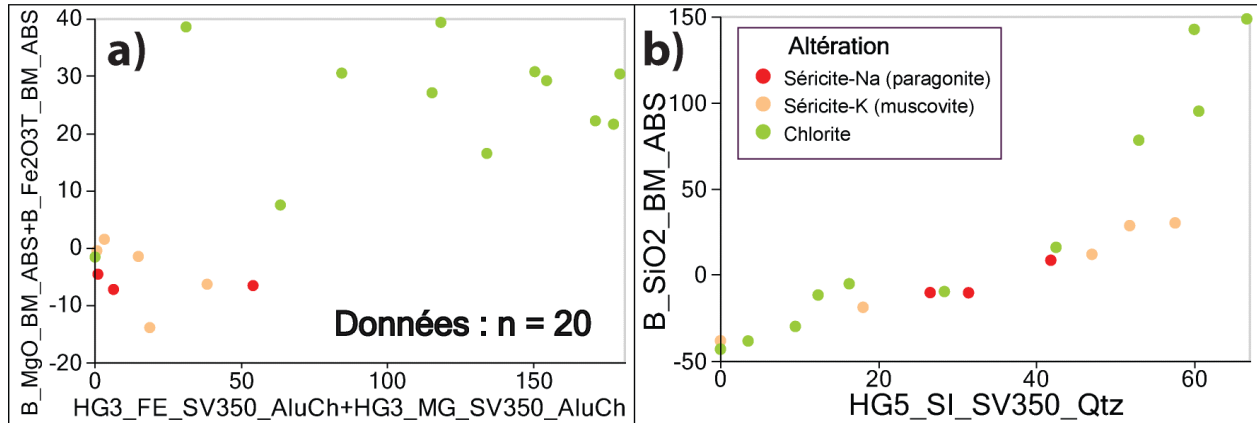
L'altération principale est de type acide, et est accompagnée d'une silicification et d'une carbonatation, ce qui ressemble à une altération de type épithermale, et non aux altérations typiques des systèmes VMS (cf. chloritisation et séricitisation développées).

Tableau 8 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(1; 1)
3	Diagramme FeMg	Chlorite et pyrophyllite	(0; 0)	(1; 1)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(1; 1)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(1; 1)
4	Diagramme NaK	Pyrophyllite	(0; 0)	(1; 1)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)



**Figure 44** : Diagramme général (a), diagramme CO<sub>2</sub> (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du VMS de Neves Corvo échantillonnées par Relvas et al. (2006).



**Figure 45** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

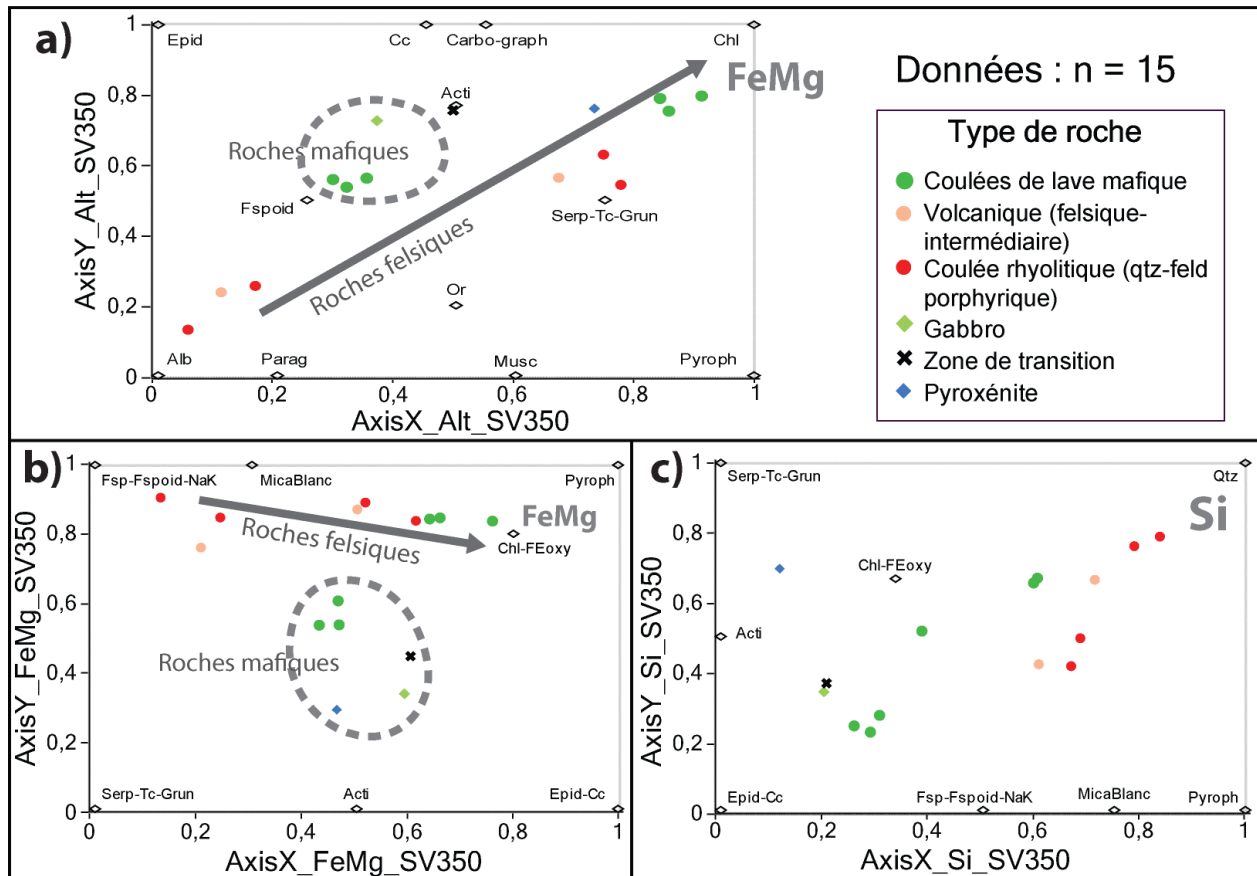
#### 4.8 VMS de Sturgeon Lake, Ontario

Le VMS de Sturgeon Lake, Ontario, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Franklin et al. (1991);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2. Ni la PAF, ni les volatiles n'ont été analysés.

Les roches analysées ont des protolithes variés. D'après le diagramme général, l'altération principale est une altération en Fe-Mg (**figure 48-a**). D'après le diagramme FeMg, cette altération affecte les roches felsiques, mais n'affecte pas les roches qui ont un protolithe frais mafique, à l'exception de trois roches très fortement chloritisées qui pourraient avoir un protolithe felsique mal identifié (**figure 48-b**). Les roches altérées en Fe-Mg contiennent un peu de micas blancs (cf. faible séricitisation).

Aucune altération en  $\text{CO}_2$  (cf. volatils non dosés) ou en Ca n'est observée. Enfin, la quantité de quartz est plus importante dans les roches altérées en Fe-Mg (cf. chloritisation), car ces roches ont un protolithe felsique (**figure 48-c**). Aussi, l'altération en Fe-Mg a pu s'accompagner d'une silicification (**figure 48-c**).



**Figure 46** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Sturgeon Lake échantillonnées par Franklin et al. (1991).

#### 4.9 VMS de Montauban, Grenville

Le VMS de Montauban, Québec, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Bernier et MacLean (1993), Prabhu et Webber (1984);
- grade métamorphique : 6,5 kbar, 620°C (Bernier 1986);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 7AMP700, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> (%pds) = 0,2 ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO mesurés lorsqu'ils sont disponibles.

Les échantillons compilés ont été classés selon leurs minéralogies, de la façon suivante, par Bernier et MacLean (1993) et Prabhu et Webber (1984) :

- gneiss BMQ (Biotite-Muscovite-Quartz) : protolithe frais felsique;
- quartzite : « stringer zone », silicification;
- roche à Ca-silicate : altération calco-silicatée (une seule roche compilée);
- roche à cordiérite-anthophyllite : altération Fe-Mg (chloritisation)? ;
- roche à cordiérite-biotite : altération Fe-Mg et K? ;
- roche à sillimanite nodulaire : lessivage? ; lessivage et altération Fe-Mg?

Lorsque l'on représente les points sur le diagramme général, on observe que les gneiss BMQ sont situés dans la partie inférieure gauche du diagramme, dans le domaine des roches felsiques fraîches, et que les roches altérées se rapprochent du pôle d'altération Fe-Mg (**figure 49-a**). Les diagrammes NaK et FeMg confirment que l'altération Na-K est mineure à inexistante, et que l'altération Fe-Mg domine dans ces roches (**figure 49-b, -d**).

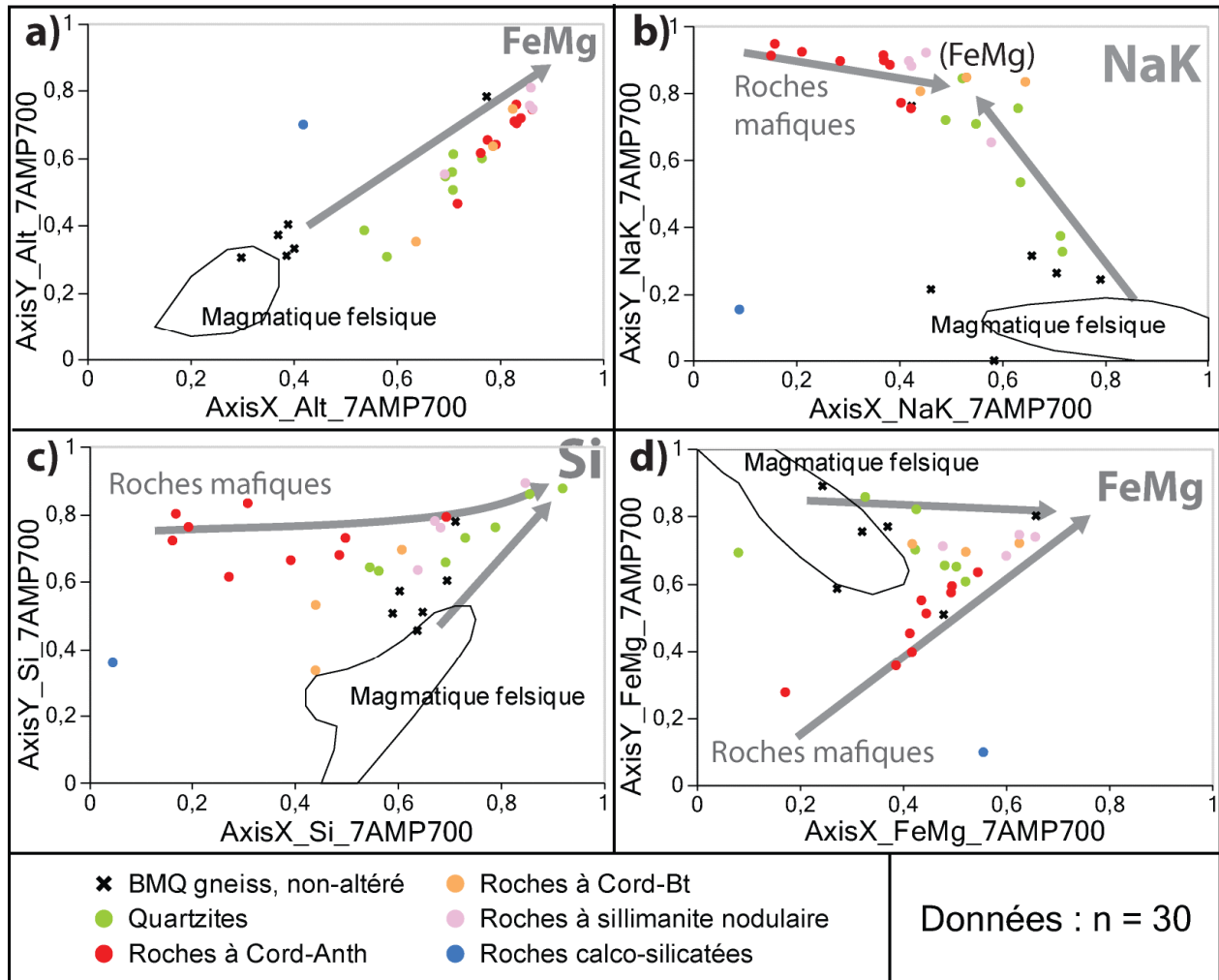
Le diagramme FeMg montre qu'une partie des roches altérées en Fe-Mg pourrait avoir un protolithe mafique (cf. roches à cordiérite-anthophyllite) et que les autres roches pourraient avoir un protolithe felsique (cf. roches à sillimanite et roches à cordiérite-biotite) (**figure 49-d**). Le diagramme Si pointe aussi vers deux types de protolithes frais, un mafique et un felsique (**figure 49-c**). Aussi, tous les types d'altération conduisent à une augmentation de la quantité de quartz dans les roches (**figure 49-c**).

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 9**. Ces indices ont été comparés aux types de roches classés par les auteurs des articles puis aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 50**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

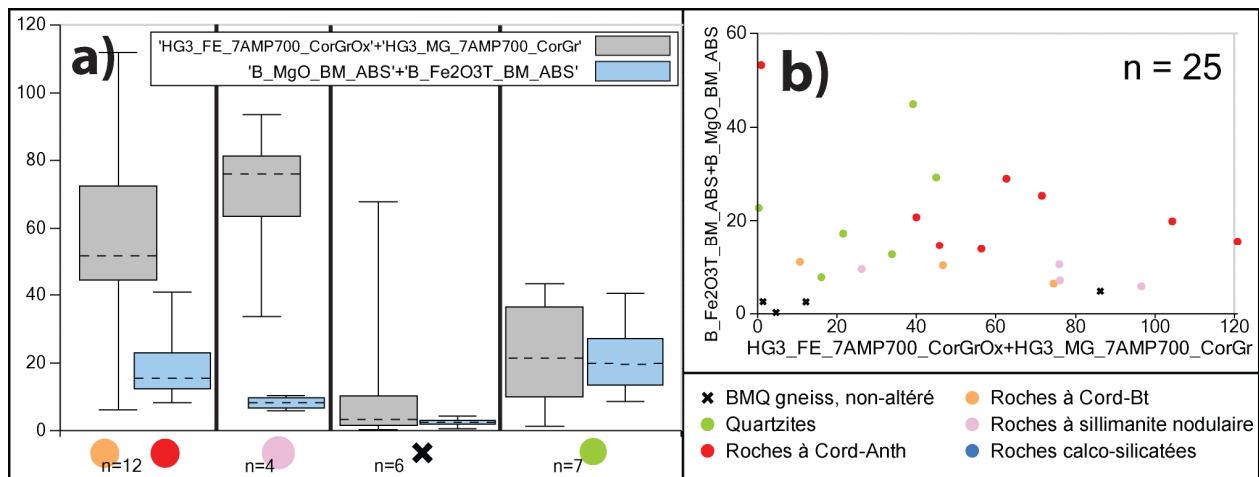
- **Ca, CO<sub>2</sub>, Na-K, Si** : altérations mineures ou inexistantes. La **silicification** est particulièrement importante dans les quartzites;
- **Fe-Mg** : altération marquée principalement par la cordiérite, car les roches concernées contiennent très peu de grenat et d'oxydes de fer. Cette altération affecte toutes les roches, quartzites inclus, à l'exception des protolithes frais (cf. gneiss BMQ). La corrélation entre les indices et les bilans de masse est assez bonne (**figure 50**);
- **roches à cordiérite-anthophyllite** : contiennent beaucoup de cordiérite, ainsi que de l'anthophyllite et du talc normatif. Si la cordiérite est le résultat d'une augmentation de la quantité d'Al (cf. lessivage accompagnant une altération Fe-Mg), le talc et l'anthophyllite reflète la richesse initiale en Fe-Mg du protolithe. Ces roches ont probablement un protolithe frais mafique;
- **roches à cordiérite-biotite, sillimanite et quartzite** : la biotite et les rares sillimanites normatives calculées pourraient refléter le caractère felsique du protolithe de ces roches. La cordiérite, quant à elle, reflète l'épisode de chloritisation.

Tableau 9 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg (Mg)	Grenat, cordiérite	(0,3; 0,8)	(0,8; 0,8)
3	Diagramme FeMg (Fe)	Grenat, cordiérite, Fe-oxyde	(0,3; 0,8)	(0,8; 0,8)



**Figure 47** : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme Si (c) et diagramme FeMg (d) pour les roches du VMS de Montauban échantillonnées par Bernier et MacLean (1993), Prabhu et Webber (1984).



**Figure 48** : Boîtes à moustaches et diagramme binaire comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.10 VMS de Hougthousean, Chine

Le VMS de Hougthousean, Chine, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Zheng et al. (2011);
- grade métamorphique : 600-650°C (Gu et al. 2007);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 5AMP670, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport  $Fe_2O_3/Fe_2O_{3T}$  (%pds) = 0,2.

Les roches échantillonnées ont des protolithes variés : basalte, basalte-andésite, andésite, dacite, rhyolite et roches du « pipe / stringer zone ». Ces roches ont également été classées par Zheng et al. (2011) selon qu'elles sont altérées ou non altérées.

Lorsque l'on représente les points sur le diagramme général, on observe une compatibilité entre la position des points et les lithologies identifiées par Zheng et al. (2011) (**figure 51-a**). Le diagramme général montre également que la principale altération est de type Fe-Mg (**figure 51-a**). Le diagramme FeMg confirme que les protolithes frais sont de nature variée (mafiques à felsiques) et que la chloritisation est importante (**figure 51-b**).

Les autres diagrammes n'indiquent pas d'altération en Ca, CO<sub>2</sub> ou Na-K. Le diagramme Si montre que les roches felsiques contiennent plus de quartz que les roches mafiques, que la quantité de quartz augmente avec l'altération Fe-Mg et que les roches du conduit (« pipe ») sont particulièrement silicifiées.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 10**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 52**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Fe-Mg** : altération marquée principalement par la cordiérite dans ces roches pauvres en grenat et oxydes de fer. Les indices FeMg semblent se corrélérer avec les bilans de masses, mais la quantité de données ayant les éléments traces analysés est trop faible pour renforcer cette affirmation (**figure 52-c**);
- **Fe-Mg** : l'indice FeMg est relativement indépendant de la composition du protolithe frais (**figure 52-a**) lorsque cet indice est calculé avec les pôles frais appropriés (cf. **tableau 10**);
- **Si** : l'indice Si se corrèle bien avec les bilans de masse (**figure 52-d**).

Tableau 10 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg (roches mafiques)	Grenat, cordiérite, Fe-oxyde	(0,4; 0,2)	(0,8; 0,8)
3	Diagramme FeMg (roches felsiques)	Grenat, cordiérite, Fe-oxyde	(0,3; 0,8)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si (roches mafiques)	quartz	(0,3; 0,5)	(1; 1)
5	Diagramme Si (roches felsiques)	quartz	(0,6; 0,4)	(1; 1)

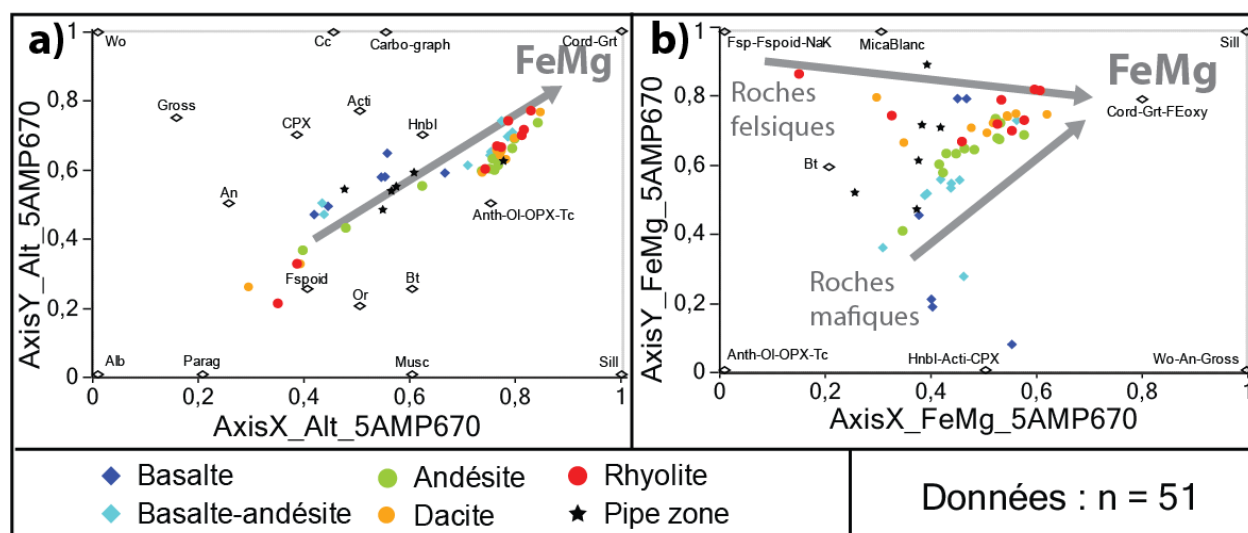
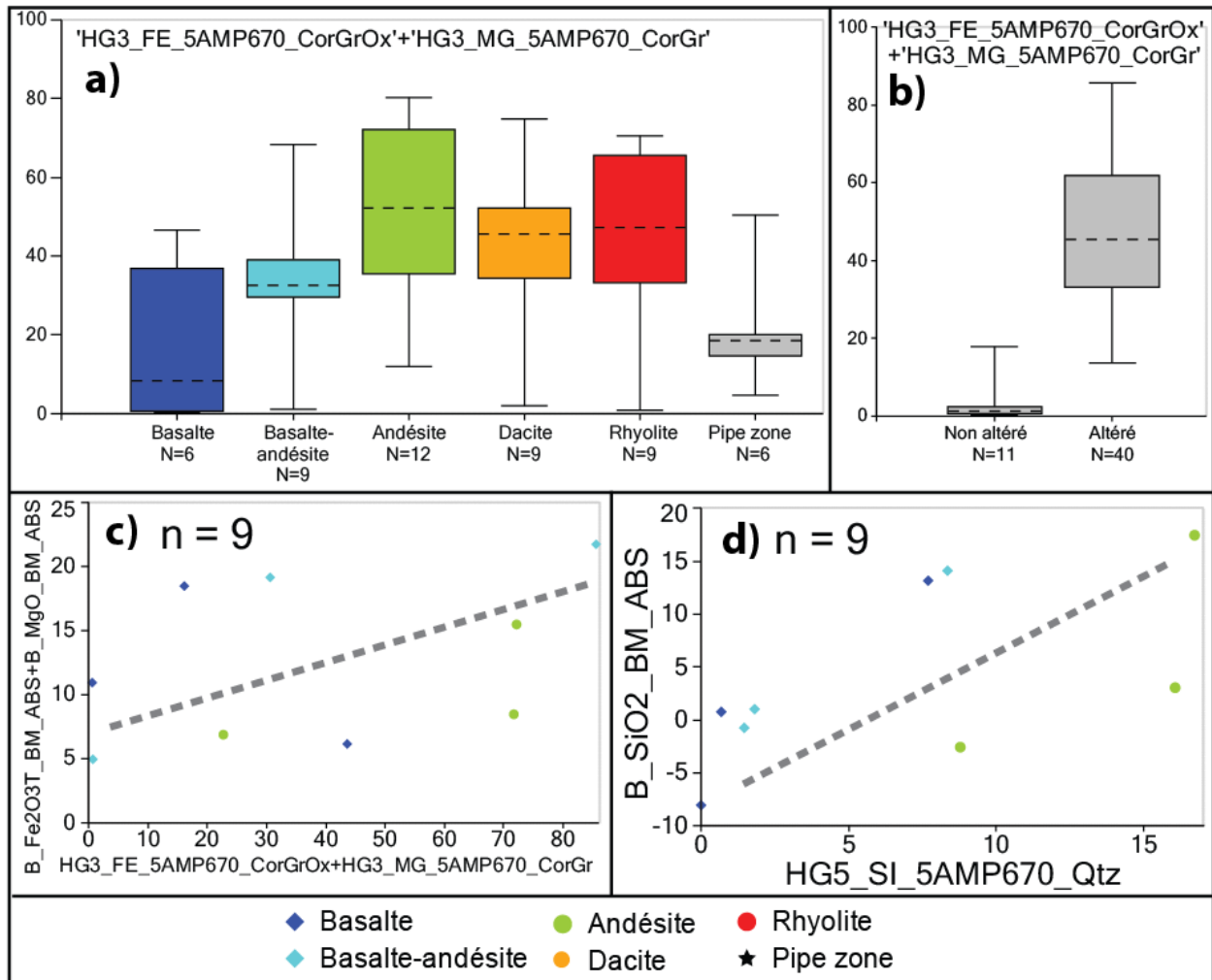


Figure 49 : Diagramme général (a) et diagramme FeMg (b) pour les roches du VMS de Houghtoushan échantillonnées par Zheng et al. (2011).





**Figure 50** : a-b) Boite à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Gu et al. (2007); c-d) Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.11 VMS du bloc d'Arunta, Australie

Les VMS du bloc d'Arunta, Australie, ont subi un épisode de métamorphisme après leurs formations. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Warren et Shaw (1985);
- grade métamorphique : 8 kbar, 850-920°C (Warren 1983, Warren et Shaw 1985);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 9GRA800, avec CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O analysés et rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO mesurés lorsqu'ils sont disponibles.

Les échantillons ont été classés de la façon suivante par Warren et Shaw (1985) :

- gneiss à quartz-feldspath;
- gneiss mafique, ou amphibolite;
- roches à quartz-cordiérite.

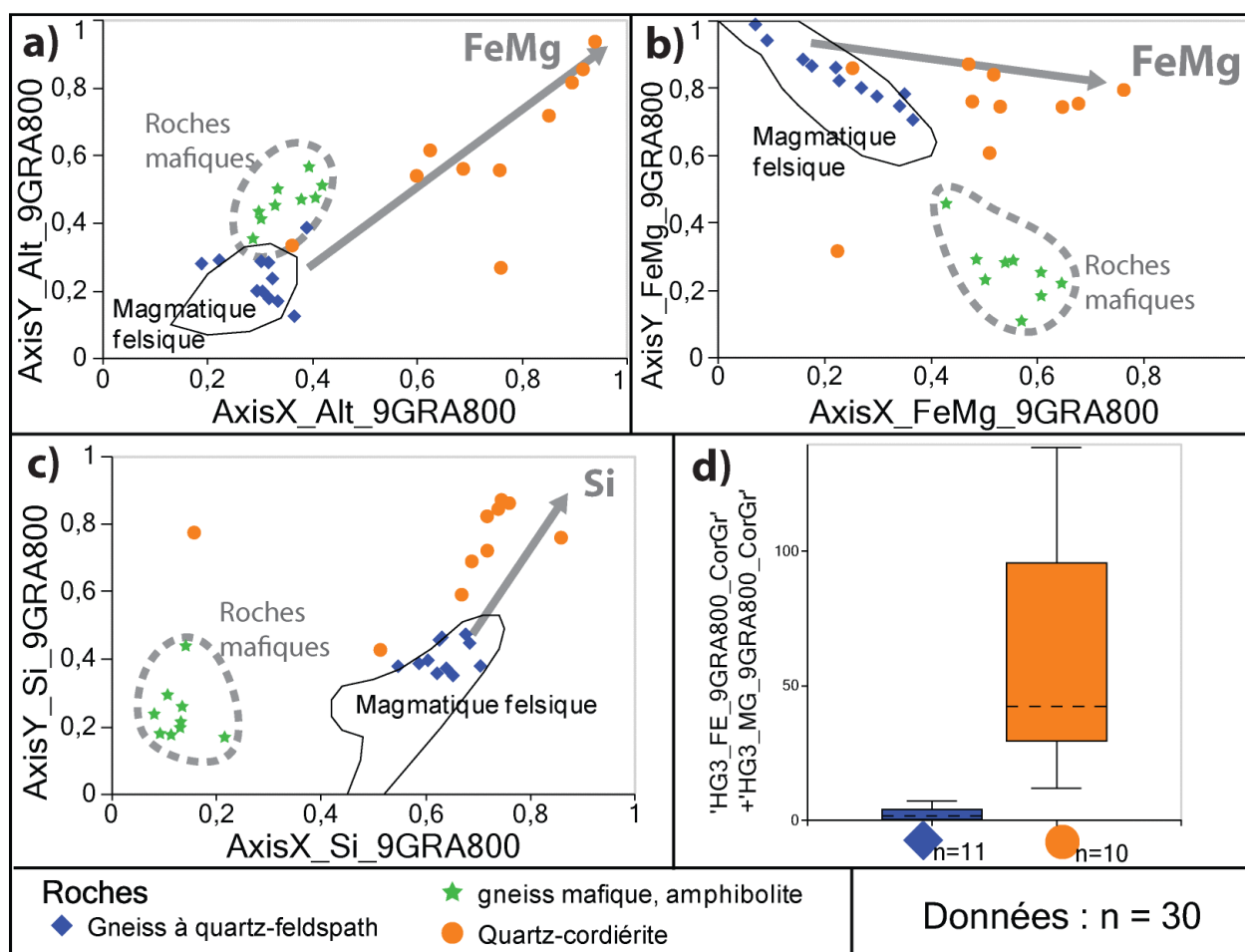
Lorsque l'on représente les points sur le diagramme général, on observe que les gneiss à quartz-feldspath se situent dans la partie inférieure gauche du diagramme, dans une zone correspondant aux roches felsiques fraîches (**figure 53-a**). Les roches à quartz-cordiérite se rapprochent du pôle Fe-Mg, et pourraient correspondre à des roches felsiques altérées en Fe-Mg (**figure 53-a**). Les amphibolites, quant à elles, pourraient correspondre à des roches mafiques non altérées d'après leurs positions sur le diagramme général (**figure 53-a**).

Le diagramme FeMg confirme que les gneiss à quartz-feldspath pourraient être les protolithes felsiques frais des roches à quartz-cordiérite, qui auraient subi une chloritisation (**figure 53-b**). Le diagramme Si montrent que la quantité de quartz est plus importante dans les roches à quartz-cordiérite que dans les gneiss à quartz-feldspath (**figure 53-c**).

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 11**. Les indices FeMg confirment que les roches à quartz-cordiérite ont subi une forte chloritisation marquée par la présence de grenat et de cordiérite (**figure 53-d**).

Tableau 11 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg (pour gneiss à quartz-feldspath et roches à quartz-cordiérite)	Grenat, cordiérite	(0,1; 0,9)	(0,8; 0,8)



**Figure 51** : a-c) Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS du bloc d'Arunta échantillonnées par Warren et Shaw (1985); d) Boîte à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Warren et Shaw (1985).

## 4.12 VMS de Winston Lake

Le VMS de Winston Lake, Ontario, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Osterberg (1993);
- grade métamorphique : amphibolite supérieure (Schandl et Gorton, 2002);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 5AMP670, avec CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O analysés et rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO mesurés lorsqu'ils sont disponibles.

Les roches échantillonnées ont des protolithes variés : volcaniques felsiques, intermédiaires et mafiques, volcano-clastique et roches sédimentaires d'origine marine (?). Ces roches ont également été classées par Osterberg (1993) selon leurs minéralogies : roches fraîches, roches à biotite, roches à sillimanite et parfois staurotite, roches à trémolite-actinote et roches à anthophyllite.

Lorsque l'on représente les points sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figures 54, 55**) :

- **protolithes frais** : deux principaux types de protolithes se distinguent sur les diagrammes (**figure 55**). Les roches ont des protolithes frais felsiques (cf. roches volcano-clastiques, roches volcaniques felsiques et intermédiaires) et mafiques (cf. roches volcaniques mafiques et roches sédimentaires d'origine marine);
- **altération principale** : la principale altération est une altération à Fe-Mg qui affecte toutes les roches, quelle que soit la nature de leurs protolithes. La quantité de quartz augmente également avec l'intensification de l'altération Fe-Mg (**figures 54, 55**);
- **marqueurs de l'altération Fe-Mg** : les roches mafiques sont plutôt riches en cordiérite et ± en oxydes de fer. Dans les roches felsiques, l'altération Fe-Mg a plutôt formé du grenat;
- **amphiboles** : les amphiboles (cf. trémolite-actinote, hornblende, anthophyllite) sont les marqueurs du caractère mafique d'une partie des protolithes. Elles sont plutôt abondantes dans les roches mafiques fraîches;
- **sillimanite, biotite** : la sillimanite et la biotite normative sont présentes en faibles quantités. Elles sont observées uniquement dans les roches altérées en Fe-Mg ayant un protolithe frais felsique.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 12**. Les indices FeMg se corrélaient bien avec les bilans de masse, confirmant que les minéraux marqueurs de l'altération Fe-Mg sont principalement le grenat et la cordiérite (**figure 56**).

Tableau 12 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg (protolithes mafiques)	Grenat, cordiérite, Fe-oxyde	(0; 1)	(0,8; 0,8)
3	Diagramme FeMg (protolithes felsiques)	Grenat, cordiérite, Fe-oxyde	(0,4; 0,2)	(0,8; 0,8)

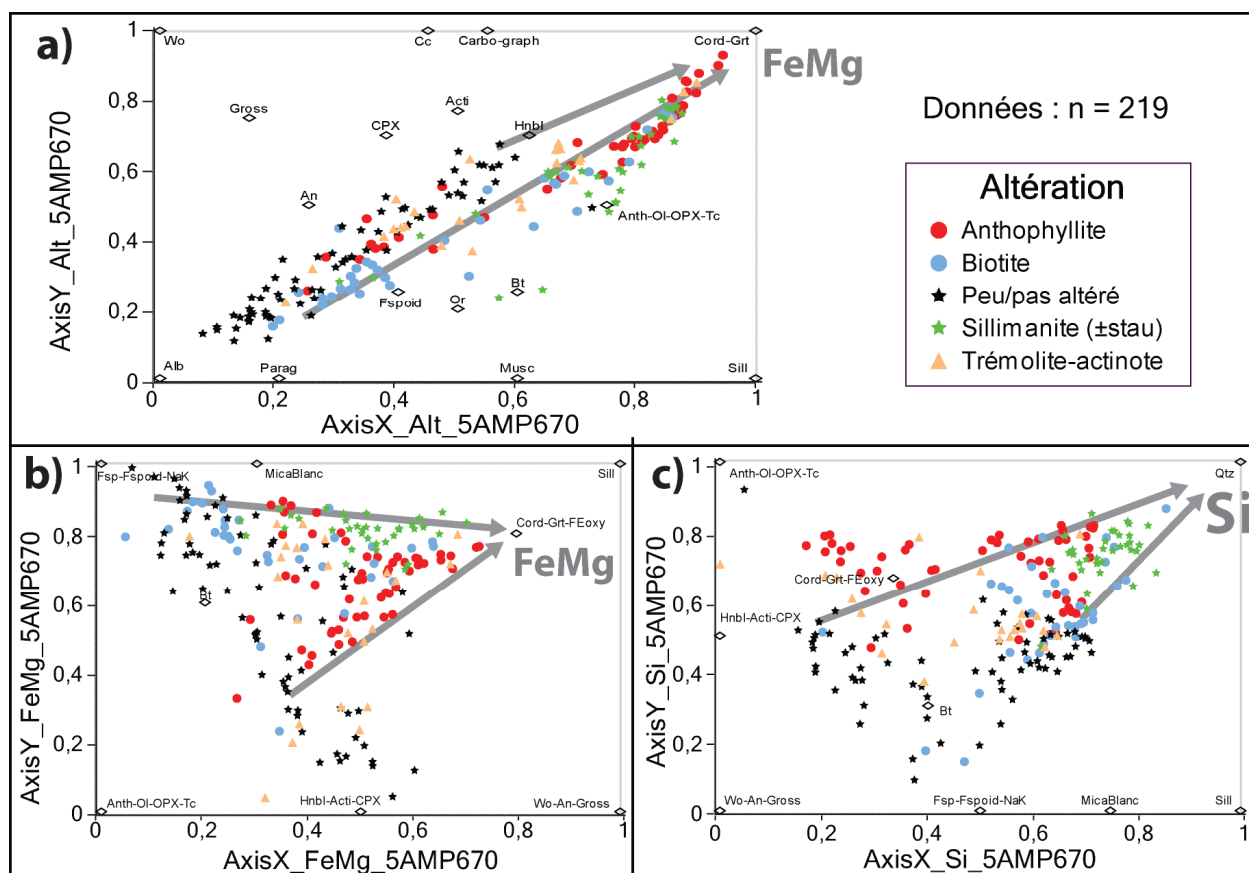
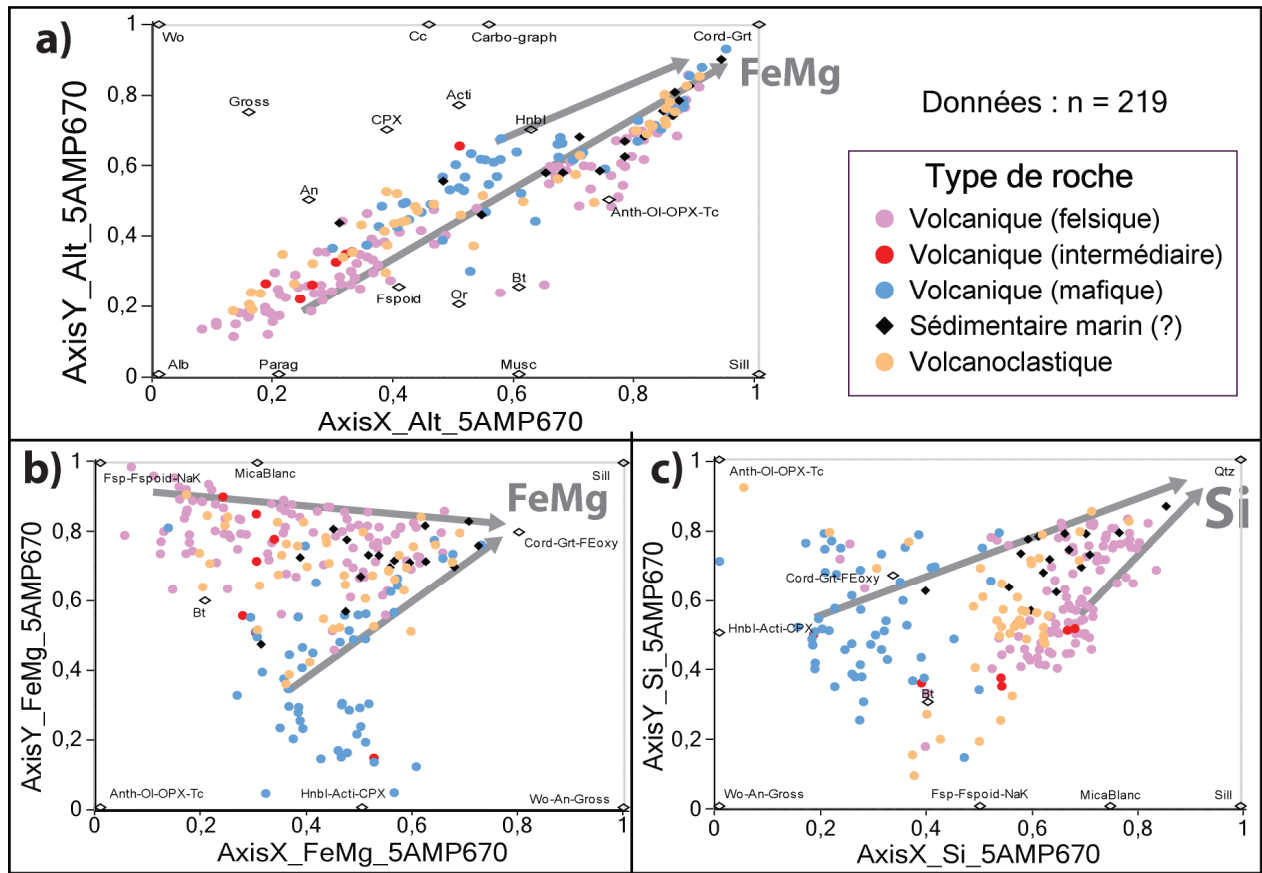
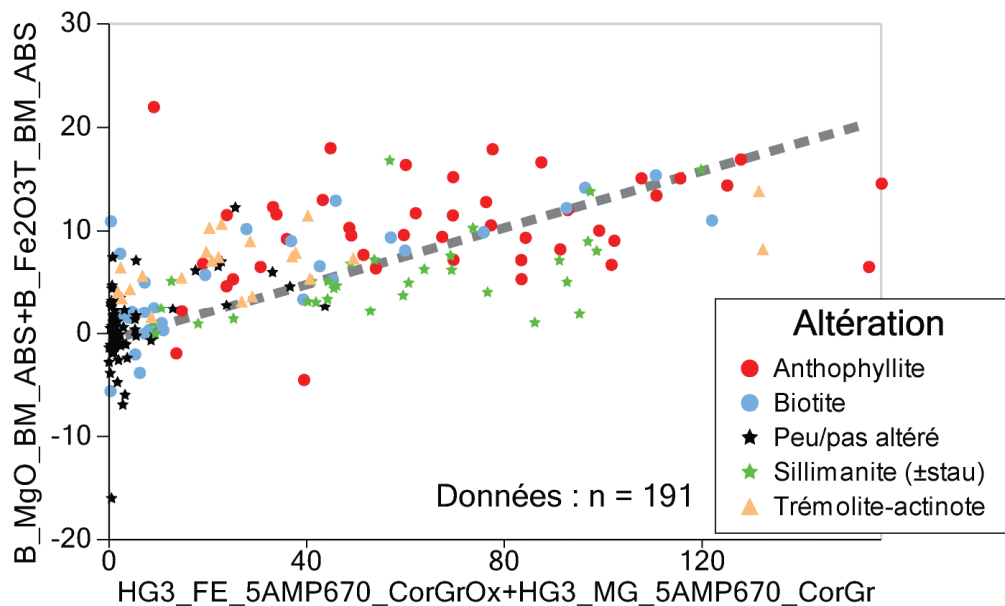


Figure 52 : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Winston Lake échantillonnées par Osterberg (1993) et classées selon le type d'altération.



**Figure 53** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du VMS de Winston Lake échantillonnées par Osterberg (1993) et classées selon la lithologie de leurs protolithes.



**Figure 54** : Diagramme binaire comparant les altérations FeMg quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.13 VMS de Déri, Inde

Le VMS de Déri, Inde, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Tiwary et Deb (1997);
- grade métamorphique : amphibolite (Tiwary et Deb 1997);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 4AMP600, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport  $Fe_2O_3/Fe_2O_{3T}$  (%pds) = 0,2.

Les roches échantillonnées ont été classées de la façon suivante par Tiwary et Deb (1997) :

- MV : « mafic volcanic », roches mafiques non altérées d'après leurs positions sur le diagramme général (**figure 57-a**);
- AMV : « Hnbl-Plag-Bt-Qtz », roches mafiques non altérées d'après leurs positions sur le diagramme général (**figure 57-a**);
- AND : « andésite », une roche intermédiaire non altérée d'après sa position sur le diagramme général (**figure 57-a**);
- FV : « felsic volcanic », une roche felsique non altérée (?) d'après sa position sur le diagramme général (**figure 57-a**);
- AFV : « altered felsic volcanic », roches felsiques altérées en Fe-Mg d'après leurs positions sur le diagramme général et sur le diagramme FeMg (**figure 57-a, -b**);
- BCS : « Bt-Chl-Ser schist », roches felsiques altérées en Fe-Mg d'après leurs positions sur le diagramme général et sur les diagrammes FeMg et NaK (**figure 57-a, -b, -c**).

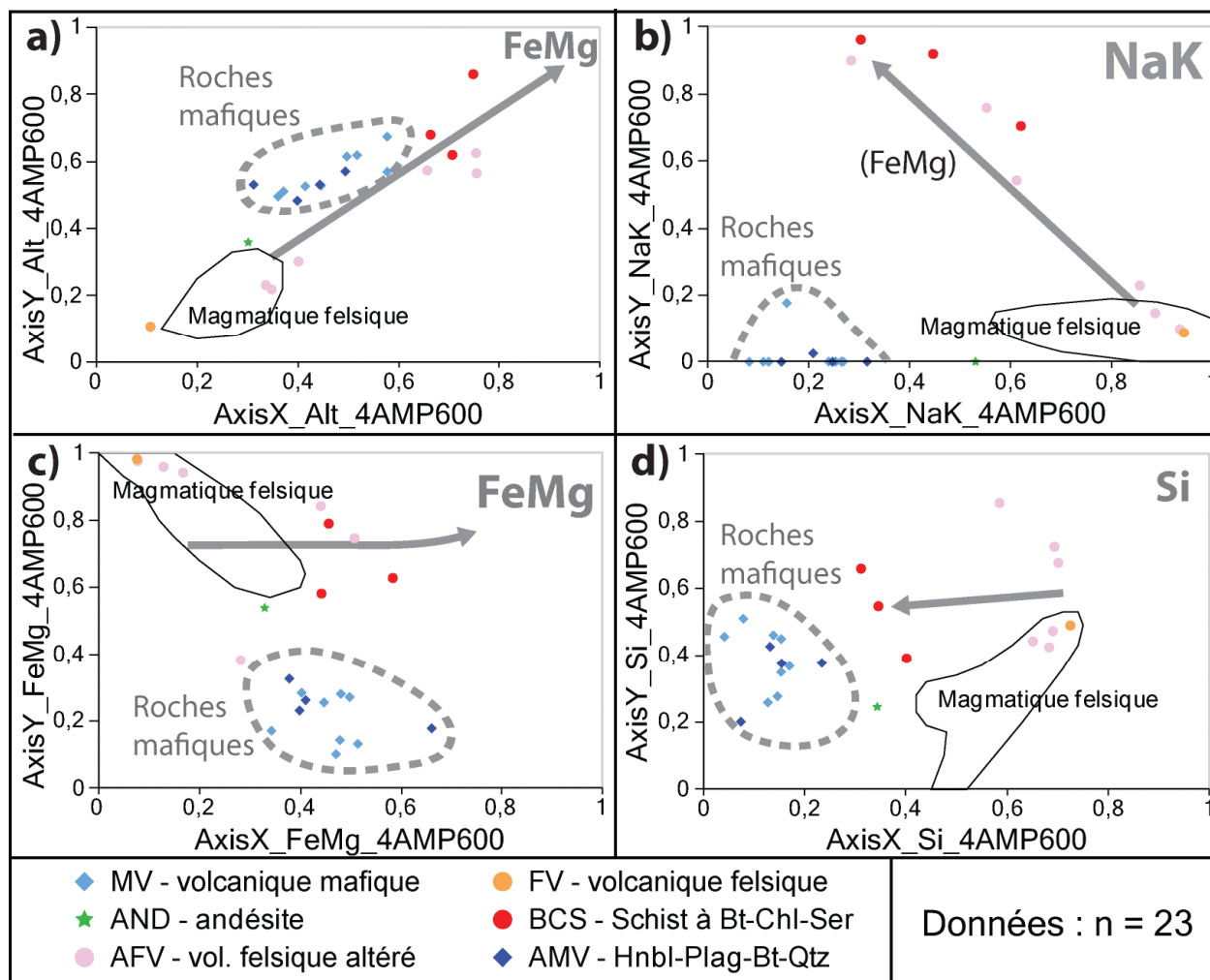
Lorsque l'on représente les points sur les différents diagrammes d'altération, on observe clairement deux groupes de roches (**figure 57**):

- roches mafiques (MV et AMV) qui n'ont pas subi d'altération;
- roches felsiques (AND, FV, AFV et BCS) qui ont subi des degrés variés d'altération Fe-Mg (**figure 57-a, -b, -c**). Les roches chloritisées sont riches en cordiérite et en biotite normatives, et contiennent moins de quartz que les roches felsiques les moins altérées (**figure 57-d**);
- ces roches n'ont pas subi d'altérations en Na-K (**figure 57-b**), Ca ou CO<sub>2</sub>. Le K de la biotite normative provient probablement du protolithe felsique, et non d'un ajout de K par un processus d'altération.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés au **tableau 13**. Le calcul des indices Fe-Mg confirme que les roches AFV et BCS sont altérées en Fe-Mg et que cette altération est principalement marquée par la cordiérite (**figure 58**). Le calcul de l'indice K montre que la biotite ne reflète pas une altération K, et que ces roches n'ont pas subi d'altération en Na-K.

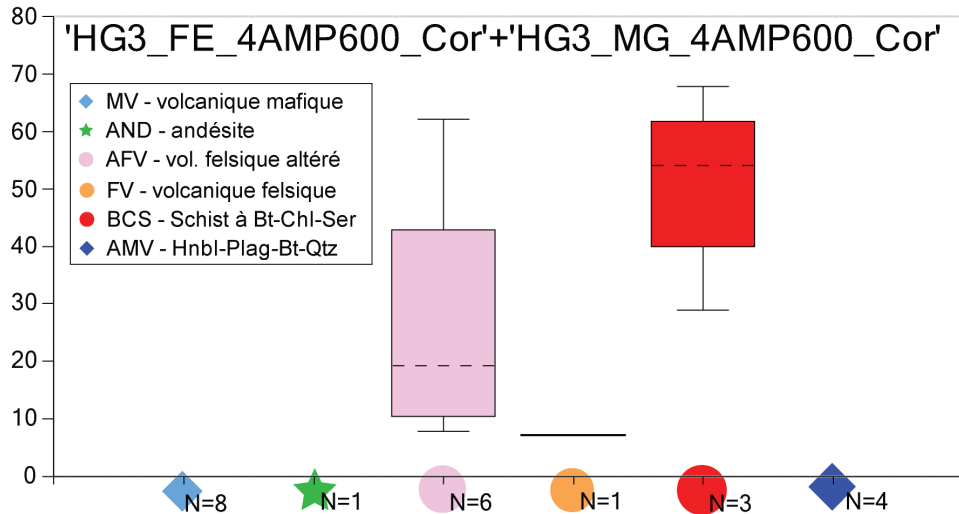
Tableau 13 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Cordiérite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Biotite	(0; 0)	(0,8; 0,8)



**Figure 55** : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches des VMS de Déri échantillonnées par Tiwary et Deb (1997).





**Figure 56** : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices Fe et Mg calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Tiwary et Deb (1997).

#### 4.14 VMS de Coulon, Baie James

Le VMS de Coulon, Québec, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

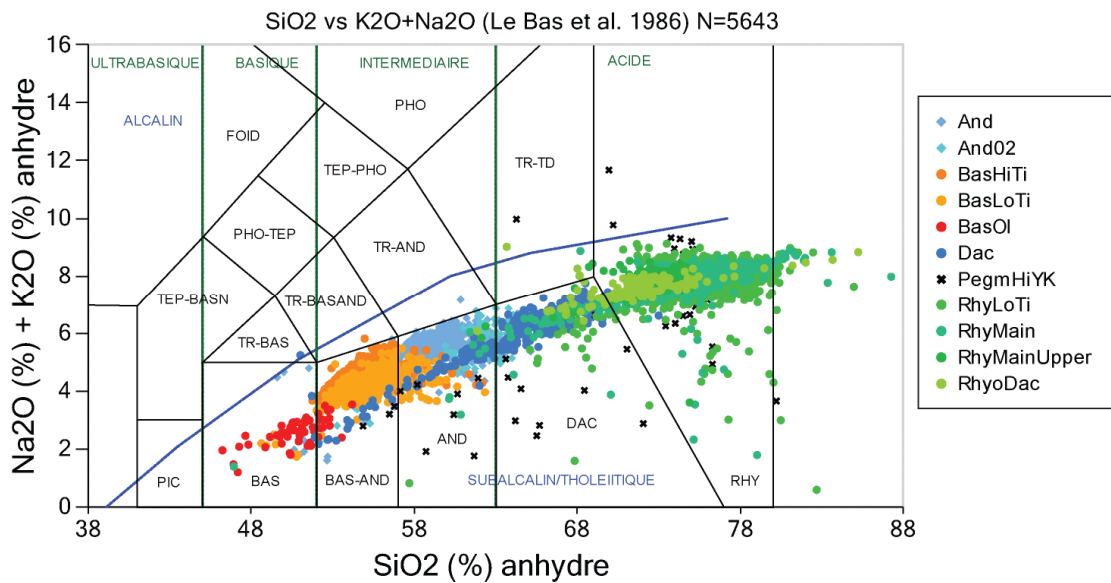
- données utilisées : Virginia Ltd. (maintenant Osisko), communication personnelle de V. Pearson en 2014;
- grade métamorphique : amphibolite;
- Norme calculée : norme HautGrade, faciès 4AMP600, avec  $\text{CO}_2$  normatif et rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2;
- note sur le choix du faciès : la base de données utilisée contient les proportions approximatives des minéraux observés en forage. Ces observations auraient pu servir à choisir le faciès le plus approprié. Cependant, ces observations sont trop hétérogènes et ne se corrélaient pas aux minéraux normatifs. Le faciès 4AMP600 a été choisi, car il est le plus proche du point triple des aluminosilicates, et que tous les types d'aluminosilicates ont été reportés dans les observations faites sur les carottes de forage.

Les roches ont été classées par Virginia de la façon suivante :

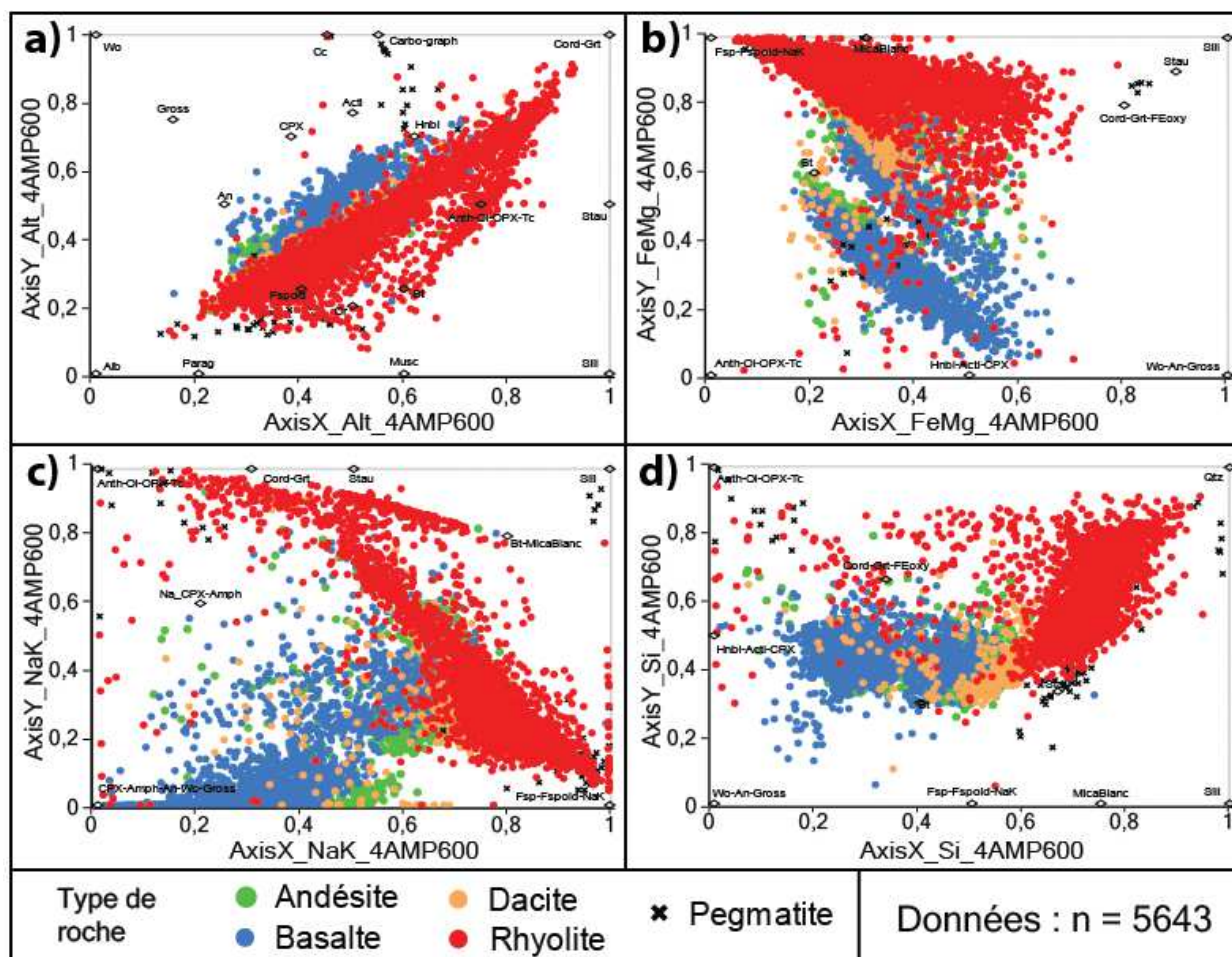
- **protolithes frais** : les protolithes sont volcaniques. Le type de protolithes a été identifié à l'aide du rapport Zr/Ti, qui est un équivalent de  $\text{SiO}_2$  (wt %). Les protolithes reconnus de cette façon sont similaires aux protolithes identifiés par la méthode des bilans de masse par modélisation des précurseurs (Trépanier, 2008) (**figure 59**);
- **protolithes frais simplifiés** : pour les besoins de cette étude, les roches ont été classées selon que leurs protolithes est de nature felsique, intermédiaire ou mafique. Ainsi classées, les roches ont été représentées sur les diagrammes d'altération

(figure 60). Ces diagrammes indiquent que les roches felsiques sont les seules à avoir subi une altération prononcée (figure 60), ce qui va dans le sens d'observations également faites par Virginia;

- **altérations** : les altérations ont été classées sur la base de la composition en  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  des roches. Les classes suivantes sont proposées par Virginia :
  - NaK-Frais : roches fraîches (cf. figure 61);
  - K+++, K++, Na+, Na++, Na+++ : roches peu altérées? (cf. figure 61);
  - NaK-Chlor : roches altérées en Fe-Mg (cf. figure 61);
  - NaK-Ser : roches altérées en K? (cf. figure 61).



**Figure 57** : Diagramme binaire TAS comparant la classification des roches établie par Virginia sur la base du rapport Zr/Ti à la composition des précurseurs modélisés par la méthode des bilans de masse par modélisation des précurseurs. Ces roches appartiennent à une lignée sub-alkaline, probablement calco-alkaline d'après le contexte géodynamique.



**Figure 58** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c) et diagramme Si (d) pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia.

Pour la suite de cette section, seules les roches felsiques (cf. rhyolithes) seront considérées, car elles sont les seules à avoir subi un épisode d'altération (cf. **figure 60**). Lorsque l'on représente ces roches sur le diagramme FeMg, on observe quelques points dans la partie inférieure du diagramme, à l'écart du nuage de points principal : ces roches pourraient avoir des protolithes frais mafiques non identifiés (**figure 61-b**). La grande majorité des roches pourrait, cependant, avoir des protolithes felsiques d'après les diagrammes d'altération (**figure 61**).

Lorsque l'on représente les roches de la classe « NaK-Chlor » sur le diagramme général (**figure 61-a**), on observe deux alignements distincts des points, selon que les roches contiennent ou non des micas blancs. Les roches des deux alignements ont, en fait, des compositions chimiques proches. La présence ou l'absence de micas blancs reflète des variations dans la valeur du rapport Na/K, et non des variations dans la quantité de Na-K présent dans ces roches.

Aussi, lorsque l'on représente ces roches sur le diagramme NaK, on observe que peu de roches contiennent des micas blancs normatifs (**figure 61-c**).

Ces roches n'ont cependant probablement pas subi d'altération en Na-K, mais ont seulement des rapports Na/K différents de ceux du reste des roches échantillonnées. Aussi, les roches étudiées sont riches en alcalins (cf. classes NaK-Ser, K+++ et K++ de Virginia). Cette richesse en alcalins pourrait refléter la richesse initiale en Na-K du protolithe frais, et non une altération en Na-K. Ainsi, les abondants feldspaths alcalins et biotites normatives calculés refléteraient la composition felsique du protolithe plutôt qu'une véritable altération en Na-K.

Les altérations présentes sont de type Fe-Mg principalement (cf. chloritisation), et sont marquées par la présence de cordiérite et d'un peu de grenat normatif (**figure 61-b**). La carbonatation est rare, mais est difficile à interpréter, car le métamorphisme a pu dévolatiliser ces roches (**figure 61-e**).

Les roches les plus intensément altérées en Fe-Mg sont aussi celles qui contiennent le plus de quartz, dénotant soit un épisode de silicification, soit une particularité minéralogique (cf. section 2.9) (**figure 61-d**). En effet, l'altération Fe-Mg détruit les feldspaths et crée des minéraux mafiques qui deviennent de la cordiérite sous l'effet du métamorphisme. La cordiérite a besoin de peu de Si pour accommoder une quantité donnée de Fe-Mg. Au contraire, les feldspaths ont besoin de beaucoup de Si pour accommoder une quantité équivalente de Na-K-Ca. L'augmentation de la quantité de quartz (silicification) est liée à la libération de la silice qui a accompagné la destruction des feldspaths, et est observée parce que la silice libérée n'est que partiellement accommodée par la cordiérite.

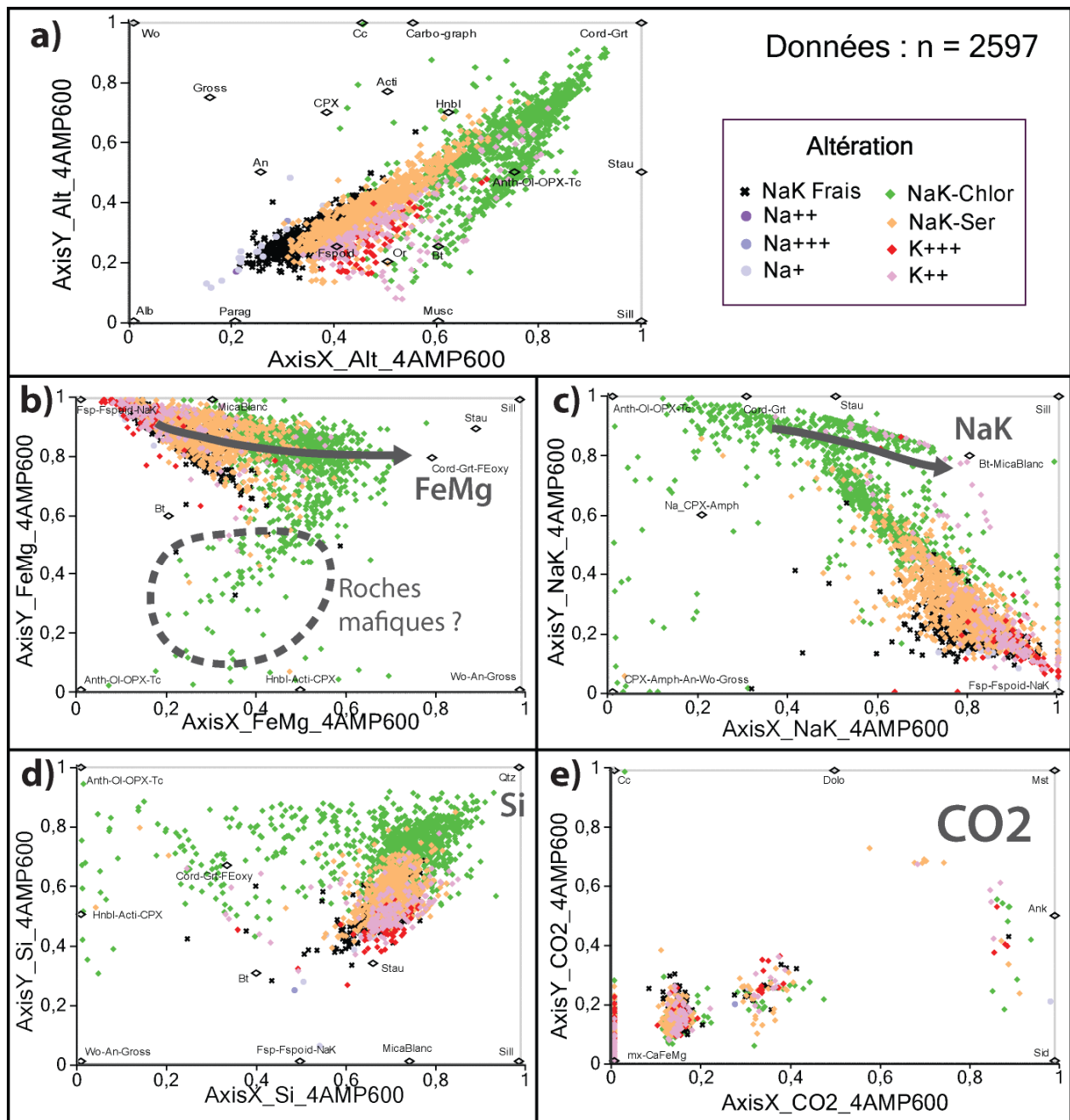
Les indices d'altération ont été calculés pour les roches ayant des protolithes frais felsiques uniquement, et selon les paramètres résumés par le **tableau 14**. Ces indices ont ensuite été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 62, 63**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **FeMg** : la cordiérite est le principal marqueur de cette altération. Les indices Fe et Mg se corrèlent bien avec les bilans de masse (**figure 63-a**);
- **Si** : l'indice Si se corrèle bien avec les bilans de masse (**figure 63-b**). Le nuage de points se corrèle suivant deux différentes tendances linéaires probablement dues à une contrainte minéralogique, marquant une différence entre des roches riches en feldspaths et les roches riches en cordiérite;
- **NaK** : lorsque les indices Na et K sont calculés en utilisant les micas comme minéraux marqueurs de l'altération, aucune corrélation n'est observée avec les bilans de masse par modélisation des précurseurs (**figure 62**). Cependant, lorsque ces indices sont calculés avec les feldspaths alcalins, la corrélation avec les bilans de masse est bonne (**figure 63-c**). Au faciès 4AMP600, l'altération devrait être marquée soit par les micas blancs, soit par un assemblage de feldspaths alcalins et d'aluminosilicates, et non pas par les feldspaths alcalins seuls comme semblent le suggérer les bilans de masse (cf. section 2). Les bilans de masse ont cependant des valeurs faibles, ce qui confirme que ces roches n'ont pas subi de gains/pertes importantes en Na-K. Les indices indiquent que quelques roches auraient pu subir une séricitisation.

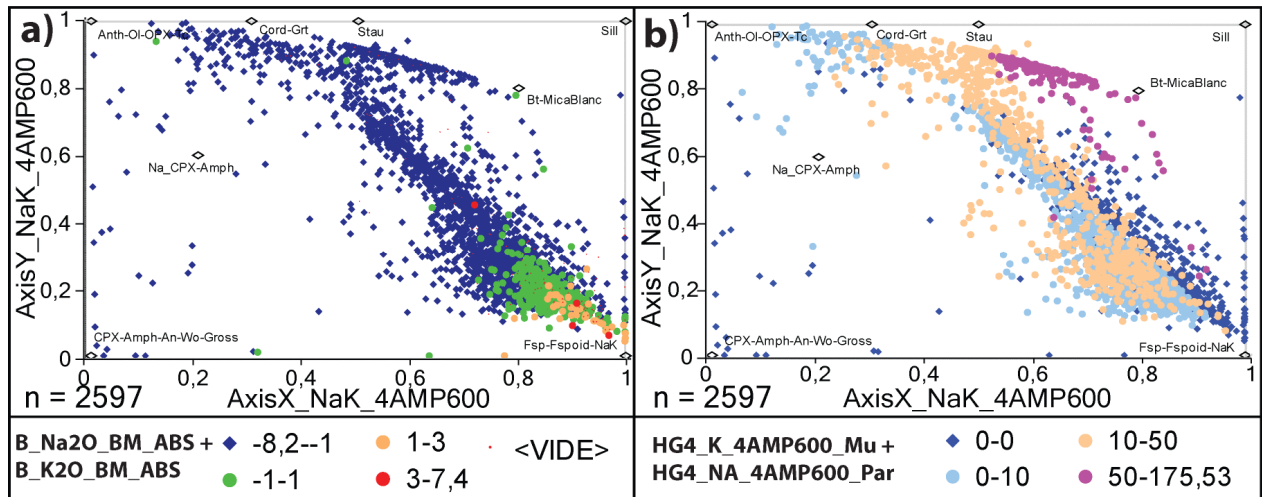
En conclusion, la principale altération est de type Fe-Mg (cf. chloritisation), elle n'affecte principalement que des roches felsiques et elle est marquée presque essentiellement par la cordiérite. Une reconnaissance systématique des proportions de cordiérite présentes en forage pourrait permettre une cartographie fine de l'altération Fe-Mg associée au VMS de Coulon. Notez qu'une altération en Na-K marquée par une surabondance de micas blancs (cf. séricitisation) pourrait également être présente dans une partie de ces roches.

Tableau 14 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

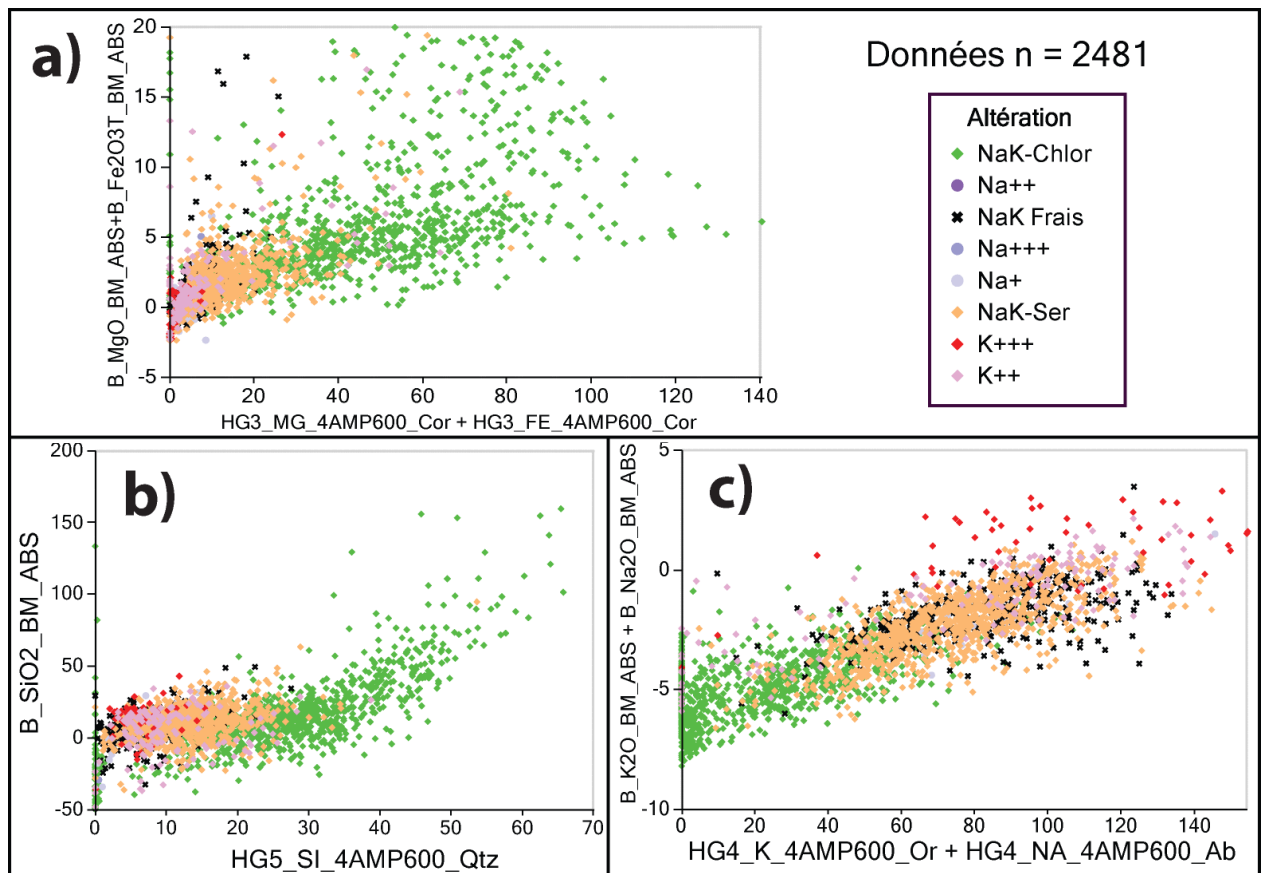
Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Cordiérite	(0; 1)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite, biotite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0,6; 0,4)	(1; 1)



**Figure 59** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b), diagramme NaK (c), diagramme Si (d) et diagramme CO<sub>2</sub> (e) pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia.



**Figure 60** : Diagramme NaK pour les roches du VMS de Coulon échantillonnées par Virginia, représentant les valeurs des bilans de masse pour les gains/pertes en Na-K (a), et les valeurs des indices Na et K.



**Figure 61** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.15 Dépôt de Comptois, Abitibi (Au ou VMS?)

Le dépôt de Comptois, Abitibi, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes VMS. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Dupré (2010);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme BasGrade, faciès SV350, avec rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 et  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-PAF}$  on disponibles.

Les roches échantillonnées ont des protolithes volcaniques felsiques, intermédiaires et mafiques. L'altération a formé les roches suivantes d'après Dupré (2010) :

- roches à cordiérite-andalousite;
- veines de type I à épidote-albite;
- veines de type II liées à une silicification et à la minéralisation en or.

Lorsque l'on représente les échantillons sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figure 64**) :

- la dispersion des roches sur le diagramme général (**figure 64-a**) pourrait refléter la présence de protolithes de compositions variées;
- les altérations en Ca sont faibles à inexistantes (**figure 64-e**). Il n'y a pas non plus de carbonatation ni d'altération en Fe-Mg (**figure 64-d**);
- la silicification est plus prononcée dans les roches identifiées comme « felsiques », ce qui dénote une corrélation entre le quartz et la nature du protolithe, et non une silicification (**Figure 64-b**);
- sur le diagramme NaK, les roches semblent avoir des protolithes mafiques (riches en Ca) et felsiques (riches en albite), et avoir subi des altérations acides en K (cf. formation de muscovite, et de très peu de paragonite et pyrophyllite) (**Figure 64-c**).

Les roches échantillonnées ont des protolithes variés et ont subi des altérations en K (cf. séricitisation) plus ou moins intenses.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 15**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 65**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Fe-Mg** : altération souvent faible. Les indices Fe et Mg et les bilans de masse se corrélaient bien (**figure 65**). L'altération Fe-Mg est intense seulement dans les roches les plus mafiques, ce qui pourrait dénoter une dépendance lithologique, ou des erreurs de reconnaissance des protolithes felsiques pour une partie des échantillons;
- **Si** : l'indice Si ne se corréle pas aux bilans de masse, possiblement parce que la silicification est faible et que les variations de la quantité de quartz reflète la nature felsique ou mafique des protolithes frais;

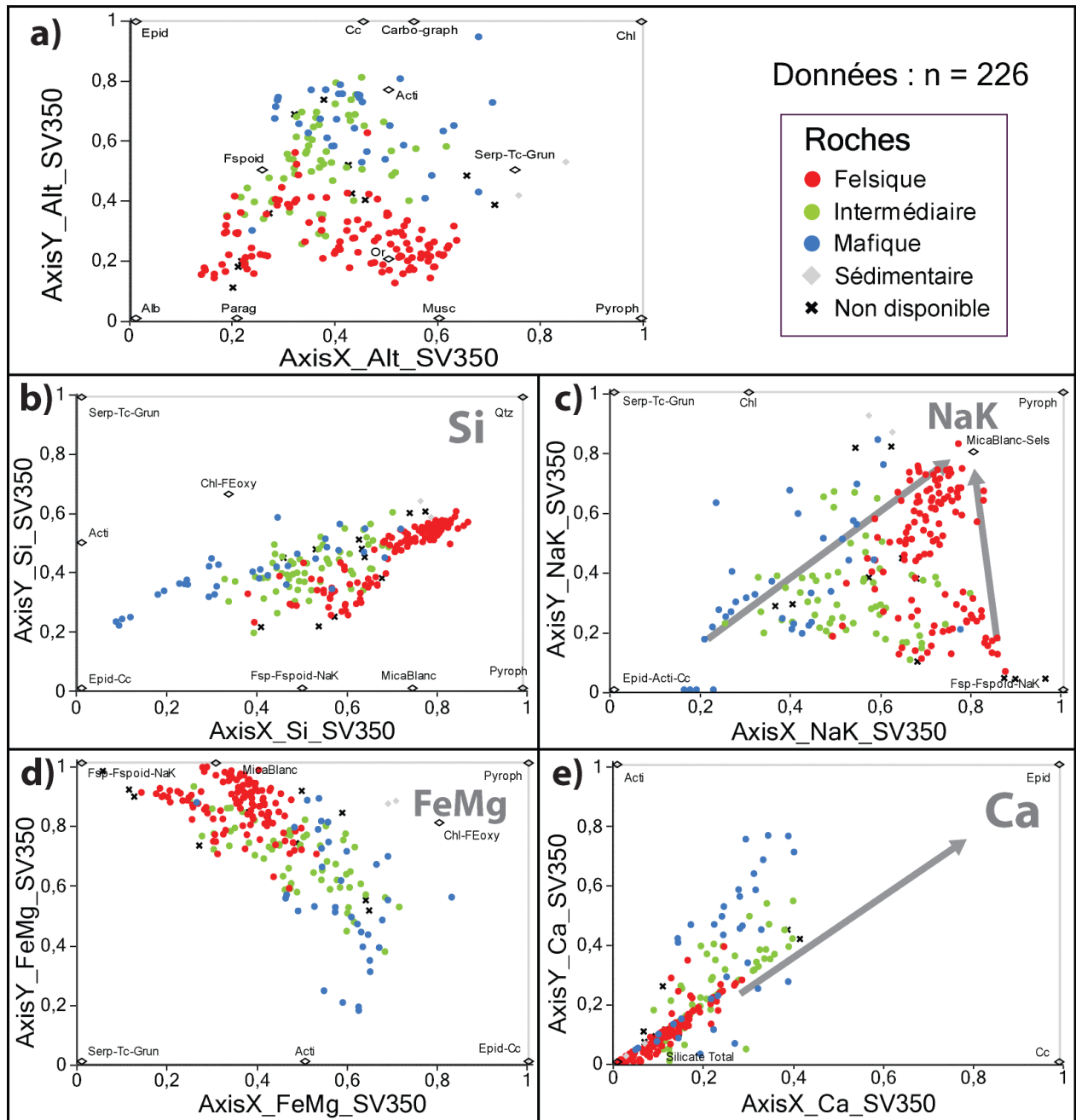


- **Na-K** : les indices Na et K ne se corrèlent aux bilans de masse que lorsqu'ils sont calculés avec albite et orthose comme minéraux marqueurs, indiquant des gains/pertes en Na-K faibles. L'indice K calculé avec la muscovite reflète mieux l'altération acide en K (séricitisation) de ces roches.

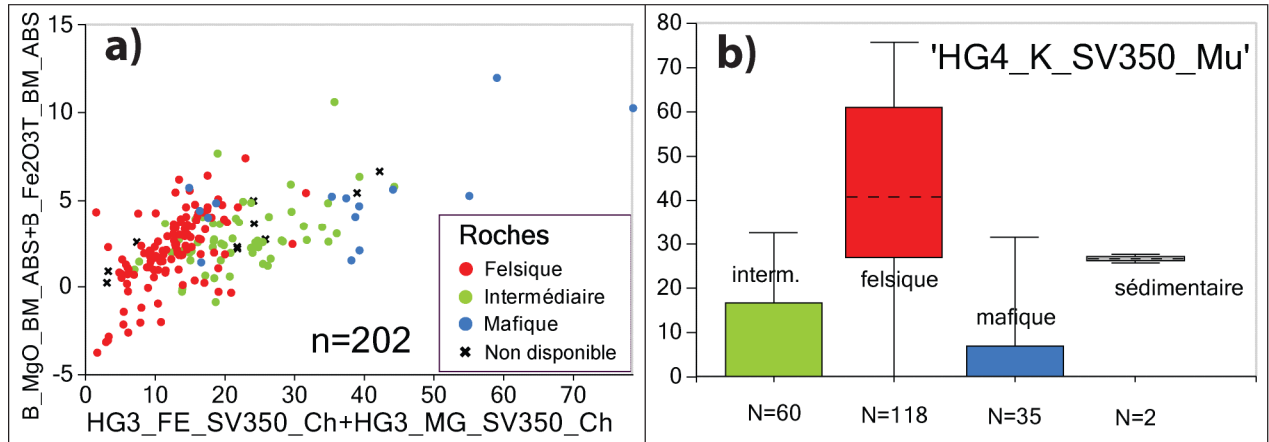
La séricitisation paraît plus intense dans les roches ayant les protolithes les plus felsiques (**figure 65-b**), puisque ces roches étaient les plus riches en K avant l'altération. Pour les roches mafiques, l'altération acide se manifeste plutôt par la formation de chlorite (**figure 65-a**).

Tableau 15 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Chlorite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)



**Figure 62** : Diagramme général (a), diagramme Si (b), diagramme NaK (c), diagramme FeMg (d) et diagramme Ca (e) pour les roches du dépôt de Comtois échantillonnées par Dupré (2010).



**Figure 63** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.16 Dépôt d'or de Challenger, Australie

Le gisement d'or de Challenger, Australie, est constitué de roches de haut grade métamorphique (cf. présence de migmatites). Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : McFarlane et al. (2007), Tomkins et Mavrogenes (2002);
- grade métamorphique : granulite;
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 5GRA900, avec rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,2 et  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-LOI}$  non disponibles.

Les roches échantillonnées ont été classées de la façon suivante par McFarlane et al. (2007), Tomkins et Mavrogenes (2002) :

- gneiss distaux au gisement;
- gneiss proximaux au gisement (roches altérées?);
- roches à grenat-cordiérite (roches altérées?);
- veines riches en quartz;
- leucosomes à quartz-feldspath.

Lorsque l'on représente ces roches sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figure 66**) :

- les « veines de quartz » se distinguent nettement des autres roches sur le diagramme Si (**figure 66-c**);
- les « leucosomes » et les « gneiss distaux » ont des paragenèses relativement proches, bien que les « leucosomes » soient plus riches en feldspaths. Ces roches pourraient provenir de la même unité lithologique.

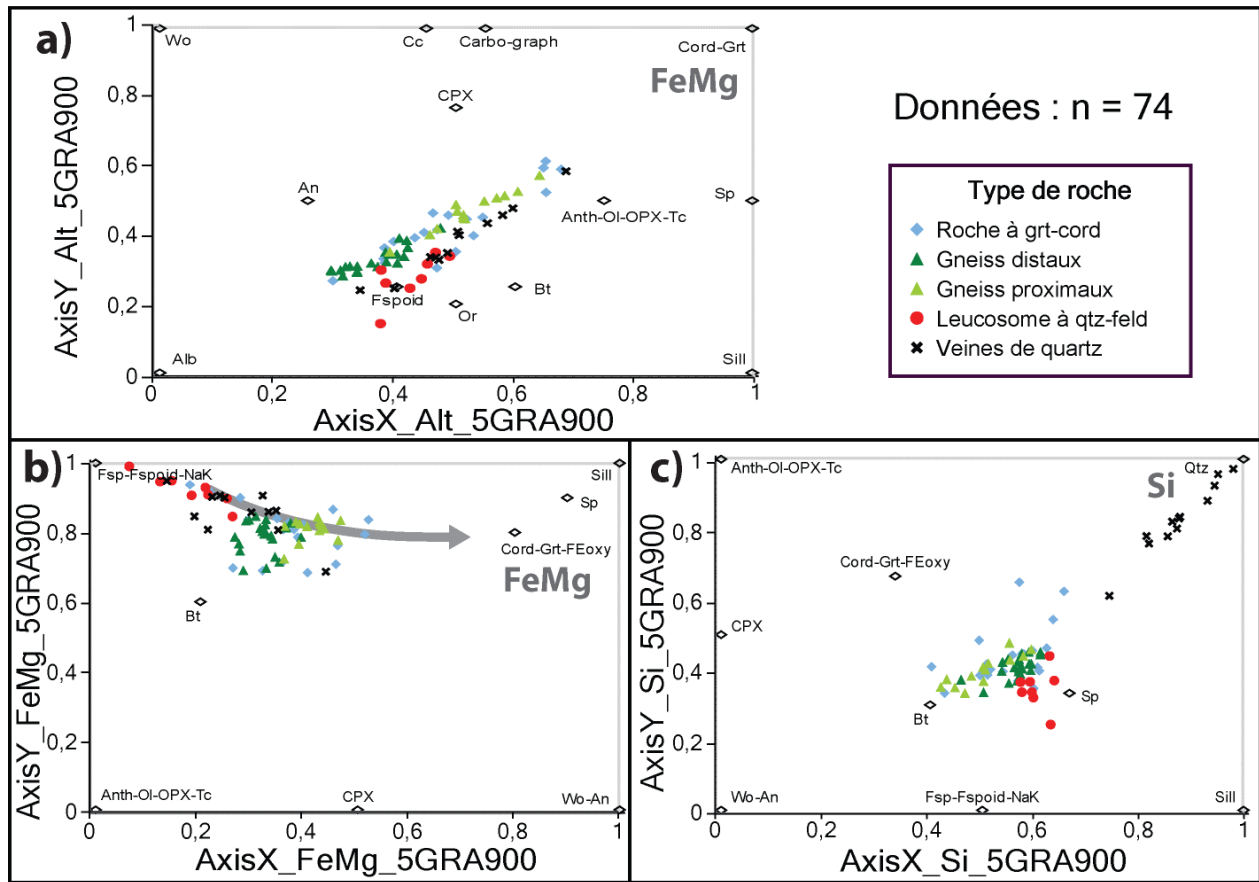
- d'après leurs positions sur les diagrammes FeMg et généraux, les « gneiss proximaux » et les « roches à grenat-cordiérite » pourraient correspondre à des « gneiss distaux » qui auraient subi une altération Fe-Mg (**figure 66-a, -b**).

Les roches considérées sont principalement composées de feldspaths alcalins, de grenat et de cordiérite, et sont possiblement des roches felsiques plus ou moins intensément altérées en Fe-Mg. Notez que la carbonatation, si elle était présente à bas grade, n'est plus observée à haut grade (cf. dévolatilisation).

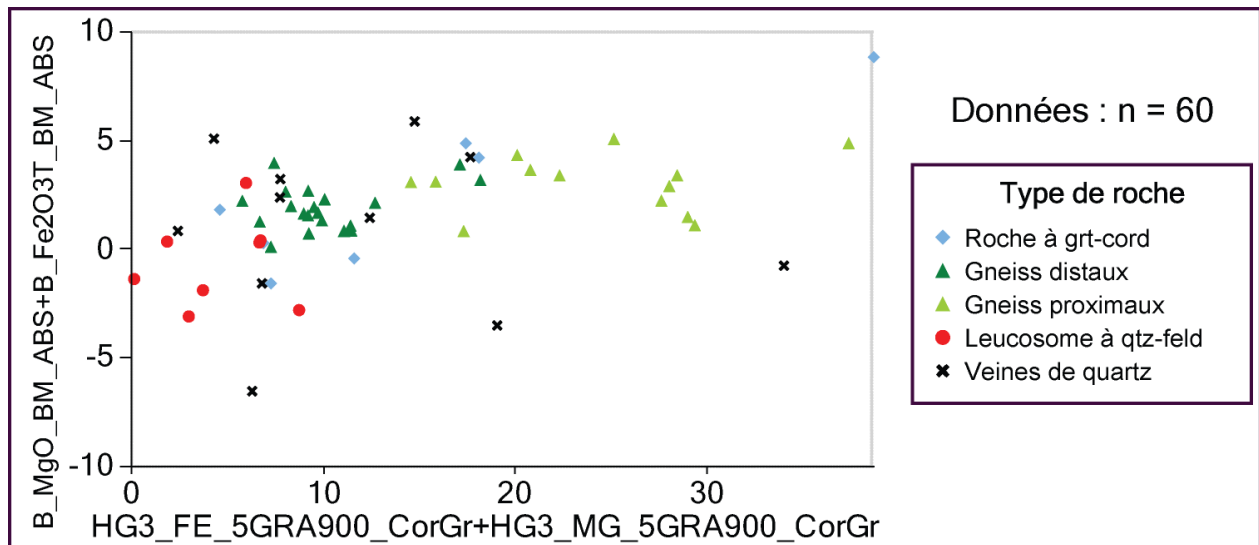
Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 16**. Les indices Fe et Mg sont bien corrélés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs (**figure 67**). La position des roches sur le diagramme FeMg (**figure 66-b**) et les valeurs des indices et des bilans de masse s'accordent pour indiquer que l'altération Fe-Mg a eu une intensité relativement faible, expliquant que les roches aient conservé une partie importante de leurs feldspaths.

Tableau 16 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Grenat, cordiérite	(0; 1)	(0,8; 0,8)



**Figure 64** : Diagramme général (a), diagramme FeMg (b) et diagramme Si (c) pour les roches du gisement d'or de Challenger échantillonnées par McFarlane et al. (2007), Tomkins and Mavrogenes (2002).



**Figure 65** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

#### 4.17 Dépôt d'or de Hemlo, Ontario

Le gisement d'or de Hemlo, Ontario, a subi un épisode de métamorphisme après sa formation. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985), Heiligmann et al. (2008);
- grade métamorphique : les roches hôtes étaient au faciès des amphibolites lorsque le gisement s'est formé au faciès schiste vert (400-500°C, 4-5 kbar). Le gisement a ensuite été métamorphisé à 630°C et 5-7 kbar (Heiligmann et al. 2008);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 7AMP700, avec CO<sub>2</sub> normatif et rapport  $Fe_2O_3/Fe_2O_{3T}$  (%pds) = 0,2 ou  $Fe_2O_3-FeO$  mesurés lorsqu'ils sont disponibles.

Les roches échantillonnées ont des protolithes variés : roches felsiques, intermédiaires, mafiques, ultramafiques et roches sédimentaires (**figure 68**). Les différents auteurs ont également classés ces roches selon qu'elles avaient ou non subi une altération (cf. classes altérées, altérées?, non-altérées et non-altérées?) (**figure 69**).

Lorsque l'on représente ces roches sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figure 69**) :

- il n'y a aucune correspondance entre la classification « altérées » et « non-altérées » des roches proposées par les auteurs et la position des échantillons sur les diagrammes (**figure 69**).
- d'après leurs positions sur les diagrammes FeMg et NaK, les roches auraient pu subir de faibles altérations en Fe-Mg et/ou en Na-K (**figure 69-b, -c**). La silicification de certains échantillons est également possible (**figure 69-d**). Il est possible que certaines variations soient dues à la variabilité lithologique des précurseurs.

Les roches étudiées sont principalement constituées de cordiérite, grenat, micas blancs et biotites normatifs.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 17**. Ces indices ont été comparés à la classification proposée par les différents auteurs (**figure 70**). Les roches identifiées comme « altérées » sont riches en feldspaths alcalins et en micas blancs. Ces roches ont un protolithe felsique et ont peut-être subi des altérations en Na-K (cf. séricitisation; **figure 70**). Les roches identifiées comme « non altérées » contiennent des feldspaths et de la cordiérite. Ces roches ont un protolithe felsique et pourraient avoir subi une altération en Fe-Mg limitée (cf. chloritisation; **figure 70**).

Tableau 17 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Cordiérite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Muscovite, paragonite	(0; 0)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK	Albite, orthose	(0; 0)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	quartz	(0; 0)	(1; 1)

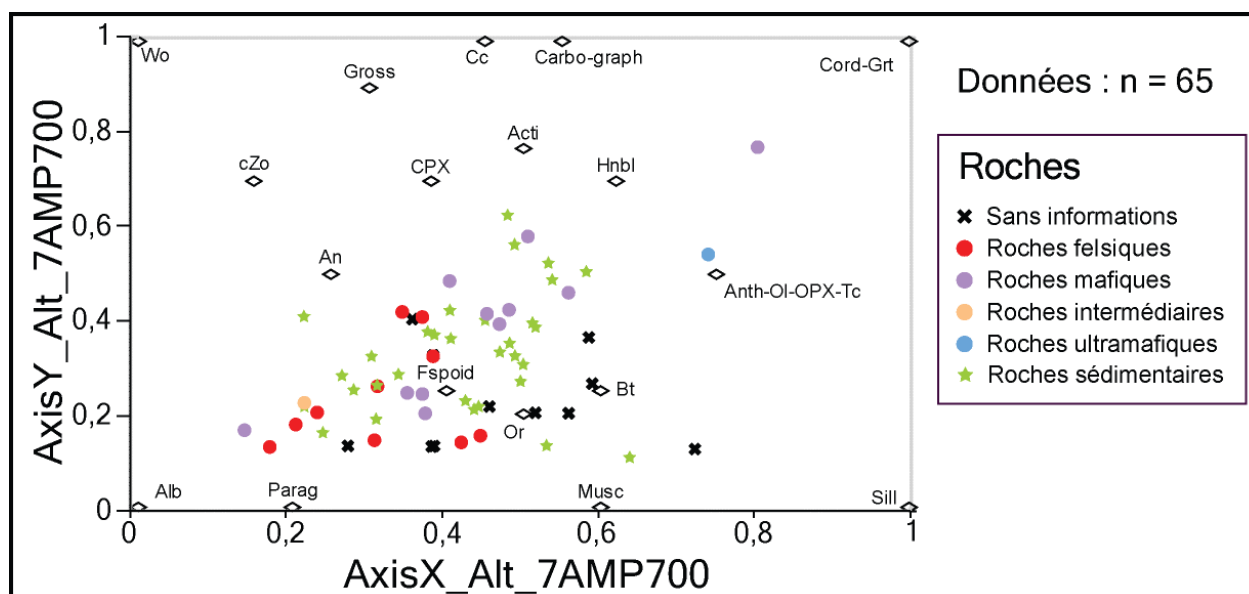
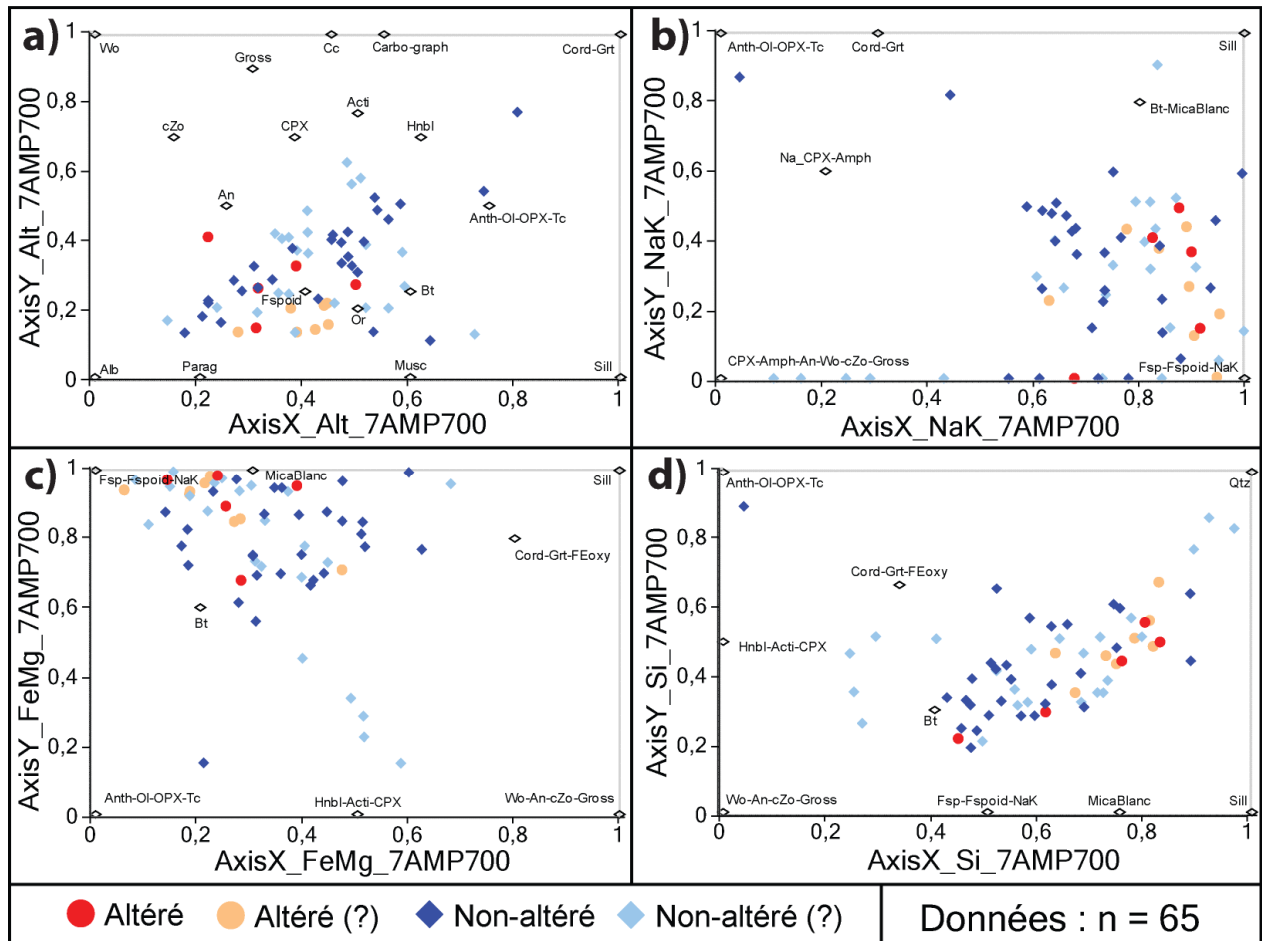
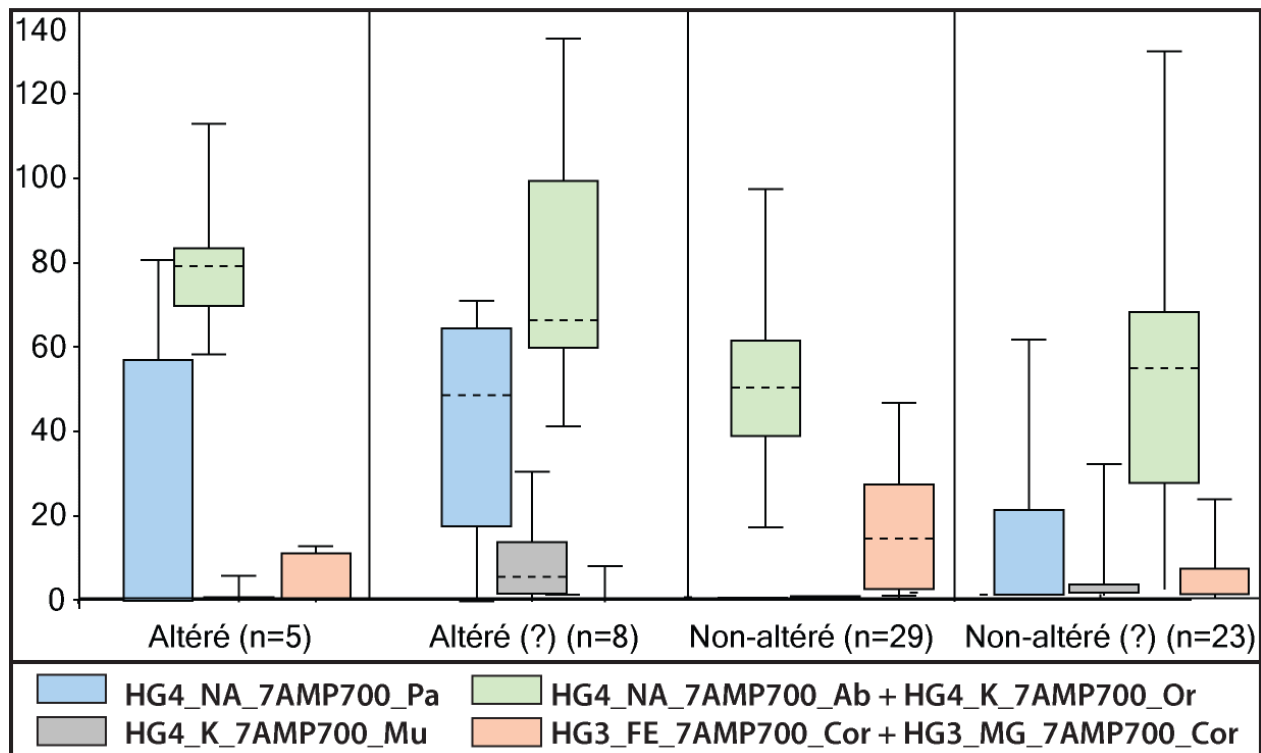


Figure 66 : Diagramme général pour les roches du gisement d'or de Hemlo échantillonnées par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985) et Heiligmann et al (2008).



**Figure 67** : Diagramme général (a), diagramme NaK (b), diagramme FeMg (c) et diagramme Si (d) pour les roches du gisement d'or de Hemlo échantillonnées par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985) et Heiligmann et al (2008).





**Figure 68** : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des altérations proposée par Kuhns et al. (1991), Cameron et Hattori (1985), Heiligmann et al. (2008).

#### 4.18 IOCG de Kwyjibo, Québec

Le dépôt de Kwyjibo, Grenville, est associé à des roches de haut grade métamorphique. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : SIGEOM, Clark et al. (2005) et SOQUEM – communication personnelle de Serge Perreault en 2014;
- grade métamorphique : les roches hôtes ont subi un métamorphisme de haut grade avant la formation du gisement (faciès des amphibolites ou des granulites, selon les terranes). Le gisement de Kwyjibo a pu se former dans les conditions du faciès des amphibolites. Il est possible qu'il n'ait pas subi d'épisode majeur de métamorphisme et/ou de déformation après sa formation;
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 7AMP700, avec  $\text{CO}_2$  normatif et rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  (%pds) = 0,6 ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO}$  mesurés lorsqu'ils sont disponibles.

Les échantillons compilés ont été classés par leurs collecteurs de la façon suivante :

- **leucogranite, aplite, gneiss, gneiss à quartz-feldspath, gneiss quartzofeldspathique** : pourraient désigner l'unité méta-magmatique felsique (cf. leucogranite) qui est l'unité hôte principale de la minéralisation;
- **granite** : pourrait désigner les autres granitoïdes du complexe de Canatiche qui ne sont pas hôtes de la minéralisation;
- **gabbro, amphibolite, M15** : autres types d'unités observées à proximité du dépôt;
- **métasomatique, gneiss à biotite-hornblende, schiste, veine** : roches altérées par les fluides hydrothermaux?

Lorsque l'on représente ces roches sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figure 71**):

- d'après le diagramme général, les principales altérations seraient de type Ca et Fe ou Mg (**figure 71-a**);
- le diagramme, Ca confirme que l'altération, Ca est prononcée dans les échantillons disponibles (**figure 71-b**). Cette altération est principalement exprimée par la présence de wollastonite et de grossulaire normatifs;
- le diagramme FeMg confirme que les altérations Fe et/ou Mg sont importantes pour certaines roches (**figure 71-c**). Ces altérations n'étant marquées que par la présence d'oxydes de fer normatifs, il s'agit en fait de gains de Fe;
- la quantité de quartz diminue naturellement dans les roches riches en oxydes de fer, puisque ces minéraux ne contiennent pas de Si par définition (**figure 71-e**);
- les échantillons disponibles n'ont pas subi d'altérations CO<sub>2</sub> ou Na-K (**figure 71-d**).

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 18**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 72**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Fe** : l'altération Fe est marquée par les oxydes de fer. L'indice Fe se corrèle bien aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, indiquant une cohérence entre les méthodes et une relative immobilité des éléments traces qui servent au calcul des bilans de masse (**figure 72-a**);
- **Ca** : l'altération, Ca est marquée par la wollastonite et le grossulaire. L'indice, Ca se corrèle plus ou moins aux bilans de masse pour les altérations les plus faibles en Ca (**figure 72-b**).

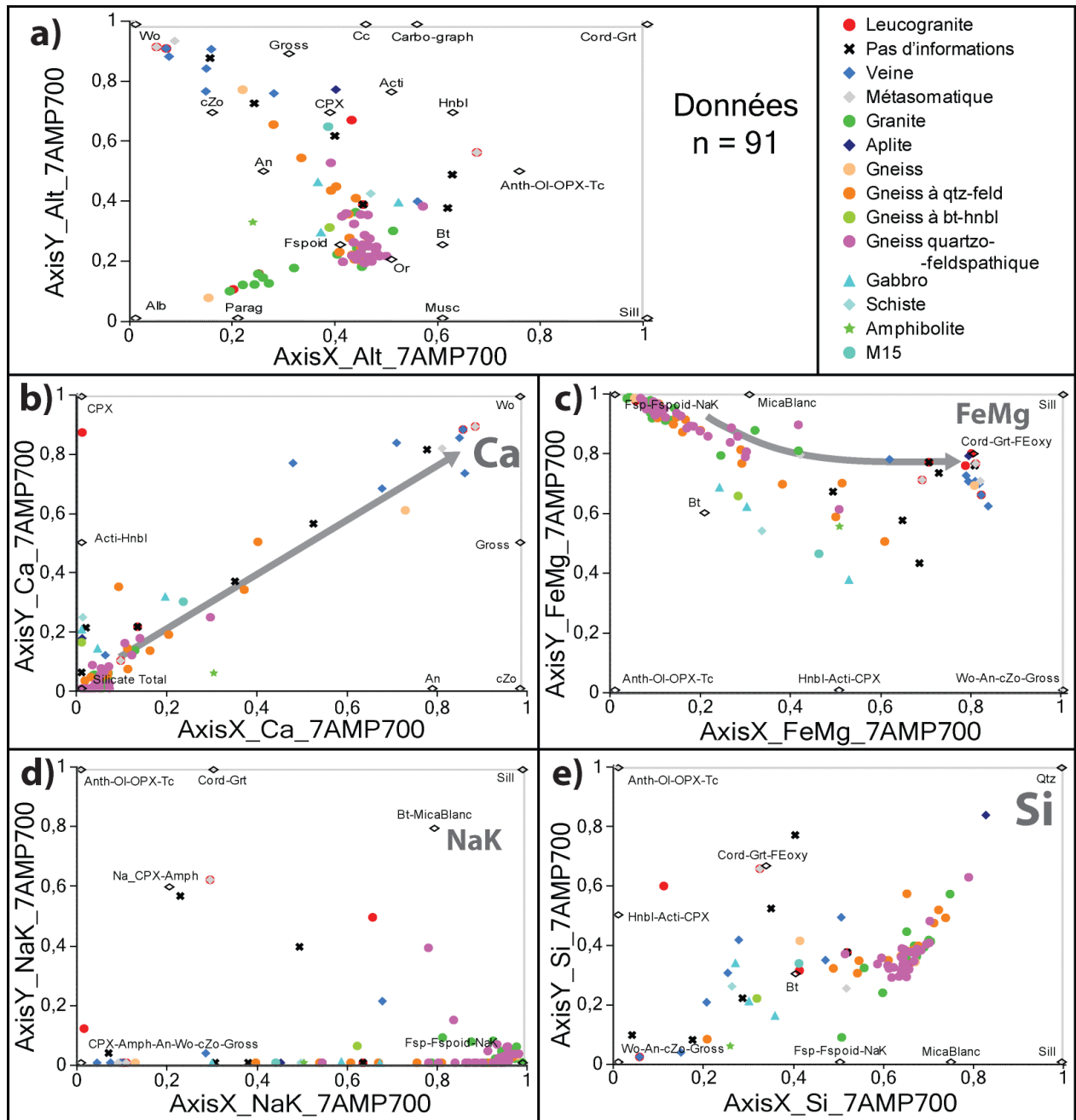
Lorsque l'on compare les valeurs des indices Fe et Ca (**figure 73**), on observe une corrélation indiquant que ces altérations sont les plus intenses dans les mêmes échantillons. Il semble donc y avoir une corrélation spatiale entre les altérations en Ca et la formation d'importantes quantités d'oxydes de fer.

## Note sur la minéralogie

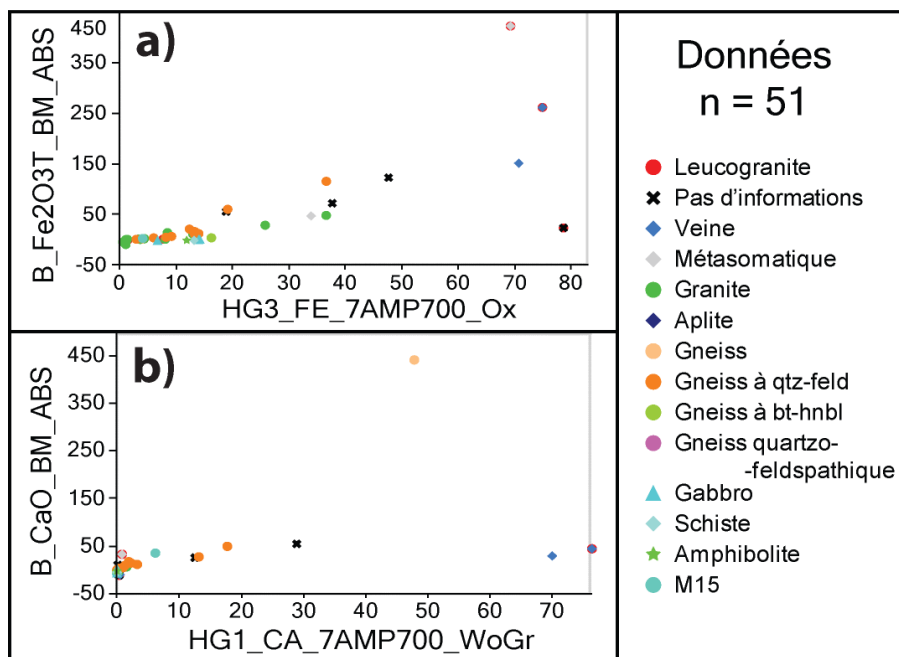
Plusieurs lames minces sont disponibles pour 10 échantillons de Kwyjibo (SOQUEM – communication personnelle de Serge Perreault en 2014). Les observations faites en lames minces ont été corrélées avec succès aux proportions des minéraux normatifs (**figure 74**). Les désaccords portent sur la biotite et l'épidote, observées en lame mince, mais non calculées, la wollastonite, les micas blancs et le grossulaire, calculés en faibles proportions, mais non observé en lames minces, et diverses phases mineures dont certaines n'ont pas été intégrées au calcul normatif.

Tableau 18 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

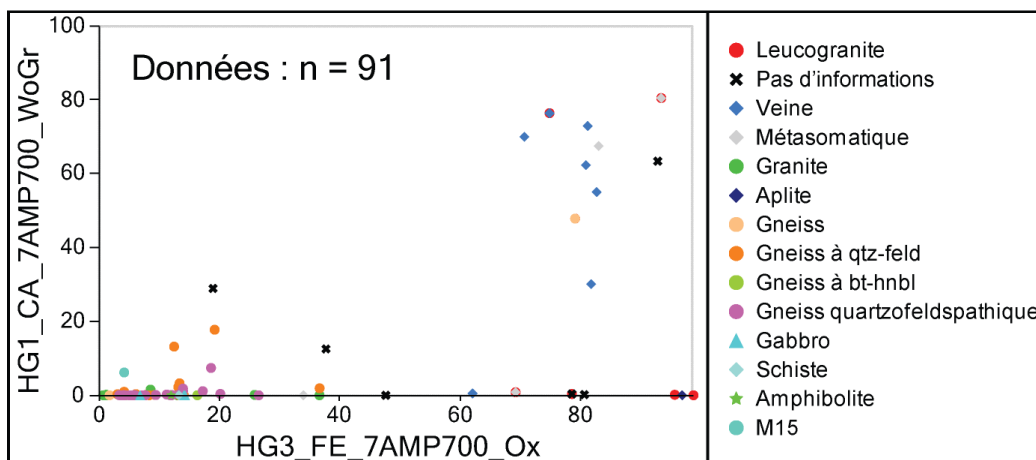
Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
1	Diagramme Ca	Wollastonite, grossulaire	(0; 0)	(1; 1)
3	Diagramme FeMg (indice Fe)	Fe-oxyde	(0; 0)	(0,8; 0,8)



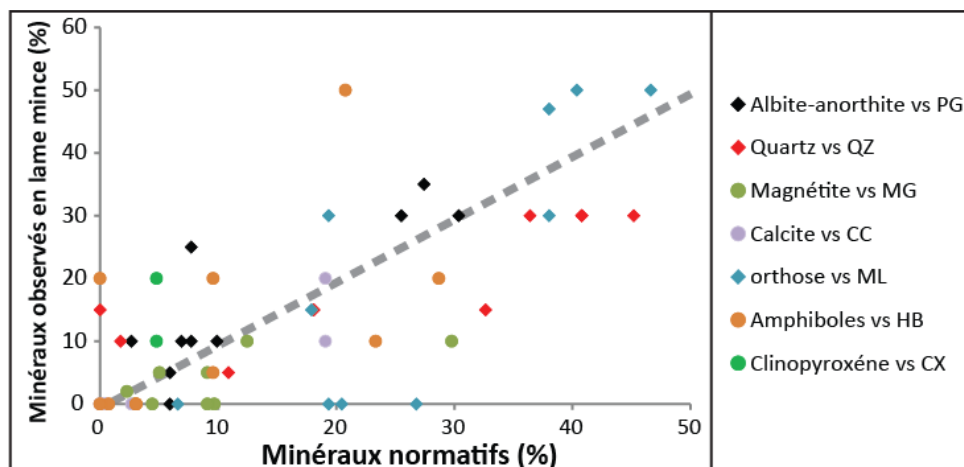
**Figure 69** : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du gisement Kwijibo échantillonnées par Clark et al. (2005), SIGEOM et SOQUEM.



**Figure 70** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».



**Figure 71** : Diagramme binaire comparant les indices Fe et Ca calculés grâce à la méthode « HautGrade ».



**Figure 72** : Diagramme binaire comparant la minéralogie de 10 échantillons décrite en lames minces (SOQUEM – communication personnelle de Serge Perreault en 2014) aux proportions des minéraux normatifs du faciès 7AMP700.

#### 4.19 VMS de Hackett River, Nunavut

Le VMS de Hackett River, Nunavut, est associé avec des roches de haut grade métamorphique. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : données fournies par X-Strata-Zn (maintenant Glencore) pour les besoins des projets 2012-08 et 2013-04 (cf. Mathieu, 2013; 2014);
- grade métamorphique : faciès amphibolite, 5,1 kbar, 550°C (Frith, 1987);
- norme calculée : norme HautGrade, faciès 5AMP670, avec CO<sub>2</sub> normatif ou mesuré lorsque disponible et rapport Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> (%pds) = 0,3.

Le dépôt de Hackett River se situe dans la ceinture de roches vertes du même nom (craton de l'Esclave). Il est encaissé dans des méta-volcanites et des méta-sédiments de nature turbiditique du Supergroupe de Yellowknife (Frith et Percival, 1978; reportés par Grant, 2009). Les dépôts pourraient se situer au contact entre des graywackes et des unités volcaniques felsiques à intermédiaires (Grant, 2009).

Les données disponibles sont classées selon le nom de l'unité reconnue en forage. L'absence d'analyses d'éléments traces (Zr par exemple) empêche une meilleure classification de ces roches. Les unités du log de forage sont les suivantes :

- **roches calco-silicatées** : unités distinctives riches en carbonates, diopside et amphiboles. Cette unité correspond soit à une unité méta-sédimentaire (marbre) ou une unité qui a subi une intense carbonatation;
- **unités sédimentaires** : méta-graywacke (roches riches en grains de quartz et biotite) et unité sombre contenant du graphite (méta-pélite?);

- **tuf** : interprété comme « unité volcanique felsique », bien que ces roches contiennent peu d'informations sur la nature de leurs protolithes. Roches fortement silicifiées qui contiennent des yeux de quartz et des anthophyllites;
- **unité volcanique** : unité volcanique mafique?
- **pegmatites, dykes de diabases** : unités non-considérées dans cette étude.

D'après la minéralogie normative des échantillons, la base de données contient principalement trois types de lithologies :

- les unités à cordiérite, muscovite, biotite et  $\pm$  grenat qui représentent la majeure partie des lithologies échantillonnées. D'après les diagrammes d'altération (**figure 75**), ces roches pourraient avoir un protolithe volcanique felsique (cf. « tuf ») et/ou un protolithe clastique (cf. graywacke ou pélite, c.-à-d. turbiditique);
- les unités riches en amphiboles, qui sont souvent désignées comme unités « volcaniques ». (cf. probablement mafiques, car les volcanites felsiques sont plutôt appelées « tuf »);
- les unités calco-silicatées, principalement constituées de carbonates, clinopyroxène, anorthite, quartz et amphiboles.

Notez qu'aucune roche n'est observée dans le champ des roches felsiques des diagrammes d'altération (**figure 75**), ce qui peut indiquer que ce type de roches est systématiquement très altéré. Aussi, certaines roches sont situées dans le champ des pélites et graywackes, ce qui pourrait indiquer la prédominance d'un précurseur sédimentaire ayant subi divers degrés d'altération.

On peut également remarquer que les roches désignées comme « tufs » sont celles qui ont subi les plus forts degrés d'altération FeMg. Ainsi, les noms du log de forage reflètent la minéralogie de la roche, qui semble plus influencée par l'intensité de l'altération que par la nature du protolithe. Les « tufs » pourraient ne pas avoir des précurseurs de type volcanique, bien que cela reste à confirmer.

D'après les diagrammes d'altération, les roches ont subi les altérations suivantes (**figure 75**) :

- **altération FeMg** : altération très importante, exprimée par la présence de cordiérite. L'ajout de Fe-Mg a profondément modifié la composition de ces roches initialement felsiques (cf. tufs) ou sédimentaires (cf. roches initialement riches en micas) (**figure 75-c**);
- **altération NaK** : la séricitisation est également très importante. Ceci est probablement en partie due à la nature sédimentaire (cf. roches initialement riches en micas) et felsiques (cf. volcanites riches en K) des différents protolithes, mais semble également refléter une véritable séricitisation (**figure 75-d**);
- **silicification** : Altération qui semble aller de pair avec la chloritisation et la séricitisation (**figure 75-e**);
- **altération CO<sub>2</sub>** : La carbonatation est limitée à quelques échantillons relativement riches en carbonates (cf. unités calco-silicatées). Les autres roches contenaient

probablement de faibles quantités de carbonates qui ont été détruits par le métamorphisme de haut grade;

- **altération Ca** : Les unités fortement carbonatées (cf. calco-silicates) contiennent des excès de Ca qui résultent d'un épisode de carbonatation suivi d'une faible dévolatilisation (cf. perte de CO<sub>2</sub> pendant le métamorphisme, qui fait augmenter la quantité de Ca-silicates) (**figure 75-b**). Il ne s'agit pas d'une véritable altération Ca.

Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 19**. Le précurseur frais utilisé pour ces calculs se situe dans le champ des pélites. Les roches étudiées contiennent des altérations en :

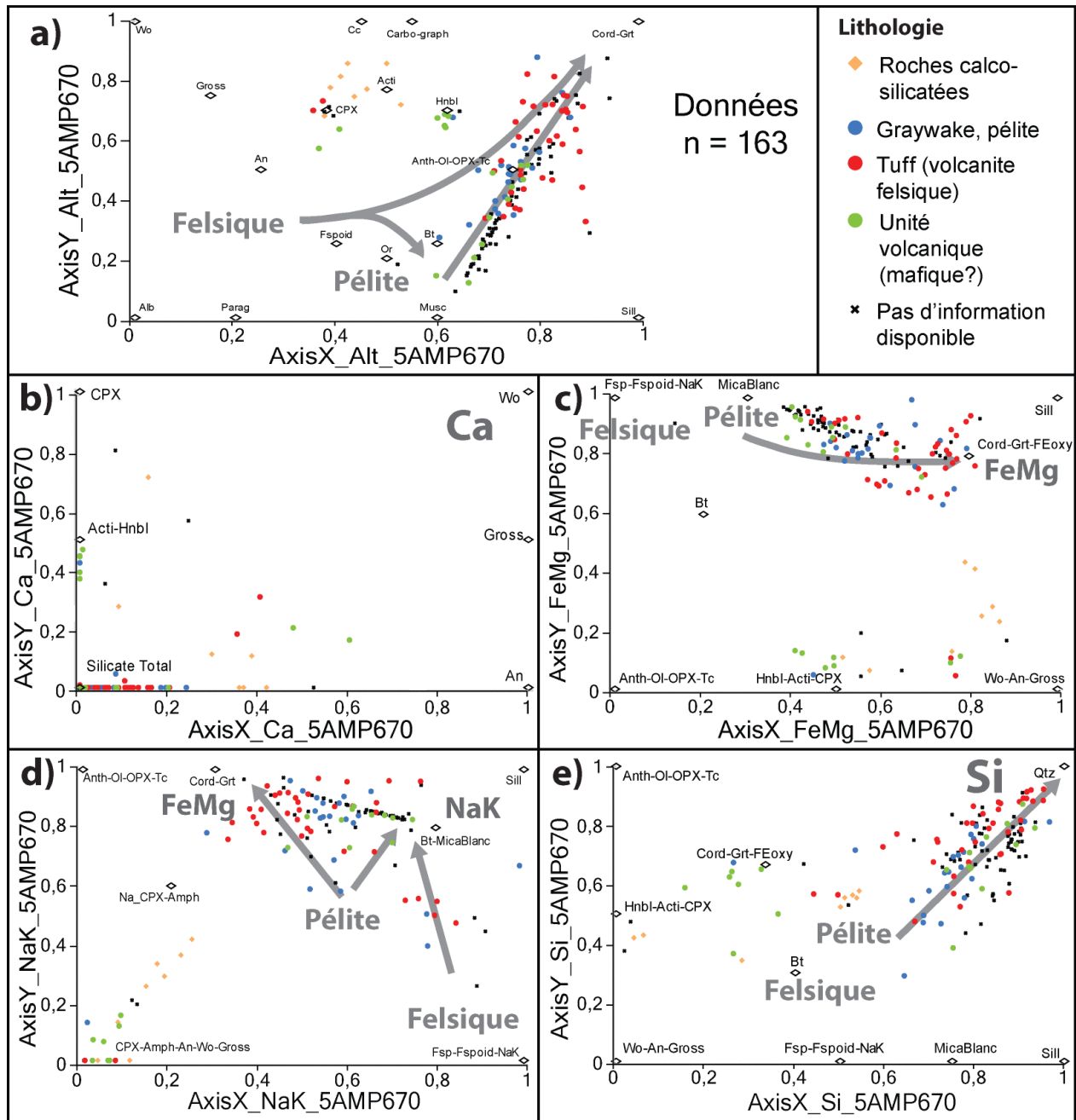
- **altérations FeMg et Si** : altérations présentes dans la plupart des faciès documentés. Ces altérations sont particulièrement intenses dans les unités dites « tuf »;
- **altération K** : la séricitisation a formé des excès de biotite et de muscovite dans les « tuffs ». L'altération Na n'est pas présente;
- **unité désignée comme « tuf »** : il s'agit en fait des roches ayant subi les plus importants taux de chloritisation, de silicification et de séricitisation. Le protolithe de ces roches est méconnaissable (volcanite felsique? Sédiment?).

Le VMS de Hackett River est associé à des altérations typiques de ce type de dépôts (cf. chloritisation et séricitisation). La nature volcanique et/ou sédimentaire des principaux protolithes reste à déterminer. Les échantillons disponibles sont proximaux, principalement très altérés, et un échantillonnage des roches distales pourrait permettre une meilleure compréhension des zones d'altération et de la nature des précurseurs frais. Aussi, la cartographie des roches riches en cordiérite-muscovite et fortement silicifiées pourrait permettre de délimiter les zones les plus fortement altérées.

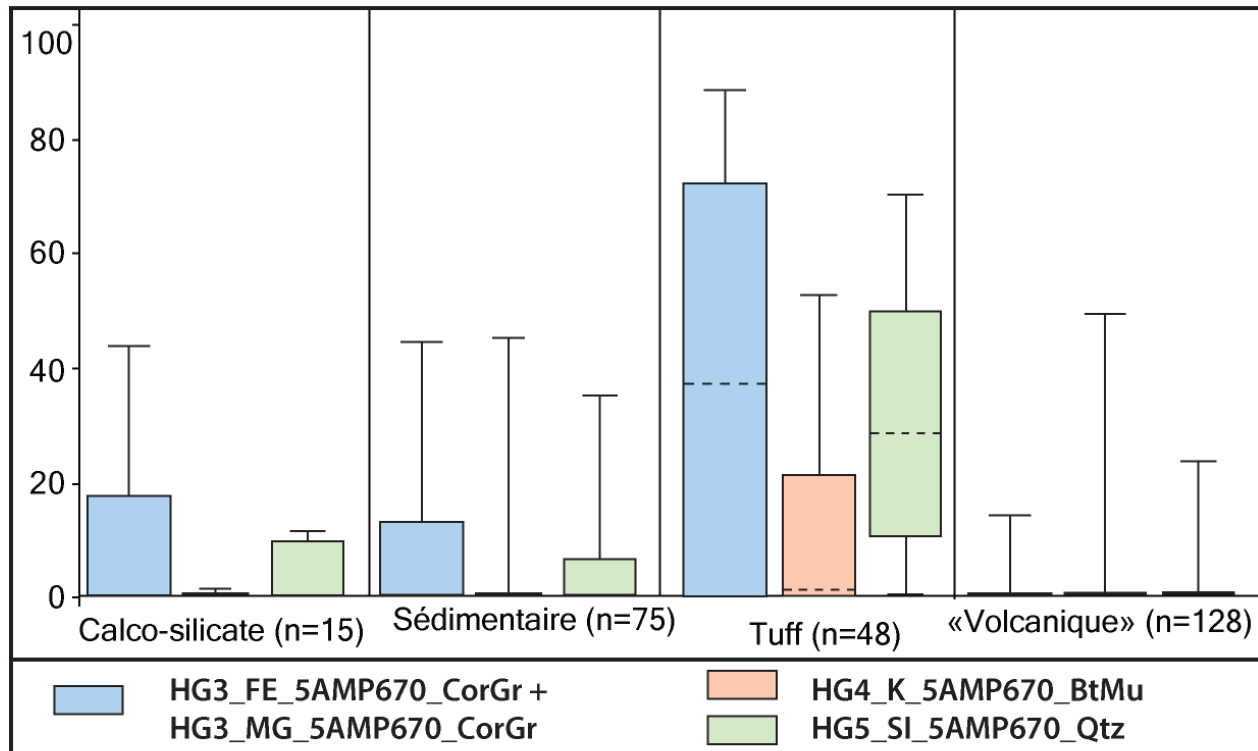
Tableau 19 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
3	Diagramme FeMg	Cordiérite, grenat FeMg	(0,2; 1)	(0,8; 0,8)
4	Diagramme NaK (indice K)	Biotite, muscovite	(0,5; 0,5)	(0,8; 0,8)
5	Diagramme Si	Quartz	(0,6; 0,4)	(1; 1)





**Figure 73** : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du VMS de Hackett River échantillonnées par Glencore.



**Figure 74** : Boîtes à moustaches représentant les valeurs des indices calculés avec la méthode « HautGrade », selon la classification des protolithes proposée dans la base de données de Glencore.

#### 4.20 Au-Mo porphyre des plutons Taschereau-Launay

Le porphyre à Au-Mo du complexe plutonique de Taschereau-Launay, Abitibi, n'a pas subi d'épisode majeur de métamorphisme après sa formation, et les altérations associées sont ainsi caractérisées par la minéralogie habituellement décrite dans les systèmes porphyriques. Les données utilisées ont les caractéristiques suivantes :

- données utilisées : Jébrak et Doucet (2002);
- grade métamorphique : schiste vert;
- norme calculée : norme HautGrade, faciès SV350, avec CO<sub>2</sub> normatif et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO mesurés.

Les roches intrusives sont des diorites, monzonites, gabbros et granites, et ont subis quatre épisodes d'altération (Jébrak et Doucet, 2002) :

- épidote-chlorite-carbonate;
- magnétite-hématite-microcline, ± minéralisé;
- albite-pyrite, minéralisé;
- séricite-quartz, ± minéralisé.

Lorsque l'on représente ces roches sur les diagrammes d'altération, on peut faire les observations suivantes (**figure 77**) :

- la position que prennent les échantillons des intrusions de Taschereau et de Launay sur les différents diagrammes est consistante avec la nature felsique des protolithes frais;
- la principale altération qui ressort sur les différents diagrammes est une altération en Na-K (gain). Cette altération a formé des orthoses (cf. unité à magnétite-hématite-microcline) et des albites (cf. unité à albite-pyrite);
- aucun autre type d'altération n'est observable, ce qui pourrait indiquer que l'ajout de Na-K est très important par rapport à l'ajout de Fe (cf. pyrite et oxydes de fer). Les calculs de bilans de masse confirment que les principales altérations sont des gains en Na-K (cf. Jébrak et Doucet, 2002).

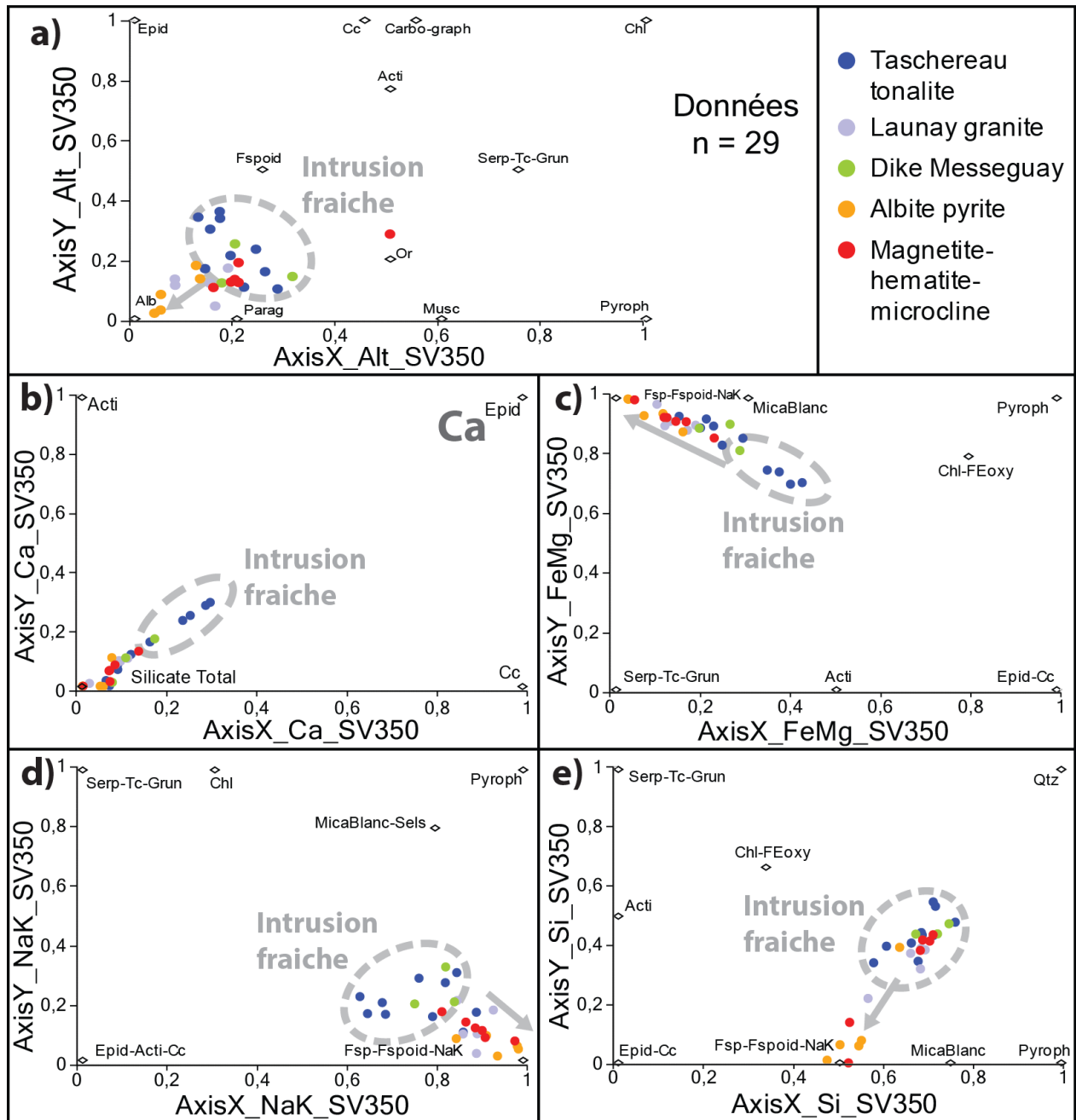
Les indices d'altération ont ensuite été calculés à l'aide des paramètres résumés par le **tableau 20**. Ces indices ont été comparés aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, afin d'évaluer leurs pertinences (**figure 78**). Les roches étudiées contiennent des altérations en :

- **Na** : altération fortement développée, probablement la plus importante du point de vue de l'exploration (cf. associée avec la minéralisation ; Jébrak et Doucet, 2002). L'indice Na (méthode HautGrade) se corrèle avec les gains en Na<sub>2</sub>O calculés par les bilans de masse, et les deux méthodes pointent vers des gains importants en Na (**figure 78**);
- **K** : altération peu intense d'après les indices de la méthode HautGrade et les bilans de masse (**figure 78**);
- **Si** : les gains/pertes en SiO<sub>2</sub> sont faibles d'après les bilans de masse et la méthode HautGrade.

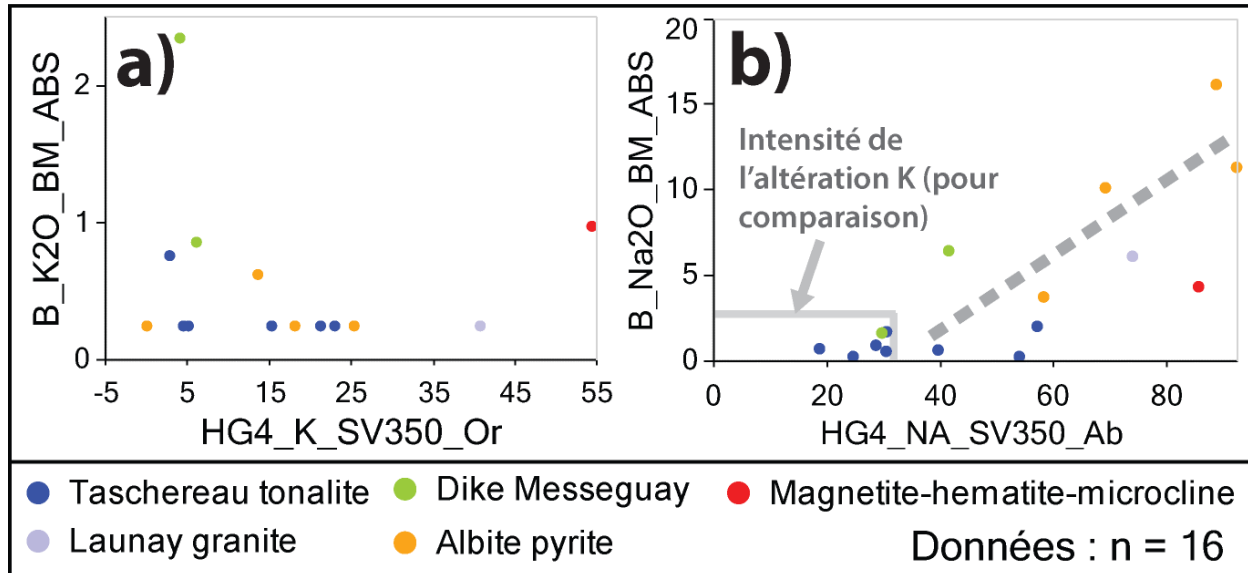
Le porphyre à Au-Mo du complexe plutonique de Taschereau-Launay semble principalement associé à une forte albitisation.

Tableau 20 : paramètres utilisés pour le calcul des indices d'altération.

Indice	Diagramme utilisé	Fact1 (minéral marqueur)	Fact2 (pôle frais)	Fact2 (pôle altéré)
4	Diagramme NaK	Orthose, albite	(0,7; 0,4)	(1; 0)
5	Diagramme Si	Quartz	(0,5; 0,7)	(1; 1)



**Figure 75** : Diagramme général (a), diagramme Ca (b), diagramme FeMg (c), diagramme NaK (d) et diagramme Si (e) pour les roches du porphyre de Taschereau-Launay échantillonnées par Jébrak et Doucet (2002).



**Figure 76** : Diagrammes binaires comparant les altérations quantifiées par les bilans de masse par modélisation des précurseurs et par les indices de la méthode « HautGrade ».

---

## 5 FAMILLES D'ALTÉRATIONS

---

Les principaux types de gisements sont associés à des empreintes d'altération caractéristiques, qui sont des assemblages des principaux types d'altérations (voir section 2.9). Ces empreintes d'altération sont décrites ci-dessous et représentées sur les six diagrammes d'altération à l'annexe B.

Sur les diagrammes de l'annexe B, les précurseurs frais utilisés sont des roches mafiques et felsiques. Pour les compositions intermédiaires, les empreintes d'altération devraient être intermédiaires entre celles associées aux roches mafiques et felsiques. Pour les roches carbonatées et/ou riches en micas (méta-sédiments principalement), les altérations auront les mêmes caractéristiques, mais la position du précurseur frais sera différente.

Les descriptions proposées ci-dessous se veulent générales. Les variantes sont, bien entendu, infinies d'un dépôt à l'autre, et les continuums entre les principales familles d'altération sont nombreux.

### 5.1 Dépôts de type SMV

Les principales altérations des systèmes SMV sont représentées sur les diagrammes d'altération des figures B-1 et B-2 (annexe B).

Les SMV sont des dépôts d'origine hydrothermale détachés de l'intrusion qui fournit la chaleur au système. Leur principale caractéristique est le rapport eau/roche élevé et l'origine principalement marine des fluides.

D'après les revues de Franklin et al. (2005) et de Galley et al. (2007), les principales altérations associées aux SMV sont :

- **altérations Fe-Mg (chloritisation) et parfois (Na)-K acide (séricitisation).** De la périphérie vers le cœur du système, les altérations sont zonées de la façon suivante : 1) chloritisation; 2) chloritisation et séricitisation; 3) séricitisation. Notez qu'une plus grande quantité de chlorite se formera dans des roches mafiques, et que les micas seront plus abondants si le précurseur est felsique;
- **silicification** : altération proximale, associée à la cheminée (« pipe »). Aussi présente dans la zone externe des gisements, où des veines à quartz-épidote se forment;
- **carbonatation** : la carbonatation varie en intensité et en position d'un dépôt à l'autre. Les Ca-carbonates sont observés dans l'ensemble du dépôt et les Fe-Mg-carbonates ont tendance à être proximaux;
- **épidotisation** : altération distale non-pervasif qui forme des veines à quartz-épidote;
- **autre** : altération Na signalée, mais rarement observée. Aussi, certains gisements sont associés à des horizons fins d'exhalites (Ba, Si, carbonates, sulfates, etc.).

Les caractéristiques des halos d'altération peuvent également varier selon la composition de la roche hôte. Les SMV sont d'ailleurs classés de cette façon. Bien que les classifications anciennes utilisent des noms de localités (Cox et Singer, 1986; Prokin et Buslaev, 1999), les travaux plus récents proposent des classifications basées sur la nature des roches hôtes (Franklin et al., 2005; Mosier et al., 2009). La classification de l'IUGS (Mosier et al., 2009) classe les SMV en trois catégories (mafique, felsique et bimodal-mafique).

Selon la nature de la roche hôte, les roches altérées auront les caractéristiques suivantes :

- **roches mafiques** : ces roches sont pauvres en K, et peu de micas pourront s'y former. Un faible ajout de K formera principalement de la biotite;
- **roches felsiques** : roches riches en K où d'importantes quantités de micas blancs pourront se former. Un ajout de Fe-Mg pourra conduire à la formation de biotite. Les altérations phylliques y paraissent souvent plus intenses.

En ce qui concerne les VMS métamorphisés à haut grade, les caractéristiques suivantes sont observées :

- **altération Fe-Mg** : altération principalement caractérisée par la présence de cordiérite (paragenèse à cordiérite-anthophyllite, ou à cordiérite-sillimanite-staurotide, etc.) et de biotite;
- **carbonatation** : d'importants horizons de calco-silicates (carbonate, diopside, grenat, albite, amphibole, etc.) sont observés à Hackett River (Grant, 2009). Ces roches pourraient correspondre à des équivalents de haut grade de roches carbonatées.

Les tendances d'altération représentées à l'annexe B (figures B-1 et B-2) reflètent bien les caractéristiques énumérées ci-dessus, ainsi que les trends déduites à la section 4 à partir d'exemples naturels. Ces tendances sont les suivantes :

- **altérations Fe-Mg et séricitisation** : ces tendances sont bien développées sur les diagrammes général, FeMg et NaK. La forme du nuage de points variera selon que l'un ou l'autre type d'altération est plus prononcé dans une série d'échantillons donnée;
- **diagrammes Ca et CO<sub>2</sub>** : le diagramme Ca pourra refléter l'épidotisation. Le diagramme CO<sub>2</sub> reflétera la carbonatation si les carbonates n'ont pas réagi avec les silicates pendant le métamorphisme;
- **diagramme Si** : la silicification fera augmenter la quantité de quartz. Par contre, l'ajout important de Fe-Mg et K dans d'autres parties du système fera diminuer la quantité de quartz, qui sera consommée pour former des micas, de la cordiérite et autres. La diminution de la quantité de quartz sera d'autant plus visible que le protolithe était riche en quartz (précurseur felsique).

## 5.2 Les IOCG

Les principales altérations des systèmes IOCG sont représentées sur les diagrammes d'altération de la figure B-3 (annexe B).

Les IOCG sont des gisements de type magmatiques hydrothermaux (Hitzman et al., 1992). Un continuum existe probablement entre les IOCG et d'autres types de dépôts hydrothermaux (cf. porphyres, épithermaux), dont les IOCG seraient le membre pauvre en soufre qui se formerait principalement à grande profondeur.

Notez que la plupart des gisements hydrothermaux se forment dans les conditions du métamorphisme de bas grade; les IOCG sont particuliers, car leurs parties profondes se forment plutôt dans des conditions de haut grade.

Ces gisements ont fait l'objet de nombreuses synthèses, qui définissent les altérations associées aux systèmes IOCG de la façon suivante (Hitzman, 2000; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Magrina et al., 2005; Groves et al., 2010) :

- **altérations Na** (albite), **Ca** (calco-silicates; andradite, épidote, clinopyroxènes), **Na-Ca** (albite-oligoclase, actinote, scapolite; cf. roches ressemblant à des skarns parfois). Ces altérations sont précoces et très étendues. L'un ou l'autre type d'altération (cf. plutôt Ca ou Na) peut être plus ou moins développé d'un gisement à l'autre;
- **altération K, K-Fe** (orthose, ou biotite-quartz-magnétite, ou biotite-orthose). Cette altération recoupe l'altération Na-Ca, elle est donc plus tardive et beaucoup plus localisée autour des dépôts métalliques;
- **magnétite et/ou hématite** (et phosphates, carbonates, sulfures tardifs, etc.) : la zone minéralisée est caractérisée par un ajout important de fer dans l'encaissant.

Les principales altérations ont tendance à se recouper dans les systèmes IOCG. Chaque nouvel événement remplace complètement les minéraux préexistants, ce qui permet une identification claire de chaque altération, quel que soit la nature du précurseur. Les altérations se mettent généralement en place dans l'ordre suivant (Bastrakov et al., 2007; Monteiro et al., 2008; Corriveau et al., 2010a; 2010b) :

- 1) **altération Na** (albite-hématite) : précoce, profonde, étendue;
- 2) **altération Na-Ca** (albite-oligoclase, actinote, magnétite, scapolite, etc.) : également précoce, profonde et étendue;
- 3) **altération Ca-Fe-(Na)** (amphibole, magnétite) : possiblement intermédiaire entre les stades (2) et (4), rarement reportée;
- 4) **altération K-Fe de haute température** (orthose, biotite, magnétite) : altération locale, proche de la minéralisation;
- 5) **altération K-Fe de basse température** (orthose, muscovite, hématite, carbonate, chlorite, etc.) : altération locale, de plus faible profondeur. Pourrait remplacer l'altération (4) dans les systèmes qui se forment à plus faible profondeur;



- 6) **aillification, argilisation** (hématite, micas, carbonates, quartz, argiles, etc.) : altérations distales de faible profondeur, caractéristiques de la partie épithermale des dépôts.

Lorsque l'on représente ces altérations sur les diagrammes d'altération (figure B-3) pour des précurseurs felsiques (cf. principales hôtes des IOCG), les remarques suivantes peuvent être formulées :

- **diagramme Si** : la plupart des altérations entraînent une diminution de la quantité de quartz, car l'ajout d'importantes quantités de Na, Ca et K consomment le quartz. Aussi, le remplacement des silicates par les oxydes de fer fait également tendre les nuages de points vers le pôle (0; 0);
- **altérations Na et K** : les roches felsiques sont riches en Na-K, et l'ajout d'orthose ou d'albite fait relativement peu varier la position des points sur les diagrammes d'altération. Ce type d'altération est difficile à détecter, surtout si elle se manifeste par le remplacement de K par Na, et *vice versa*, au sein des feldspaths. Dans les cas extrêmes cependant (cf. albitites, etc.), ces altérations sont faciles à détecter;
- **altération Ca** : ces altérations sont caractérisées par l'ajout d'amphiboles, de clinopyroxènes, de grossulaire ou andradite, etc. Cette altération forme des tendances longues sur les différents diagrammes, car l'ajout de Ca à une roche felsique modifie grandement sa minéralogie. Notez que l'ajout de Ca est généralement accompagné de l'ajout de Fe qui permet la formation d'amphibole et d'andradite, par exemple;
- **altération Na-Ca** : tendances intermédiaires entre ceux des altérations Ca et Na;
- **altération Fe-Mg** : cette altération est particulièrement visible sur le diagramme FeMg, car les oxydes de Fe-Ti y sont représentés en position (0,8; 0,8).

Lorsque l'on compare les tendances théoriques de la figure B-3 à ceux déduits pour le gisement de Kwyjibo (cf. section 4.18), la similitude est frappante. Le gisement de Kwyjibo présente donc des altérations typiques des systèmes IOCG.

### 5.3 Les porphyres Cu-Mo-(Au)

Les principales altérations des systèmes porphyriques sont représentées sur les diagrammes d'altération de la figure B-4 (annexe B).

Les porphyres sont des gisements de relativement de faible profondeur, se mettant cependant en place à plus d'un kilomètre sous la surface, qui sont connectés à l'intrusion motrice du système hydrothermal. Cette intrusion, généralement felsique, est communément altérée et minéralisée au même titre que ses roches encaissantes.

Il existe différents types de porphyres, qui sont classés selon la composition en Cu, Mo et Au du gisement et sous-divisés selon que l'intrusion associée est de nature alcaline ou sub-alcaline (Seedorff et al., 2005). L'IUGS classe les porphyres de la façon suivante (Singer, 2008) :

- porphyres à Cu-Au (si  $Au/Mo \geq 30$ );
- porphyres à Cu-Mo (si  $Au/Mo \leq 3$ );

- porphyres à Cu pour les compositions intermédiaires, si les gisements sont relativement pauvres en Au et Mo.

Ces distinctions sont importantes, car les différents porphyres se forment dans des systèmes hydrothermaux différents, et localement dans des conditions géodynamiques différentes (cf. lien entre intrusions alcalines et porphyres Cu-Au, etc.).

Les principales altérations décrites pour les systèmes porphyriques sont les suivantes (McMillan et Panteleyev, 1987; Jensen et Barton, 2000; Blevin, 2002; Jébrak et Doucet, 2002; Seedorff et al., 2005) :

- **altération propylitique** (épidote, chlorite, albite, carbonate) : altération profonde, distale, observée dans les roches encaissantes, possiblement plus étendues et précoces dans les systèmes calco-alcalins que dans les systèmes alcalins;
- **altération Na-Ca** (actinote, albite, magnétite) : altération précoce et proximale (systèmes alcalins);
- **altération Na** (albite) : altération proximale plutôt développée dans les systèmes calco-alcalins;
- **altération K ou K-Fe** (orthose, magnétite) : souvent très développée dans les systèmes alcalins, où cette altération est proximale et dominante. Altération mineure ou absente dans les systèmes calco-alcalins;
- **séricitisation, quartz-muscovite** : altération tardive, observée au toit des intrusions à proximité de la partie épithermale du système;
- **argilisation** (argiles, muscovite, hématite, chlorite, calcite) : souvent très développée dans les systèmes alcalins. Altération caractéristique de la partie épithermale du système.

Lorsque l'on représente ces altérations sur les diagrammes d'altération (figure B-4) pour des précurseurs felsiques (cf. principales hôtes des gisements de type porphyre), les remarques suivantes peuvent être formulées :

- **altérations Na-Ca et propylitique** : ces différentes altérations forment des tendances similaires sur les différents diagrammes. L'ajout de Ca et de Fe-Mg à un précurseur felsique entraîne de forts changements minéralogiques. Une tendance sera observée sur le diagramme CO<sub>2</sub> seulement si les carbonates n'ont pas réagis avec les silicates sous l'effet du métamorphisme;
- **altération K** : altération marquée par la formation d'orthose, qui n'est pas toujours facile à détecter si le précurseur est felsique. L'ajout de fer peut être plus facile à détecter puisque cela provoquera l'augmentation des proportions de biotite et d'oxydes de fer;
- **altérations acides** : la séricitisation et l'argilisation forment de longues tendances facilement identifiables sur les diagrammes NaK, FeMg, général et Si.

Il est à noter que ces différentes altérations sont similaires à celles observées dans les systèmes IOCG (cf. Na-Ca, K et K-Fe). La particularité des porphyres est la présence importante de la séricitisation et de l'argilisation, qui reflète la faible profondeur de mise en place

de ces dépôts. Les IOCG et les porphyres sont parfois décrits comme faisant partie d'un même continuum, dont les fluides auraient des  $fS_2$  et des  $fO_2$  différents. Du point de vue de leurs altérations, ces systèmes sont en effet similaires.

## 5.4 Les épithermaux

Les principales altérations des systèmes épithermaux sont représentées sur les diagrammes d'altération de la figure B-5 (annexe B).

Les systèmes épithermaux se forment à faible profondeur (cf. < 1km; Roberts et Sheahan, 1988). Ils peuvent correspondre à la partie superficielle des systèmes porphyriques, de type IOCG ou autres. À faible profondeur, l'ébullition est possible et répandue, et provoque des séparations de phases brutales dont des fluides acides peuvent être issus (cf. évolution rapide du pH et de la salinité due à la perte de  $H_2O$ ; Roberts et Sheahan, 1988). La précipitation de phases minérales variées peut également être observée.

Les fluides peuvent être riches en  $CO_2$  (partie distale souvent), avoir une  $fO_2$  élevée, et être riches ou pauvres en S ( $H_2S$ ,  $SO_2$ , etc.). À l'aplomb des systèmes magmatiques, les fluides ont tendance à être chauds, acides, riches en S et à présenter une salinité élevée; alors que les fluides distaux sont moins chauds, neutres, pauvres en S et ont une salinité faible (Hedenquist et Lowenstern, 1994).

Les principales altérations observées dans les systèmes épithermaux sont (Strong, 1981; Hedenquist et Lowenstern, 1994; Callegari et Pertsev, 2007) :

- altération propylitique, précoce et étendue;
- argilisation avancée ou intermédiaire (argiles, alunites, etc.);
- séricitisation;
- Silicification, localement très intense. Possibilité de former des greisens (cf. roches à quartz-muscovite, et phases alumineuses);
- Carbonatation possible.

Les épithermaux sont donc principalement caractérisés par des altérations acides, qui forment des roches riches en Al-Si dans lesquelles du K peut persister. Ces systèmes peuvent produire une vaste gamme de phases relativement inhabituelles, comme le topaze, la tourmaline, la fluorite, etc.

Les gisements d'or.

Il existe de très nombreux types de gisements d'or, dont les principaux sont :

- gisements de type Carlin à Au;
- « or orogénique » ou « or filonien » des ceintures de roches vertes;
- au situé dans des formations de fer;
- au associés aux intrusions felsiques (pour certains dépôts, il s'agit de porphyres; cf. section 5.3);

- vMS à Au (cf. section 5.1).

Les gisements d'au ayant un lien plus ou moins clair avec une intrusion magmatique se rapprochent des types VMS et porphyres (cf. ci-dessus). Les autres types de gisements d'or sont moins clairement associés à l'activité magmatique, et les fluides qui les forment peuvent avoir des origines variées (cf. fluides métamorphiques, fluides des bassins sédimentaires, etc.).

Une différence importante entre les gisements est la nature de leurs roches hôtes :

- **type Carlin** : roche hôte riche en Si et/ou Ca-CO<sub>2</sub> (roches sédimentaires clastiques ou carbonatées le plus souvent);
- « **or orogénique** » : roche hôte silicatée, souvent de composition mafique (coulées de lave basaltiques, etc.);
- **au situé dans des formations de fer** : roche hôte à magnétite et/ou hématite.

Chaque type de roches hôtes réagit différemment avec le fluide minéralisateur, et développera des altérations particulières. Ces réactions chimiques sont, dans certains cas, le principal ingrédient qui permet de former les gisements (cf. Au des formations de fer en particulier).

Les altérations associées à ce type de gisements sont les suivantes (cf. Roberts, 1987; Kerrich, 1983; Phillips, 1986) :

- **type Carlin** : silicification et argilisation dominant, ce qui rapproche le type Carlin des gisements épithermaux (cf. section 5.4);
- **carbonatation** : altération qui semble très développée dans la plupart des dépôts. La carbonatation peut entraîner la formation de chlorite et de muscovite (cf. Trépanier, 2011);
- **hydratation** : semble accompagner la formation des dépôts, faciliter le métamorphisme rétrograde (vers le faciès des schistes verts), etc. Les effets de ce type d'altération seront masqués par un métamorphisme de haut grade;
- **sulfurisation** : mécanisme qui peut contrôler la précipitation de l'or, surtout si la roche hôte est une formation de fer ou toute autre unité riche en fer;
- **silicification** : localement très importante, puisque les dépôts de type « or orogénique », par exemple, sont associés à de nombreuses veines de quartz. Accompagnée d'un ajout de S et B parfois (cf. sulfures et tourmaline);
- **Au associés aux « syénites » en Abitibi** (cf. projet 2014-06 ; Mathieu, 2016) : altération Na et/ou K (gains) présentes, sous la forme d'échange de Na-K au sein des feldspaths;
- **albitisation (Na)** : altération proximale aux veines, qui peut caractériser les zones de haute température (Hemley et Jones, 1964; Smith et Kesler, 1985);
- **autres éléments majeurs (Fe, Mg, Ca, etc.)** : altérations très limitées à inexistantes (Pirie, 1981; MacGeehan et Hodgson, 1982; Robert et Brown, 1986; Andrews et al., 1986; Phillips, 1986).

Les gisements d'or associés aux fluides les plus chauds (cf. gisements communément associés à des intrusions magmatiques) présentent des altérations en Na-K proximales. Les autres

éléments majeurs, mis à part le Si (cf. veines de quartz), semblent très peu mobiles. Les principales altérations impliquent des volatiles (C, S, H) et affectent des volumes importants de roche.

Le métamorphisme de haut grade a tendance à dévolatiliser les roches, ce qui peut masquer la plupart des effets que les fluides minéralisateurs ont eus sur les roches hôtes. Il semble donc difficile de prospecter à grande échelle pour la plupart des gisements d'or.

Il est à noter, cependant, que certaines caractéristiques des systèmes hydrothermaux (cf. hydratation en particulier) peuvent favoriser la migmatisation, parfois à proximité des veines minéralisées (cf. gisement de Challenger par exemple; McFarlane et al., 2007). Lorsque les gisements sont encaissés dans des roches felsiques pauvres en minéraux hydratés, les migmatites sont rares et pourraient servir de vecteurs vers les zones minéralisées.

---

## 6 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

---

Ce projet s'intéresse aux dépôts ayant des associations avec les roches de haut grade métamorphique, soit parce qu'ils ont été métamorphisés après leurs formations, soit parce qu'ils se sont formés à des profondeurs et à des températures importantes. Les gisements concernés par ce projet se situent majoritairement dans les terrains de haut grade traditionnellement ignorés par l'exploration, bien que la vision négative de ces territoires soit en train d'évoluer.

Le présent projet a permis de proposer différents diagrammes d'altération, qui permettent de visualiser les paragenèses métamorphiques et d'interpréter le type d'altérations présent dans un ensemble d'échantillons. Ces diagrammes peuvent également être utilisés pour tester des hypothèses du travail : par exemple, si un groupe de roches est jugé felsique, et qu'elles tombent dans le champ des roches mafiques de tous les diagrammes, alors l'interprétation « roches felsiques » devrait être remise en question. Des hypothèses formulées quant au type d'altération peuvent également être validées ou invalidées grâce à ces diagrammes.

Les diagrammes d'altération permettent de faire les observations qui sont nécessaires aux calculs des indices d'altération par la méthode « HautGrade ». Ces indices prennent en compte la position des roches sur les diagrammes d'altération ainsi que les proportions d'un ou plusieurs minéraux marqueurs de l'altération.

Leurs calculs pour différentes roches altérées, et leurs comparaisons systématiques aux indices de la norme « BasGrade » et, lorsque cela est possible, aux bilans de masse par modélisation des précurseurs, a permis de réfléchir sur la pertinence des différentes méthodes de calcul de l'altération et d'identifier les principaux minéraux marqueurs de l'altération dans les roches de haut grade métamorphique.

En ce qui concerne la pertinence des différentes méthodes de quantification, les résultats de cette étude sont résumés par le **tableau 19**. Les bilans de masse par modélisation des précurseurs représentent la méthode la plus fiable lorsque les roches sont d'origine magmatique et qu'elles ont été altérées en Fe, Mg, Ca et/ou Si. Cette méthode ne peut pas être appliquée aux roches d'origine sédimentaire. Aussi, certains des éléments traces utilisés par le calcul des bilans de masses (cf. Th, Ti) pourraient être mobiles à haut grade (Keppler, 1996; Johnson et Plank, 2000; Touret et Huizenga, 1999), bien que ce type de mobilité demande encore à être documentée en détail et quantifiée.

En ce qui concerne les altérations en Na-K, les bilans de masse semblent moins fiables, et sont surtout conditionnés pour détecter des ajouts en Na-K. La « séricitisation » comprend aussi des composantes d'hydratation et de lessivage que les bilans de masse ne voient pas, mais auxquelles les normes sont sensibles.

Le lessivage et la carbonatation ne sont accessibles qu'à partir des minéraux normatifs. Quant à l'hydratation, les normes sont calculées avec H<sub>2</sub>O en excès et ne sont donc pas adaptées à l'identification de ce type d'altération. De toute façon, le métamorphisme peut s'accompagner d'une dévolatilisation, qui fera perdre des informations sur les processus d'hydratation et de carbonatation.

En ce qui concerne la méthode des bilans de masse par précurseurs uniques (Grant, 1986), elle n'a pas pu être appliquée pendant ce projet. Cette méthode reste la plus fiable et la plus précise lorsque l'unité altérée est suffisamment homogène pour pouvoir être représentée par un seul précurseur. Dans les faits, l'hypothèse de départ peu rarement être vérifiée et la méthode de Grant (1986) est ainsi très rarement applicable.

Enfin, la minéralogie des roches altérées est décrite à la section 2.8 et résumée ci-dessous. Les roches altérées par un fluide hydrothermal puis métamorphisées à haut grade contiennent les minéraux suivant :

- altération Mg > Fe : **cordiérite** principalement, accompagnée de biotite (protolithe felsique) ou d'anthophyllite (protolithe mafique);
- altération Fe > Mg : **grenat-cordiérite**, ou oxydes de fer seuls dans les cas extrêmes, accompagnés de biotite (protolithe felsique) ou d'anthophyllite (protolithe mafique);
- altération K-Na (acide) : **muscovite-paragonite**, ou **feldspaths alcalin ET aluminosilicates** si les micas blancs ne sont pas stables;
- altération K-Na (gain/perte) : **feldspaths alcalins**;
- **aluminosilicates** : peuvent être présents en quantités variables dans les roches altérées en Na, K, Fe et/ou Mg, et dénotés un lessivage important non entièrement compensé par l'apport de Fe-Mg par exemple;
- altération Ca : **grossulaire**, ou anorthite/lawsonite/clinozoisite si le grossulaire n'est pas stable, et **wollastonite**. Les amphiboles et clinopyroxènes sont, quant à eux, plutôt des marqueurs du caractère mafique du protolithe;
- altération Si : **quartz**. La diminution de la quantité de quartz peut se corrélérer à l'ajout de Na, K, Fe, Mg et/ou Ca à une roche;
- altération CO<sub>2</sub> : **carbonates**, ou **graphite** et silicates Fe-Mg-Ca lorsque les carbonates ne sont pas stables.

Tableau 21 : Techniques recommandées pour quantifier les différents types d'altérations. ###

Altérations	Bilans de masse (Trépanier, 2008; 2012)	Indices (méthodes « HautGrade » et « BasGrade »)
Fe, Mg	Oui, plus précis	Oui, moins précis
Na, K (acide)	Non	Oui
Na, K (gain/perte)	Oui, plus précis (attention aux roches alcalines)	Oui, mais plus difficile à interpréter
Ca	Oui, plus précis	Oui, moins précis
Si	Oui, plus précis	Oui, moins précis
Al	Non	Oui
CO <sub>2</sub>	Non	Oui



---

## RÉFÉRENCES

---

Andrews AJ, Hugon H., Durocher M, Corfu F, Lavigne M J (1986) The anatomy of a gold-bearing greenstone belt: Red Lake, northwestern Ontario, Canada. In *Gold* 86:3-22

Barrett TJ, MacLean WH, Årebäck H (2005) The Palaeoproterozoic Kristineberg VMS deposit, Skellefte district, northern Sweden. Part II: chemostratigraphy and alteration. *Mineralium Deposita* 40(4):368-395

Bastrakov EN, Skirrow RG, Davidson GJ (2007) Fluid Evolution and Origins of Iron Oxide Cu-Au Prospects in the Olympic Dam District, Gawler Craton, South Australia. *Economic Geology*, 102:1415-1440

Bernier L (1986) Géologie, minéralogie et pétrographie de la zone aurifère nord du gisement métamorphisé de Zn-Pb-An-Ag-Cu de Montauban-les-Mines, Québec. Thèse de maîtrise inédite, Université de Montréal, p. 283

Blevin PL (2002) The petrographic and compositional character of variably K-enriched magmatic suites associated with Ordovician porphyry Cu–Au mineralisation in the Lachlan Fold Belt, Australia. *Mineralium Deposita*, 37(1): 87-99

Bernier LR, MacLean WH (1993) Lithogeochemistry of a metamorphosed VMS alteration zone at Montauban, Grenville Province, Quebec. *Exploration and Mining Geology*, 2:367-386

Bigot L (2012) Gold mineralizations at the syenite-hosted Beattie gold deposit at Duparquet, neoproterozoic Abitibi belt, Québec, Canada. Thèse de Maitrise, Université du Québec à Montréal, p. 146

Bourdeau (2013) Petrology, Mineralogy and Geochemistry of the Beattie Syenite and Country Rocks, Abitibi Greenstone Belt, Québec. Thèse de Maitrise, Université d'Ottawa, p.445

Callegari E, Pertsev N (2007) A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 10. Contact metamorphic rocks. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks. SCMR website ([www.bgs.ac.uk/SCMRH](http://www.bgs.ac.uk/SCMRH))

Cameron EM, Hattori K (1985) The Hemlo gold deposit, Ontario: A geochemical and isotopic study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49(10):2041-2050

Clark T, Gobeil A, David J (2005) Iron oxide - copper - gold-type and related deposits in the Manitou Lake area, eastern Grenville Province, Quebec: variations in setting, composition, and style. *Revue canadienne des sciences de la Terre* 42(10):1829-1847 DOI:10.1139/e05-048

Corriveau L, Williams PJ, Mumin AH (2010a) Alteration vectors to IOCG mineralization from uncharted terranes to deposits. Exploring for iron oxide copper–gold deposits: Canada and global analogues. Edited by L. Corriveau and AH Mumin. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 20:89-110

Corriveau L, Mumin AH, Setterfield T (2010b) IOCG environments in Canada: characteristics, geological vectors to ore and challenges. Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective, 3:311-343

- Cox DP, Singer DA (1986) Mineral deposit models (Vol. 1693) US Government Printing Office
- De La Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, Marchal M (1980) A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2-diagram and major-element analyses—Its relationships with current nomenclature. *Chemical geology*, 29(1), 183-210.
- Dupré F (2010) Study of the veins, alterations and mineralization of the Comtois gold deposit, Abitibi subprovince, Quebec, Canada. Thèse de Maitrise, Université du Québec à Montréal
- Franklin, Schieders, Koopman (1991) Mineral deposits in the western Superior Province, Ontario, Open File 2164
- Franklin JM, Gibson HL, Jonasson IR, Galley AG (2005) Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 98:523-560
- Frith RA (1987) Precambrian geology of the Hackett River area, District of Mackenzie, N.W.T. *Geological Survey of Canada Memoir 417*, p.61
- Frith RA, Percival JA (1978) Stratigraphy of the Yellowknife Supergroup in the Mara-Back rivers area, District of Mackenzie. *Current Research, Part C, Geological Survey of Canada, Paper*, 89-98.
- Galley AG, Hannington MD, Jonasson IR (2007) Volcanogenic massive sulphide deposits. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 5:141-161
- Galley AG, Jonasson IR, Watkinson DH (2000) Magnetite-rich calc-silicate alteration in relation to synvolcanic intrusion at the Ansil volcanogenic massive sulfide deposit, Rouyn–Noranda, Quebec, Canada. *Mineralium deposita* 35(7):619-637
- Genna D, Gaboury D, Moore L, Mueller WU (2011) Magnetite-rich calc-silicate alteration in relation to synvolcanic intrusion at the Ansil volcanogenic massive sulfide deposit, Rouyn–Noranda, Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*. 108(2):131-142
- GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>)
- Grant JA (1986) The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81(8):1976-1982
- Grant HLJ (2009) The distribution and controls on silver mineralization in the Main Zone of the 2.68 Ga Archean Hackett River Zn-Pb-Cu-Ag volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Nunavut, Canada. *Université Queen, Kingston, Ontario, Thèse de MSc*, p. 205
- Groves DI, Bierlein FP, Meinert LD, Hitzman MW (2010) Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3):641-654
- Gu L, Zheng Y, Tang X, Zaw K, Della-Pasque F, Wu C, Tian Z, Lu J, Ni, P, Li X, Yang F, Wang X (2007) Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, N.E. China. *Ore geology reviews* 30(1):1-29

Hannington MD, Kjarsgaard IM, Galley AG, Taylor B (2003) Mineral-chemical studies of metamorphosed hydrothermal alteration in the Kristineberg volcanogenic massive sulfide district, Sweden *Mineralium Deposita* 38(4):423-442

Heiligmann M, Williams-Jones AE, Clark JR (2008) The Role of Sulfate-Sulfide-Oxide-Silicate Equilibria in the Metamorphism of Hydrothermal Alteration at the Hemlo Gold Deposit, Ontario. *Economic Geology* 103(2):335-351

Hedenquist JW, Lowenstern JB (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490):519-527

Hemley JJ, Jones WR (1964) Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism. *Economic Geology*, 59(4):538-569

Hitzman MC (2000) Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why? Dans: Porter, T.M., ed., *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*: PGC Publishing, Adelaide, 1:9-25

Hitzman MW, Oreskes N, Einaudi MT (1992) Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. *Precambrian Research*, 58:241-287

IUSGS-SCMR (2007) IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks (SCMR), site internet, <https://www.bgs.ac.uk/scmr/home.html>

Jébrak M, Doucet P (2002) Geology and gold-molybdenum porphyry mineralisation of the Archean Taschereau-Launay plutons, Abitibi, Quebec. *Precambrian Research*, 115(1):329-348

Jensen EP, Barton MD (2000) Gold deposits related to alkaline magmatism. Dans: Hagemann, S.G. et Brown, P.E., eds., *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, volume 13, Society of Economic Geologist, p. 279-314

Johnson MC, Plank T (2000) Dehydration and melting experiments constrain the fate of subducted sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1(12).

Keppler H (1996) Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*, 380:237-240.

Kerrick R (1983) *Geochemistry of gold deposits in the Abitibi greenstone belt (Vol. 27)*. Canadian Institute of Mining and Metallurgy

Kuhns R, Sawkins FJ, Ito E (1991) Magmatism, Metamorphism and Deformation at Hemlo, Ontario, and the Timing of Au-Mo Mineralization in the Golden Giant Mine. *Economic Geology* 89:720-756

Lafrance (2009) Signature lithogéochimique des altérations à épidote-quartz semi-concordantes associées aux SMV ; projet Consorem 2009-03

Large RR, Gemmell JB, Paulick H, Huston DL (2001) The Alteration Box Plot: A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Lithogeochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology* 96(5):957-971

Liaghat S, MacLean H (1995) Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstones and younger volcanic rocks. *Journal of Geochemical Exploration* 52(3):333-350

Longuépée et Trépanier (2009) Reconnaissance géochimique des protolithes dans les domaines de haut grade métamorphique ; projet Consorem 2009-09

MacGeehan PJ, Hodgson CJ (1982) A review of the geological characteristics of “gold only” deposits in the Superior Province of the Canadian Shield. In *Geology of Canadian Gold Deposits*, 24:211-228)

MacLean WH, Hoy LD (1991) Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne Mine, Noranda, Quebec. *Economic Geology* 86(3):506-528

Magrina B, Jébrak M, Cuney M (2005) Le magmatisme de la région de Kwyjibo, Province de Grenville, Canada: intérêt pour les minéralisations de type fer-oxydes associées. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42: this issue

Martin RD (2012) Syenite-hosted gold mineralization and hydrothermal alteration at the Young-Davidson deposit, Matachewan, Ontario. Thèse de Maîtrise, Université de Waterloo, p. 188

Mathieu (2013) Opportunité pour les sulfures massifs volcanogènes riches en Ag ; projet Consorem 2012-08

Mathieu (2014) Caractéristiques minéralogiques et chimiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase I ; projet Consorem 2013-04

Mathieu (2016) Plutonisme et minéralisation en Abitibi ; projet Conorem 2013-06

Mathieu L, Trépanier S, Daigneault R (2016) CONSONORM\_HG: a new method of norm calculation for mid-to high-grade metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(1):1-15

McFarlane CRM, Mavrogenes JA, Tomkins AG (2007) Recognizing hydrothermal alteration through a granulite facies metamorphic overprint at the challenger Au deposit, South Australia. *Chemical Geology* 243:64-89

McMillan WJ, Panteleyev A (1987) Porphyry copper deposits. In: Roberts, R.G., Sheahan, P.A., (Eds.), *Ore Deposits Models*. Geoscience Canada Reprint Series 3, pp. 45–58

Monteiro LVS, Xavier RP, de Carvalho ER, Hitzman MW, Johnson CA, de Souza Filho CR, Torresi I (2008) Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas Mineral Province, Brasil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, 43:129-159

Mosier DLB, Singer VI, Donald A (2009) Volcanogenic massive sulfide deposits of the world: Database and grade and tonnage models.

Nabil (2005) Zonalité et typologie de la carbonatation pour les minéralisations Au-MB – phase 1; projet Consorem 2005-04

Nabil (2006) Zonalité et typologie de la carbonatation pour les minéralisations Au-MB - phase 2 ; projet Consorem 2006-04

Osterberg SA (1993) Stratigraphy, Physical Volcanology and Hydrothermal Alteration of the Footwall Rocks to the Winston Lake Massive Sulfide Deposit, Northwestern Ontario. Thèse de doctorat, Université du Minnesota

Piché M, Jébrak M (2004) Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 82(1):59-77

Phillips GN (1986) Geology and alteration in the Golden Mile, Kalgoolie. *Economic Geology*, 81:779-808

Pirie J (1981) Regional geological setting of gold deposits in the Red Lake area, northwestern Ontario. *Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper*, 97:71-93

Prabhu MK, Webber GR (1984) Origin of quartzofeldspathic gneisses at Montauban-les-Mines, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences* 21:336-345 DOI : 10.1139/e84-035

Prokin VA, Buslaev FP (1999) Massive copper–zinc sulphide deposits in the Urals. *Ore Geology Reviews* 14:1–69

Relvas JMRS, Barriga FJAS, Ferreira A (2006) Hydrothermal Alteration and Mineralization in the Neves-Corvo Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposit, Portugal. I. Geology, Mineralogy, and Geochemistry. *Economic Geology* 101(4):753-790

Robert F, Brown AC (1986) Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine, Abitibi greenstone belt, Quebec; Part I, Geologic relations and formation of the vein system. *Economic Geology*, 81(3):578-592

Roberts RG (1987) Ore deposit models# 11. Archean lode gold deposits. *Geoscience Canada*, 14(1)

Roberts RG, Sheahan PA (1988) Ore deposit models. *Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series* 3. p. 194

Santaguida F (1999) The paragenetic relationships of epidote–quartz hydrothermal alteration within the Noranda volcanic complex, Quebec. Thèse de doctorat, Carleton University, Ottawa

Schandl ES, Gorton MP (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in vms environments. *Economic geology* 97:629-642

SedDB (<http://www.earthchem.org/seddb/>)

Seedorff E, Dilles JH, Proffett JM, Einaudi MT, Zurcher L, Stavast WJA, Johnson DA, Barton MD (2005) Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. Dans: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP, eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists*, pp. 371-405

SIGEOM (2014) SIGÉOM (ressource électronique), système d'information géominère à référence spatiale. Regroupement des données géoscientifiques aux échelles 1:20 000 et 1:50 000, Ministère des Ressources naturelles et de la faune Québec, Géologie Québec. (<http://sigeom.mrn.gouv.qc.ca/>)

Sillitoe RH (2003) Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38:787-812

Singer DA (2008) Mineral deposit densities for estimating mineral resources. *Mathematical geosciences*, 40(1):33-46

Smith TJ, Kesler SE (1985) Relation of fluid inclusion geochemistry wallrock alteration and lithogeochemical zonation at the Hollinger-McIntyre gold deposit, Timmins, Ontario, Canada *Canadian Mining Metallogeny Bulletin*, 78:35-46

Strong DF (1981) Ore deposit models-5. A model for granophile mineral deposits. *Geoscience Canada*, 8(4)

Thompson A.J.B, Thompson. J.F.H. (2012) Atlas of Alteration, A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, p. 128

Tiwary A, Deb M (1997) Geochemistry of hydrothermal alteration at the Deri massive sulphide deposit, Sirohi district, Rajasthan, NW India. *Journal of geochemical exploration* 59(2):99-121

Tomkins AG, Mavrogenes JA (2002) Mobilization of Gold as a Polymetallic Melt during Pelite Anatexis at the Challenger Deposit, South Australia: A Metamorphosed Archean Gold Deposit. *Economic geology* 97(6):1249-1271

Touret JL, Huizenga JM (1999) Precambrian intraplate magmatism: high temperature, low pressure crustal granulites. *Journal of African Earth Sciences*, 28(2):367-382.

Trépanier (2008) Outils d'assistance pour le traitement géochimique de l'altération ; projet Consorem 2008-07

Trépanier (2011) Logiciel de traitement des données lithogéochimiques - Phase 3 ; projet Consorem 2011-04

Trépanier (2012) Bilans de masse par modélisation des précurseurs pour les roches alcalines ; projet Consorem 2012-05

Trépanier S, Mathieu L, Daigneault R (2015) CONSONORM\_LG: new normative minerals and alteration indexes for low-grade metamorphic rocks. *Economic Geology*, 110(8):2127-2138

USGS Alaska (<http://alaska.usgs.gov/>)

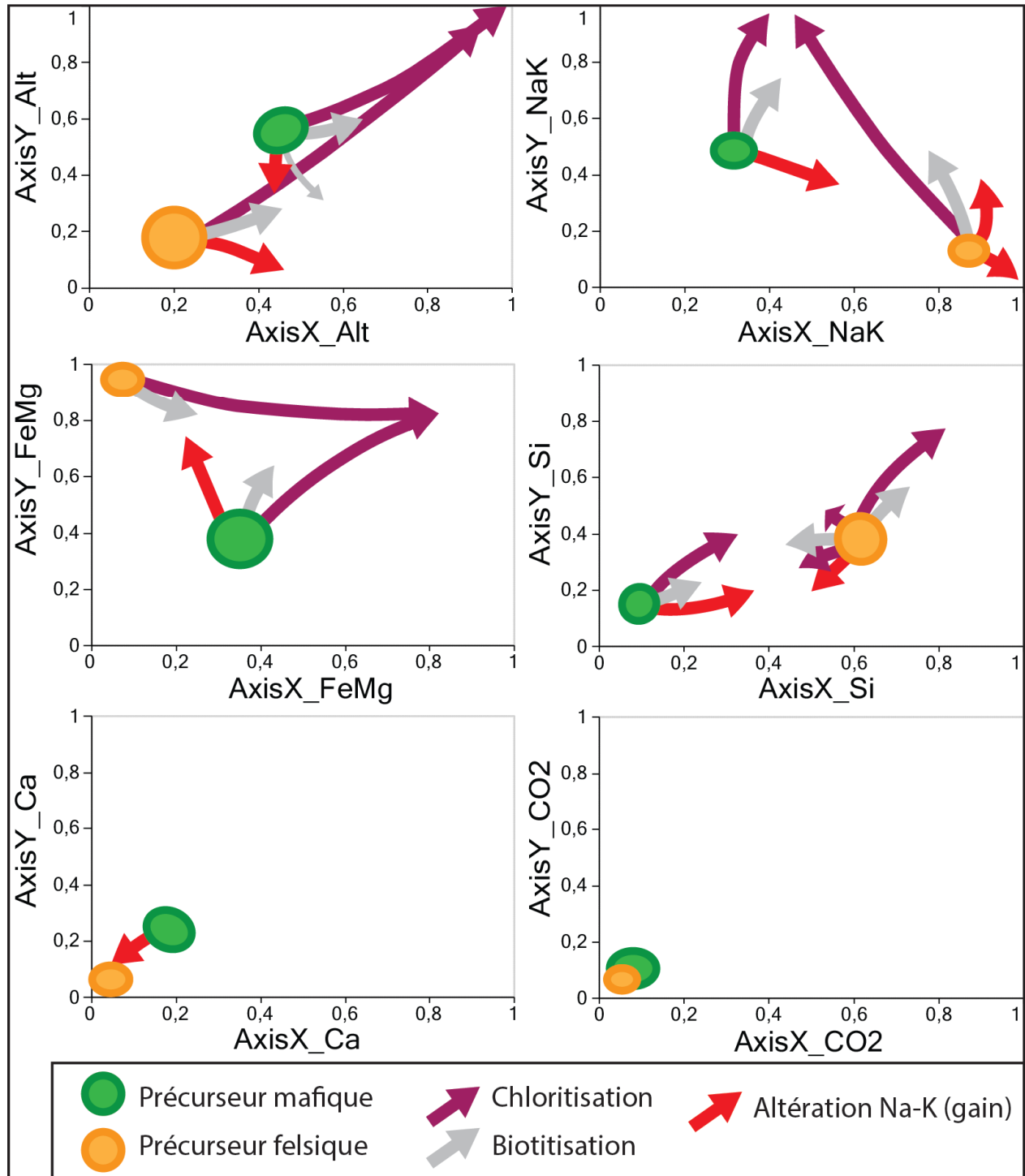
Warren RG (1983) Metamorphic and tectonic evolution of granulites, Arunta Block, central Australia. *Nature* 305:300-303

Warren RG, Shaw RD (1985) Volcanogenic Cu-Pb-Zn bodies in granulites of the central Arunta Block, central Australia. *Journal of metamorphic geology* 3:481-499

Williams PJ, Barton MD, Johnson DA, Fontboté L, DeHaller A, Mark G, Oliver NHS, Marschik R (2005) Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible mode of origin. Dans: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP, eds., Economic Geology 100th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists, pp. 371-405

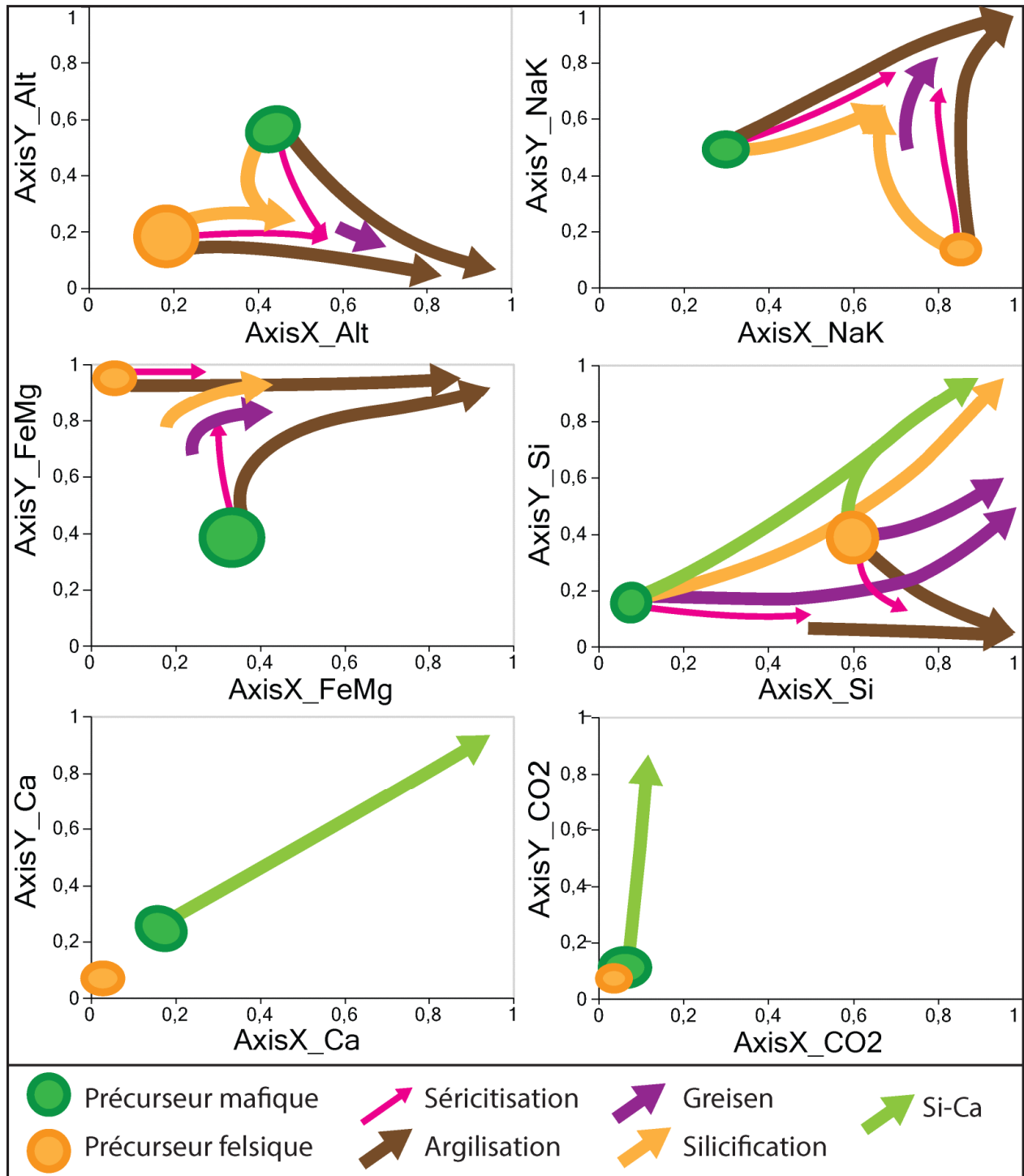
Zheng YC, Gu L, Tang X, Wu C, Li C, Liu S (2011) Geology and Geochemistry of Highly Metamorphosed Footwall Alteration Zones in the Hongtoushan Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Liaoning Province, China. Resource geology 61(2):113-139

**ANNEXE A**

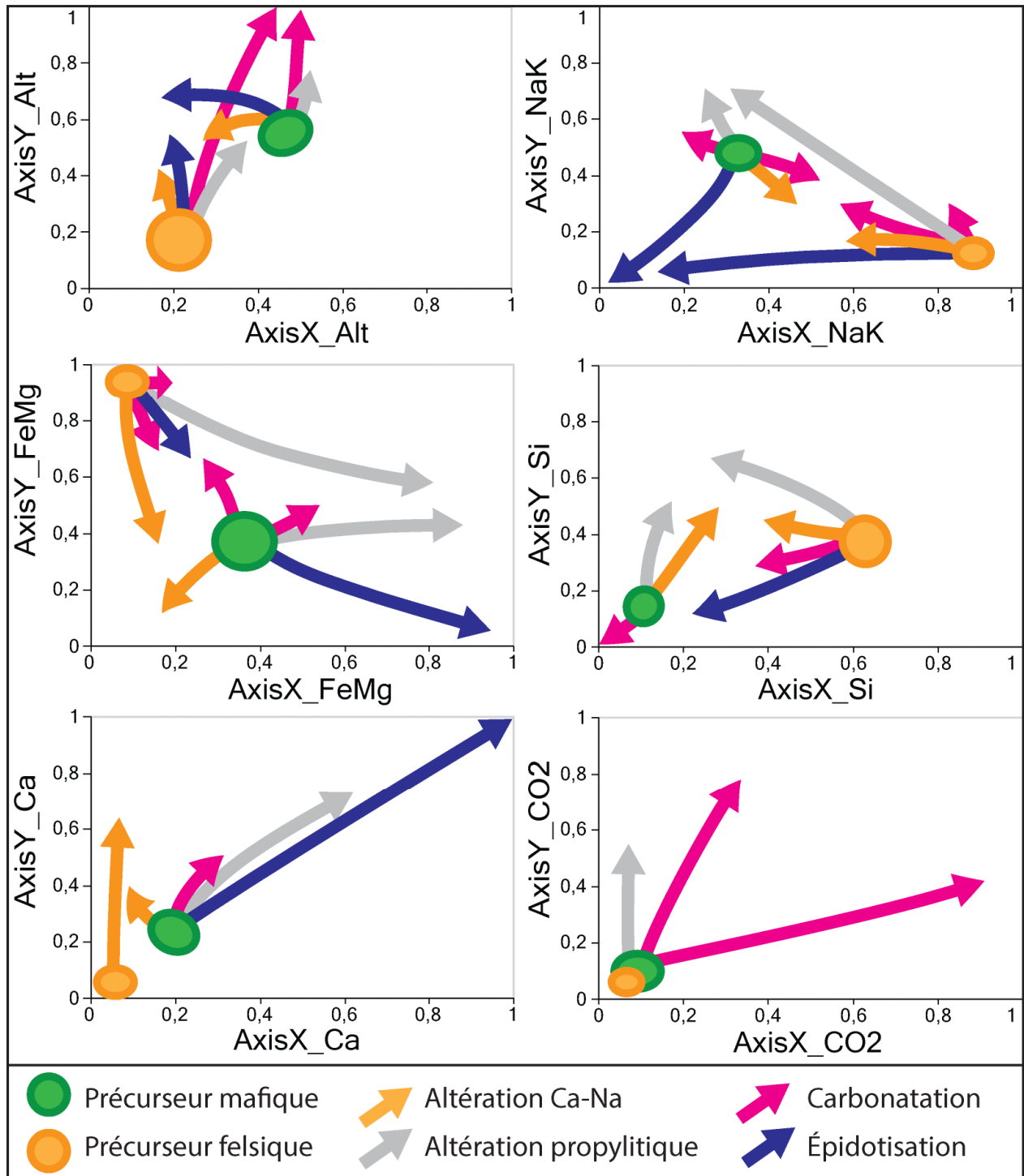


**Figure A-1 :** Représentation schématique de divers types d'altération (chloritisation, biotitisation, altération Na-K) sur les six diagrammes d'altération.

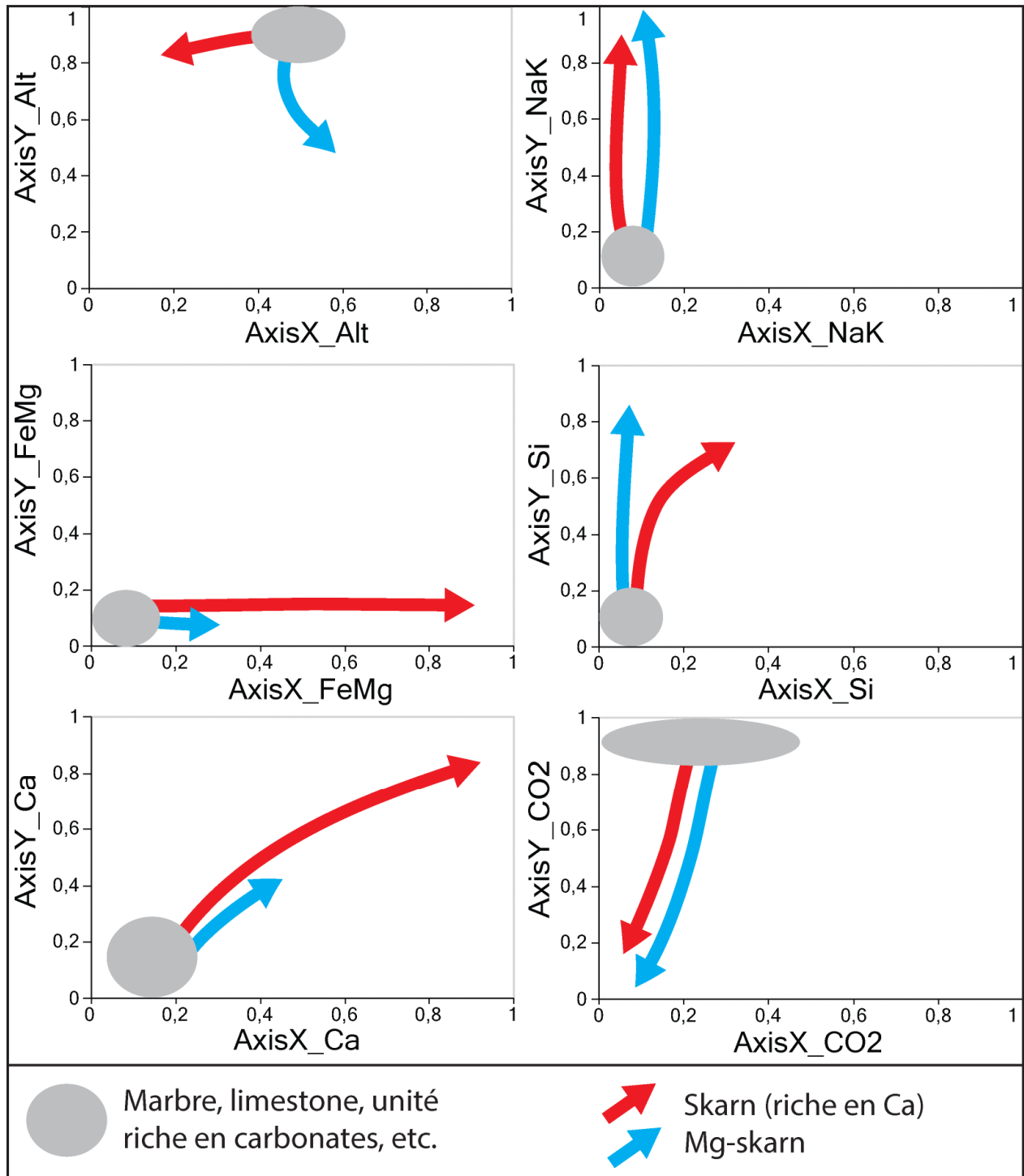




**Figure A-2 :** Représentation schématique de divers types d'altérations acides sur les six diagrammes d'altération.

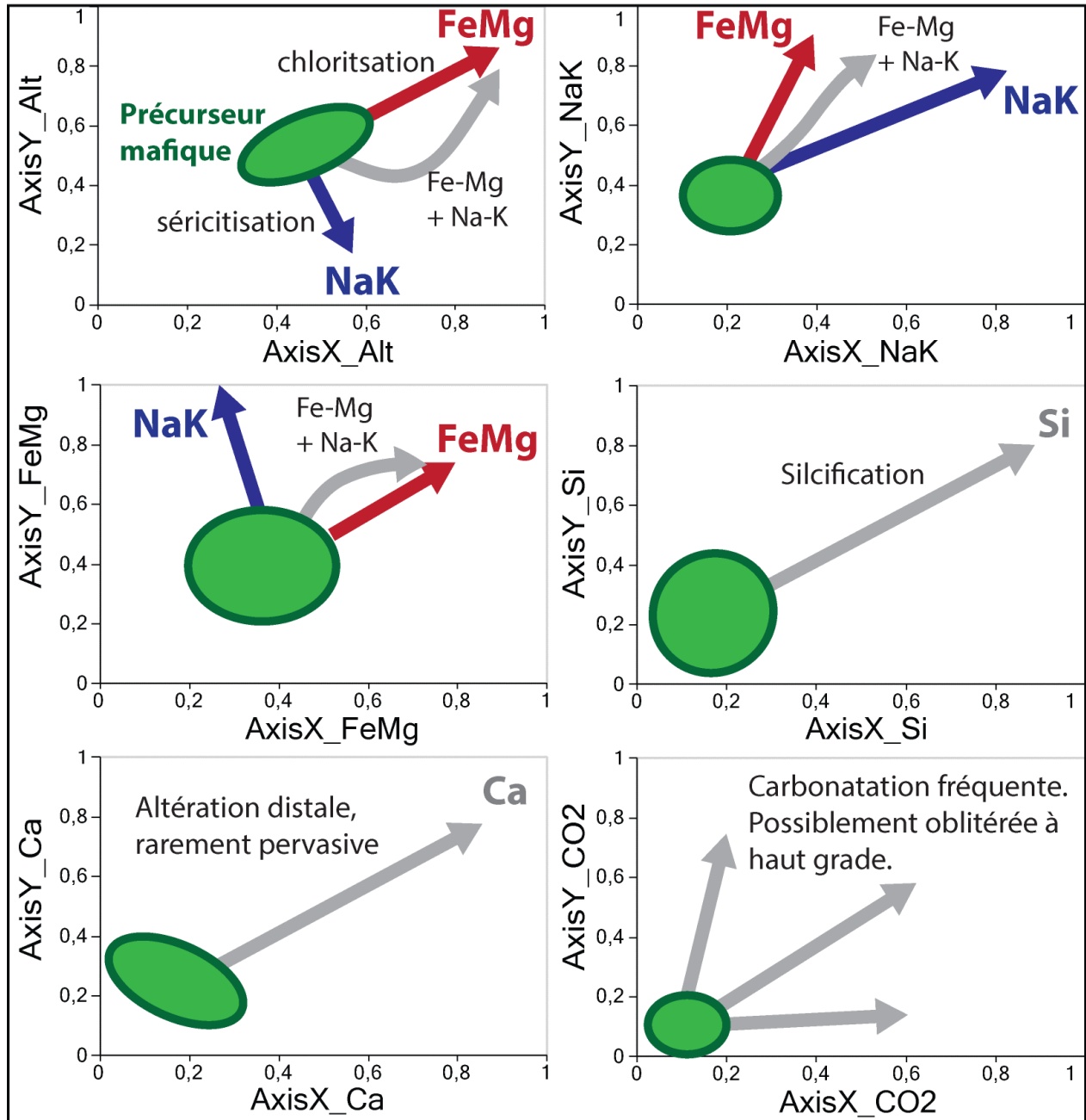


**Figure A-3 :** Représentation schématique de divers types d'altérations (altérations Na-Ca et propylitique, épidotisation, carbonatation) sur les six diagrammes d'altération.

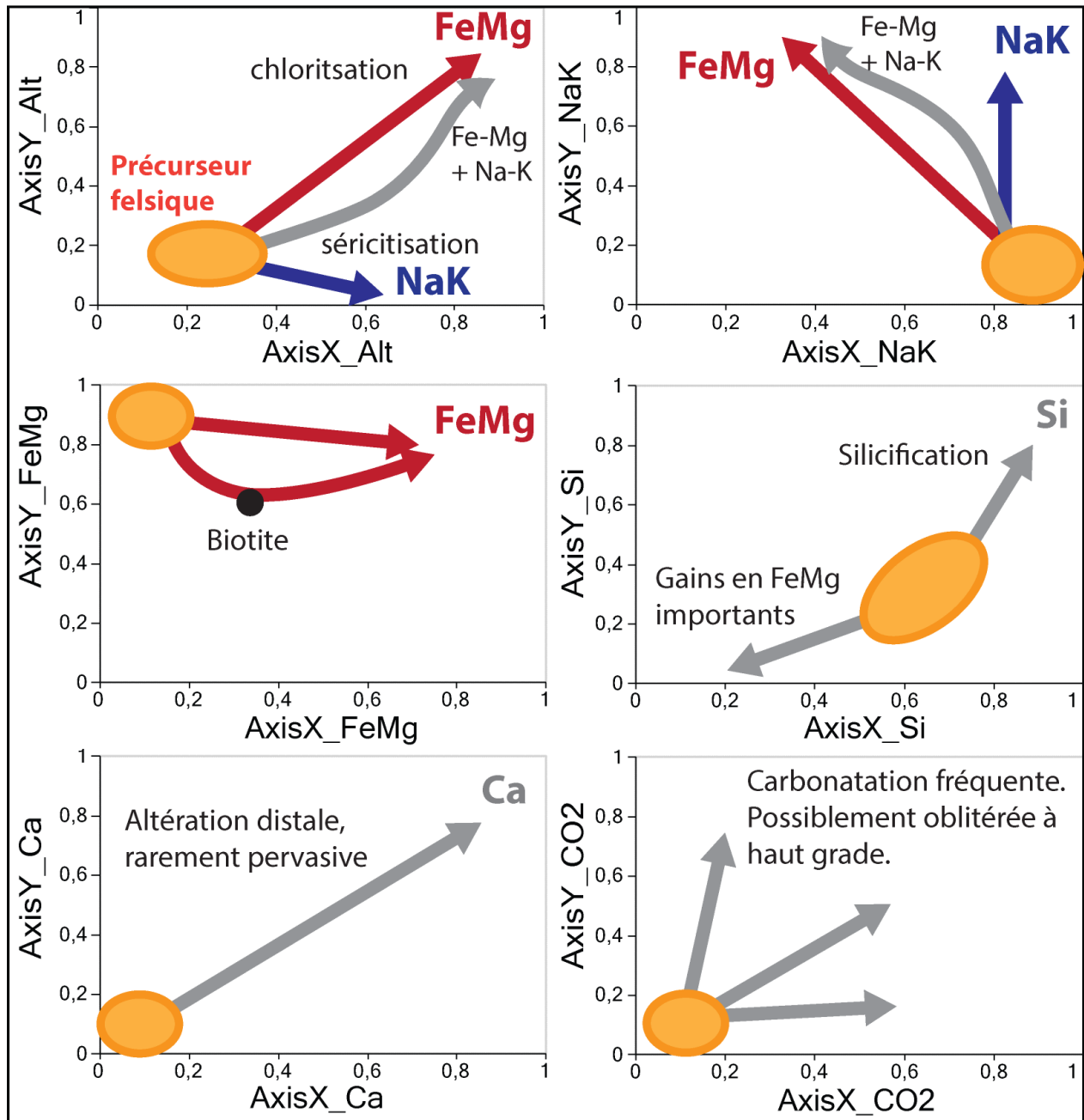


**Figure A-4:** Représentation schématique d'altérations de type skarn sur les six diagrammes d'altération.

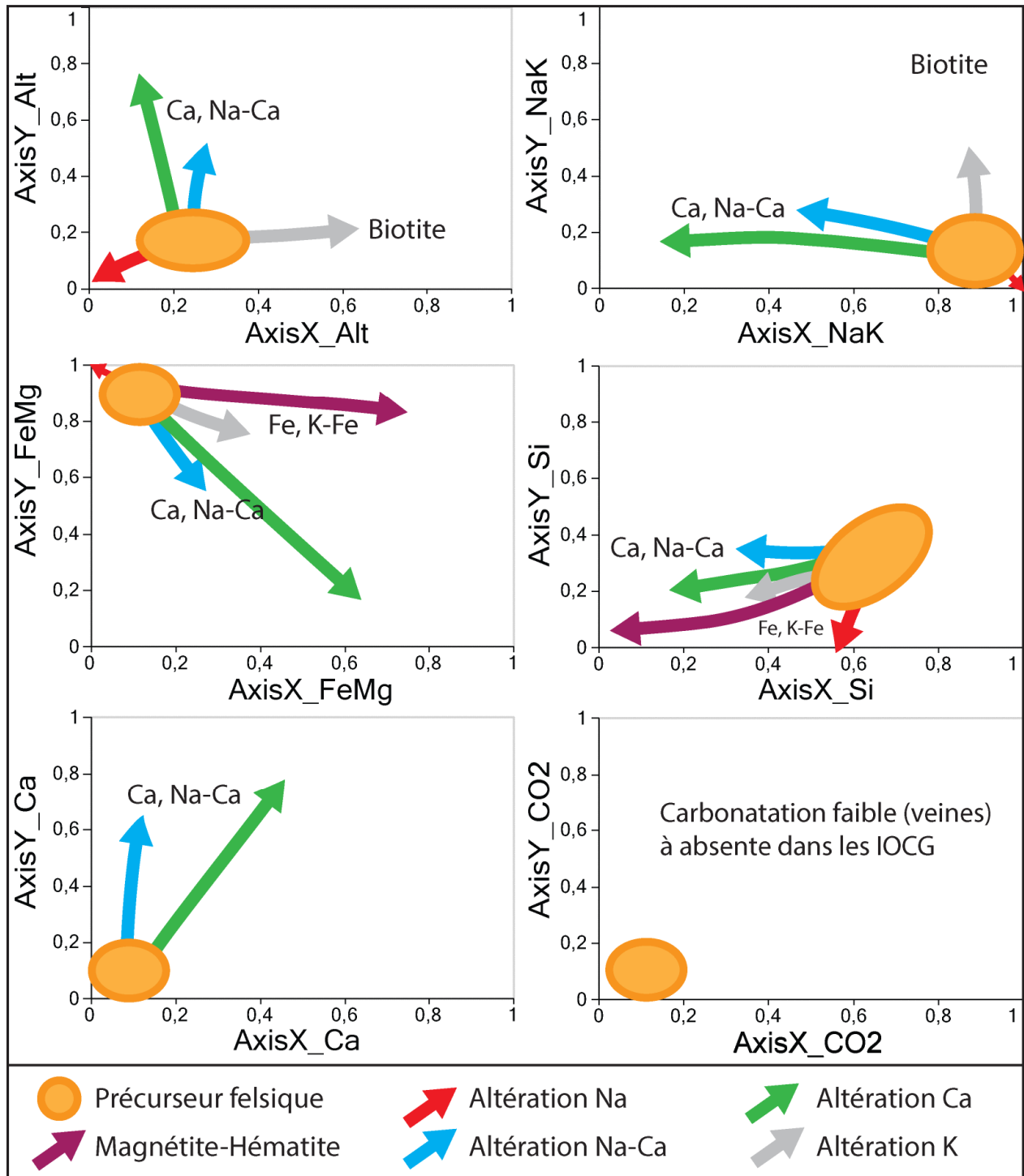
**ANNEXE B**



**Figure B-1 :** Représentation schématique des altérations associées aux systèmes VMS sur les six diagrammes d'altération (précurseurs mafiques).

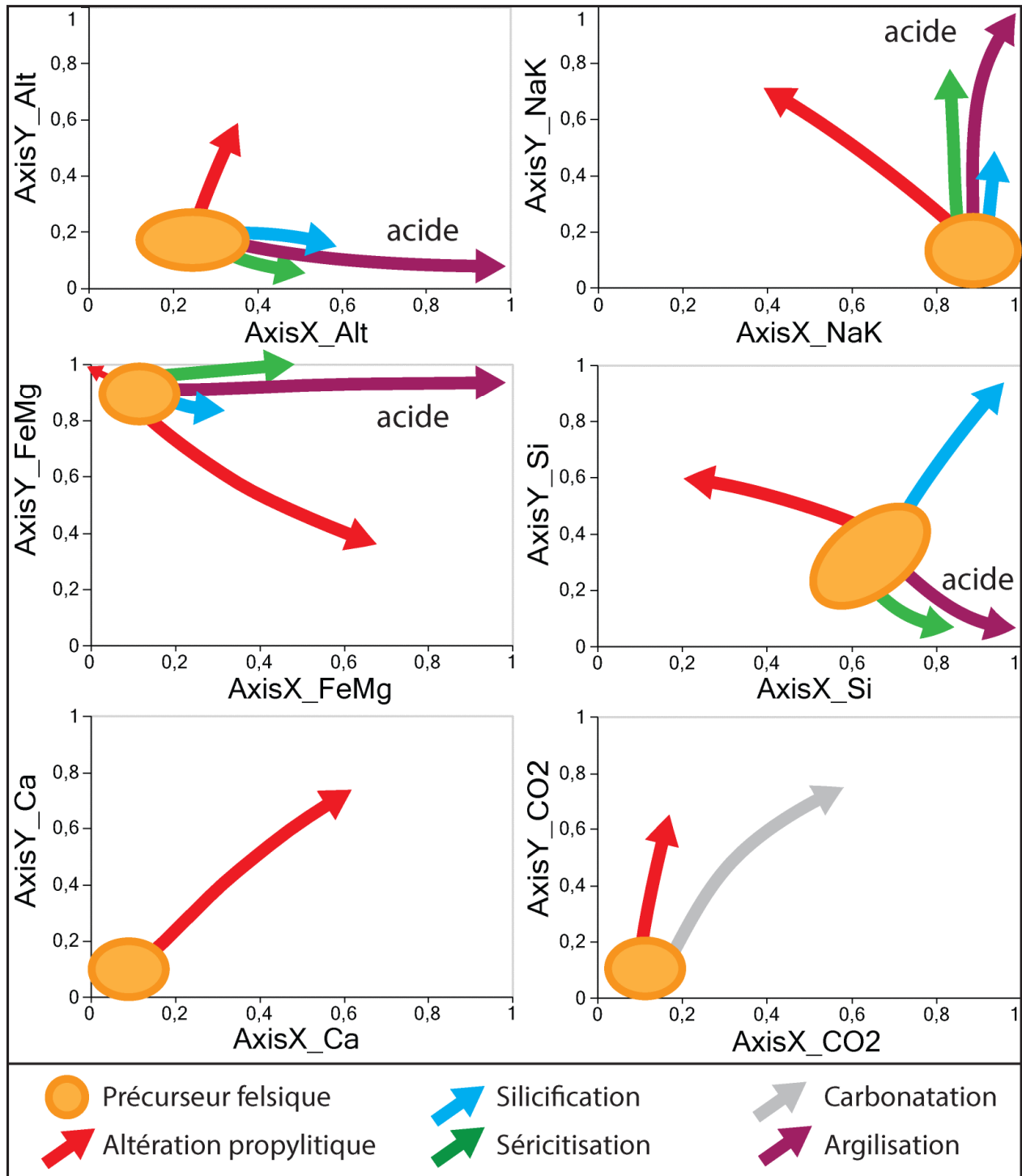


**Figure B-2 :** Représentation schématique des altérations associées aux systèmes VMS sur les six diagrammes d'altération (précurseurs felsiques).



**Figure B-3 :** Représentation schématique des altérations associées aux IOCG sur les six diagrammes d'altération (précurseurs felsiques).





**Figure B-5 :** Représentation schématique des altérations associées aux épithermaux sur les six diagrammes d'altération (précurseurs felsiques).