
Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme

PROJET 2008-07

PAR : SYLVAIN TREPANIER

MAI 2011



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

AVERTISSEMENT

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

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

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

*Trépanier, S. 2011. Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. **Projet CONSOREM 2008-07**, 209 p.*

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

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

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

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT	I
TABLE DES MATIÈRES.....	II
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
1. INTRODUCTION	1
1.1 Distinction entre altération et métasomatisme	1
1.2 Considérations de base pour le traitement de l'altération et du métasomatisme	3
1.2.1 Recalcul à 100 %	3
1.2.2 Recalcul « anhydre » (sans volatils)	3
1.2.3 Combinaison du recalcul « anhydre » et à 100 %	4
1.2.4 Analyse du fer et recalculs $Fe_2O_3 - FeO$	4
1.2.5 Analyse des éléments volatils et leur signification	6
2 METHODOLOGIE.....	7
2.1 Banques de données de référence	7
2.1.1 Banque de données de roches fraîches	8
2.1.2 Banque de données de roches altérées/métasomatisées.....	15
2.2 Typologie des méthodes de traitement étudiées.....	16
3 RATIOS D'ÉLÉMENTS SIMPLES (INDICES UNAIRES)	17
3.1 Dépendance des ratios d'éléments simples aux lithologies et détermination des seuils.	17
3.2 Ratios d'éléments simples et diagrammes binaires correspondants	18
3.3 Nouveaux ratios unaires peu dépendants des lithologies.....	19
3.4 Ratios d'éléments simples, processus et résultat du métasomatisme et de l'altération ..	21
3.4.1 Métasomatisme.....	21
3.4.2 Altération.....	24
3.5 Conclusions sur l'utilité des ratios simples (indices unaires)	24
4 DIAGRAMMES BINAIRES GEOCHIMIQUES.....	25
4.1 Nouveaux diagrammes binaires géochimiques.....	25
4.2 Diagrammes binaires, processus et résultat du métasomatisme et de l'altération	26
4.2.1 Exemple du diagramme K_2O vs K_2O+Na_2O	26
4.2.2 Diagramme Alkali-Alumine	27
4.3 Signification du champ des roches fraîches vs champs des roches métasomatisées	28
4.4 Utilité des diagrammes binaires	29
5 METHODES DES BILANS DE MASSE	30
5.1 Principaux fondamentaux des méthodes de bilans de masse.....	31
5.1.1 Variables inconnues dans les expressions des bilans de masse.....	32

5.1.2	Étapes nécessaires à la réalisation des bilans de masse	32
5.1.3	Détermination des éléments immobiles durant le métasomatisme	32
5.1.4	Détermination d'un précurseur	33
5.2	Méthode Isocon	33
5.3	Modélisation des précurseurs uniques et multiples par analyse d'éléments immobiles- mobiles	35
5.3.1	Bilan de masse à précurseur unique	35
5.3.2	Bilan de masse à précurseurs multiples	37
5.4	Méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux	40
5.4.1	Choix de la banque de référence de roches peu métasomatisées	41
5.4.2	Méthode de traitement par réseaux neuronaux	42
5.4.3	Validation empirique de la méthode	44
5.4.4	Exemple d'application à l'échelle locale, pour précurseur unique : Phelps Dodge.	45
5.4.5	Exemple d'application à l'échelle locale, pour des précurseurs multiples : Caber Nord.	48
5.4.6	Exemple d'application à l'échelle locale : mine Red Lake	52
5.4.7	Avantages et inconvénients de la méthode de modélisation des précurseurs	54
5.5	Ratios d'éléments de Pearce	54
5.5.1	Principe de base des ratios d'éléments de Pearce	55
5.5.2	Choix des dénominateurs des ratios	57
5.5.3	Choix des numérateurs des ratios	57
5.5.4	Ratios d'éléments de Pearce appliqués au métasomatisme	58
5.5.5	Avantages et inconvénients de la méthode des ratios d'éléments de Pearce appliqué au métasomatisme	58
6	METHODES DE MINERAUX NORMATIFS	59
6.1	NORMAT (version préliminaire)	59
6.1.1	Séparation des analyses selon les caractéristiques analytiques pour le traitement	60
6.1.2	Calcul des minéraux hydrothermaux alumineux et des indices associés ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS	60
6.1.3	Analyse du fer et les minéraux normatifs ferrifères	66
6.1.4	Calcul du CO ₂ normatif, de la perte au feu analytique, de et de l'indice IPAF	67
6.1.5	Avantages et inconvénients de NORMAT	68
6.2	Combinaison de NORMAT et de la méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux	69
7	CONCLUSIONS	70
	BIBLIOGRAPHIE	72

ANNEXE 1 - FICHES DETAILLEES DE COMPILATION DES RATIOS GEOCHIMIQUES SIMPLES (INDICES UNAIRES).....	75
FICHE 1A - Saturation en Muscovite+albite	75
FICHE 1B - Saturation en albite	80
FICHE 1C – Saturation en muscovite.....	84
FICHE 1D – MnO/CaO	89
FICHE 1E – Spitz-Darling	94
FICHE 1F – Sericite Index	99
FICHE 1G – Chlorite Index	108
FICHE 1H – Alkali Index	116
FICHE 1I – Hashimoto Index	121
FICHE 1J – Hashigushi Index.....	126
FICHE 1K – Modified Hashimoto.....	130
FICHE 1L – CCPI (Chlorite-Carbonate-Pyrite) Index	137
ANNEXE 2 – DIAGRAMMES BINAIRES	143
FICHE 2A – Diagrammes de Hugues.....	143
FICHE 2B – Alkali-Aluminium	146
FICHE 2C – MgO - Aluminium.....	151
FICHE 2D – Alteration Box plot	154
ANNEXE 3 – FICHES DETAILLEES DES RATIOS D’ELEMENTS DE PEARCE APPLIQUES AU METASOMATISME	156
FICHE 3A – Per-Alcalin	156
FICHE 3B – Per-Felsiques	160
ANNEXE 4 – FICHES DETAILLEES DE COMPILATION DES INDICES DE NORMAT	163
FICHE 4A – Normat Indice IFRAIS.....	163
FICHE 4B – Normat Indice IPAF	168
FICHE 4C – Normat Indice ICHLO	173
FICHE 4D – Normat Indice IPARA	176
FICHE 4E – Normat Indice ISER.....	181
FICHE 4F – Normat Indice IAB.....	186
FICHE 4G – Normat Indice IOR	191
FICHE 4H – Normat Indice ICD.....	195
FICHE 4I – Normat magnétite Normative	200
FICHE 4J - Normat Paragonite Normative	203
FICHE 4K – Normat Epidote Normative	206
ANNEXE 5 – LISTE DES ECHANTILLONS EN CONTEXTES MINERALISES.....	209

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Représentation conceptuelle simple des processus d'altération et de métasomatisme d'une roche.....	2
Figure 2. Relation entre le fer FeO analysé (réel) et TiO ₂ , pour une sélection de roches volcaniques récentes. La formule de régression est $1,2 + 4,8 * TiO_2 + 0,52 * TiO_2 * TiO_2$	6
Figure 3. Localisation des échantillons de roches volcaniques récentes.....	10
Figure 4. Répartition des roches volcaniques récentes de la banque de référence selon l'environnement tectonique.....	10

Figure 5. Légende lithologique pour les diagrammes de classification des roches volcaniques récentes. Ces catégories sont une simplification du nom donné dans la référence originale.	11
Figure 6. Classification des roches volcaniques récentes selon Miyashiro (1974).	11
Figure 7. Classification des roches volcaniques récentes selon R1-R2 (De La Roche et al., 1980).	12
Figure 8. Localisation des échantillons provenant d'études pétrogénétiques dans la Province de Supérieur, loin des gîtes métallifères connus.	13
Figure 9. Classification de Miyashiro (1974) des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques.	14
Figure 10. Classification par R1-R2 (De la Roche, 1980) des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques.	14
Figure 11. Classification des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques par Zr/TiO ₂ vs Nb/Y (Winchester et Floyd, 1977).	15
Figure 12. Répartition des échantillons de contextes de minéralisation selon le type de roche déterminé par le rapport Zr/TiO ₂ seulement.	16
Figure 13. Exemple de dépendance des ratios simples aux lithologies (Indice Séricite; Saeki et Date, 1980).	20
Figure 14. Exemple d'indépendance de l'indice Séricite modifié aux lithologies (sauf picrites).	21
Figure 15. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour obtenir un indice Séricite de 0,6, pour un précurseur inconnu.	23
Figure 16. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour obtenir un indice Séricite de 0,75, pour un même précurseur connu.	23
Figure 17. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour arriver à une certaine position d'altération sur le diagramme binaire, si le précurseur est inconnu.	27
Figure 18. Diagramme Alkali-Alumine pour les rhyolites de différents contextes.	28
Figure 19. Exemple de diagramme Isocon (tiré de Grant, 2005).	35
Figure 20. Exemple d'un bilan de masse avec précurseur unique (tiré de Barrett et MacLean, 1994).	36
Figure 21. Principe des bilans de masse à précurseurs multiples. L'utilisation d'un élément immobile compatible vs immobile incompatible permet de distinguer le fractionnement des changements de masse (tiré de Barrett et MacLean, 1994).	38
Figure 22. Gains et pertes en SiO ₂ vs Fe ₂ O ₃ t + MgO pour les rhyodacites de Phelps Dodge dans la région de Matagami, par la méthode de modélisation des précurseurs.	46
Figure 23. Comparaison des teneurs en SiO ₂ vs MgO+Fe ₂ O ₃ t pour les banques de références vs la rhyodacite la moins altérée de MacLean et Kranidiotis, 1987.	47
Figure 24. Changements de masse de la rhyodacite de Phelps Dodge, calculé par la méthode du précurseur unique. Tiré de Barrett et MacLean, 1994.	48
Figure 25. Localisation des gîtes Caber Nord et Phelps Dodge au sein de la Sous-province d'Abitibi (Géologie du SIGEOM).	49
Figure 26. Section N-S contenant le forage étudié (NCB-99-53). Le forage recoupe le mur ("footwall") de la lentille de SMV. Tiré de Salmon et al., 2007.	50
Figure 27. Lithologies échantillonnées dans le forage NCB-99-53.	50
Figure 28. Gains/pertes pour tous les éléments, forage NCB-99-53.	51
Figure 29. Bilans de masse pour SiO ₂ vs MgO+Fe ₂ O ₃ , pour les roches du forage NCB-99-53 (sauf gabbros non-altérés).	52

Figure 30. Gains et pertes moyennes pour l'altération en grenat-magnétite calculée par la modélisation du précurseur, comparée avec les résultats originaux, Red Lake (moyenne de 9 échantillons).	53
Figure 31. Test par ratios d'éléments de Pearce du fractionnement de l'olivine, plagioclase et clinopyroxène dans des laves basaltiques. Les points se placent sur une droite de pente de 1, ce qui indique que l'hypothèse est correcte.	55
Figure 32. Test par ratios d'éléments de Pearce d'hypothèses concurrentes. Une pente de -1 indique le fractionnement du clinopyroxène seul, alors qu'une pente de 1 indique un fractionnement d'olivine-anorthite-albite en proportions variables	56
Figure 33. Choix de l'élément au dénominateur dans les ratios d'éléments de Pearce. Si les deux éléments X-Y sont conservés durant le transfert de matériel, ils se placent sur une droite sur le diagramme X-Y. Tiré de Stanley et Madeisky, 1994.	57
Figure 34. Séquence de calcul de NORMAT (tiré de Piché et Jébrak, 2004).	60
Figure 35. Séquence de traitement simplifiée des minéraux alumineux et calciques ignées, norme CIPW.	62
Figure 36. Séquence de traitement simplifiée des minéraux alumineux et calciques ignées, NORMAT.	63
Figure 37. Ratios $Al/(2Ca+Na+K)$ molaire pour différents types de roche.	64
Figure 38. Dépendance de l'indice IFRAIS aux lithologies, roches volcaniques récentes.	65
Figure 39. Dépendance de l'indice IPAF aux lithologies, roches volcaniques récentes.	66
Figure 40. Bilan de masse des minéraux normatifs pour le forage NCB-99-53.	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Ratios Fe_2O_3 / FeO typiques pour des roches volcaniques non métasomatisées.	5
Tableau 2. Coefficients de corrélation (r) entre les valeurs prédites et réelles par réseaux neuronaux, groupes de test.	43
Tableau 3. Coefficients de corrélations entre les valeurs prédites et analysées pour les volcanites archéennes.	44
Tableau 4. Comparaison du précurseur composite de Cadieux et al., (2006) et modélisation de sa composition par ses éléments immobiles.	53

1. INTRODUCTION

De nombreuses méthodes existent pour détecter l'altération hydrothermale et le métasomatisme à partir de l'analyse chimique des roches ignées. Plusieurs de ces méthodes sont utilisées de façon routinière en exploration. Toutefois, plusieurs aspects du traitement par ces méthodes soulèvent des questions, par exemple :

1. le choix d'une méthode selon 1) son efficacité, 2) le contexte géologique/métallogénique, 3) la densité des données disponibles et 4) le stade de l'exploration,
2. L'applicabilité des méthodes aux données disponibles : types de roches appropriés, etc.,
3. le traitement des données comme tel : transformations à effectuer, aspects algorithmiques, statistiques ou mathématiques des méthodes plus complexes,
4. la détermination des seuils d'anomalies pour les échantillons individuels,
5. la représentation spatiale des résultats,
6. Identification des secteurs d'intérêt à partir des résultats.

Ce rapport traite principalement des aspects 2, 3 et 4 énumérés précédemment. Les principales méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme seront abordées dans le cadre de ce rapport et examinées selon ces aspects.

1.1 Distinction entre altération et métasomatisme

Le processus d'altération est considéré comme des changements minéralogiques de la roche alors que le processus métasomatique représente des changements chimiques (Stanley et Madeisky, 1994). Cette définition sera utilisée dans ce texte.

On peut envisager l'altération et le métasomatisme selon un modèle simple (**Figure 1**). L'état initial est la roche ignée fraîche, non-altérée et non-métasomatisée, avec un volume et une masse donnée. La circulation de fluides hydrothermaux dans les roches modifie la composition chimique initiale de la roche (processus métasomatique), sa composition minéralogique (processus d'altération) et ses caractéristiques physiques (volume et masse). L'état final est une roche métasomatisée, dont la composition chimique est modifiée. Elle est également altérée (minéralogique); ses minéraux sont différents de son état initial (roche fraîche). Finalement, sa masse et son volume peuvent avoir aussi été modifiés.

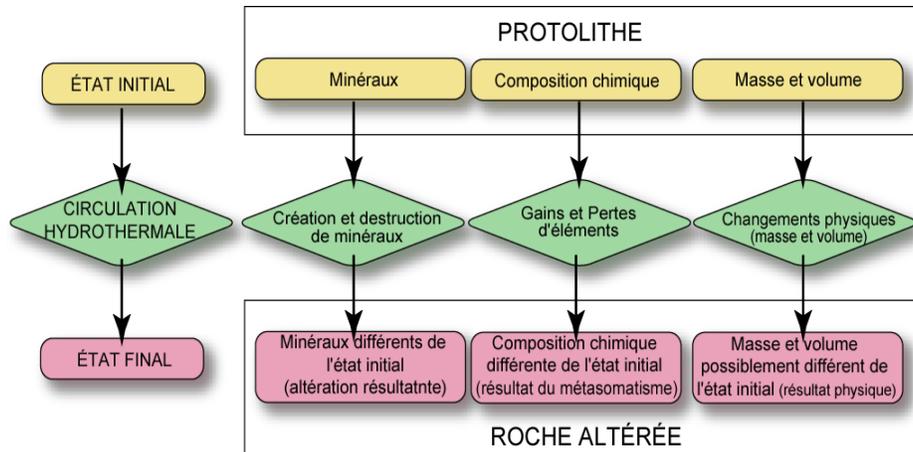
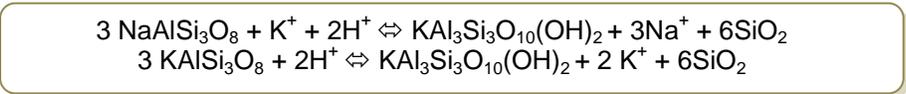


Figure 1. Représentation conceptuelle simple des processus d'altération et de métasomatisme d'une roche.

Ce modèle simple permet de considérer les méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme selon les aspects qui sont traités. Il permet de voir quelles sont les méthodes qui tiennent compte de l'ensemble du problème ou seulement de quelques-unes de ses parties.

Stanley et Madeisky (1994) démontrent de façon convaincante la différence entre altération et métasomatisme. Par exemple, supposons l'altération complète (minéralogiquement) du feldspath potassique et de l'albite d'une roche en séricite. Deux réactions distinctes peuvent produire la séricite :



La première réaction demande un ajout de potassium à la roche. La seconde libère en fait le potassium. Si on suppose un précurseur contenant 15 moles d'albite et 5 moles d'orthose (ex. : une roche intermédiaire) et une transformation complète des feldspaths en séricite, on a besoin d'un ajout de 1,66 mole de potassium. Si on a plutôt un précurseur à 10 moles d'orthose et 10 moles d'albite, on libère en fait 3,33 moles de potassium durant la séricitisation complète. Cet exemple simple montre que, même si l'altération et le métasomatisme sont fonctionnellement reliés, ils ne sont pas nécessairement proportionnels.

1.2 Considérations de base pour le traitement de l'altération et du métasomatisme

1.2.1 Recalcul à 100 %

La somme des éléments chimiques d'une analyse doit normalement fermer à 100 %. Ce n'est pas toujours le cas; la somme est généralement rapportée par le laboratoire d'analyse. Pour comparer directement les valeurs de deux analyses, elles doivent être ramenées à 100 %.

La formule suivante permet le recalcul à 100 %, pour chaque élément d'une même analyse :

$$\text{Recalcul à 100 \% : Valeur analysée} * 100 / \text{Total.}$$

Cette formule s'applique directement à tout élément, qu'il soit analysé en %, ppm ou ppb. Le calcul devrait aussi être appliqué aux analyses d'éléments volatils.

Il faut noter qu'en général, le total est rarement très différent de 100 %. Par exemple, sur une banque de données de ~45 000 analyses de l'Abitibi, 95 % des valeurs du total sont entre 97,95 et 100,78. (soit 0,78 à 2 % de la valeur idéale).

De plus, la transformation à 100 % n'a aucune influence sur tout indice constitué d'un ratio, puisque la même transformation est appliquée à tous les éléments d'une même analyse.

1.2.2 Recalcul « anhydre » (sans volatils)

Une certaine quantité d'éléments volatils sont présents dans les roches ignées. Ces éléments volatils sont en général regroupés dans une analyse de perte au feu (voir section 1.2.5). On peut recalculer les valeurs des éléments sur une base anhydre (ou plutôt sans volatils puisque la perte au feu comprend d'autres éléments que l'eau). Ce recalcul s'effectue de la façon suivante, pour tous les éléments de la roche :

$$\text{Recalcul anhydre : Élément} * (100 + \text{volatils \%}) / 100$$

Le terme « Volatils » représente soit la perte au feu ou à la somme des volatils analysés dans le cas où ils sont analysés séparément. Cette formule s'applique directement à tout élément, qu'il soit analysé en %, ppm ou ppb.

En général, la modification induite par le recalcul anhydre est beaucoup plus importante que le recalcul à 100 % en termes de changements absolus des valeurs, en particulier dans les roches métasomatisées.

Il est normal de faire un recalcul anhydre dans le cas de calculs normatifs sur roches ignées (ex.: CIPW; Verma et al., 2002) ou pour des diagrammes ou indices pétrogénétiques s'appliquant aux roches ignées (ex.: TAS; Le Bas et al., 1986). En effet, ces outils sont généralement calibrés sur des roches ignées relativement fraîches et peu hydratées. Par contre, on ne mentionne nulle part dans la littérature le besoin de faire ce type de transformation pour les diagrammes ou indices d'altération ou de métasomatisme. NORMAT inclut automatiquement le recalcul anhydre et à 100 % dans le cadre de ses calculs normatifs (Piché et Jébrak, 2004).

1.2.3 Combinaison du recalcul « anhydre » et à 100 %

Le recalcul anhydre et à 100 % sont deux opérations qui sont mathématiquement commutatives, c.-à-d. que l'ordre dans lequel on les effectue n'a pas d'influence sur le résultat. On peut facilement simplifier les deux opérations en une seule par la formule suivante :

$$\text{Recalculs à 100 \% et anhydre combinés} = \text{élément} * (100 + \% \text{ volatils}) / \text{Total}$$

1.2.4 Analyse du fer et recalculs Fe_2O_3 – FeO.

La plupart des analyses d'éléments majeurs donnent le fer comme Fe_2O_3 total ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$). Or, en réalité, le fer dans les roches est présent sous forme +2 (FeO) et +3 (Fe_2O_3). Certaines analyses rapportent spécifiquement le FeO. Cette analyse doit être faite séparément, normalement par titrage, et engendre des coûts analytiques supplémentaires.

Si on a le $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ analysé, la formule suivante permet d'obtenir le FeOt :

$$\text{FeOt} = \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} / 1,111348$$

La valeur de 1,111348 correspond au poids moléculaire de la molécule de Fe_2O_3 basé sur un atome de fer, $159,70 / 2$, divisé par le poids moléculaire de la molécule FeO, 71,85.

Si le fer FeO a été analysé séparément (ex. : par titrage) et qu'on a aussi le $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ rapporté, la formule suivante permet de calculer le Fe_2O_3 réel :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ réel} = \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} - \text{FeO} * 1,11134$$

La plupart du temps dans les analyses commerciales, seul Fe_2O_3 total est donné, même si dans la majorité des roches il est sous forme de FeO principalement. Si FeO n'est pas analysé, il existe des facteurs de conversion pour évaluer la quantité de FeO présent. Ces conversions ne s'appliquent qu'aux roches ignées, *et supposent que la roche n'est pas métasomatisée*. La

conversion à employer dépend du type de roche. En général, plus la roche est felsique, plus le rapport Fe_2O_3 / FeO est élevé.

Middlemost (1989) a proposé des ratios Fe_2O_3 / FeO typiques pour des roches volcaniques non métasomatisées. Ces ratios sont les suivants (**Tableau 1**):

Tableau 1. Ratios Fe_2O_3 / FeO typiques pour des roches volcaniques non métasomatisées.

foidite	0,15 – 0,40
picrobasalte	0,15
basanite/tephrite	0,20–0,30
basalte	0,20
trachybasalte	0,30
andésite basaltique	0,30
phonotephrite	0,35
trachyandésite basaltique	0,35
andésite	0,35
tephriphonolite	0,40
trachyandésite	0,40
dacite	0,40
phonolite	0,50
trachyte/trachydacite	0,50
rhyolite	0,50

Il existe également une excellente relation entre les valeurs de FeO réel et de TiO_2 (**Figure 2**). Cette relation permet de construire une courbe quadratique d'équation suivante :

$$\% FeO \text{ estimé} = 1,2 + 4,8 * \%TiO_2 - 0,52 * \%TiO_2 * \%TiO_2$$

Cette relation ne s'applique qu'aux roches volcaniques non métasomatisées.

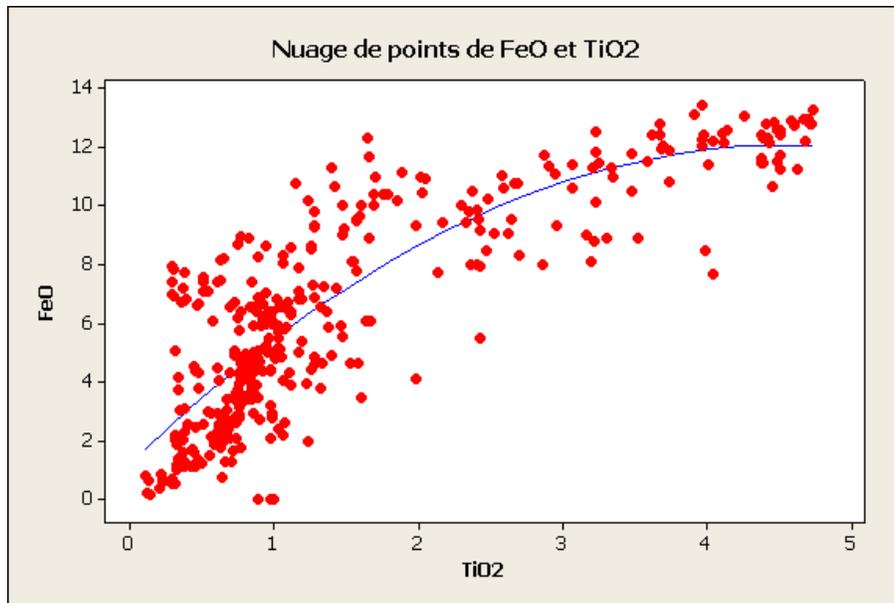


Figure 2. Relation entre le fer FeO analysé (réel) et TiO₂, pour une sélection de roches volcaniques récentes. La formule de régression est $1,2 + 4,8 * TiO_2 + 0,52 * TiO_2 * TiO_2$.

1.2.5 Analyse des éléments volatils et leur signification

Perte au feu

La plupart des analyses calculent les volatils comme leur somme sous forme de perte au feu (PAF% ou LOI% « loss on ignition »). La perte au feu d'un échantillon est calculée comme étant la perte de masse de l'échantillon en % suite à une chauffe à environ 1000 °C (Best, 2003). Une telle température permet normalement la libération des éléments volatils de la roche (H₂O structurel des minéraux (H₂O+), H₂O faiblement fixé (H₂O-), CO₂, S, matière organique, etc.; Best., 2003). Toutefois, un certain gain de masse également au cours de l'opération par l'oxydation du fer FeO de l'échantillon en Fe₂O₃. Ce gain est égal à $0,111348 * \% \text{ FeO réel}$ de la roche (Piché et Jébrak, 2004).

La valeur analysée de la perte au feu représente la somme des éléments volatils présents dans la roche, moins le gain de masse causé par l'oxydation du fer FeO en Fe₂O₃. Dans des échantillons très anhydres où la quantité réelle de volatiles est très faible, la perte au feu analysée peut donc être négative. Si on connaît la valeur réelle de FeO, on peut calculer la perte au feu réelle :

$$\text{Perte au feu réelle \%} = \text{Perte au feu analysée \%} - 0,111348 * \text{FeO\% réel}$$

H_2O^+ , H_2O^-

Certaines analyses donnent H_2O^+ et H_2O^- plutôt ou en plus de la perte au feu. H_2O^+ représente l'eau structurale des minéraux, c.-à-d. celle qui est présente dans la formule des minéraux (ex. : groupes OH des micas ou des amphiboles; Best, 2003). Cette eau est donc présente en quantités prévisibles par la stoechiométrie des minéraux.

H_2O^- représente l'eau qui est faiblement fixée aux minéraux (« humidité ») (Best, 2003). Ce sont des molécules d'eau qui sont adsorbées à la surface des minéraux. Tous les minéraux analysés en contiennent une quantité variable (Deer et al., 1966). H_2O^- est non-stoechiométrique, c.-à-d. que les valeurs ne peuvent être prédites par la formule des minéraux. H_2O^- est en général plus abondant dans les phyllosilicates que dans les autres minéraux (Deer et al., 1966), et est particulièrement abondant dans les argiles. Les surfaces des phyllosilicates ont une capacité particulière d'adsorber les particules d'eau.

H_2O^- est analysé suite à une chauffe d'environ 110 °C qui permet l'ébullition de cette eau faiblement fixée (Best, 2003).

2 METHODOLOGIE

Chaque méthode de traitement sera abordée dans le but de documenter les aspects pratiques du traitement des données, son applicabilité à différents types de roches, la détermination des seuils et son utilité dans le cadre du modèle de traitement de l'altération et du métasomatisme présenté précédemment. La signification des résultats des différentes méthodes sera également discutée.

Cette documentation est réalisée de deux façons :

1. Par un retour à la littérature de base pertinente aux différentes méthodes,
2. Par l'application des méthodes à des banques de données de référence de roches fraîches et de roches altérées/métasomatisées.

L'étude actuelle vise à documenter l'altération et le métasomatisme dans les roches ignées, en particulier dans les roches volcaniques.

2.1 Banques de données de référence

Dans le but de documenter de façon indépendante les différentes méthodes (par exemple la détermination de seuils appropriés), des données de référence sont nécessaires. Pour ce faire, deux types de données sont nécessaires : des données de roches ignées non-métasomatisées (fraîches) et des données de roches ignées altérées/métasomatisées.

2.1.1 Banque de données de roches fraîches

Trois méthodes sont envisageables pour identifier des roches non-métasomatisées/altérées:

1. Utiliser les valeurs de différentes méthodes de traitement sur des banques de données géochimiques afin d'identifier des roches fraîches.
2. Utiliser des données géochimiques couplées à des observations pétrographiques permettant de juger de l'altération/métasomatisme.
3. Utiliser des données de contextes géologiques qui sont susceptibles de ne pas contenir d'altération et de métasomatisme.

La première méthode est clairement inappropriée, car elle suppose en réalité un raisonnement circulaire. On ne peut utiliser des méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme pour identifier des roches fraîches et ensuite réutiliser ces roches fraîches pour évaluer ces mêmes méthodes. La deuxième approche est également difficile d'un point de vue pratique en raison de la rareté de bonnes descriptions pétrographiques associées à des banques de données géochimiques. La troisième approche est donc privilégiée par défaut.

Les édifices volcaniques actuels en milieu subaérien sont probablement les endroits où on peut retrouver les roches volcaniques les moins altérées et métasomatisées. Tout d'abord, le milieu subaérien minimise la possibilité d'altération par des fluides météoritiques par rapport aux milieux subaquatiques dans lequel on retrouve une circulation intense d'eau de mer chargée de sels minéraux. Ensuite, les roches des édifices actuels n'ont jamais été enfouies, ce qui diminue probablement la possibilité de circulations hydrothermales post-mise en place.

La question se pose par contre sur la différence possible entre la composition des roches volcaniques récentes non-altérées et celles des roches anciennes, en particulier celles de la fin de l'Archéen. Les travaux de Condie (1993) semblent démontrer des variations séculaires de la composition des roches volcaniques de l'Archéen vers le Cénozoïque. Toutefois, certains auteurs remettent en question ces différences sur la base de la similarité des suites intrusives d'une époque à l'autre et attribuent les différences dans les roches volcaniques aux phénomènes d'altération post-mise en place plus intenses des suites plus anciennes (ex. : Davies et Whitehead, 2006).

Des données de roches volcaniques anciennes peu métasomatisées sont donc nécessaires dans le but de vérifier l'applicabilité des conclusions qui seront tirées de l'étude des roches volcaniques récentes. Les études pétrogénétiques sur les roches volcaniques sont probablement la source de données idéale dans ce cas; en général, les études pétrogénétiques tentent d'éviter de traiter des roches.

Roches volcaniques récentes

La banque de données GEOROC (*Geochemistry of the Oceans and Continents; georoc.mpch-mainz.gwdg.de*) a été choisie comme source de données pour les roches volcaniques récentes fraîches. Cette base de données constitue une compilation de données d'analyses de roches volcaniques publiées dans la littérature. Elle comprend les références complètes de toutes les données, leur localisation, leur description et l'identification de leur contexte tectonique. Les critères suivants ont été utilisés pour extraire des analyses de cette banque :

1. Le complexe volcanique duquel provient chaque analyse doit être identifié et doit être un complexe volcanique actif à l'Holocène ou au Quaternaire récent.
2. Les données extraites doivent représenter un éventail de compositions, d'affinités chimiques, et d'environnements tectoniques variés : picrites à rhyolites, roches subalcalines à ultraalcalines, tholéitiques à calco-alcalines, de marges convergentes océaniques et continentales, rifts, îles océaniques, etc.
3. Les données extraites doivent être clairement des volcanites subaériennes.
4. Les données doivent contenir les éléments majeurs, et préférentiellement l'information sur les composantes volatiles H₂O et CO₂, ou au moins la perte au feu.

Cinq cent deux (502) analyses répondant à ces critères ont été recueillies. Elles proviennent d'une vingtaine d'articles publiés et de différentes régions volcaniques actives du monde (**Figure 3**). L'accent a été mis sur les contextes de marges convergentes, puisque ces contextes sont particulièrement importants pour les minéralisations métalliques (**Figure 4**); ce contexte représente la moitié des données compilées.

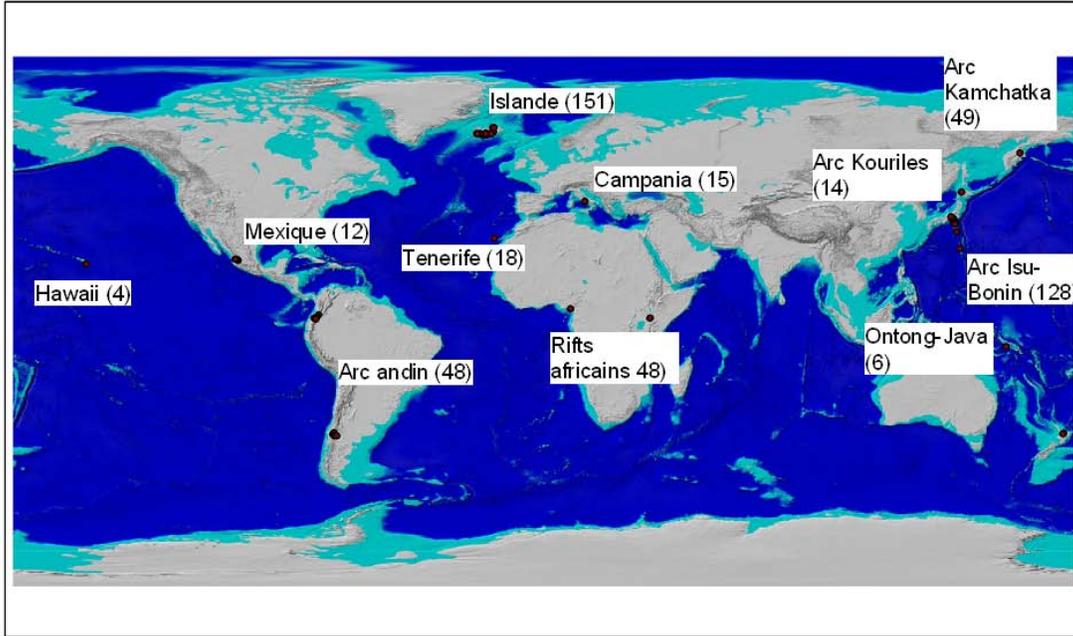


Figure 3. Localisation des échantillons de roches volcaniques récentes.

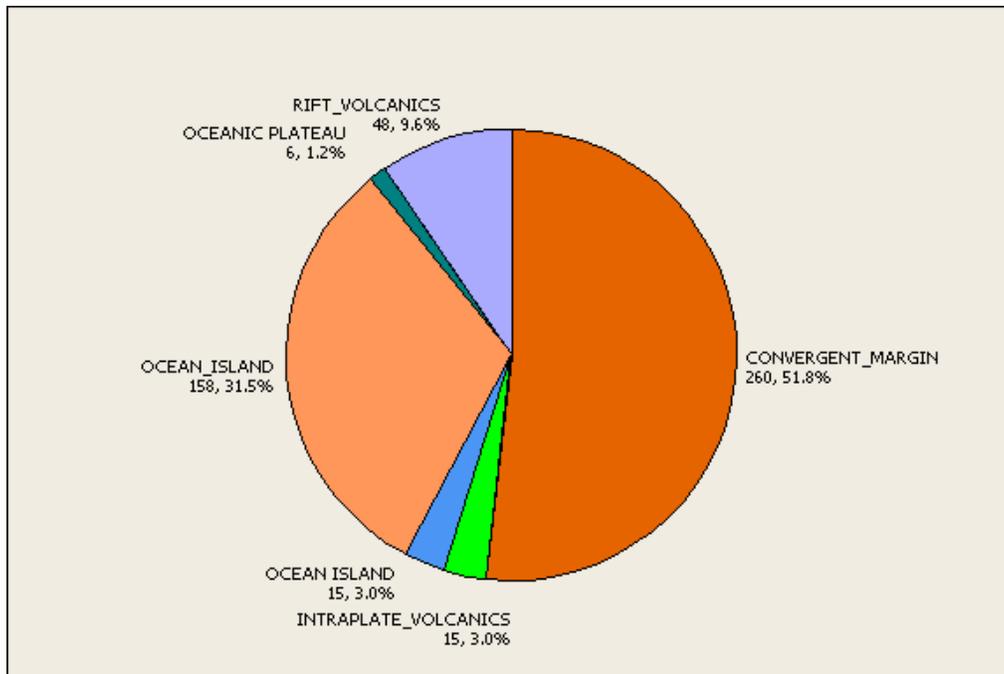


Figure 4. Répartition des roches volcaniques récentes de la banque de référence selon l'environnement tectonique.

La description lithologique originale a d'abord été simplifiée en un certain nombre de catégories (**Figure 5**). Différents diagrammes de classification des roches montrent que ces analyses représentent un éventail complet de roches volcaniques de différentes compositions et de différents contextes (Miyashiro (1974) **Figure 6**; R1-R2 De La Roche et al., (1980) **Figure 7**).



Figure 5. Légende lithologique pour les diagrammes de classification des roches volcaniques récentes. Ces catégories sont une simplification du nom donné dans la référence originale.

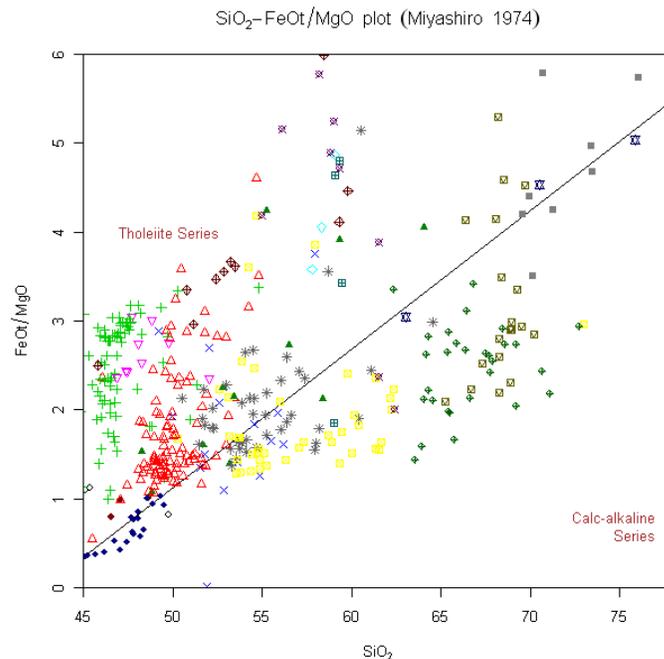


Figure 6. Classification des roches volcaniques récentes selon Miyashiro (1974).

Dans le reste de cette étude, la classification de De La Roche et al., (1980) sera utilisée pour classer cette banque de roches volcaniques récentes. Cette classification est préférée aux autres puisqu'elle utilise l'ensemble des éléments majeurs pour classer les roches. Cette classification a été légèrement simplifiée ici (**Figure 7**). Une classification additionnelle plus large d'alcalinité a été effectuée en trois catégories selon la position gauche-droite sur le diagramme.

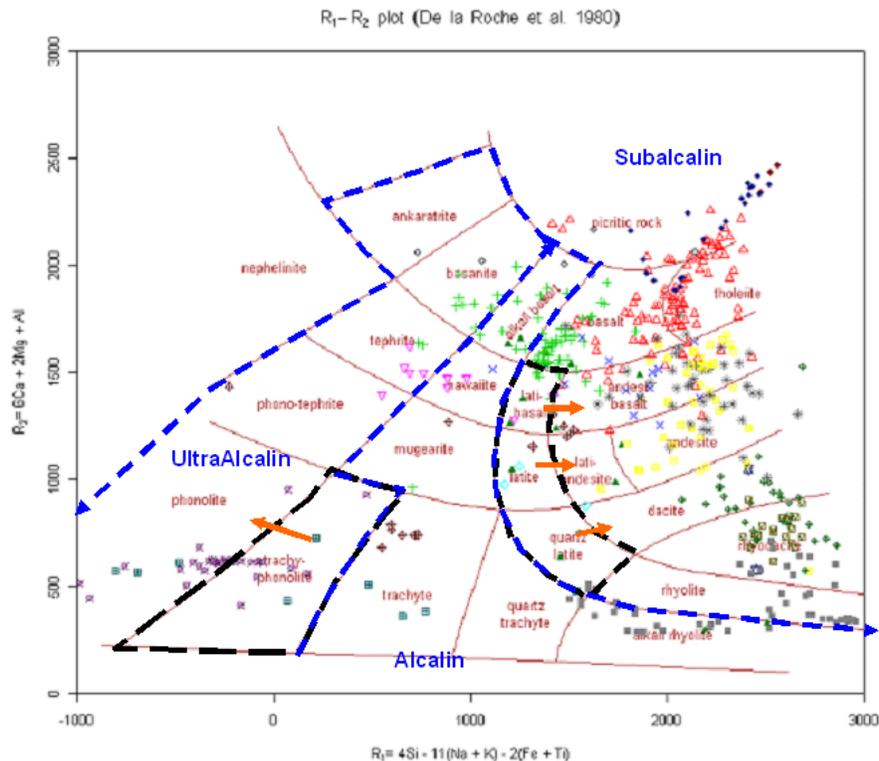


Figure 7. Classification des roches volcaniques récentes selon R1-R2 (De La Roche et al., 1980).

Roches archéennes peu altérées/métasomatisées provenant d'études pétrogénétiques

Des données provenant d'études pétrogénétiques réalisées dans la Province de Supérieur (Québec et Ontario) ont également été compilées de la banque GEOROC. Comme il a déjà été mentionné, les études pétrogénétiques tentent généralement d'utiliser des roches fraîches pour ne pas fausser les analyses. Les critères suivants ont donc été utilisés pour choisir ces données :

- L'étude correspondante doit porter sur la pétrogenèse des roches volcaniques.
- Pour minimiser les risques d'altération, seules les données localisées à plus de 10 km des gîtes, gisements et mines connues ont été retenues.
- Dans le but d'identifier avec certitude les différents types de roches, seules les données contenant Zr et Nb en plus des éléments majeurs ont été retenues (pour l'utilisation dans le diagramme de classification Zr-TiO₂ vs Nb/Y de Winchester et Floyd, 1977).

Les échantillons retenus proviennent de différents secteurs de la Province de Supérieur (Figure 8).

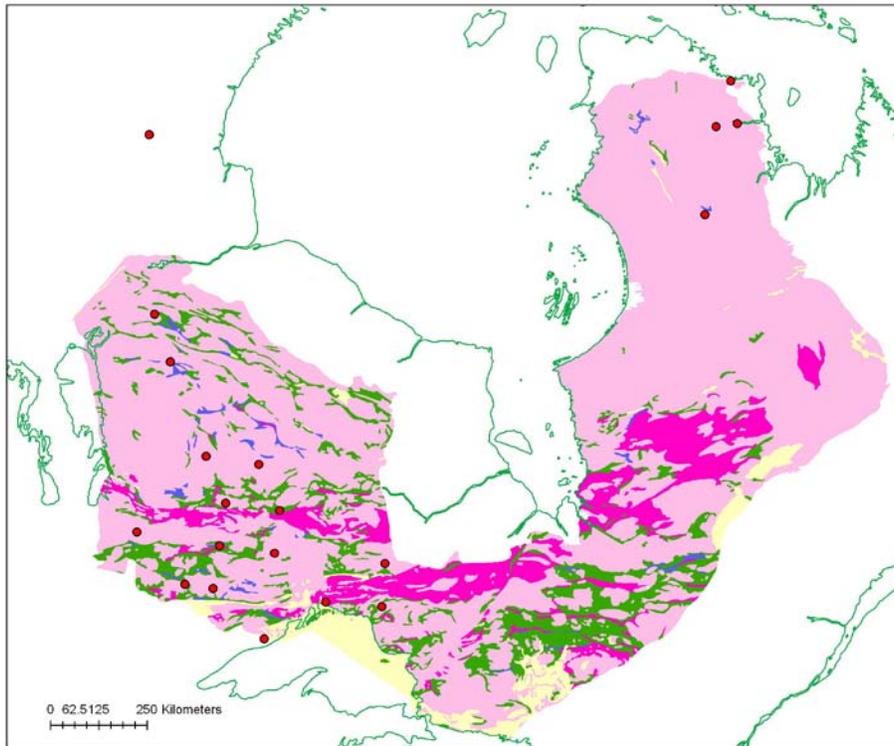


Figure 8. Localisation des échantillons provenant d'études pétrogénétiques dans la Province de Supérieur, loin des gîtes métallifères connus.

Les différents diagrammes de classification montrent que ces roches représentent un éventail de compositions subcalines, des komatiites aux rhyolites (Miyashiro, 1974, **Figure 9**; R1-R2 De La Roche et al., 1980, **Figure 10**; Winchester et al., 1977, **Figure 11**).

L'étude de ces roches par différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme montrera que l'essentiel des analyses ainsi choisies représente des roches non-métasomatisées. Toutefois, contrairement à la banque de données des roches volcaniques récentes qui est pratiquement composée à 100 % de roches non-métasomatisées cette banque contient quelques échantillons métasomatisés qui ont été à dessein conservés dans la banque.

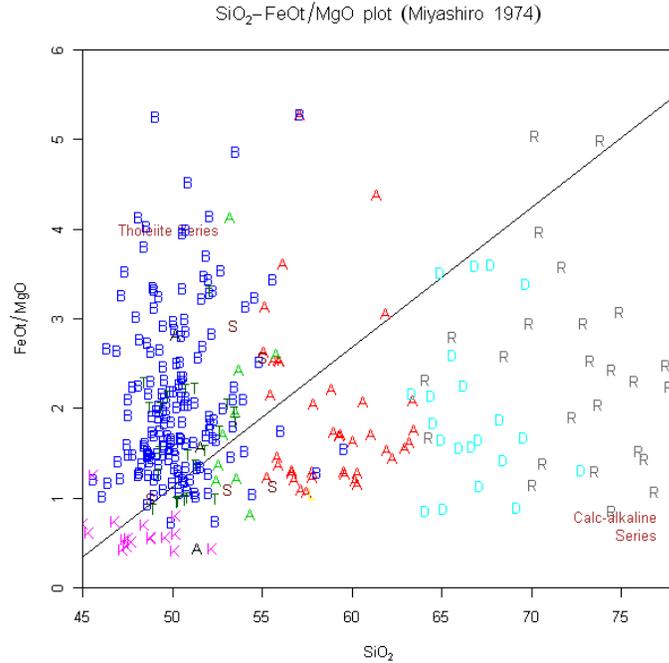


Figure 9. Classification de Miyashiro (1974) des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques.

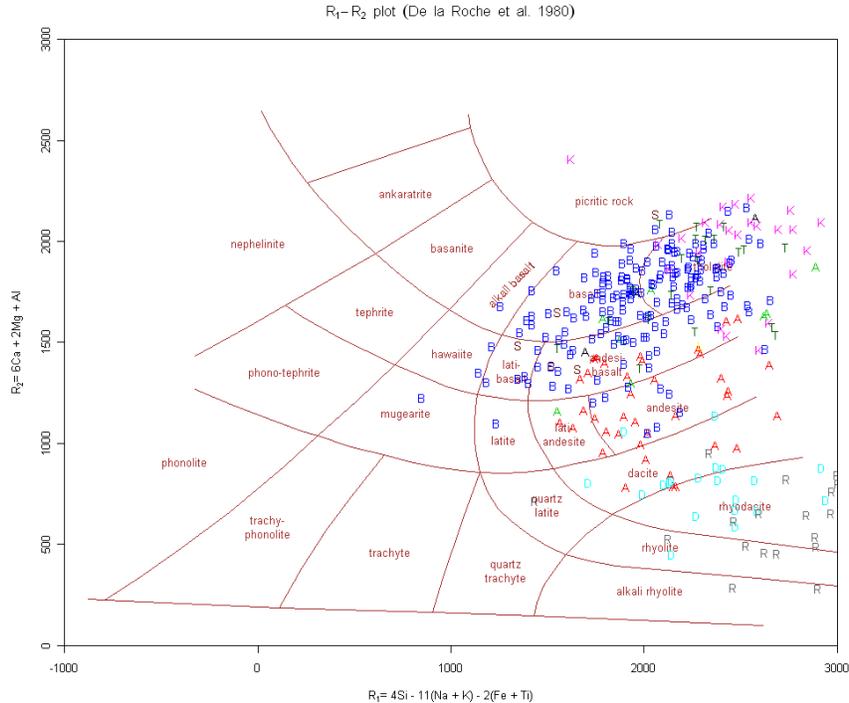


Figure 10. Classification par R₁-R₂ (De la Roche, 1980) des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques.

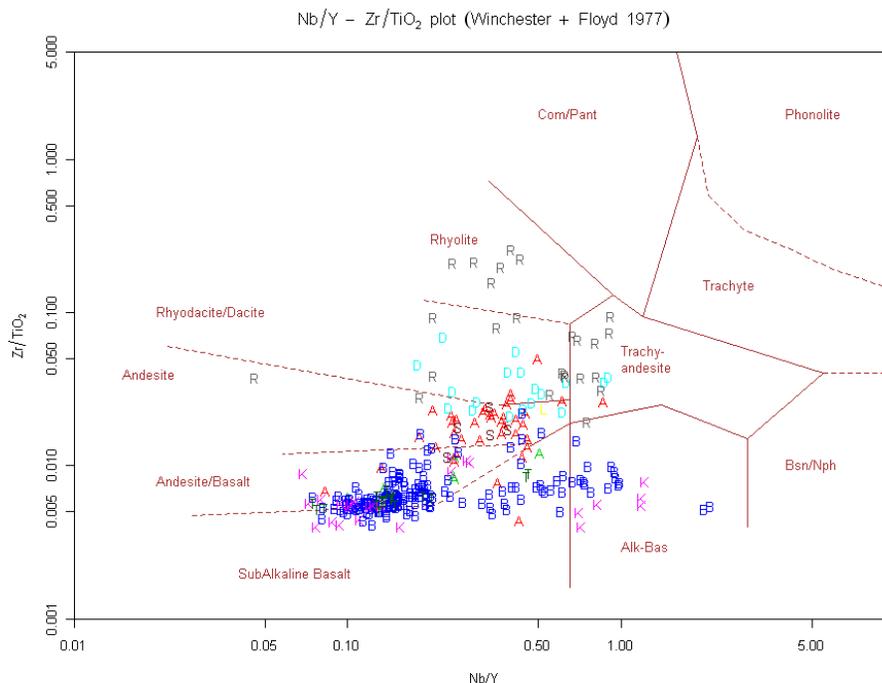


Figure 11. Classification des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques par Zr/TiO₂ vs Nb/Y (Winchester et Floyd, 1977).

2.1.2 Banque de données de roches altérées/métasomatisées

Pour avoir une certaine idée de l'éventail typique du métasomatisme des roches volcaniques, des données provenant de différents contextes de minéralisation ont été recueillies. Trois principaux contextes ont été considérés :

1. Métasomatisme en contexte de sulfures massifs volcanogènes (VMS);
2. Métasomatisme en contexte d'or orogénique;
3. Métasomatisme en contexte d'or associé à des syénites.

Les données des partenaires du CONSOREM sont alors utiles, puisqu'elles proviennent communément de secteurs adjacents à des minéralisations. Des données de la littérature provenant d'études portant sur le métasomatisme hydrothermal autour des minéralisations ont aussi été compilées. Les critères suivants ont été utilisés pour choisir les données de chaque contexte :

- Roches identifiées comme volcaniques dans les descriptions originales.
- Éléments majeurs + (perte au feu ou (H₂O+ et CO₂)) analysés.
- Zr analysé pour pouvoir classer les roches selon leur fractionnement par le ratio Zr/TiO₂ malgré le métasomatisme.

- Avoir un éventail le plus complet possible de compositions des basaltes aux rhyolites, et garder un équilibre dans les proportions de ces compositions.

L'Annexe 5 présente la liste des échantillons de référence compilés de sites minéralisés.

Les diagrammes utilisés dans la section précédente ne peuvent évidemment s'appliquer à ces roches étant donné leur métasomatisme. De plus, puisque les valeurs de Y et Nb n'étaient pas disponibles pour la majorité des échantillons, il est impossible de les classer par le diagramme Zr/TiO₂ vs Nb/Y (Winchester et Floyd, 1977). Toutefois, le rapport Zr/TiO₂ peut être utilisé pour classer de façon sommaire les roches volcaniques métasomatisées, puisque les subdivisions entre les basaltes, basaltes andésitiques, andésites, dacites et rhyolites sont grossièrement horizontales sur ce dernier diagramme. Les différentes valeurs de ce rapport correspondant approximativement aux catégories du diagramme Zr/TiO₂ vs Nb/Y ont été calculées et appliquées aux roches métasomatisées. La **Figure 12** montre la répartition des lithologies pour l'ensemble des roches métasomatisées.

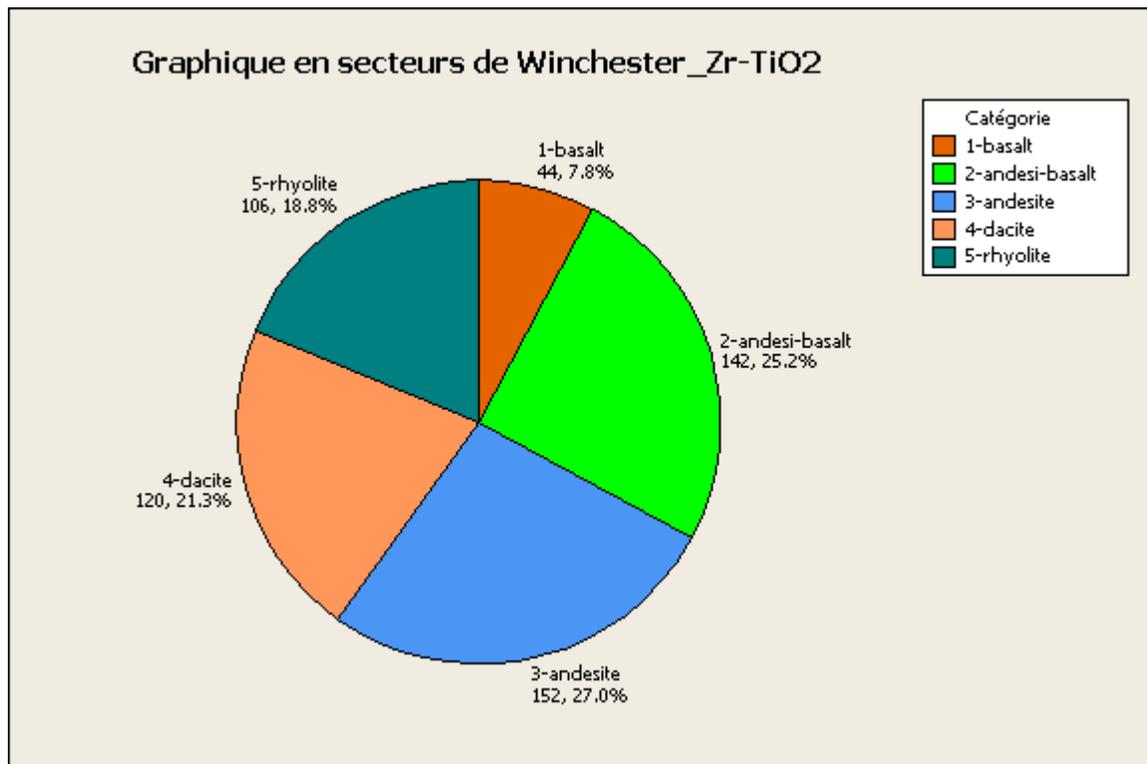


Figure 12. Répartition des échantillons de contextes de minéralisation selon le type de roche déterminé par le rapport Zr/TiO₂ seulement.

2.2 Typologie des méthodes de traitement étudiées

Les différentes méthodes de traitement abordent le problème de l'altération et du métasomatisme selon différentes composantes du modèle simple présenté à la **Figure 1**:

- 1) Méthodes caractérisant (principalement) le résultat du métasomatisme (chimique)
 - Ratios d'éléments simples (indices unaires).
 - Diagrammes binaires d'éléments.
- 2) Méthodes caractérisant l'état initial, le processus, le résultat du métasomatisme (chimique) et l'état physique initial et final ainsi que son processus
 - Bilans de masse
 - Avec précurseurs choisis.
 - Avec modélisation mathématique du précurseur (nouvelle méthode).
 - Ratios d'éléments de Pearce.
- 3) Méthodes caractérisant (principalement) le résultat de l'altération (minéralogique)
 - NORMAT
- 4) Méthode caractérisant l'état initial, le processus, le résultat du métasomatisme ET de l'altération ET physique
 - Combinaison de la minéralogie normative NORMAT et des bilans de masse avec modélisation mathématique des précurseurs.

3 RATIOS D'ÉLÉMENTS SIMPLES (INDICES UNAIRES)

Les indices unaires se caractérisent par des ratios directs d'éléments ou de sommes d'éléments chimiques (ex. : $K_2O/(K_2O+Na_2O)$). La plupart n'ont pas de lien avec la stœchiométrie des minéraux d'altération (sauf indices de saturation en albite, muscovite). Ils ciblent principalement la conséquence chimique (métasomatisme) de l'effet des circulations hydrothermales plutôt que les conséquences minéralogiques. Les ratios sont compilés à l'**Annexe 1**.

3.1 Dépendance des ratios d'éléments simples aux lithologies et détermination des seuils

Les différents ratios étudiés montrent tous une dépendance plus ou moins importante aux lithologies pour les roches volcaniques récentes et fraîches. Il est donc impossible de déterminer des seuils absolus pour détecter des roches métasomatisées pour ces indices. Ces seuils se doivent de varier selon les lithologies. Si on connaît les précurseurs des roches, on peut toutefois normaliser séparément les valeurs de différents précurseurs pour pouvoir ensuite comparer les valeurs entre elles. La normalisation s'effectue par la formule :

$$V_{n,éch,Litho} = (V_{i,éch,Litho} - moy_{Litho}) / eT_{Litho}$$

$V_{n,éch,Litho}$ = Valeur Normalisée du ratio pour un échantillon d'une lithologie

$V_{i,éch,Litho}$ = Valeur initiale du ratio pour un échantillon d'une lithologie

moy_{Litho} = Moyenne du Ratio pour la lithologie pour les données disponibles

eT_{Litho} = Écart-type du ratio pour la lithologie pour les données disponibles

Cette formule normalise les valeurs et les amène à une moyenne de 0, avec un écart-type de 1. Un seuil d'anomalie peut alors être fixé par exemple à une valeur de 2, représentant deux écarts-types au-dessus de la moyenne pour tous les types de roches. Il faut toutefois noter que la moyenne et l'écart-type sont dépendants de la distribution des données disponibles. De plus, il faut s'assurer que les valeurs du ratio sont distribuées à peu près normalement; sinon on doit les transformer de façon préalable aux calculs (en logarithme la plupart du temps).

En général, l'utilisation efficace des ratios simples est plutôt difficile dans un contexte d'exploration régionale, où les lithologies sont souvent peu contraintes. Ils peuvent toutefois être utilisés dans le contexte de l'évaluation de l'altération dans une lithologie unique (ex. : une unité unique de rhyolite) ou de quelques lithologies connues en normalisant les valeurs. Cependant, comme il sera abordé dans la section 3.4, l'information qui peut en être retirée ne dépasse pas beaucoup l'identification positive d'une roche métasomatisée, même dans un cas idéal comme celui d'un précurseur unique.

3.2 Ratios d'éléments simples et diagrammes binaires correspondants

Chacun des ratios peut être étudié par un diagramme X-Y correspondant. L'examen de ces diagrammes binaires permet d'obtenir plus d'information que les ratios correspondants et sont également examinés avec les différents indices.

Sur ces diagrammes, on peut (sauf pour l'indice Hashigushi; 1983) déterminer des champs séparant les roches métasomatisées des roches fraîches. Dans certains cas, certaines roches métasomatisées se superposent à des roches volcaniques de compositions particulières (ex. : alcalines ou ultramafiques). Toutefois, dans la majorité des cas, ces champs séparant le métasomatisme des roches fraîches ne peuvent pas être définis par des valeurs constantes de l'indice unaire. Dans certains cas extrêmes, comme pour l'indice Alkali, (Saeki et Date, 1980) les champs définissant le métasomatisme se trouvent carrément vers l'origine du diagramme par rapport aux roches fraîches.

La conclusion est que *l'utilisation de champs séparant les roches métasomatisées des roches fraîches sur les diagrammes binaires est beaucoup plus avantageuse que d'utiliser les ratios eux-mêmes.*

Des champs séparant les métasomatisées et non métasomatisées (fraîches) ont été tracés sur tous les diagrammes binaires correspondants aux ratios. Ces champs facilitent la discrimination. Toutefois, comme il sera démontré dans la section 3.4, des roches métasomatisées peuvent toujours se retrouver dans le champ des roches fraîches.

3.3 Nouveaux ratios unaires peu dépendants des lithologies

Pour les indices¹ Chlorite, Séricite (Chlorite index et Sericite index de Saeki et Date, 1980), et Hashimoto (1993) modifié, il a été remarqué que les roches volcaniques fraîches se distribuent sur les diagrammes binaires le long de droites, pour des compositions variant de basalte à rhyolite (excluant les volcanites plus primitives). La **Figure 13** montre cette droite pour l'indice Séricite. Cependant, ces droites ne passent pas par l'origine, expliquant leur dépendance aux lithologies.

On peut alors facilement dériver de nouveaux indices unaires à partir de ces trois indices. Il suffit de calculer la régression de la droite passant par ces points et de dériver un nouvel indice (**Figure 14**). L'avantage des indices modifiés est que les valeurs des roches fraîches sont centrées sur 1 pour tous les types de roches. Le métasomatisme éloigne les valeurs de 1.

Les indices modifiés suivants seront donc indépendants des lithologies, de basalte à rhyolite :

- Indice Séricite modifié : $(K_2O+1)/0,5*(K_2O+Na_2O)$
- Indice Chlorite modifié : $(Fe_2O_3t + MgO + 5) / (Fe_2O_3t + MgO + 2*Na_2O + 2*CaO)$
- Indice Hashimoto Modifié modifié : $(FeOt + MgO + K_2O + 4) / (MgO + K_2O + CaO + Na_2O)$
- Indice CCPI modifié: $(FeOt + MgO + 8,5) / (FeOt + MgO + Na_2O + K_2O)$

Le comportement de ces indices modifiés est étudié à l'Annexe 1, accompagnant les indices desquels ils sont dérivés. Les formules des indices originaux sont également données à l'**Annexe 1**.

¹ Voir Annexe 1 : Fiche 1F – Index Séricite, 1G – Index Chlorite

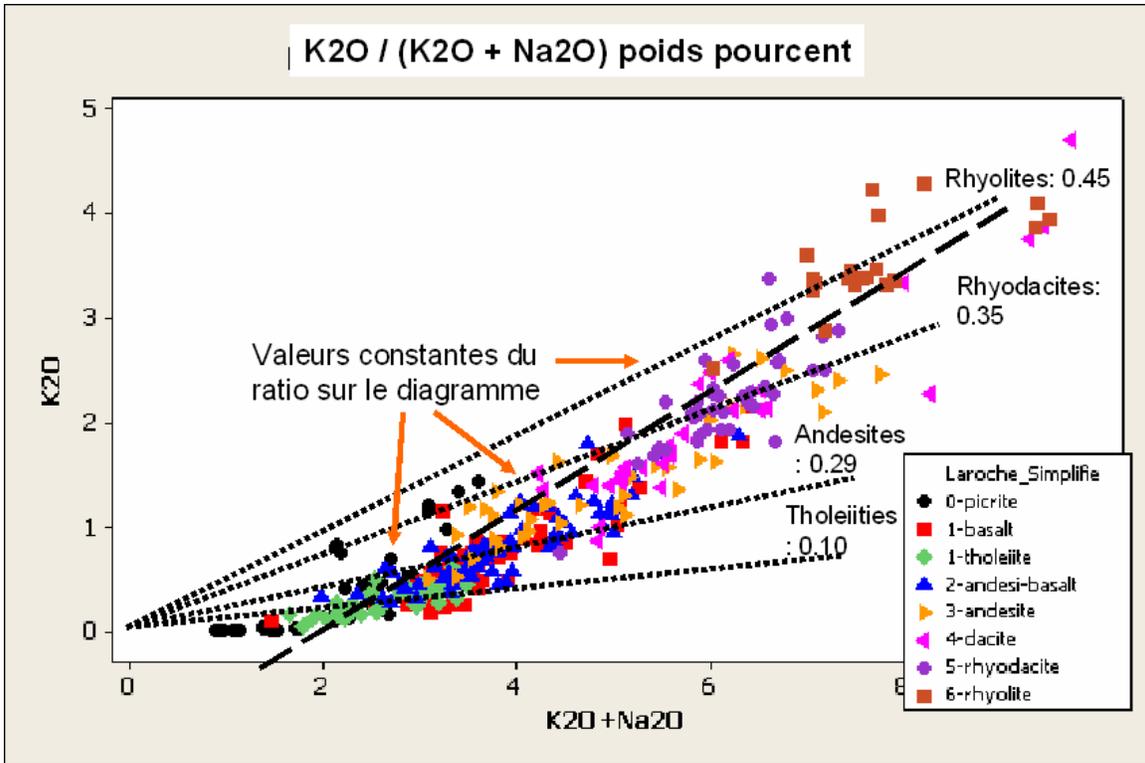


Figure 13. Exemple de dépendance des ratios simples aux lithologies (Indice Sérécite; Saeki et Date, 1980)

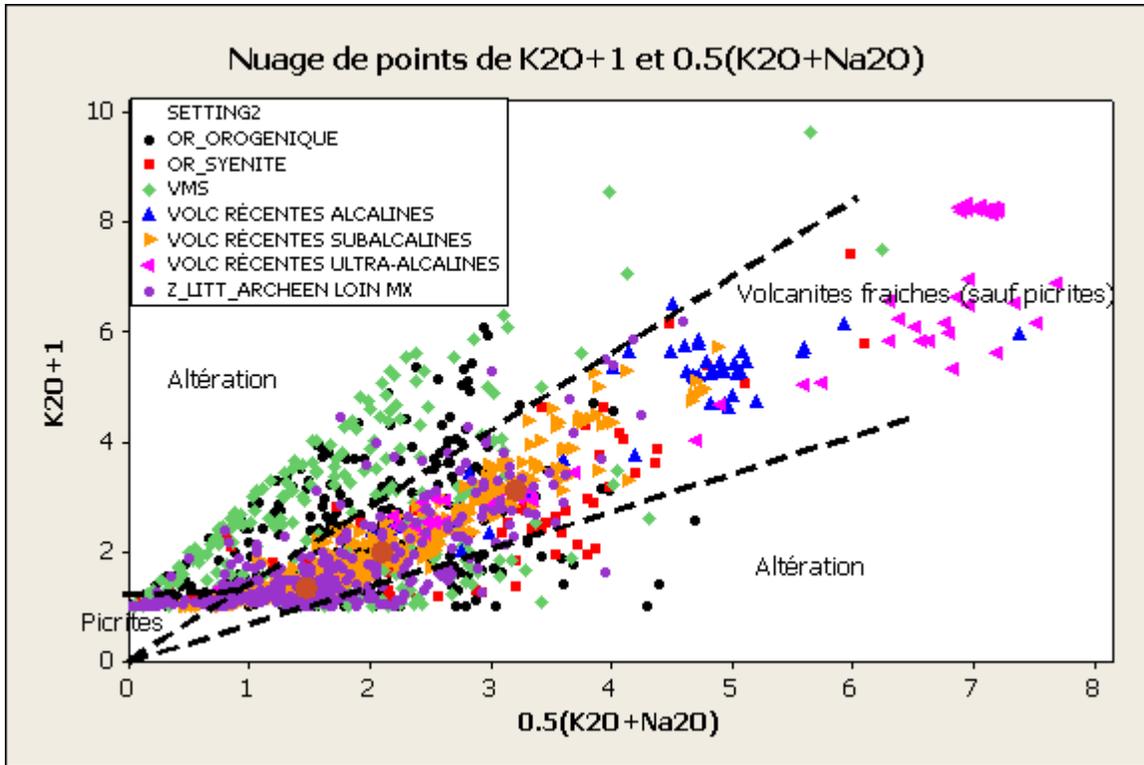


Figure 14. Exemple d'indépendance de l'indice Séricite modifié aux lithologies (sauf picrites).

3.4 Ratios d'éléments simples, processus et résultat du métasomatisme et de l'altération

3.4.1 Métasomatisme

On peut se demander comment il peut être possible de qualifier le métasomatisme en termes d'intensité et de processus par les valeurs d'un ratio d'altération (unaire). Pour examiner ces questions, l'indice Séricite sera pris en exemple.

Prenons par exemple une valeur de l'indice séricite de 0,6. Pour toutes les lithologies, une telle valeur indique un métasomatisme. Peut-elle toutefois être qualifiée de faible, moyenne ou intense? Et quelle est la signification de cette valeur en terme de métasomatisme sodique/potassique? Différents cas seront examinés, selon la connaissance ou non du précurseur.

Précurseur inconnu, utilisation du ratio seulement

L'examen du diagramme K_2O vs K_2O+Na_2O permet rapidement de réaliser qu'une valeur constante du ratio (ex. : 0,6) correspond à plusieurs positions possibles sur le diagramme (**Figure 15**). Si on considère en plus des points de départ (précurseurs) différents dans le champ des roches fraîches (ex. : un basalte et une rhyolite), on constate que le métasomatisme nécessaire pour atteindre une valeur de 0.6 du ratio peut être très différent. En détail, à partir des

points de départ et d'arrivée donnés en exemple sur la figure, on peut obtenir une valeur de 0,6 du ratio par les façons suivantes :

- Ajout modéré de K_2O (+1,5 %) et une perte de Na_2O (-2,5 %) sur une rhyolite, vers point d'arrivée 1.
- Lessivage du K_2O (-0,75 %) et de Na_2O (-3 %) sur une rhyolite, vers point d'arrivée 2.
- Ajout drastique de K_2O (+3 %) et une perte de Na_2O (-1 %) sur un basalte vers point d'arrivée 1.
- Ajout de K_2O léger (+0,75 %) et une perte de Na_2O (-1,5 %) sur un basalte, vers point d'arrivée 2.

On constate que dans certains cas, on a une perte modérée de sodium et de potassium, alors que dans d'autres cas, il y a une perte plus faible de sodium et un gain de potassium. Les gains et les pertes absolues en sodium et potassium varient également de façon importante dans les différents cas possibles. L'intensité du métasomatisme varie donc de façon considérable d'un cas à l'autre.

Précurseur connu, utilisation du ratio seulement.

Supposons maintenant que la composition du précurseur est connue, même approximativement, par exemple par l'utilisation d'éléments traces peu mobiles. La **Figure 16** montre un exemple à partir de l'altération possible d'un basalte andésitique frais (Bf) vers deux basaltes andésitiques métasomatisés (Ba1 et Ba2) identifiés par le ratio Zr/TiO_2 . Même si leur précurseur a une composition probablement similaire, le métasomatisme subi par Ba1 et Ba2, ayant une même valeur de l'indice, est assez différent. Ba1 a subi une perte en sodium et un ajout de potassium, alors que Ba2 a subi une perte en sodium et en potassium. L'intensité absolue du métasomatisme est également différente dans les deux cas. Au total, Ba2 a eu un changement absolu de 4,5 % alors que Ba1 a subi un changement de 3 %.

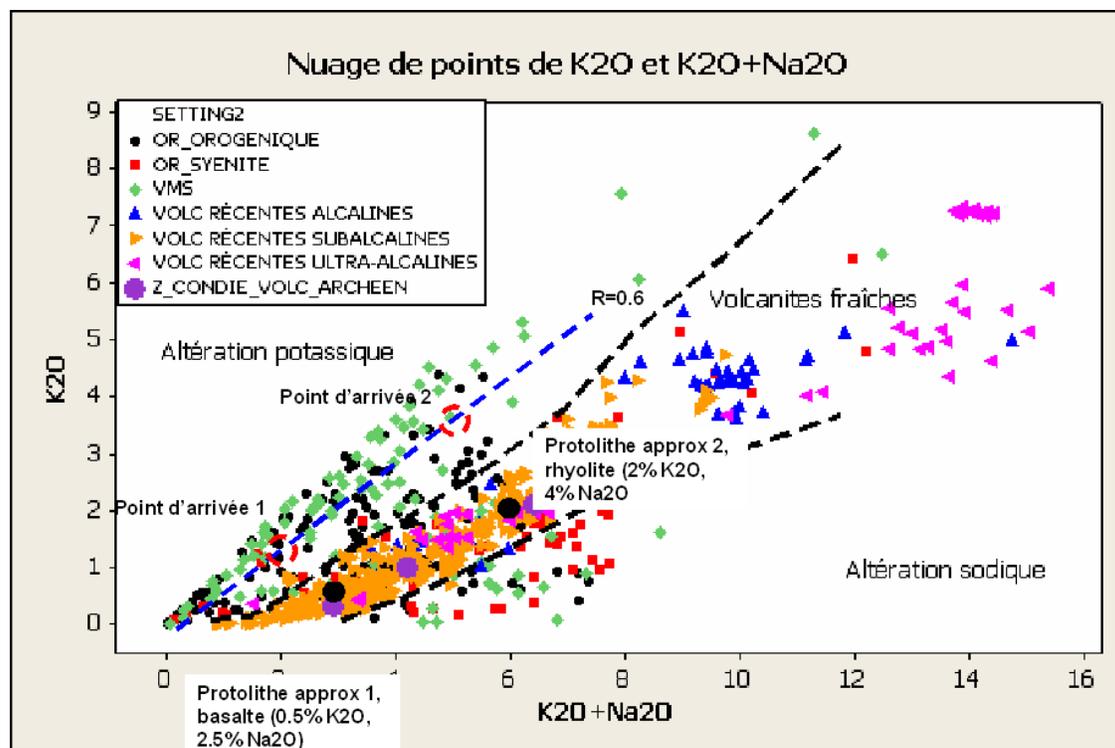


Figure 15. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour obtenir un indice Séricite de 0,6, pour un précurseur inconnu.

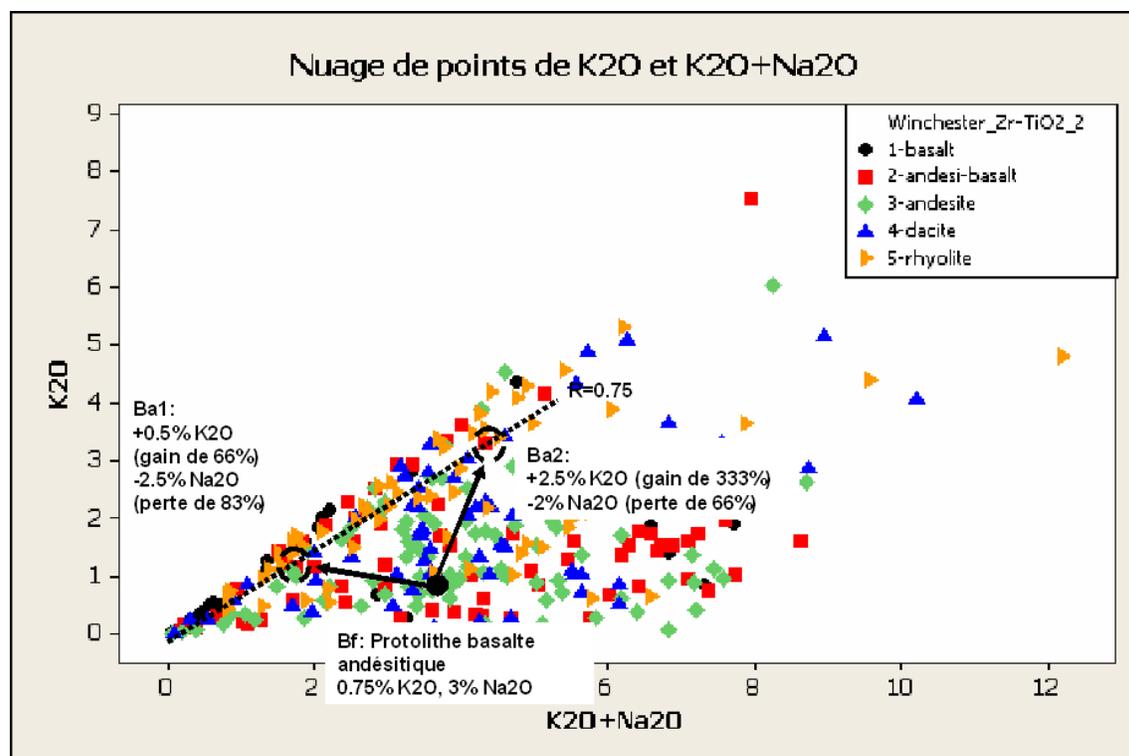


Figure 16. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour obtenir un indice Séricite de 0,75, pour un même précurseur connu.

3.4.2 Altération

Plusieurs ratios portent des noms de minéraux (ex. : indice Séricite, indice Chlorite). Ces ratios identifient-ils vraiment des minéraux? Prenons encore une fois l'exemple de l'indice Séricite. Supposons une valeur de 1 (ou 100) du ratio. Il n'est pas certain qu'une telle valeur représente de la séricite dans la roche altérée. Différents processus et résultats d'altérations peuvent montrer un tel ratio :

- 100 % orthose et albite en séricite (séricitisation) ;
- 100 % albite en orthose (altération potassique) ;
- 100 % albite et 99 % orthose (léger résidu d'orthose) en chlorite ;
- Etc.

3.5 Conclusions sur l'utilité des ratios simples (indices unaires)

À partir des observations précédentes, on retient les éléments suivants sur les ratios simples :

Avantages

- Simples à calculer.
- Un seul chiffre comme résultat, utilisé pour faire des grilles par la suite pour visualiser les résultats.
- Les indices constitués de ratios ne sont pas affectés par les changements de masse des roches.
- Utile pour identifier positivement le métasomatisme (présent) si on connaît le précurseur; si on ne connaît pas le précurseur, des valeurs extrêmes peuvent toutefois identifier de façon sûre la présence de métasomatisme.

Désavantages

- Les valeurs des ratios (et donc les seuils) pour les roches fraîches sont dépendantes des lithologies (sauf les indices modifiés proposés).
- Des valeurs constantes des indices ne donnent pas d'information sur l'intensité du métasomatisme et n'indiquent pas non plus un type constant de métasomatisme (ex. : une même valeur peut représenter parfois un ajout d'un élément et parfois une perte de ce même élément).
- Ils ne permettent pas de déterminer le type de minéraux d'altération formés
- Ils ne permettent pas de détecter/quantifier l'effet des changements de masse/volume de la roche.
- Une valeur d'indice correspondant aux roches fraîches peut tout de même indiquer une roche métasomatisée ;
 - Soit par un métasomatisme n'impliquant pas les éléments du ratio ;

- Soit par un métasomatisme déplaçant la composition à l'intérieur du champ des roches fraîches.
- Ils ne qualifient pas non plus l'altération (minéralogique).
- Les changements métasomatiques sont en réalité seulement qualitatifs.

En conclusion, ces ratios simples ne sont pas d'une très grande utilité. *Ils ont tout avantage à être remplacés par les diagrammes binaires correspondants.* Toutefois, comme il sera démontré dans la section 4.1, même si ces diagrammes binaires d'éléments permettent d'identifier les échantillons altérés en utilisant des champs définis, ils ne permettent pas de connaître l'intensité réelle du métasomatisme, ni le processus, si le précurseur n'est pas connu. Si le précurseur est connu, les effets de fermeture par des changements de masse peuvent également fausser l'interprétation de l'intensité et du processus.

4 DIAGRAMMES BINAIRES GEOCHIMIQUES

Les diagrammes binaires géochimiques mettent en relation des éléments individuels ou combinaisons d'éléments. Les éléments choisis ont dans certains cas des relations avec la stœchiométrie des minéraux (p.ex. le diagramme K_2O/Al_2O_3 vs Na_2O/Al_2O_3), et parfois non (p. ex. le diagramme de Hugues 1973 ; $K_2O + Na_2O$ vs $(K_2O / (K_2O+Na_2O)) * 100$).

Il faut noter que cette section sur les diagrammes binaires exclut les ratios d'éléments de Pearce appliqués à l'altération, qui sont également des diagrammes binaires, mais qui sont basés sur des hypothèses pétrogénétiques précises et qui permettent d'éviter les problèmes de fermeture des analyses. Ils seront traités dans la section sur les bilans de masse.

L'**Annexe 2** présente les différents diagrammes étudiés.

4.1 Nouveaux diagrammes binaires géochimiques

Des diagrammes binaires géochimiques pour détecter le métasomatisme ont été construits en utilisant les différents ratios d'altération étudiés. L'étude de la répartition des roches volcaniques récentes sur ces diagrammes et de la banque de roches archéennes d'études pétrogénétiques a permis de délimiter sur ces diagrammes les champs correspondant aux roches volcaniques métasomatisées de ceux des roches fraîches. Ces diagrammes binaires correspondants aux différents ratios simples sont présentés à l'**Annexe 2**. Il s'agit donc de nouveaux diagrammes binaires qui sont basés sur des indices connus et dont les champs sont délimités dans la présente étude. Les diagrammes suivants sont proposés :

- K_2O vs K_2O+Na_2O (Fiche no 1F en Annexe 1)
- Al_2O_3 vs Na_2O (Fiche no 1E)
- $Fe_2O_3t + MgO$ vs $Fe_2O_3t + MgO + 2CaO + 2Na_2O$ (Fiche no 1K)
- $MgO+ K_2O$ vs $MgO + K_2O + CaO + Na_2O$ (Fiche no 1I)

- $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ vs $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Fiche no 1H)
- $\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO}$ vs $\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ (Fiche no 1K)
- $3\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ vs Al_2O_3 molaire (Fiche no 1B)
- $3\text{K}_2\text{O}$ vs Al_2O_3 molaire (Fiche no 1C)
- Na_2O vs Al_2O_3 molaire (Fiche no 1E)

4.2 Diagrammes binaires, processus et résultat du métasomatisme et de l'altération

La section 3.4 a montré les limites des ratios d'éléments simples pour quantifier le processus du métasomatisme. Il est intéressant à ce stade-ci de se poser les mêmes questions à propos des diagrammes binaires d'altération. L'exemple de l'indice séricite est repris ici. Il faut noter que la même discussion pourrait s'appliquer aux autres diagrammes (au diagramme de Hughes également). Le diagramme Alkali-Alumine est différent et est traité séparément, puisque ce diagramme est relié à la stœchiométrie des minéraux et réagit différemment des autres.

4.2.1 Exemple du diagramme K_2O vs $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$

Précurseur inconnu, utilisation du diagramme binaire K_2O vs $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

Supposons que l'on choisit une rhyolite se trouvant dans le champ des roches fraîches. Considérons le changement nécessaire pour amener sa composition vers une autre rhyolite qui est cette fois métasomatisée. On peut également choisir un basalte du champ des roches fraîches et considérer le changement nécessaire pour l'amener vers la composition d'un basalte métasomatisé, dont la position sur le diagramme est semblable à celle de la rhyolite altérée précédente.

Si on compare le métasomatisme subi par ces deux roches pour les amener à une position semblable dans le champ des roches métasomatisées, on note que le métasomatisme subi est sensiblement différent (**Figure 17**). Le changement de composition enregistré par la rhyolite est nettement plus significatif que ce soit en termes relatifs ou en termes absolus.

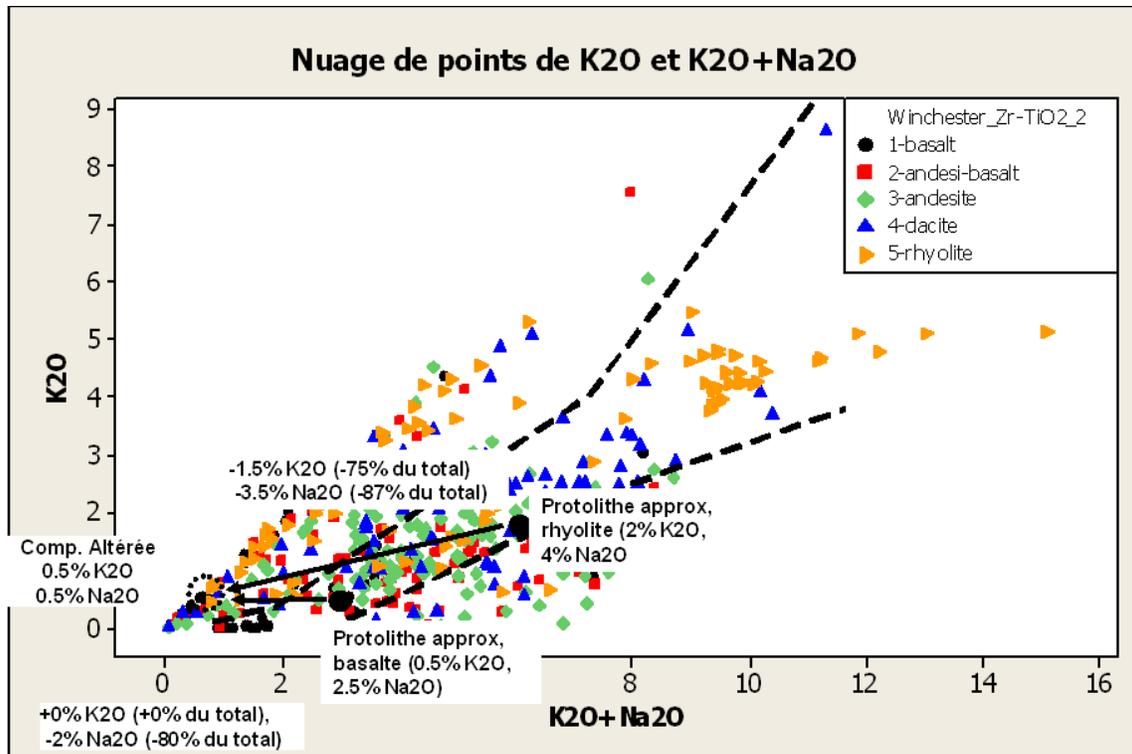


Figure 17. Exemple de différents parcours de métasomatisme pour arriver à une certaine position d'altération sur le diagramme binaire, si le précurseur est inconnu.

Précurseur connu, utilisation du diagramme binaire K₂O vs K₂O+Na₂O.

Le seul cas où l'intensité du métasomatisme pourrait en principe être déterminée est celui où on connaît approximativement la composition en alcalis du précurseur. Toutefois, le métasomatisme réel peut alors être tributaire des changements de masse et de l'effet de fermeture des analyses. Sans en tenir compte, le métasomatisme réel ne peut être calculé. Ces problèmes sont réglés par l'utilisation des bilans de masse.

4.2.2 Diagramme Alkali-Alumine

Le diagramme alcali-alumine (Na₂O/Al₂O₃ vs K₂O/Al₂O₃) ne s'applique qu'aux rhyolites. En ce sens, on a un précurseur connu dont les ratios sont sensiblement semblables et assez restreints pour des roches fraîches de composition strictement rhyolitique (**Figure 18**).

Les ratios sont reliés à la stœchiométrie des feldspaths, qui contrôlent essentiellement toute la variation des teneurs de K, Na et Al dans les rhyolites. Comme l'aluminium est au dénominateur des deux ratios et est peu mobile, toute modification des ratios est due à des changements de masse absolus au numérateur des ratios (K ou Na). Donc la valeur des ratios des rhyolites altérées par rapport aux rhyolites fraîches donne une indication semi-quantitative du métasomatisme (semi-quantitative car les ratios réels pour les rhyolites fraîches varient tout de

même un peu). La minéralogie de l'altération résultante peut être déterminée par la position par rapport aux différents minéraux alumineux sur le diagramme.

Ce diagramme permet donc de mieux évaluer le résultat de l'altération, autant au niveau du processus que de l'intensité. L'utilisation d'un élément immobile au dénominateur des axes le rapproche de la méthode des ratios de Pearce (bilans de masse).

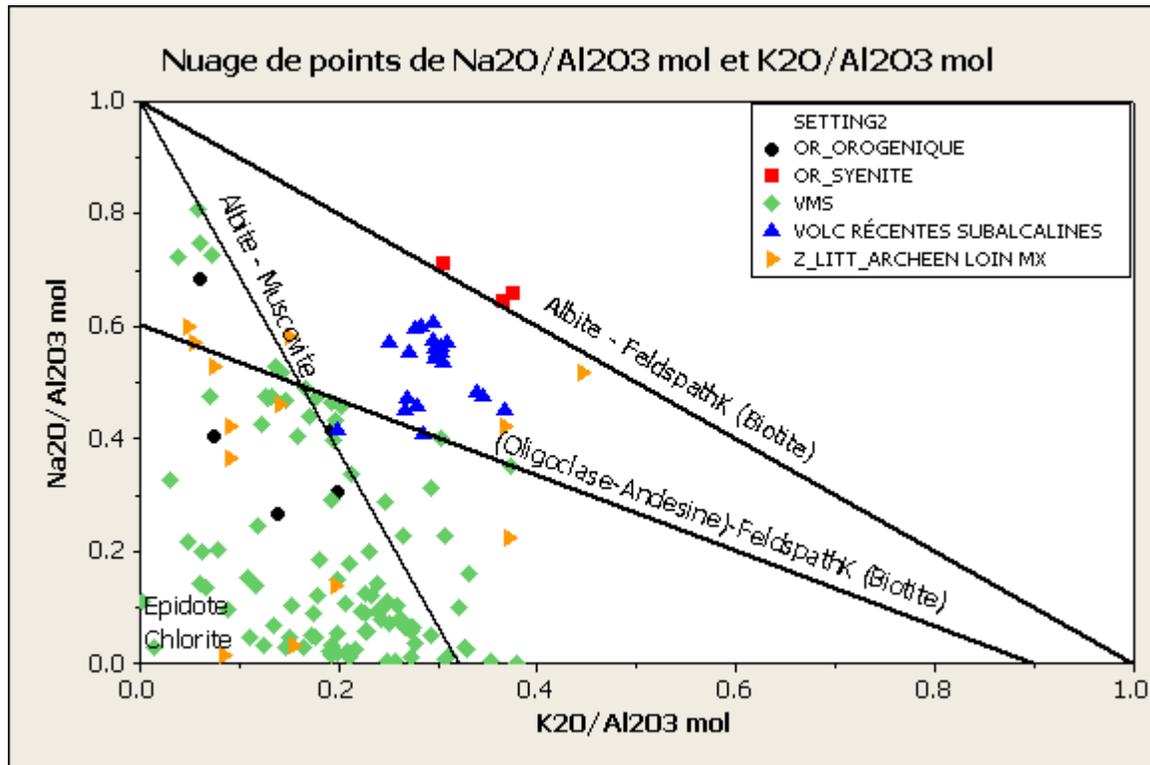


Figure 18. Diagramme Alkali-Alumine pour les rhyolites de différents contextes.

4.3 Signification du champ des roches fraîches vs champs des roches métasomatisées

Il faut noter que des roches métasomatisées peuvent se retrouver dans le champ des roches fraîches dans ce type de diagramme. La raison la plus évidente est que certaines roches peuvent avoir subi un métasomatisme qui n'est pas représenté par les éléments d'un certain diagramme. D'autre part, il est également possible que le métasomatisme déplace les roches à l'intérieur du champ des roches fraîches.

On peut conclure sur les diagrammes binaires que :

- Si un échantillon tombe dans un champ du métasomatisme, il s'agit d'une roche métasomatisée.
- Si une roche est métasomatisée elle peut être dans le champ des roches fraîches ou dans le champ du métasomatisme.
- Si une roche est fraîche, elle tombe dans le champ des roches fraîches.
- Si une roche tombe dans le champ des roches fraîches, elle peut être fraîche ou métasomatisée.

4.4 Utilité des diagrammes binaires

À partir des observations précédentes, on retient les points suivants pour les diagrammes binaires géochimiques (plusieurs ne s'appliquent toutefois pas au diagramme Alkali-Alumine) :

Avantages

- Facile de construire les graphiques nécessaires.
- Permettent de déterminer des champs séparant les roches volcaniques métasomatisées des roches volcaniques fraîches. Un échantillon tombant dans le champ du métasomatisme est métasomatisé.
- L'identification positive (OUI/PEUT-ÊTRE) du métasomatisme est nettement plus fiable que les ratios d'altération unaires.

Désavantages

- Un point précis sur un de ces diagrammes ne permet pas de connaître l'intensité du métasomatisme, ni le processus exact en termes de pertes ou gains des éléments impliqués; ces paramètres varient selon le point de départ réel sur le diagramme (c.-à-d. la composition du précurseur).
- Un point précis sur un de ces diagrammes n'indique pas non plus la présence d'un minéral d'altération ou l'autre (sauf exception).
- Un échantillon tombant dans le champ des roches fraîches n'est pas nécessairement frais.
- Même si la composition du précurseur est estimée, un déplacement sur le diagramme peut être causé totalement ou en partie par un changement de masse global de la roche, ce qui rend encore une fois impossible l'évaluation du métasomatisme de façon absolue à partir des diagrammes.
- En conséquence, les champs ne peuvent être non plus assignés à des processus métasomatiques ou d'altération.

Les diagrammes binaires géochimiques sont nettement plus utiles que les ratios d'éléments simples, puisqu'ils permettent en général de séparer le métasomatisme des roches fraîches, sans trop d'ambiguïté. La position dans les champs des roches métasomatisées n'est toutefois pas représentative en général d'une intensité de métasomatisme ou du processus.

Dans le schéma de l'altération présenté au début de ce document, on constate que les diagrammes binaires géochimiques permettent d'identifier positivement une roche ayant subi un métasomatisme. Il n'y a donc pas d'information quantitative sur le processus subi, ni d'altération ou de métasomatisme.

Les méthodes des bilans de masse, examinées dans la section suivante, permettent un examen beaucoup plus approfondi du métasomatisme que les diagrammes binaires et d'obtenir des évaluations réelles des changements chimiques (et parfois minéralogiques) des roches lors de l'altération.

5 METHODES DES BILANS DE MASSE

Les sections précédentes permettent de constater que les variations des concentrations d'éléments des roches métasomatisées sont également dues à des facteurs externes au métasomatisme hydrothermal. Selon Stanley et Madeisky (1994), les éléments suivants doivent être considérés:

1. l'effet de fermeture des analyses, qui requiert que toutes les concentrations des éléments d'une roche doivent égaler à une somme de 100 %;
2. les processus pétrogénétiques (fractionnement, sources magmatiques, etc.);
3. d'autres changements métasomatiques non reliés aux fluides hydrothermaux (diagénèse, altération par l'eau de mer, etc.).

Le métasomatisme n'est donc qu'un des processus responsables de la modification de la composition des roches. Ces effets sont susceptibles de masquer le métasomatisme hydrothermal subi par les roches et il est donc nécessaire de diminuer l'effet des autres facteurs de variabilité.

Les méthodes basées sur les bilans de masse permettent de régler le problème de la fermeture des analyses. Plusieurs de ces techniques s'attaquent au problème de la variabilité due aux processus pétrogénétiques. Les différentes techniques peuvent être séparées en deux grandes catégories :

- Techniques qui demandent l'identification d'un précurseur
 - L'approche Isocon (Grant, 1986).
 - L'approche de modélisation des changements de masse par des diagrammes d'éléments immobiles (MacLean et Kanidiotis, 1987; MacLean et Barrett, 1993).

- Technique des ratios d'éléments de Pearce appliqués au métasomatisme (Stanley et Madeisky, 1994).

Une nouvelle technique d'évaluation de la composition des précurseurs volcaniques par réseaux neuronaux sera également examinée.

Dans le cadre du schéma de l'altération présenté à la **Figure 1**, il faut noter que les bilans de masse permettent de connaître de façon quantitative le processus métasomatique et l'état chimique initial (relatif) de la roche. Ils ne permettent toutefois pas de connaître le résultat de l'altération (minéralogique) ni le processus d'altération.

5.1 Principaux fondamentaux des méthodes de bilans de masse

Les méthodes des bilans de masse sont basées l'équation fondamentale des transferts de matière dans les roches (Stanley et Madeisky, 1994; Leitch et Lentz, 1994; Gresens, 1967). Cette équation peut être exprimée de différentes façons, qui sont équivalentes. Une façon de l'exprimer est la suivante:

$$X_n = W_n^B - W_n^A = w \{[(F_V)(X_n^B)(S^B/S^A)] - X_n^A\}$$

- X_n est le changement de masse de la composante n (un élément chimique d'intérêt).
- W^A , W^B sont les poids de la composante n dans la roche fraîche (parent) A et dans la roche métasomatisée B .
- W est le poids initial de la roche métasomatisée. W est normalement fixé à 100 g d'un point de vue pratique.
- X_n^A et X_n^B sont les proportions massiques de la composante n dans la roche fraîche A et la roche métasomatisée B , qui proviennent directement de l'analyse chimique.
- S^B et S^A représentent la densité de la roche métasomatisée et fraîche respectivement.
- F_V est le ratio du volume total, c.-à-d. le ratio du volume de la roche métasomatisée sur le volume de la roche fraîche.
- $F_V = V^B / V^A = (M^B / M^A) (S^A / S^B)$. M^B / M^A est le ratio de la masse totale.
- Le ratio M^B / M^A peut être calculé à l'aide d'un élément immobile (comme Al_2O_3) par son ratio inverse $X_{Al_2O_3}^A / X_{Al_2O_3}^B$.

Si on remplace $F_V = (M^B / M^A) (S^A / S^B) = (X_{Al_2O_3}^A / X_{Al_2O_3}^B) (S^A / S^B)$ dans l'équation initiale, pour un élément mobile, on a alors :

$$X_n = W^B - W^A = 100 \{(X_{Al_2O_3}^A / X_{Al_2O_3}^B)(X_n^B)] - X_n^A\}$$

5.1.1 Variables inconnues dans les expressions des bilans de masse

Dans les deux cas, les équations comportent plusieurs (les mêmes) inconnues. Les changements de taille (masse et/ou volume et/ou densité) de la roche métasomatisée par rapport à la roche fraîche ne sont pas a priori connus. De plus, la composition du précurseur frais ne l'est pas non plus.

On peut déterminer les changements de volume/masse de l'ensemble de la roche durant le métasomatisme ($Taille_{Méta}$ dans la première expression, F_v dans la deuxième) par différents moyens :

1. soit de connaître le changement de la taille métasomatisée durant le métasomatisme (rarement disponible) ;
2. soit de connaître le comportement d'un des éléments lors du métasomatisme. Si un élément est immobile :
 - son ajout absolu $A_{ElemImm}$ est de 0 durant l'altération, ce qui permet de déterminer alors $Taille_{Méta}$ dans la première expression ($= Taille_{Frais} * X_{ElemImmFrais} / X_{ElemImmMeta}$).
 - La valeur de M^B / M^A peut être fixée par le ratio inverse de l'élément immobile et simplifie l'équation.

La composition du précurseur frais pour l'élément d'intérêt n'est pas non plus connue. La plupart des approches nécessitent d'identifier ce précurseur parmi la population des échantillons disponibles, par observations pétrographiques (voir section 5.2, 5.3). La méthode proposée à la section 5.4 suggère de modéliser la composition du précurseur à partir des éléments immobiles. La méthode des ratios d'éléments de Pearce contourne habilement ce problème (section 5.5) mais en comporte d'autres.

5.1.2 Étapes nécessaires à la réalisation des bilans de masse

Pour solutionner les paramètres inconnus dans les bilans de masse, les étapes suivantes sont typiquement nécessaires :

1. Déterminer un ou plusieurs éléments immobiles durant le métasomatisme.
2. Déterminer la composition d'un précurseur non-métasomatisé (sauf pour les ratios d'éléments de Pearce).
3. Fixer une quantité de précurseur initiale à 100 g.

5.1.3 Détermination des éléments immobiles durant le métasomatisme

La détermination d'éléments immobiles est importante pour les bilans de masse puisqu'elle permet de calculer les changements de masse/volume globaux de la roche.

Les méthodes suivantes permettent de choisir les éléments immobiles (Leitch et Lentz, 1994) :

1. Connaître a priori l'immobilité de certains éléments dans certains contextes géologiques
2. Calculer les ratios de concentrations de l'élément immobile dans le précurseur frais / concentrations de l'élément immobile dans la roche métasomatisée pour tous les éléments immobiles potentiels. Tous les éléments immobiles devraient montrer le même ratio. (s'applique seulement pour un précurseur uniforme ou unique)
3. Calculer les coefficients de corrélation entre des éléments immobiles potentiels. Si on est dans un précurseur unique, les coefficients de corrélation devraient être élevés ($r > 0,85$).

5.1.4 Détermination d'un précurseur

Le choix du précurseur est probablement l'aspect le plus difficile de la méthode des changements de masse. Toutes les méthodes sauf les ratios d'éléments de Pearce demandent le choix d'un précurseur à partir des échantillons disponibles. Dans le cas d'un précurseur unique, Leitch et Lentz (1994) soulignent l'importance de choisir un précurseur qui se trouve spatialement proche des roches métasomatisées. Certaines études suggèrent de constituer une moyenne de plusieurs échantillons jugés frais comme le précurseur (Baumgartner et Olsen, 1995). D'autres considèrent qu'il est préférable d'effectuer plusieurs analyses du même échantillon (MacLean et Kranidiotis, 1987; Leitch et Lentz, 1994).

Le choix d'un précurseur pose plusieurs problèmes :

1. Le précurseur choisi doit représenter effectivement une roche non-métasomatisée. Ceci peut être vérifié par pétrographie dans certains cas, mais en général cela reste difficile de le confirmer, surtout dans des roches métamorphisées
2. Le précurseur choisi doit représenter le même degré de fractionnement et la même affinité chimique que les roches métasomatisées. Ceci peut être vérifié sur des diagrammes binaires d'affinité chimique tels que TiO_2/Zr vs Zr/Y . Des échantillons de même affinité et de même fractionnement devraient se placer sur une droite passant par l'origine sur un tel diagramme.

5.2 Méthode Isocon

Cette méthode propose une solution graphique simple des équations de changements de masse de Gresens (1967). Les étapes suivantes résument la construction d'un diagramme Isocon (Grant, 1986; Grant, 2005):

1. Trouver un échantillon représentant le précurseur. On peut également créer un composite représentant la moyenne de plusieurs échantillons.
2. Faire un graphique plaçant en abscisse les concentrations de l'échantillon frais par rapport aux concentrations d'un échantillon métasomatisé que l'on veut évaluer en ordonnée.
3. Les éléments peuvent être multipliés ou divisés pour obtenir un graphique facile à visualiser (ex. : $Al_2O_3 * 10$, $SiO_2/10$, etc.).
4. Les éléments immobiles durant le métasomatisme devraient se distribuer le long d'une droite passant par l'origine (ligne « isocon »).
5. L'inverse de pente de la droite « isocon » donne le changement de masse $R^{A/B}$, A étant le précurseur et B la roche métasomatisée. Si on connaît le changement de densité avant/après le métasomatisme, (ratio D^B/D^A), on peut alors connaître le changement de volume associé au métasomatisme. De façon alternative, on peut considérer un volume constant.
6. Les éléments ayant subi des gains auront des pentes supérieures à 1 et ceux ayant subi des pertes auront des pentes inférieures à 1.

La **Figure 19** illustre un exemple de la méthode Isocon appliquée sur un échantillon métasomatisé.

Avantages et inconvénients de la méthode de Grant (1986)

Cette méthode a les **avantages** suivants (Leitch et Lentz, 1994) :

- Simple à utiliser.
- Permet de faire une évaluation visuelle directe de différentes hypothèses (ex : volume constant, Al_2O_3 constant, etc.).
- Permet de faire une évaluation rapide des changements métasomatiques pour un échantillon.
- Comme toutes les méthodes de bilans de masse, elle tient compte de façon efficace de l'effet de fermeture des analyses dû aux changements de masse/volume.

La méthode présente également des **désavantages** :

- Chaque échantillon demande son propre graphique isocon; ce qui devient donc très fastidieux pour des études étendues.
- Choix d'un échantillon précurseur (non-métasomatisé) unique, ce qui n'est pas nécessairement évident. Ne tient pas compte de l'incertitude engendrée par le choix de ce précurseur unique.
- Le choix des multiplicateurs des éléments dans la méthode originale influence la pente de la droite « isocon » (Baumgartner et Olsen, 1995) et donc le changement de masse global.

- La méthode demande d'avoir une idée a priori des éléments qui sont immobiles durant l'altération pour construire la droite.

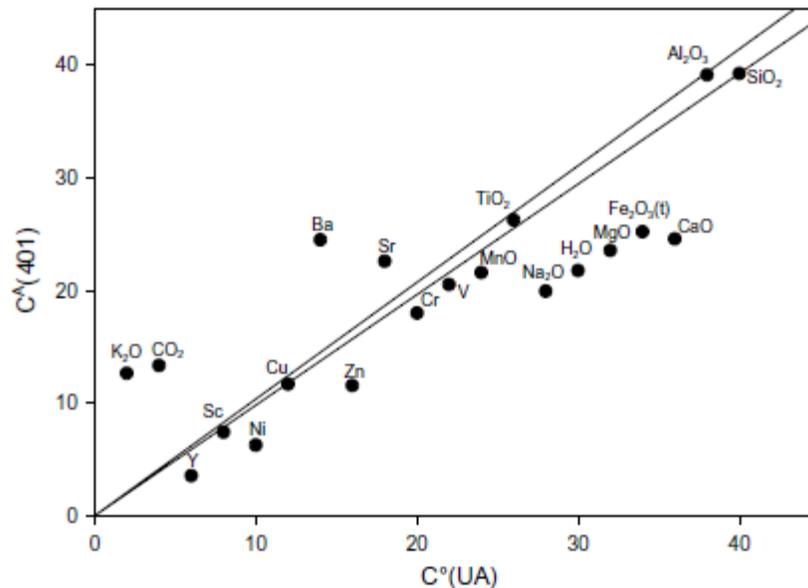


Figure 19. Exemple de diagramme Isocon (tiré de Grant, 2005).

5.3 Modélisation des précurseurs uniques et multiples par analyse d'éléments immobiles-mobiles

Cette méthode d'évaluation du métasomatisme repose sur la modélisation de la composition des précurseurs à partir de graphiques éléments immobiles vs éléments immobiles. Deux cas généraux sont considérés (Barrett et MacLean, 1994) :

- un précurseur unique et initialement homogène, et
- des précurseurs multiples.

5.3.1 Bilan de masse à précurseur unique

Les étapes suivantes pour le cas du précurseur unique sont données dans par Barrett et MacLean (1994) :

- S'assurer que les analyses chimiques données sont fiables pour les éléments immobiles. Convertir Fe_2O_3 en FeO . Normaliser les données à un contenu sans volatiles.
- Identifier des éléments immobiles probables (par exemple, en utilisant une coulée unique).
- Faire des diagrammes X-Y opposant des éléments immobiles potentiels.

4. Calculer les coefficients de corrélation sur les droites. On devrait trouver des corrélations (r) de 0,85 à 0,99 pour des éléments très immobiles sur ces diagrammes.
5. Calculer la composition moyenne et l'écart-type d'un précurseur non-métasomatisé pour tous les éléments, normalisés sans volatiles

NOTE : aucune mention n'est faite sur la méthode d'identification du précurseur, ni sur le nombre de précurseurs à identifier, ni sur l'incertitude engendrée par le choix du précurseur sur les calculs des bilans de masse.

6. Calculer le facteur d'enrichissement (EF) en éléments immobiles pour chaque échantillon : $EF = \frac{\text{élément immobile}_{\text{Précurseur}}}{\text{élément immobile}_{\text{Éch altéré}}}$
7. Calculer une composition reconstruite (RC) pour chaque élément de la roche sur une base anhydre en % poids ou en ppm : $RC = EF * \text{poids\% ou ppm de la roche métasomatisée}$.
8. Le changement de masse est $\text{Changement} = RC - \text{précurseur}$. (Précurseur est la composition du précurseur en poids % ou ppm tel que calculé au point #2) .

Les gains/pertes de masse pour un précurseur unique peuvent être visualisés sur un diagramme X-Y de deux éléments immobiles (**Figure 20**).

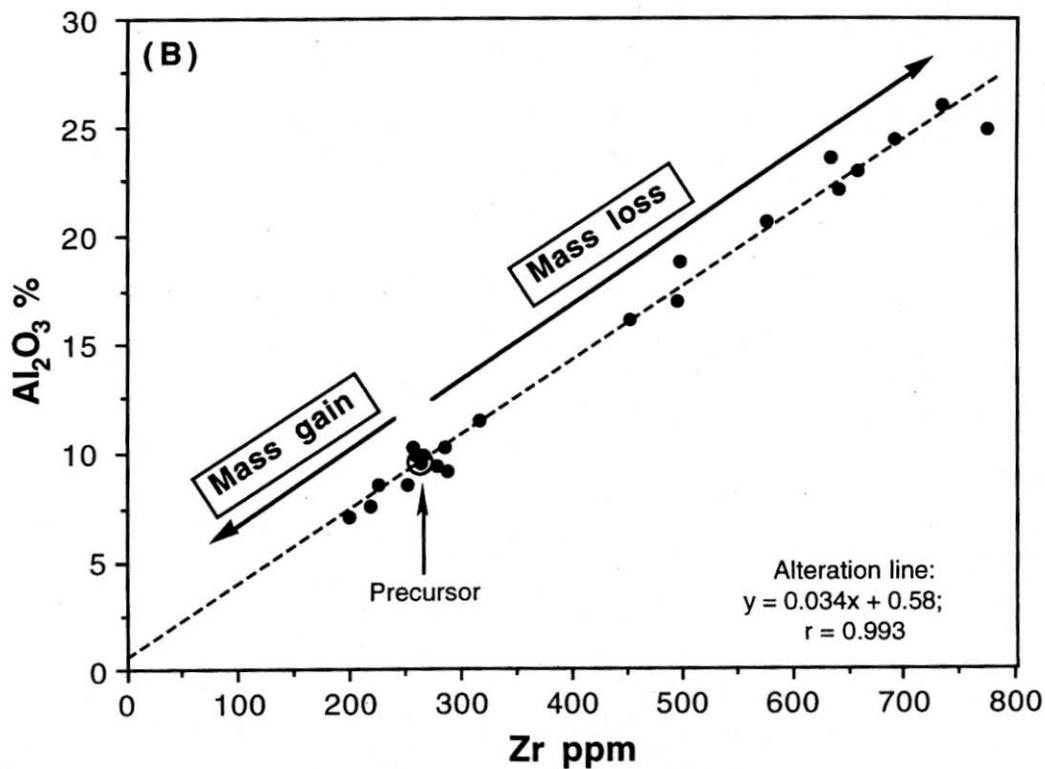


Figure 20. Exemple d'un bilan de masse avec précurseur unique (tiré de Barrett et MacLean, 1994).

Avantages et inconvénients de la méthode à précurseur unique

Avantages

- Permet de calculer rapidement les changements de masse en tenant compte de l'effet de fermeture des analyses.

Inconvénients

- La méthode demande de choisir un précurseur non métasomatisé. Le choix de ce précurseur n'est pas évident et n'est pas abordé dans les différents articles traitant de la méthode (MacLean et Barrett, 1993; Barrett et MacLean, 1994; MacLean et Kranidiotis, 1987).
- Demande un précurseur unique et très homogène, ce qui n'est pas le cas souvent même dans une coulée individuelle (ex. : variation de la proportion de phénocristaux au sommet vs la base).
- Demande une bonne qualité d'analyses d'éléments traces.

5.3.2 Bilan de masse à précurseurs multiples

Le cas le plus général est que les roches étudiées ont une composition originale variable (précurseurs multiples). Cette méthode est examinée en plus de détails dans un projet antérieur du CONSOREM (Gaboury, 2004, projet 2000-2a). Seules les grandes lignes seront reprises ici.

La variation de composition originale des roches ignées est causée par différents processus tels que le fractionnement, la contamination, la séparation mécanique de cristaux dans un magma ou dans une coulée, etc. (Barrett et MacLean (1994). On utilise le terme « ligne de fractionnement » pour désigner la tendance de l'évolution chimique de la roche originale.

Par définition, la ligne de fractionnement pour une série volcanique contient tous les précurseurs des roches d'une certaine affinité. Le changement de masse pour un échantillon métasomatisé est proportionnel à la distance de la ligne de fractionnement établie pour des éléments immobiles, chaque échantillon métasomatisé ayant alors sa propre ligne de changement de masse fixée à l'origine. L'utilisation d'un élément immobile incompatible (ex. : Zr) et d'un élément immobile compatible permet d'obtenir des tendances de fractionnement qui sont à angle droit par rapport à l'effet des changements de masse (**Figure 21**).

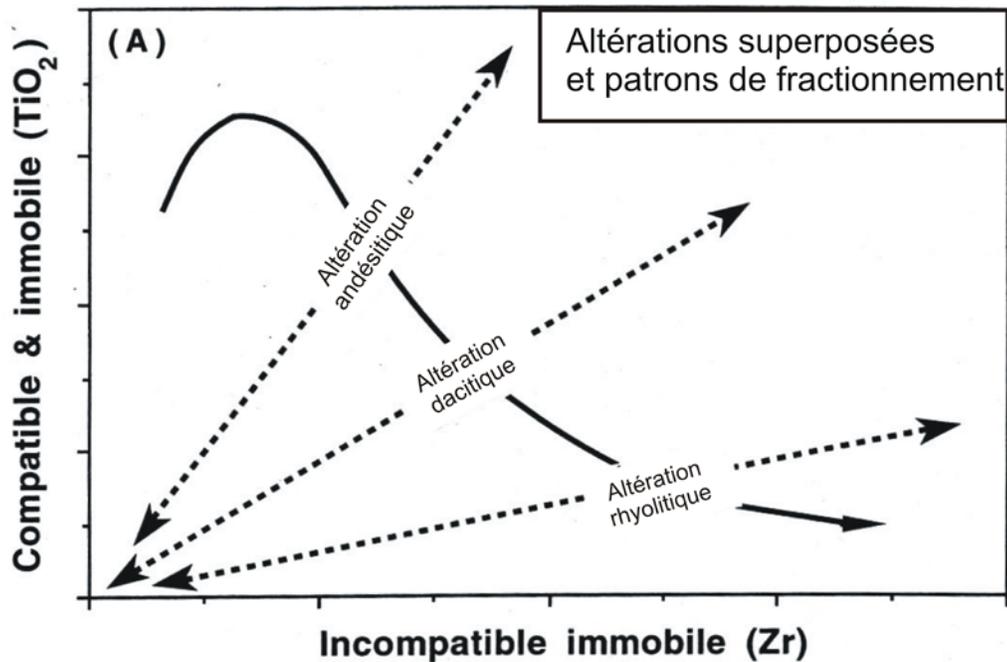


Figure 21. Principe des bilans de masse à précurseurs multiples. L'utilisation d'un élément immobile compatible vs immobile incompatible permet de distinguer le fractionnement des changements de masse (tiré de Barrett et MacLean, 1994).

Barrett et MacLean (1994) donnent les étapes détaillées des calculs de changements de masse pour des précurseurs multiples :

1. Séparer les échantillons en groupes d'affinité en utilisant le diagramme Zr-Y ou un autre discriminant d'affinité.
2. Construire des lignes de fractionnement distinctes pour chaque groupe d'affinité avec Zr ou un autre HFSE (« high-field strength element) comme observateur du fractionnement. Il faut choisir en X un élément très incompatible et immobile et en Y un élément plus compatible et immobile (MacLean et Barrett, 1993).
3. Pour les éléments immobiles
 - a. Placer les échantillons frais sur un diagramme Al₂O₃-Zr ou TiO₂-Zr. Calculer les courbes de fractionnements linéaires ou quadratiques.
 - b. Chaque échantillon a une ligne d'altération linéaire $y = mb$ (croise 0,0 sur les diagrammes X-Y).
 - c. Solutionner mathématiquement l'intersection entre la ligne d'altération et de fractionnement.
4. Pour les autres éléments (mobiles)
 - a. Placer les échantillons frais sur des diagrammes mobile vs immobile (ex : SiO₂-Zr, FeO-Zr, etc.). Si les courbes de fractionnement sont monotones pour

l'ensemble du spectre de fractionnement, c'est correct. Sinon il faut séparer en différentes affinités.

- b. Substituer les valeurs de Zr (3c) dans les équations des oxydes individuels pour obtenir les valeurs de SiO₂, FeO, MgO, etc., dans les précurseurs.
5. Calculer les valeurs de EF, RC, et le changement de masse comme dans le système à un précurseur.

Avantages

- Permet de calculer les changements de masse en tenant compte de l'effet de fermeture des analyses.
- Tient compte de la variabilité des précurseurs.

Inconvénients

- Demande de choisir plusieurs précurseurs pour calculer la ligne de fractionnement. Le choix de ces précurseurs n'est pas évident et n'est pas abordé dans les différents articles traitant de la méthode (MacLean et Barrett, 1993; Barrett et MacLean, 1994). Le choix des précurseurs influence grandement les bilans de masse.
- La séparation en affinités proposée par l'auteur se base en général sur un seul ratio d'éléments, par exemple le ratio Zr/Y, pour séparer en affinités tholéitiques vs calco-alcalines. Si des différences sont dues à des variations d'affinités autres (ex. : une alcalinité qui varie) alors la séparation en affinités devient très complexe.
- Ceci suppose que les suites ainsi identifiées définissent bien aussi les différentes affinités des éléments majeurs des précurseurs.
- Complexité de mise en œuvre; demande par exemple la résolution d'une équation potentiellement quadratique distincte pour chaque échantillon.
- Laborieux en général.

Détermination empirique de la courbe de fractionnement (Bilan de Masse Relatif; Gaboury, 2004)

Pour choisir une courbe de précurseurs qui soit composée des échantillons les plus frais possibles, Gaboury (2004) propose une approche novatrice. Une première courbe des précurseurs est d'abord calculée d'une façon quelconque sur le diagramme d'éléments immobiles. Les échantillons tombant près de cette courbe préliminaire sont identifiés et séparés. Puis, des diagrammes « élément immobile » vs « élément mobile » sont analysés avec ces échantillons. Si la courbe des précurseurs est correcte, alors ces diagrammes doivent montrer des courbes de fractionnement cohérentes. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que la courbe des précurseurs n'est pas bonne et une nouvelle courbe de précurseurs doit être construite. Un logiciel réalisant les calculs nécessaires a été développé au CONSOREM.

5.4 Méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux

Le problème le plus important des méthodes de bilans de masse présentées dans les sections précédentes (diagrammes Isocon et diagrammes d'éléments immobiles) demeure le choix du ou des précurseurs.

La variabilité de composition primaire des roches ignées est relativement restreinte et simple, si on la compare aux variations possibles dans les systèmes hydrothermaux ou sédimentaires. Par exemple, le nombre de minéraux possibles comme phases majeures ou mineures dans les roches ignées fraîches est relativement faible.

Il est intéressant de considérer la possibilité de modéliser la composition en éléments majeurs des roches ignées fraîches à partir de la composition en éléments immobiles. Une telle modélisation permettrait alors de prédire la composition en éléments majeurs d'un échantillon métasomatisé à partir de ses éléments peu mobiles et d'évaluer par la suite le métasomatisme, en comparant la composition modélisée avec la composition réelle telle qu'analysée. Cela reviendrait donc à déterminer la composition probable du précurseur d'une roche volcanique. Une telle évaluation doit obligatoirement se faire à partir des ratios d'éléments immobiles.

Au niveau géologique, on doit faire les hypothèses suivantes préalables à ce genre d'évaluation :

- Les ratios d'éléments choisis doivent pouvoir prédire de façon satisfaisante la composition en éléments majeurs des roches ignées *fraîches*. Ceci peut être vérifié expérimentalement à partir d'échantillons tests de banques de données de roches fraîches suffisamment étendues et provenant de différentes régions ou contextes.
- La banque de données de roches volcaniques choisie doit représenter un éventail raisonnable de variations des compositions/affinités de roches volcaniques *fraîches* ou peu altérées.

La marche à suivre pour cette technique sera donc la suivante :

1. Compiler une large banque de données de roches volcaniques fraîches représentant un éventail large de compositions et d'affinités, et des données pour un certain nombre d'éléments peu mobiles (par exemple, Zr, Y, TiO_2 , Al_2O_3 , Cr et Nb). S'assurer d'avoir une représentativité des différentes compositions et affinités.
2. Calculer les différents ratios possibles entre ces différents éléments immobiles (ex. : Zr/Y , Zr/TiO_2 , Zr/Nb , etc.)
3. À partir de cette banque, modéliser les valeurs en éléments mobiles dans ces roches ignées fraîches (par exemple par réseaux neuronaux). Supposons TiO_2 comme l'élément immobile au dénominateur (ce choix est justifié à la section 5.4.2). On entraîne le système séparément pour chaque élément majeur d'intérêt comme par exemple :
 - a. Modélisation de SiO_2 à partir des ratios Zr/Y , Zr/Nb , Nb/Y , etc.
 - b. Modélisation de Na_2O à partir des ratios Zr/Y , Zr/Nb , Nb/Y , etc.

4. Modéliser la teneur absolue en un élément immobile (ex. : TiO_2) à partir des ratios d'éléments immobiles.
5. Si la modélisation est correcte, on devrait obtenir des coefficients de corrélation élevés sur des échantillons de tests frais ($>0,85$).
6. Calculer les bilans de masse selon les équations données dans la section 5.1.

5.4.1 Choix de la banque de référence de roches peu métasomatisées

Pour établir les relations qui existent entre les ratios d'éléments immobiles et les éléments mobiles pour les roches volcaniques peu métasomatisées, il faut d'abord compiler des données de telles roches. La banque utilisée à la section 2 pour caractériser les roches fraîches était limitée à des roches volcaniques récentes pour en limiter le métasomatisme. Dans la phase actuelle, des diagrammes binaires identifiant le métasomatisme peuvent maintenant être utilisées sur une banque plus large de roches pour enlever les échantillons métasomatisés.

L'ensemble des analyses de roches volcaniques subalcalines de la banque de données Georoc (www.georoc.com) a donc d'abord été regroupé. Ceci représente plus de 40 000 analyses, de komatiites jusqu'à des rhyolites, de tous les âges et de toutes les régions du monde. Les étapes suivantes ont été réalisées :

1. D'abord, tous les échantillons se trouvant dans les champs des roches métasomatisées sur le diagramme de Hughes (sauf pour picrites) et sur le diagramme de Large modifié ont été enlevés.
2. Par la suite, seules les analyses contenant au moins les éléments SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , CaO , MgO , Na_2O , Zr et Fe sous une de ses formes ont été conservées.
3. Zr a été jugé essentiel pour au moins avoir trois éléments immobiles avec TiO_2 et Al_2O_3 .
4. Les valeurs du fer données dans les analyses ont été transformées en Fe_2O_3 selon les caractéristiques individuelles des analyses.
5. Les analyses ont été ramenées à 100 % et sur une base anhydre.
6. Finalement, pour obtenir une représentativité égale des différentes compositions, on a filtré les données pour obtenir la représentation suivante:
 - 10 % de picrites,
 - 20 % de basaltes,
 - 20 % d'andésites,
 - 20 % de rhyolites et
 - 20 % de dacites (selon descriptions originales des roches).

Environ 5 100 analyses ont ainsi été conservées après avoir appliqué le critère du métasomatisme, des éléments analysés et de la représentativité. Ces analyses constituent la base de données de roches peu métasomatisées utilisée par la suite. Il faut noter que la méthode de filtrage des roches métasomatisées *ne garantit pas que ce qui a été retenu ne contienne que*

des roches fraîches. Cependant, cette approche minimise l'importance du métasomatisme dans la banque de référence.

5.4.2 Méthode de traitement par réseaux neuronaux

Caractéristiques du système

L'optimisation a été réalisée par la méthode des réseaux neuronaux (Neurosolutions, 2005). Les paramètres suivants ont été utilisés pour l'optimisation:

- 5-15 neurones ont été utilisés dans le niveau caché selon le nombre d'éléments immobiles testés.
- La règle d'apprentissage de Levensberg-Marquardt (Neurosolutions, 2005) a été utilisée en raison de la convergence très rapide de la solution.
- La banque de référence a été séparée aléatoirement en trois groupes pour l'entraînement
 - 50 % des échantillons pour la détermination des paramètres ;
 - 25 % pour la contre-validation en cours d'entraînement et l'arrêt précoce lors de la diminution de performance sur ce groupe ;
 - 25 % pour des tests a posteriori des résultats.

Tests des éléments immobiles à considérer

Par souci d'applicabilité à des banques de données les plus étendues possible, il est préférable de pouvoir réaliser l'évaluation à partir du nombre le plus restreint possible d'éléments trace. L'éventail d'éléments traces immobiles considérés est Zr, Y, TiO₂, Al₂O₃ et Cr. Ces éléments sont considérés généralement immobiles en contexte d'or orogénique et de VMS (Barrett et McLean, 1994), sauf dans les cas d'altération extrêmes (McCuaig et Kerrich, 1994).

En général, TiO₂ et Al₂O₃ sont analysés. Si on prend l'exemple de la banque de données de compilation interne du CONSOREM de l'Abitibi, contenant 142 392 analyses, on trouve que :

- 46 % sont analysés pour Zr,
- 41 % sont analysés pour Cr,
- 37 % pour Y et 23 % pour Nb.
- 15,4 % des échantillons (soit ~22 000) sont analysés pour tous ces éléments.

Différents réseaux neuronaux ont été testés sur la banque de référence en utilisant d'abord un nombre réduit d'éléments puis en augmentant ce nombre. Les coefficients de corrélation entre les ratios élément mobiles prédits versus réels ont été calculés sur des groupes de tests a posteriori représentant 25 % de la banque. Les résultats sont présentés au **Tableau 1**.

Tableau 2. Coefficients de corrélation (r) entre les valeurs prédites et réelles par réseaux neuronaux, groupes de test.

Ratios d'éléments immobiles	n	SiO ₂	Zr	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃	1014	0,94	0,99	0,96	0,95	0,91	0,73	0,90	0,77
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr	786	0,95	0,99	0,99	0,94	0,91	0,95	0,87	0,84
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Y	786	0,95	0,99	0,96	0,95	0,92	0,75	0,90	0,78
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr, Y	786	0,95	0,99	0,99	0,95	0,92	0,96	0,89	0,84

Les ratios entre trois éléments (Zr/TiO₂, TiO₂/Al₂O₃ et Al₂O₃/TiO₂) sont suffisants pour déterminer l'essentiel de la variation en SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃ et CaO (r > 0.90). Toutefois, pour MgO, K₂O et Al₂O₃ et Na₂O, ils ne sont pas suffisants pour obtenir de bonnes corrélations. Avec l'ajout de Cr, la détermination de MgO et dans une moindre mesure Na₂O augmente sensiblement. L'ajout de Y améliore les résultats de K₂O également. Donc l'idéal est d'avoir Zr, TiO₂, Al₂O₃, Cr, Y.

Méthode de rejet des extrapolations

On parle d'extrapolation sur une régression lorsqu'une valeur nouvelle que l'on veut évaluer se trouve à l'extérieur du champ des valeurs connues pour les variables prédictives du modèle. Dans le cas présent, le domaine de l'extrapolation consiste en des échantillons dont les valeurs se trouveraient à l'extérieur ou aux limites des valeurs des ratios des éléments immobiles de la banque de référence. À l'inverse, l'interpolation désigne les échantillons qui ont des valeurs à l'intérieur des limites des ratios déjà connus. On peut également détecter des problèmes d'extrapolation lorsque les valeurs prédites par un modèle (par exemple pour un élément mobile) sont à l'extérieur des valeurs de la banque de référence.

Toutes les méthodes d'optimisation mathématiques fines comme les réseaux neuronaux sont sensibles à l'extrapolation. Pour diminuer les risques d'extrapolation, on utilisera les étapes suivantes, cumulatives:

1. Enlever du calcul des précurseurs chaque échantillon dont au moins un des ratios d'éléments immobiles est à l'extérieur des valeurs connues dans la banque de référence.
2. Enlever du calcul du bilan de masse d'un élément mobile d'un échantillon toute valeur prédite à l'extérieur des valeurs de la banque de référence.

Le filtrage des extrapolations pourra se faire par logiciel.

5.4.3 Validation empirique de la méthode

Corrélation entre valeurs prédites et analysées pour la banque de données de référence

Les coefficients de corrélation obtenus au **Tableau 1** montrent bien que l'essentiel de la variation en éléments majeurs pour des roches volcaniques fraîches peut être modélisé par des ratios d'éléments immobiles. En utilisant Zr, TiO₂, Al₂O₃, Cr et Y, les coefficients de corrélation sont en général supérieurs à 0,9 (pour SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO). Cela donne des r² d'environ 0,8-0,85 pour ces éléments. Pour Na₂O, K₂O et Al₂O₃, les corrélations sont plus basses, mais quand même acceptables (0,8-0,87). L'origine de ces plus basses corrélations pour Na₂O, K₂O et Al₂O₃ est spéculative. Il est préférable d'utiliser TiO₂ comme élément immobile pour calculer les changements de masse, puisque sa corrélation est > 0,98 pour tous les modèles.

Incertitude sur le changement de masse

On peut calculer les centiles 5 et 95 % pour le changement de masse global de la banque de référence, calculé à partir des éléments immobiles Al₂O₃ et TiO₂. Ce calcul considère que l'ensemble des échantillons de la banque de référence n'a pas subi de changements de masse appréciable. Pour TiO₂, l'intervalle entre ces centiles est de -17 % à +13. Pour Al₂O₃, l'intervalle entre ces centiles est de -11 % à +11 %. Cela signifie que la méthode permet de détecter des changements de masse de plus ou moins environ **±10-15 %**.

De tels intervalles ont été calculés sur les éléments mobiles également. Toutefois, il est certain que la banque de référence n'est pas sans métasomatisme. Les intervalles calculés sont alors fonction de la quantité de métasomatisme de chaque élément et non de la qualité réelle de la prédiction.

Corrélations entre valeurs prédites et analysées pour les roches volcaniques archéennes de la banque de référence

La banque de référence utilisée contient environ 500 analyses provenant de différentes ceintures de roches vertes archéennes (pour le modèle Al₂O₃-TiO₂-Zr-Y-Cr). Il est intéressant d'examiner les corrélations entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles des éléments sur ces roches archéennes dans le but d'y vérifier sa validité.

Tableau 3. Coefficients de corrélations entre les valeurs prédites et analysées pour les volcanites archéennes.

Éléments immobiles	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Corrélation(r)	0,87	0,70	0,94	0,86	0,85	0,86	0,75	0,65

Les corrélations pour SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃, CaO et MgO sont légèrement plus faibles que pour l'ensemble de la banque de référence (de 0,05 à 0,10). Pour Al₂O₃ et K₂O et Na₂O, les corrélations sont plus faibles d'environ 0,15. Pour Na₂O et K₂O, il est probable que ces plus faibles corrélations soient dues à un métasomatisme plus grand de ces roches plus anciennes

que le reste des données. Pour Al_2O_3 , la cause reste spéculative. Toutefois, dans l'ensemble, le modèle est toujours applicable à ces roches.

5.4.4 Exemple d'application à l'échelle locale, pour précurseur unique : Phelps Dodge.

Les rhyodacites de Phelps Dodge dans la région de Matagami au sein de la Sous-province de l'Abitibi ont été choisies en exemple ici, car elles ont déjà fait l'objet d'une étude des changements de masse pour Si, Mg et Fe (MacLean et Kranidiotis, 1987). Les données d'éléments majeurs et traces pour 22 échantillons de rhyodacites plus ou moins altérés et métasomatisés y sont données. Ces analyses ont été traitées dans la méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux.

Altération de l'échantillon « le moins métasomatisé »

L'étude de McLean et Kranidiotis (1987) est basée sur l'identification d'un échantillon « peu métasomatisé » (#18) qui constitue la référence non métasomatisée pour les calculs de changements de masse. Il est intéressant de constater que les auteurs mentionnent dès le départ que même les échantillons peu altérés contiennent de la chlorite en abondance; ceci laisse présager que même l'échantillon le moins altéré peu présenter de l'altération et du métasomatisme.

Les résultats indiquent que même pour l'échantillon le plus frais (#18), SiO_2 , MgO et Fe_2O_3 montrent des ajouts relatifs et absolus importants par rapport au précurseur modélisé (**Figure 22**).

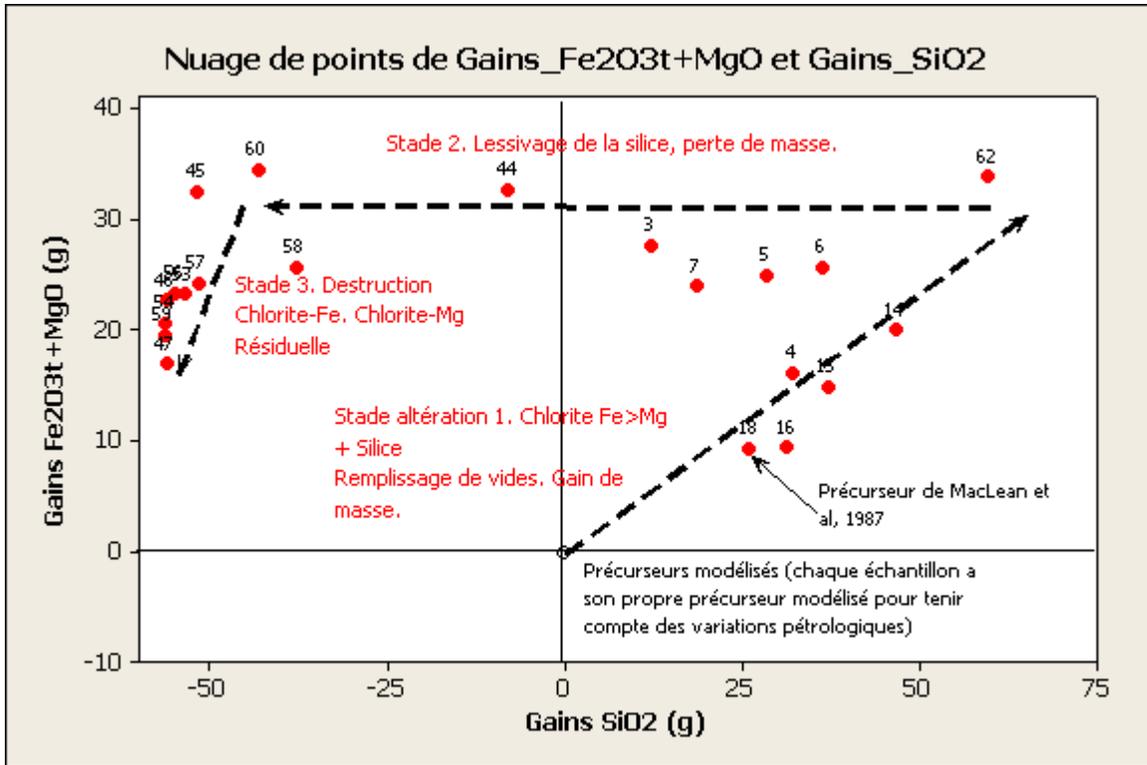


Figure 22. Gains et pertes en SiO₂ vs Fe₂O₃ + MgO pour les rhyodacites de Phelps Dodge dans la région de Matagami, par la méthode de modélisation des précurseurs.

Si on compare la rhyodacite #18 de Phelps Dodge à celles des banques de référence précédemment présentées à la section 2.1 par un diagramme SiO₂ vs. MgO+Fe₂O₃, on constate qu'elle est, pour une teneur égale en SiO₂, nettement plus enrichie en MgO+Fe₂O₃ que les volcanites felsiques récentes (fraîches) et que la grande majorité des volcanites felsiques archéennes (**Figure 23**) et se compare plutôt à des rhyolites altérées en contexte VMS. Il est donc très probable que même l'échantillon le moins altéré est sensiblement chloritisé; ceci va également dans le sens des remarques initiales des auteurs de l'article basées sur les observations pétrographiques.

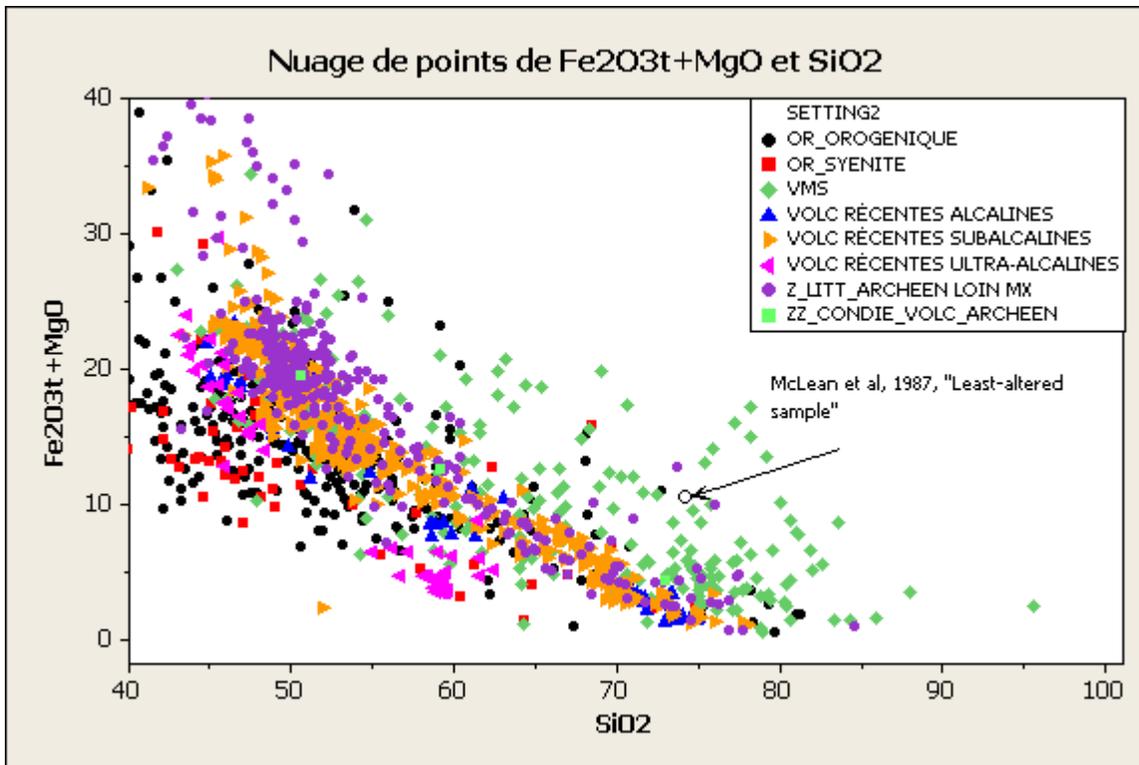


Figure 23. Comparaison des teneurs en SiO_2 vs $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ pour les banques de références vs la rhyodacite la moins altérée de **MacLean et Kranidiotis, 1987.**

L'échantillon le plus frais de MacLean et Kranidiotis (1987), est donc à la fois chloritisé et silicifié. Il est très intéressant de constater que cette combinaison d'altération correspond au stade 1 identifié par les auteurs. Cette altération est une chloritisation et une silicification de la rhyodacite par remplissage des vides et par remplacement. Ceci concorde totalement avec les résultats obtenus par la méthode présentée. La seule différence est qu'en réalité l'échantillon le moins altéré s'avère lui-même altéré et métasomatisé selon le premier stade de l'altération.

Comparaison des résultats de changements de masse

On peut présenter les différents stades d'altération sur un diagramme des changements de masse absolus $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ vs SiO_2 , similaire à celui présenté par Barrett et McLean, 1994 dans un autre article (**Figure 24**). On peut constater sur le diagramme que le précurseur modélisé se trouve encore une fois en amont du premier stade d'altération en chlorite-silice qui était identifié par les auteurs, mais qui n'était pas évident sur le diagramme original en raison de l'altération des roches les plus fraîches dans cet assemblage.

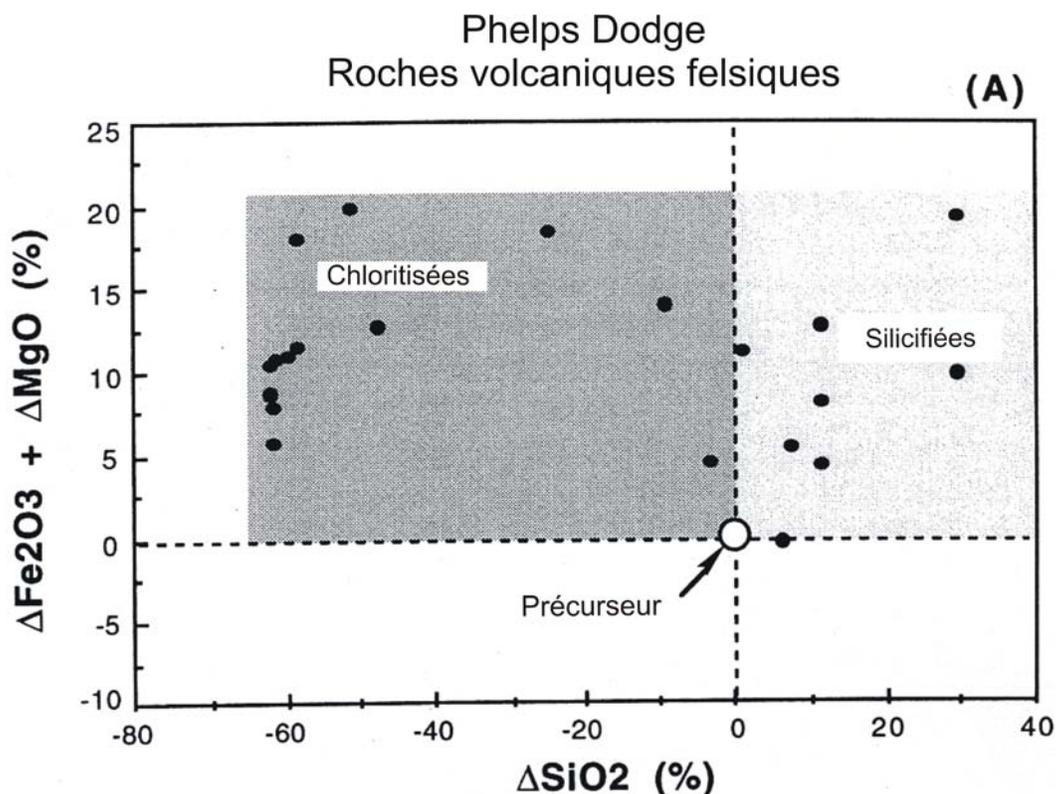


Figure 24. Changements de masse de la rhyodacite de Phelps Dodge, calculé par la méthode du précurseur unique. Tiré de Barrett et MacLean, 1994

Conclusions

La méthode proposée permet d'identifier les mêmes stades d'altération que l'étude originale. La méthode a permis de démontrer que l'échantillon le moins altéré a subi des gains en SiO_2 , Fe_2O_3 et MgO , et un gain global de masse. Ces gains correspondent à l'altération du stade 1 identifiés par les auteurs. L'échantillon le moins altéré fait en réalité partie du stade 1 d'altération.

La méthode a donc permis rapidement de déterminer les pertes et gains d'éléments qui ont été déterminés par une étude détaillée. Elle a aussi permis de préciser de façon importante le premier stade d'altération qui n'était pas bien visible en raison de l'altération des roches les moins altérées.

5.4.5 Exemple d'application à l'échelle locale, pour des précurseurs multiples : Caber Nord.

Un forage (NCB-99-53; GM-58326) toujours dans la région de Matagami a été pris comme deuxième exemple. Il se trouve à proximité du gisement Zn-Cu de Caber Nord au sud-ouest de la ville de Matagami (**Figure 25**). Les changements de masse ont été calculés sur ce forage par la méthode de modélisation des précurseurs.

Ce forage recoupe différentes lithologies, qui sont représentées en section à la **Figure 26**. Toutes ces lithologies ont été échantillonnées (**Figure 27**). Le calcul des bilans de masse (relatifs) le long du forage par la méthode proposée pour les différents éléments permet d'interpréter rapidement toute la séquence du métasomatisme (**Figure 28**).

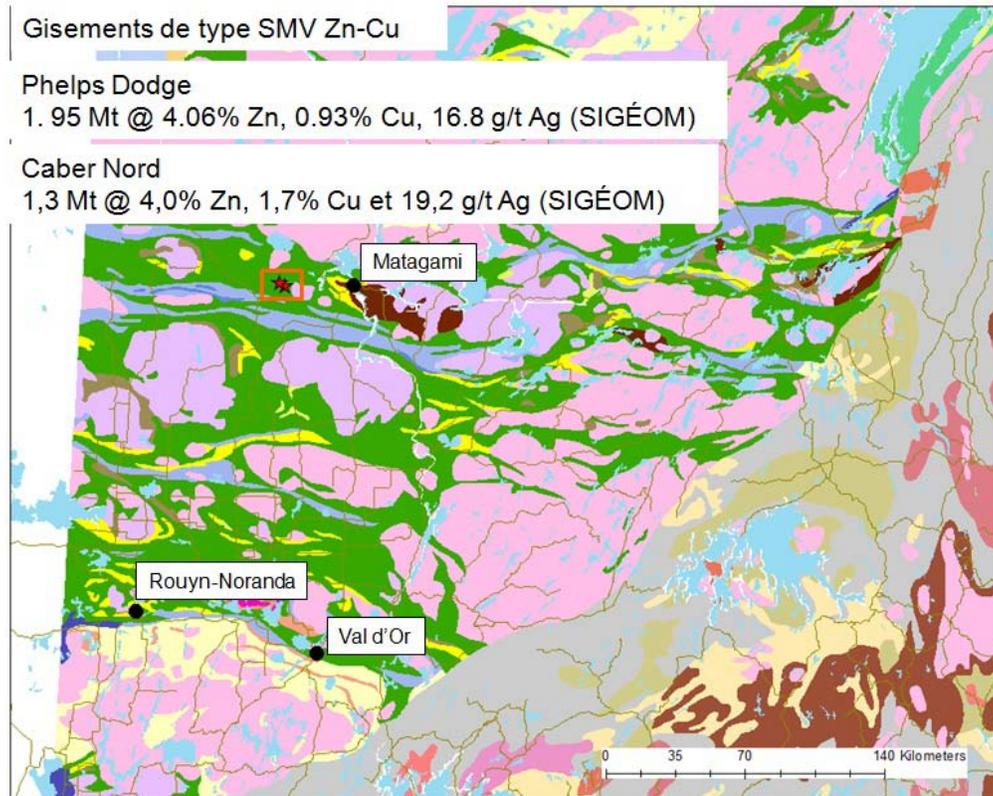


Figure 25. Localisation des gîtes Caber Nord et Phelps Dodge au sein de la Sous-province d'Abitibi (Géologie du SIGÉOM).

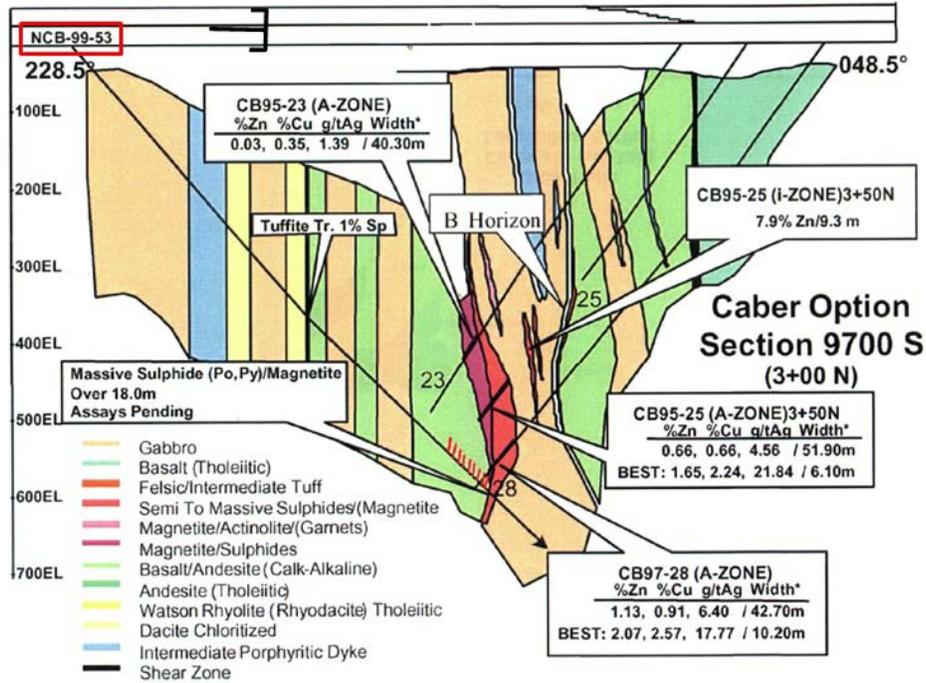


Figure 26. Section N-S contenant le forage étudié (NCB-99-53). Le forage recoupe le mur ("footwall") de la lentille de SMV. Tiré de Salmon et al., 2007.

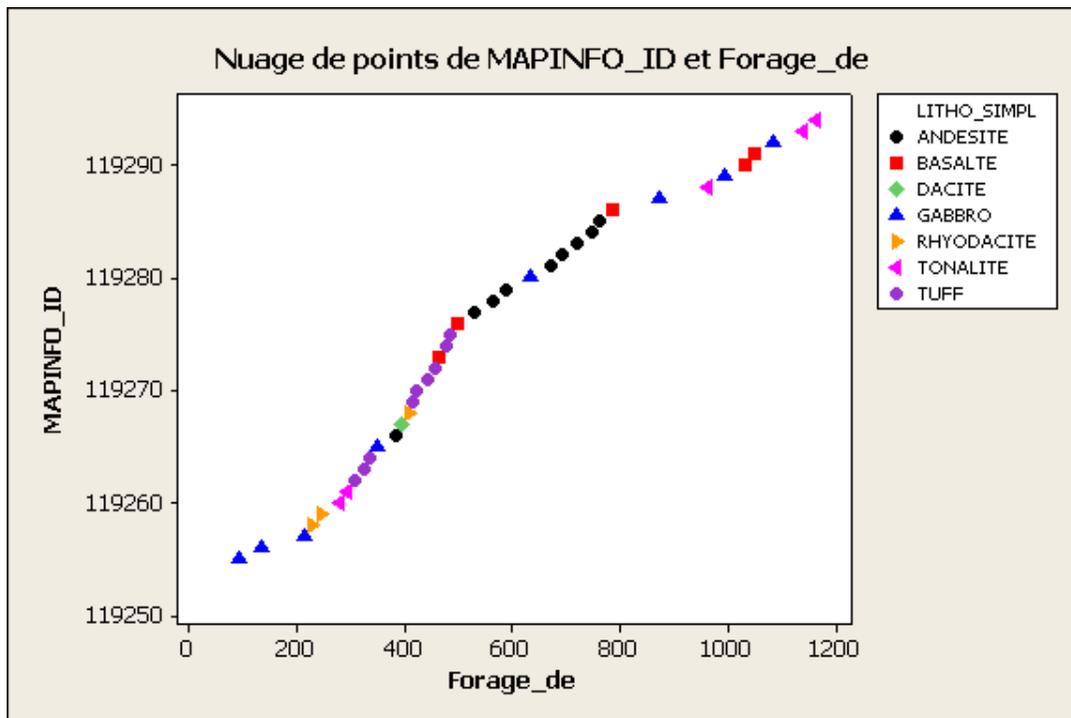


Figure 27. Lithologies échantillonnées dans le forage NCB-99-53.

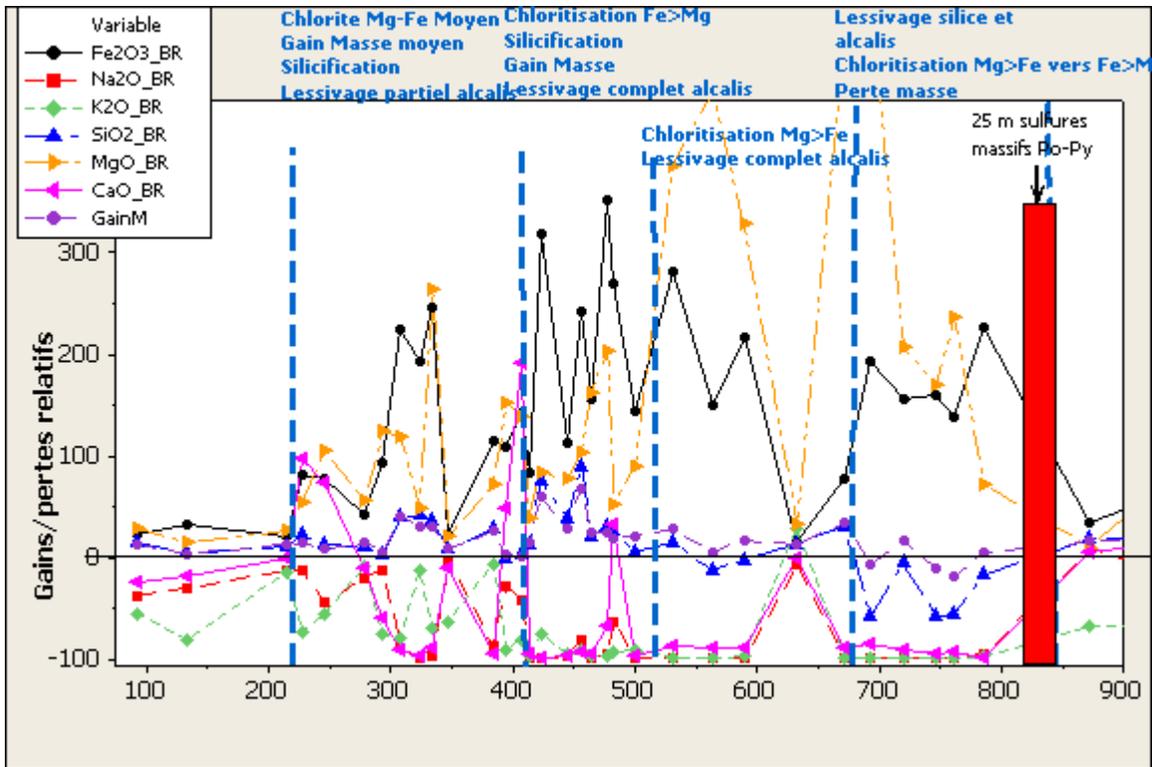


Figure 28. Gains/pertes pour tous les éléments, forage NCB-99-53.

La succession de l'altération observée montre beaucoup de similitudes avec l'altération observée à Phelps Dodge par MacLean et Kranidiotis (1987) et précisée dans la section précédente (**Figure 29**). La première altération rencontrée est une chloritisation Mg=Fe accompagnée d'une silicification. La silicification devient graduellement plus intense et la chloritisation devient plus ferrifère. La suite montre un lessivage progressif de la silice des roches silicifiées et une chloritisation très intense, mais plus magnésienne. Le stade final montre des pertes en silice et chloritisation très intense caractérisée par une transition d'une chlorite très magnésienne vers plus ferrifère.

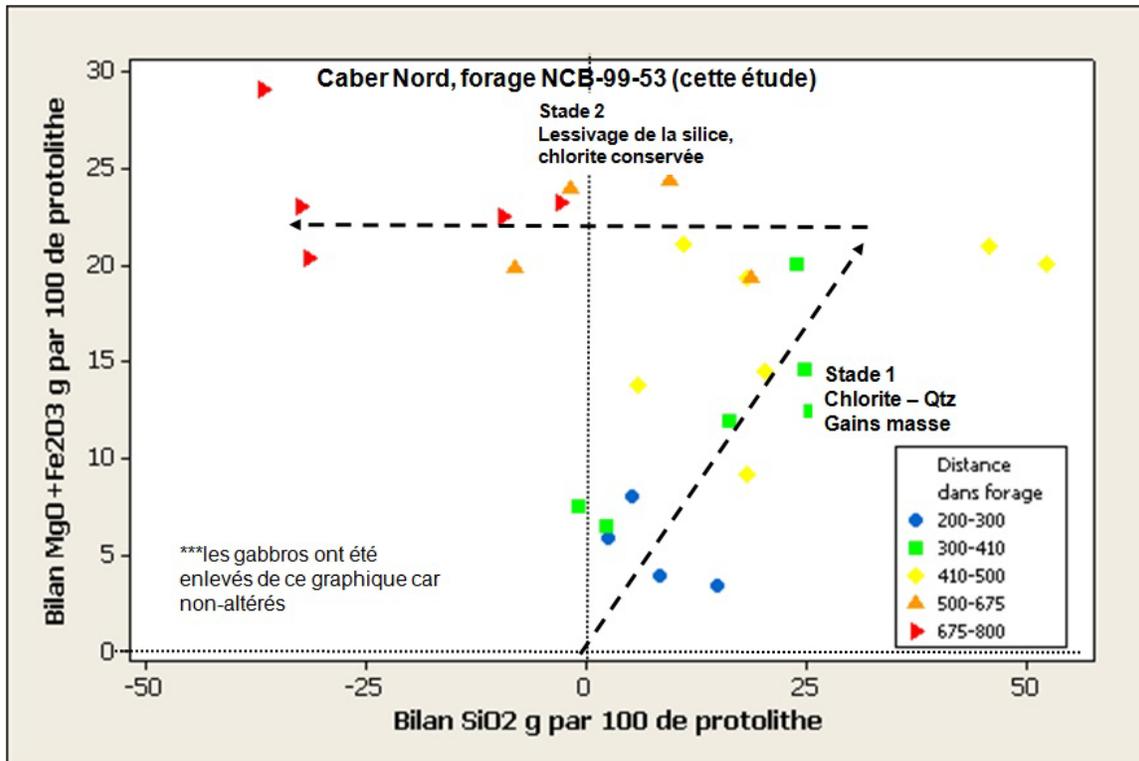


Figure 29. Bilans de masse pour SiO₂ vs MgO+Fe₂O₃, pour les roches du forage NCB-99-53 (sauf gabbros non-altérés).

5.4.6 Exemple d'application à l'échelle locale : mine Red Lake

Cette étude récente et très détaillée porte sur l'altération associée à la « High-Grade zone » du gisement d'or de Red Lake (Cadieux et al., 2006). Elle présente un intérêt certain pour l'évaluation de la méthode de modélisation des précurseurs puisqu'en plus de contenir plusieurs analyses avec éléments traces de différents faciès d'altération, elle comprend une analyse de bilans de masse par la méthode Isocon. Les données d'analyses compilées de Cadieux et al., (2006) ont été traitées par un modèle comprenant Al₂O₃, TiO₂, Cr et Zr comme éléments immobiles (Y est mobile selon les bilans de masse des auteurs).

Le précurseur identifié par l'étude est en fait par une moyenne de cinq basaltes jugés relativement frais par pétrographie. Cet échantillon composite n'a aucun déficit cationique d'alcalis vs aluminium et une perte au feu inférieure à 1 %. Sa composition est donnée dans le **Tableau 3**. La composition donnée par la modélisation est donnée sur la ligne suivante, ainsi que les changements de masse calculés entre le précurseur modélisé et le composite de l'article. On voit que les gains/pertes sont relativement faibles pour la plupart des éléments et sont à l'intérieur de la marge d'erreur de la méthode ($\pm 10-15$ %). Le précurseur choisi par les auteurs semble donc assez peu altéré effectivement. Seul le potassium montre une différence appréciable entre les deux résultats (spilitisation du précurseur de Cadieux et al., 2006?).

Tableau 4. Comparaison du précurseur composite de Cadieux et al., (2006) et modélisation de sa composition par ses éléments immobiles.

	SiO ₂	TiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Composite « peu altéré », Cadieux et al., 2006	50,6	1,01	6,88	10,60	12,55	2,58	0,19
Précurseur modélisé par les éléments trace du composite	51,02	0,96	7,25	10,14	10,41	2,23	0,78
Gains/perte de la modélisation vs composite	-5,5 %	-4,7 %	-9 %	-0,55 %	14,7 %	+10 %	-76 %

Les bilans de masse de l'article original ont été réalisés par des moyennes des échantillons de différents faciès d'altération. Seule l'altération en grenat-magnétite a été traitée.

Les résultats montrent une concordance très nette (**Figure 30**). Ceci était attendu étant donnée la ressemblance entre le précurseur modélisé et le précurseur composite. Seul le potassium diverge. La divergence semble élevée, mais il faut se rappeler que les changements de masse sont exprimés en %; la faible valeur en K₂O du précurseur de Cadieux et al.(2006) rend les changements de masse relatifs très importants en K₂O pour ceux-ci. Quoi qu'il en soit, les résultats concordent quant à l'ajout important de potassium dans les altérations.

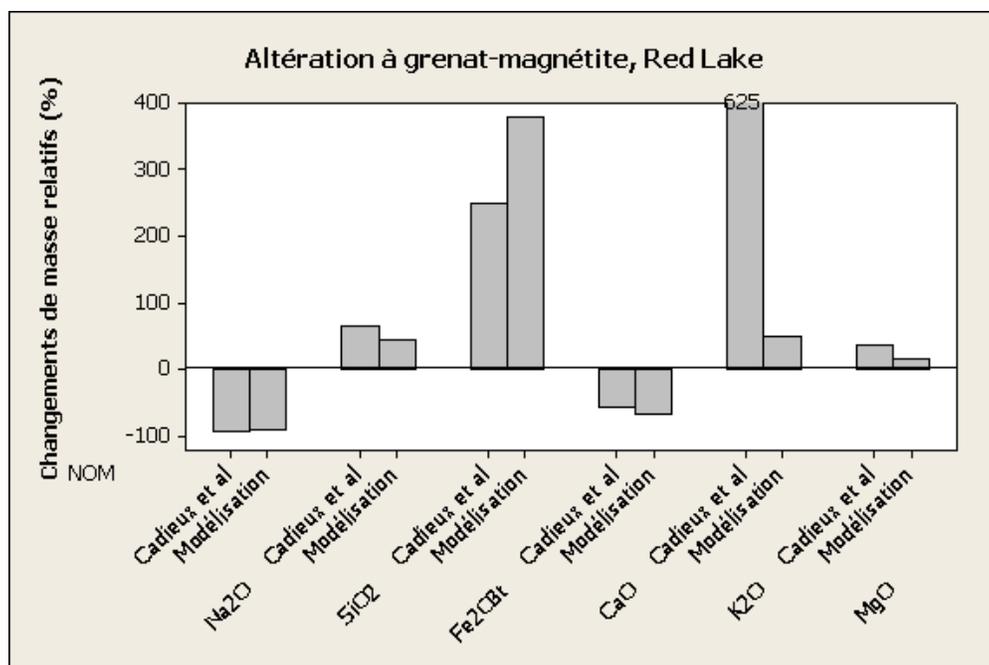


Figure 30. Gains et pertes moyennes pour l'altération en grenat-magnétite calculée par la modélisation du précurseur, comparée avec les résultats originaux, Red Lake (moyenne de 9 échantillons).

5.4.7 Avantages et inconvénients de la méthode de modélisation des précurseurs

Avantages

- La modélisation de la composition du précurseur « raisonnable » permet de calculer tous les bilans de masse de tous les éléments, en termes absolus ou relatifs.
- Chaque échantillon a son précurseur calculé selon ses ratios d'éléments immobiles; pas besoin de choisir ou trouver le précurseur sur le terrain (souvent il n'existe probablement même pas).
- Permet de caractériser de façon aisée le métasomatisme.
- Très facile d'application (une routine logicielle de calcul peut faire le tout).
- Peut être appliqué à des banques de données régionales, contrairement aux autres méthodes de bilans de masse.
- Les résultats pour TiO_2 (changement de masse global), SiO_2 , MgO (avec Cr), Fe_2O_3 et CaO sont estimés très fiables.
- Reconnaît les compositions (c.-à-d. ratios d'éléments immobiles) exotiques et identifie ces échantillons comme « indéterminés ».

Désavantages

- Il faut avoir des analyses avec au moins Zr , et Cr pour obtenir des résultats satisfaisants pour tous les éléments mobiles.
- La méthode ne s'applique pas aux roches alcalines.
- La méthode ne peut donner des résultats pour des roches dont les ratios d'éléments immobiles sont à l'extérieur du domaine de la banque de référence utilisée.
- Une certaine incertitude reste sur K_2O et Na_2O avec les ratios d'éléments immobiles qui ont été testés jusqu'à maintenant. Ceci ne les rend pas inutilisables par contre.
- Il n'est pas garanti que le précurseur calculé soit exactement le vrai. C'est un précurseur « raisonnable ». Mais il est constant tant que les ratios d'éléments immobiles des roches sont constants.

La modélisation des précurseurs est utile en contexte d'exploration lorsque les variations lithologiques sont importantes et que le contexte stratigraphique précis n'est pas bien connu. Elle ne devrait pas remplacer le choix d'un précurseur sur le terrain dans le cas d'études très détaillées (ex. : suivi de l'altération d'une coulée précise dans une mine).

5.5 Ratios d'éléments de Pearce

Une façon différente de considérer les bilans de masse est par l'entremise des ratios d'éléments de Pearce (Pearce, 1968).

5.5.1 Principe de base des ratios d'éléments de Pearce

Les ratios d'éléments de Pearce ont été développés à l'origine pour tester des hypothèses pétrogénétiques, mais peuvent très bien s'appliquer au métasomatisme. Par exemple, on voudrait tester l'hypothèse que le fractionnement de l'olivine, plagioclase et clinopyroxène en différentes proportions expliquent les variations de teneurs en Al, Fe, Mg, Ca et Na d'une série de roches. Par exemple, une paire de ratios permettant de tester cette hypothèse est la suivante :

Si/K vs. $(0,25 \text{ Al} + 0,5 \text{ FM} + 1,5 \text{ Ca} + 2,75 \text{ Na})/\text{K}$ (valeurs molaires; Nicholls et Gordon, 1994).

Si l'hypothèse est correcte, ces deux ratios placés sur un diagramme X-Y donneront une pente de 1 (**Figure 31**). On peut également construire des ratios qui permettent de tester des hypothèses concurrentes ayant des pentes différentes (p. ex. : on veut une pente de -1 pour tester le fractionnement du clinopyroxène vs une pente de 1 pour Olivine-Anorthite-Albite; **Figure 32**).

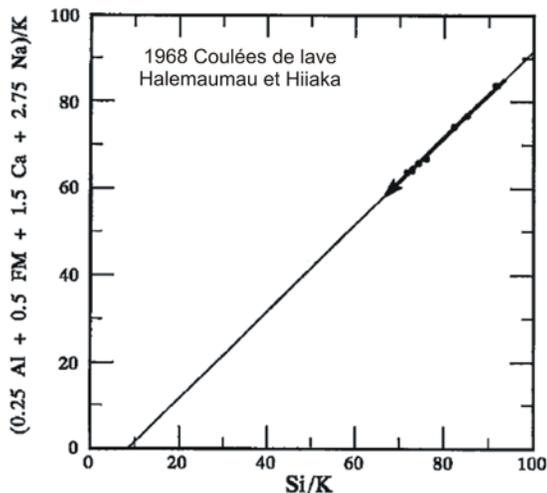


Figure 31. Test par ratios d'éléments de Pearce du fractionnement de l'olivine, plagioclase et clinopyroxène dans des laves basaltiques. Les points se placent sur une droite de pente de 1, ce qui indique que l'hypothèse est correcte.

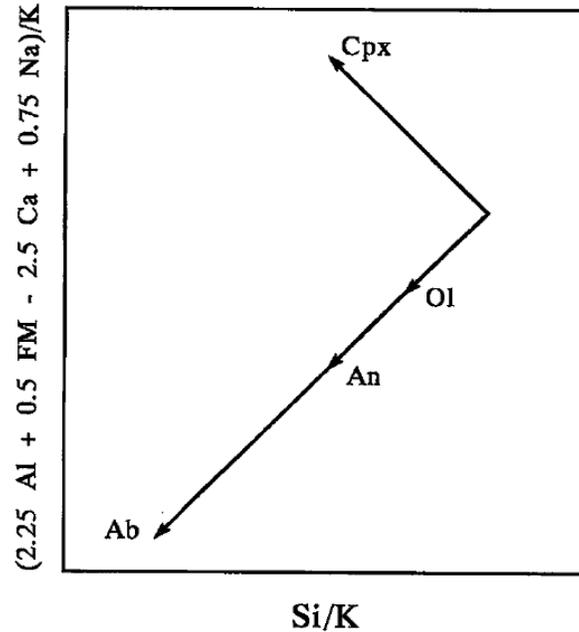


Figure 32. Test par ratios d'éléments de Pearce d'hypothèses concurrentes. Une pente de -1 indique le fractionnement du clinopyroxène seul, alors qu'une pente de 1 indique un fractionnement d'olivine-anorthite-albite en proportions variables

Ce type de ratios est basé sur les équations de transfert de matière de Pearce (1968), qui sont en fait simplement une forme différente d'exprimer les équations de changements de masse vus à la section 5.1. L'équation suivante est à la base des ratios d'éléments de Pearce :

$$T_i = X_j (x_{id} / x_{jd} - x_{ip} / x_{jp}) \text{ (Stanley et Madeisky, 1994).}$$

x_{id} est la concentration de l'élément i dans la roche mère (parent, avant le transfert de matériel), x_{id} est la concentration de l'élément i dans la roche fille (après le transfert de matériel). L'hypothèse demande que l'élément j au dénominateur ne soit pas impliqué dans le transfert de matière. Dans le cas d'hypothèse pétrogénétiques, il s'agirait d'un élément qui n'est pas dans un des minéraux dont on veut tester l'hypothèse (ex. : K_2O dans le test précédent pour Ol-Pl-Cpx). La X_j est la quantité de l'élément j dans la roche. X_j est donc pareil dans la roche mère que dans la roche fille (d et p), et est donc une constante inconnue. La quantité de transfert de matériel est donc directement proportionnelle à la différence des ratios.

Si on construit deux ratios de masse tels que précédemment exprimés sur un diagramme X-Y, on peut étudier la covariation des ratios qui peut être diagnostique d'un transfert de matériel. On obtient encore de meilleurs résultats en transformant les masses en moles pour représenter les stœchiométries des minéraux.

Condition de base d'homogénéité du parent

Une hypothèse est requise par les ratios d'éléments de Pearce. Les roches investiguées par la méthode doivent être reliées à un matériel parent commun qui est homogène. Dans le cas des ratios d'éléments de Pearce, comme il a été vu précédemment, la composition du parent n'a pas à être connue. Cette hypothèse peut être vérifiée de différentes façons. Cela peut être fait par observation géologique (par exemple, par corrélations stratigraphiques) ou en examinant des ratios d'éléments qui ne sont pas impliqués dans le transfert de matériel examiné. Les ratios d'éléments non-impliqués doivent être les mêmes dans un matériel parent qui était homogène. Ceci est raisonnable quand on regarde des roches magmatiques reliées entre elles. Les éléments non impliqués peuvent servir de dénominateurs aux ratios.

5.5.2 Choix des dénominateurs des ratios

Le dénominateur choisi doit être un élément conservé durant le transfert de matériel. On peut examiner des diagrammes binaires entre des éléments potentiellement conservés (c.-à-d. non-impliqués) pour vérifier la conservation (**Figure 33**).

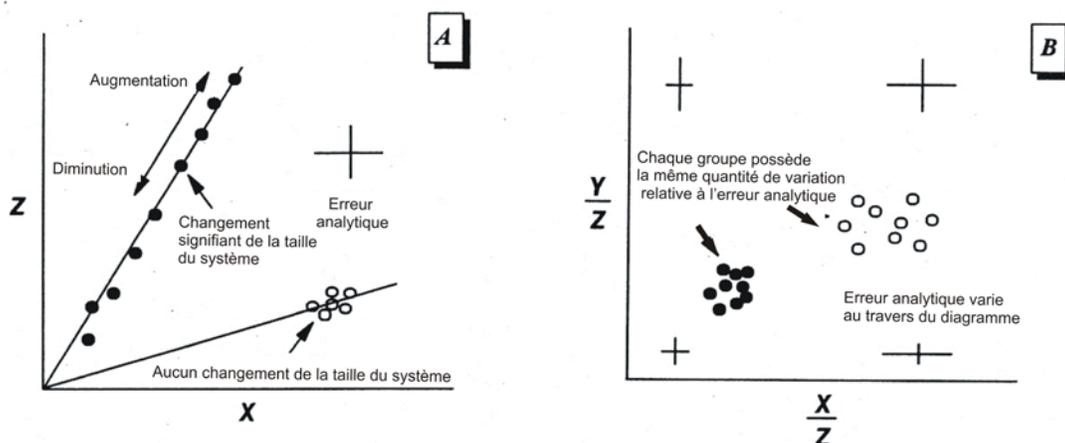


Figure 33. Choix de l'élément au dénominateur dans les ratios d'éléments de Pearce. Si les deux éléments X-Y sont conservés durant le transfert de matériel, ils se placent sur une droite sur le diagramme X-Y. Tiré de Stanley et Madeisky, 1994.

5.5.3 Choix des numérateurs des ratios

La plus grande difficulté des ratios d'éléments de Pearce est de choisir les éléments au numérateur ainsi que leurs coefficients, pour tester l'hypothèse correctement. On peut travailler par essai et erreur, ou par une approche matricielle assez complexe (Nicholls et Gordon, 1994). Quoi qu'il en soit, une fois les ratios déterminés pour une situation donnée, il n'est plus nécessaire de les recalculer.

5.5.4 Ratios d'éléments de Pearce appliqués au métasomatisme

Dans les roches ignées, les ratios d'éléments de Pearce peuvent être étudiés pour distinguer les effets du métasomatisme des effets du fractionnement ignée. Par exemple, pour des roches volcaniques felsiques, on veut tester l'hypothèse que les valeurs en K, Al, et Na sont expliquées par les variations dans les quantités d'albite et d'orthose dans les roches. Comme ces minéraux sont essentiellement les seules phases contenant ces éléments dans les roches ignées felsiques fraîches, cette hypothèse devrait se vérifier. Sinon, cela veut dire qu'il y a eu métasomatisme.

Un diagramme X-Y (et un ratio) permettant de tester cette hypothèse est le suivant : $Na+K/Z$ vs Al/Z (où Z est un élément conservé durant le métasomatisme, comme TiO_2 ou Zr). Sur ce diagramme, une pente de 1 indique que l'hypothèse du fractionnement des feldspaths est correcte. Sinon, il y a métasomatisme (normalement pente inférieure à 1 pour lessivage des alcalis). La composition se déplace verticalement sur le diagramme, car Al est conservé. La particularité d'avoir un élément immobile seul au numérateur d'un des ratios permet de quantifier le métasomatisme en proportion, puisque l'on connaît alors le vecteur de direction du métasomatisme. Ce ratio d'élément de Pearce est particulièrement utile pour les roches volcaniques felsiques.

Cependant, il n'est pas malheureusement toujours possible d'isoler un élément immobile au numérateur d'un des ratios pour tous les cas et alors l'évaluation du métasomatisme devient qualitative seulement.

Ce ratio d'élément de Pearce ainsi que quelques autres sont examinés en détail dans l'Annexe 3.

5.5.5 Avantages et inconvénients de la méthode des ratios d'éléments de Pearce appliqué au métasomatisme

Avantages

- Les variations des ratios d'éléments sont directement proportionnelles à la vraie quantité de transfert de matériel au numérateur du ratio.
- L'utilisation de concentrations molaires dans les ratios permet de relier les transferts de masse aux variations minérales.
- Permet de modéliser le fractionnement des roches et de le distinguer du métasomatisme.
- Si on peut trouver un ratio composé uniquement d'un élément immobile au numérateur (ex. : ratio $Na+K/Z$ vs Al/Z pour les rhyolites) le métasomatisme déplace les roches dans une direction précise du diagramme et on peut le quantifier directement en termes numériques par la suite.

Inconvénients

- On doit faire l'hypothèse que les roches étudiées sont issues d'un précurseur qui était homogène à un moment passé (par exemple, un magma source commun qui a pu fractionner des minéraux par la suite).
- Il n'est pas possible toujours de trouver des ratios dans lesquels un élément immobile est seul au numérateur. Dans ces cas, la détermination du métasomatisme devient qualitative (altéré ou non, pas la quantité).
- La détermination des numérateurs et de leurs coefficients requis pour tester une nouvelle hypothèse pétrogénétique est très difficile.

6 METHODES DE MINERAUX NORMATIFS

Les méthodes des minéraux normatifs visent à calculer la minéralogie idéalisée de la roche à partir des analyses chimiques.

6.1 NORMAT (version préliminaire)

L'approche NORMAT est expliquée en détail par Piché et Jébrak (2004). Un logiciel est disponible et est maintenant librement distribué par l'auteur de la méthode pour effectuer les calculs normatifs. La section actuelle présente un guide d'utilisation de ce logiciel réalisé à partir de tests effectués avec le logiciel à partir de la banque de données de référence de la section 2 et à partir de l'analyse détaillée de l'article. Des observations détaillées sur le comportement des indices et des minéraux normatifs de NORMAT sur la banque de référence sont disponibles à l'**Annexe 4**. Les observations suivantes sont préliminaires. La séquence de calcul de NORMAT est illustrée à la **Figure 34**.

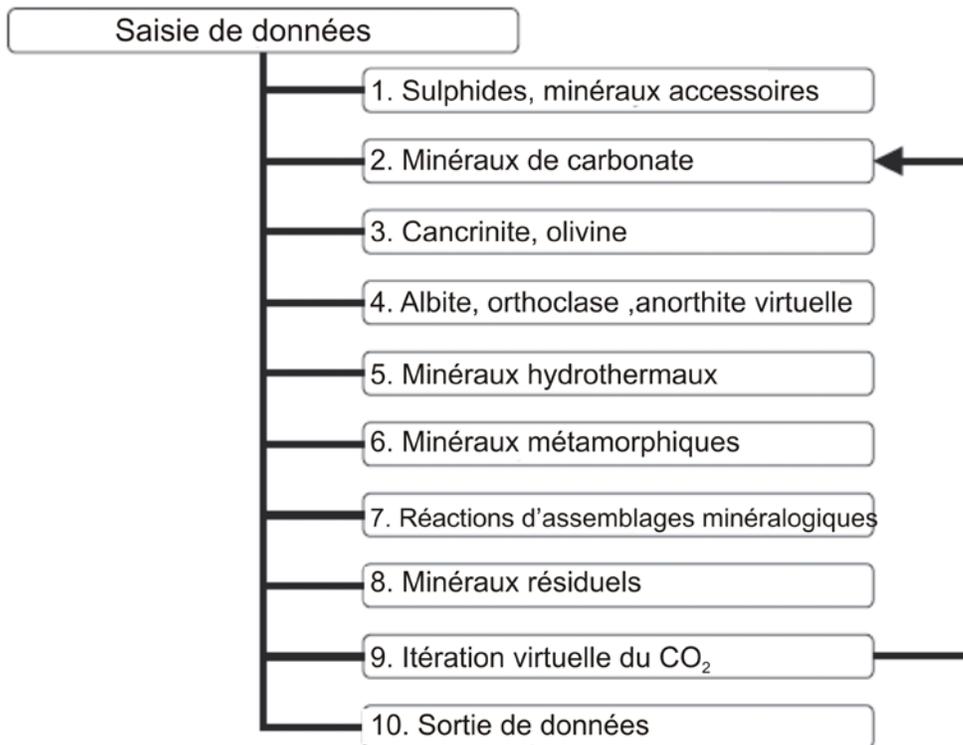


Figure 34. Séquence de calcul de NORMAT (tiré de Piché et Jébrak, 2004).

6.1.1 Séparation des analyses selon les caractéristiques analytiques pour le traitement

Lors du traitement des données, il est important de séparer le traitement des données selon les caractéristiques analytiques des échantillons. Ceci permet de maximiser l'information donnée au logiciel de traitement et de s'assurer que les résultats soient les plus cohérents.

6.1.2 Calcul des minéraux hydrothermaux alumineux et des indices associés ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS

Prérequis lithologiques pour le calcul correct des minéraux hydrothermaux et des indices associés

Pour que le calcul des indices de minéraux hydrothermaux ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS soit correct, le précurseur non altéré de la roche ne doit pas contenir de minéraux peralumineux. Ceci exclut les shales pélitiques, certaines roches ignées peralumineuses et les roches contenant du spinel (comme certaines roches ultramafiques).

Calcul des minéraux hydrothermaux HSer, HChl, HPara, HPyr

Après le calcul des feldspaths et de certains minéraux calciques, NORMAT utilise tout excès d'aluminium restant pour former des minéraux hydrothermaux. Cet excès est semblable à la formation du corindon normatif dans la norme CIPW. Ces minéraux sont la paragonite hydrothermale, la séricite hydrothermale, la chlorite hydrothermale et la pyrophyllite hydrothermale. Ce sont ces minéraux hydrothermaux qui servent à calculer les indices ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS. Piché et Jébrak (2004) indiquent que les minéraux sont produits dans l'ordre : paragonite, puis séricite, puis chlorite, puis pyrophyllite. Cette séquence d'altération correspond à un schéma d'altération typique en contexte de VMS de type Noranda. Cette séquence peut être illustrée ainsi :

Si Excès Al restant après le calcul des feldspaths et de certains minéraux calciques alors :

1. Albite + Excès d'aluminium → Paragonite hydrothermale

Si Excès Al restant après 1 alors :

2. Orthose + Excès d'aluminium → Séricite hydrothermale

Si Excès Al restant après 2 alors :

3. Olivine + Excès d'aluminium → Chlorite hydrothermale

Si Excès Al restant après 3 alors :

4. Quartz + Excès d'aluminium → Pyrophyllite hydrothermale

On constate qu'il est plus facile de former la paragonite et la séricite puisque les premiers excès d'aluminium vont vers ces minéraux (si K et Na sont disponibles). Pour obtenir la pyrophyllite, il faut vraiment un lessivage complet de Fe, Mg, K et Na de la roche.

Il faut noter que ces minéraux hydrothermaux ne sont PAS ceux qui se retrouvent dans les résultats finaux du calcul de la norme, qui sont les minéraux métamorphiques. Les valeurs exactes de ces minéraux ne sont pas rapportées par NORMAT.

Calcul des indices ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS

Ces indices sont calculés à partir des minéraux hydrothermaux précédents. Chacun des indices ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO est de la forme suivante (par exemple, pour IPARA):

$$IPARA = HPara / (HPara + HSer + HChl + HPyro + An + Ab + Cpx + Or)$$

$$IFRAIS = 100 * (An + Ab + Cpx + Or) / (HPara + HSer + HChl + HPyro + An + Ab + Cpx + Or)$$

Il faut noter encore que les valeurs des minéraux hydrothermaux ne sont pas données dans le calcul final de la norme. De même, Cpx et An ne le sont pas non plus. En conséquence, il est

impossible d'examiner le numérateur et le dénominateur des indices et donc, ces indices sont particulièrement opaques et difficiles à décortiquer.

Ratio du Calcium, minéraux hydrothermaux et indices ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS

La norme CIPW produit du corindon normatif (donc un excès d'aluminium) en attribuant l'aluminium successivement à l'orthose, l'albite puis l'anorthite. Le clinopyroxène est produit par le calcium restant après la formation de toute l'anorthite possible. Cette séquence est illustrée à la **Figure 35**. Dans la norme CIPW, on peut facilement savoir au départ si des excès d'aluminium seront présents en calculant le ratio molaire $Al / (2Ca + K + Na)$. Ce ratio correspond au rapport entre Al et les alcalis dans les différents feldspaths. Pour une roche dans laquelle Ca, K et Na sont uniquement dans les feldspaths et sans aluminium en excès, le ratio est de 1. Si le ratio est supérieur à 1, du corindon normatif sera probablement produit (cela dépend aussi de la quantité de phases calciques mineures comme le sphène et l'apatite mais elles sont généralement en assez faibles quantités).

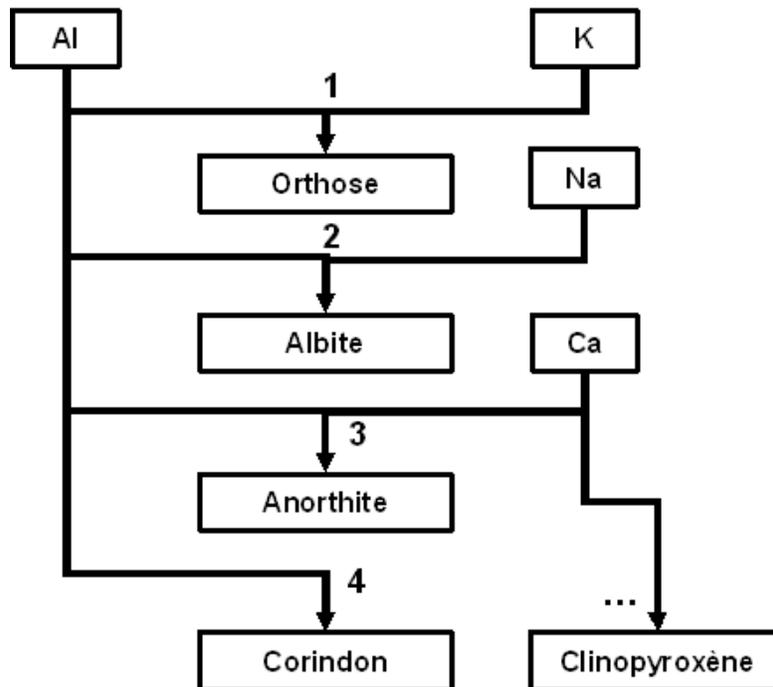


Figure 35. Séquence de traitement simplifiée des minéraux alumineux et calciques ignées, norme CIPW.

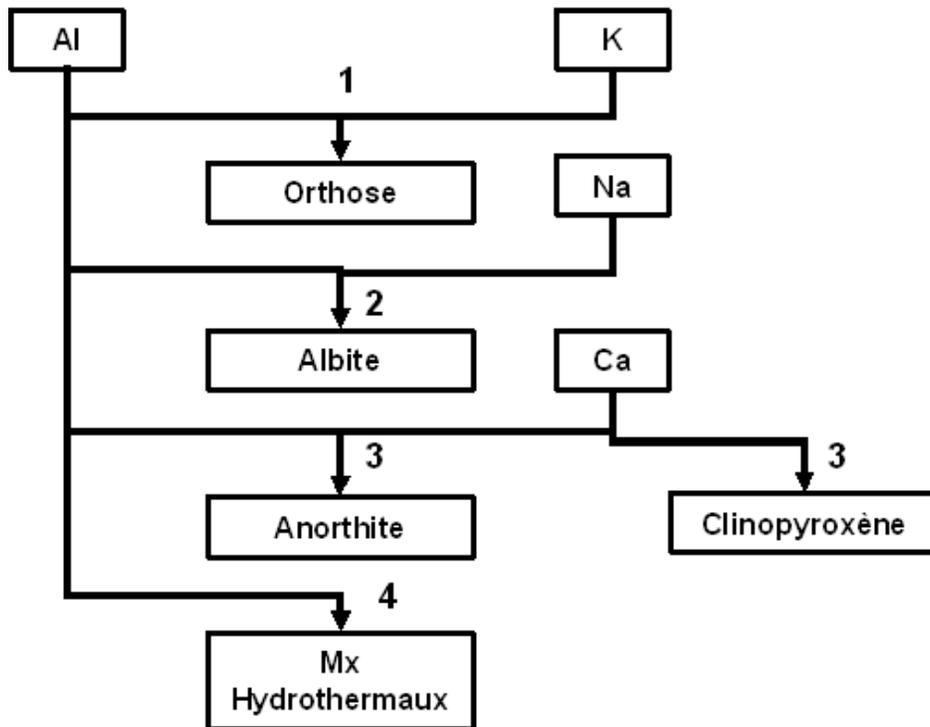


Figure 36. Séquence de traitement simplifiée des minéraux alumineux et calciques ignées, NORMAT.

Cependant, on constate les valeurs du ratio $Al / (2Ca + K + Na)$ pour des roches volcaniques récentes et fraîches (**Figure 37**) varient selon les lithologies. Ce ratio est près de 1 pour les rhyolites mais près de 0,7 pour les basaltes. Cela est dû à la présence de phases calciques non-alumineuses dans les roches mafiques, en l'occurrence le clinopyroxène. Pour les rhyolites, l'essentiel de Ca, Na et K est dans les feldspaths.

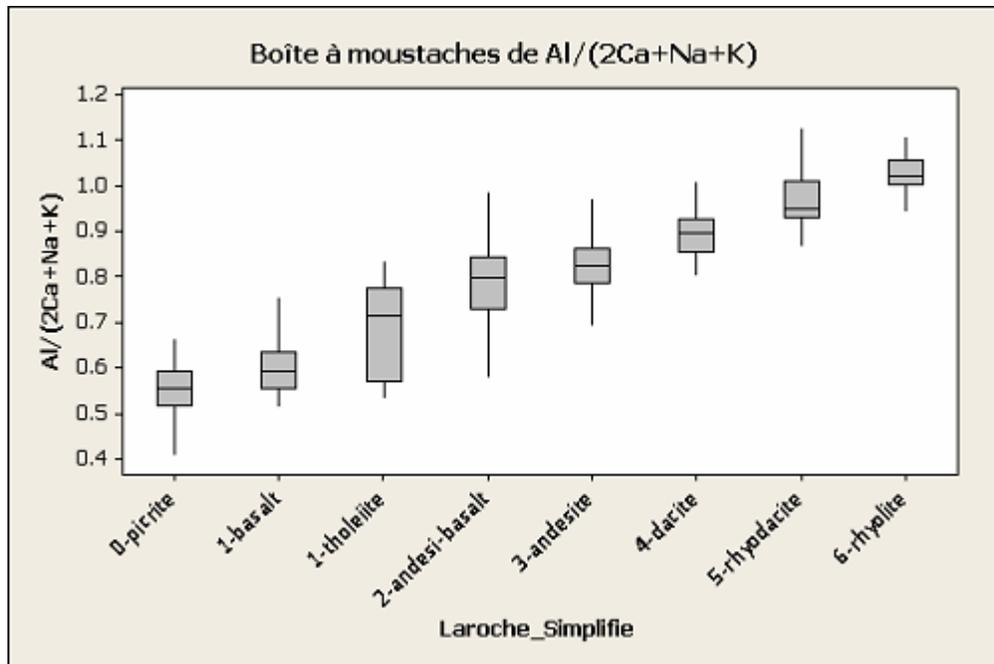


Figure 37. Ratios Al/(2Ca+Na+K) molaire pour différents types de roche.

Pour un basalte, il faudra donc un lessivage d'environ 30 % de Na, K et/ou Ca pour obtenir un excès d'aluminium dans la norme CIPW et donc du corindon normatif. Pour une rhyolite, un lessivage faible de quelques pourcents suffit puisque ces roches sont déjà à la limite de l'excès d'aluminium. C'est donc dire que la quantité de corindon normatif produite par la norme CIPW suite à une même quantité absolue de métasomatisme dépend de la lithologie. On voudrait que pour une même quantité de lessivage pour différentes roches, l'excès d'aluminium produit soit semblable.

Pour régler ce problème, NORMAT propose de séparer le calcium simultanément entre le clinopyroxène et l'anorthite. La séquence de calcul de NORMAT est illustrée à la **Figure 36**. La conséquence de la séparation simultanée du calcium entre les deux minéraux est de provoquer plus facilement des excès d'aluminium qui peuvent ensuite former les minéraux hydrothermaux. La question est de savoir comment séparer le calcium entre ces deux minéraux. NORMAT donne une formule « déterminée empiriquement » sur une base de données d'environ 400 000 analyses, qui est la suivante :

$$\text{Ca Ratio} = (\text{An Virtuel}/5) / ((\text{An Virtuel}/5) + (\text{Cpx Virtuel}/4)/4)$$

Cpx virtuel et An virtuel sont calculés simultanément à partir des valeurs originales en Si et Ca.

Lors de tests effectués, des minéraux hydrothermaux normatifs (indice IFRAIS < 100 et indices IPARA et ISER > 0) apparaissent pour les roches volcaniques intermédiaires à felsiques fraîches des volcans récents (voir section 2 pour la description de la banque ; **Figure 38**). Or, ces roches

ne devraient pas (ou peu) contenir de ces minéraux hydrothermaux (seules quelques-unes tendent vers le champ peralumineux selon Shand,1943). Les seuils à utiliser pour IPARA ET ISER doivent donc être différents de 0. De plus, ils sont dépendants des lithologies (voir Annexe 4). Par contre, aucune des roches volcaniques récentes ne présente des valeurs de ICHLO et IPYRO supérieure à 0. Des valeurs non nulles de ces indices indiquent donc une altération.

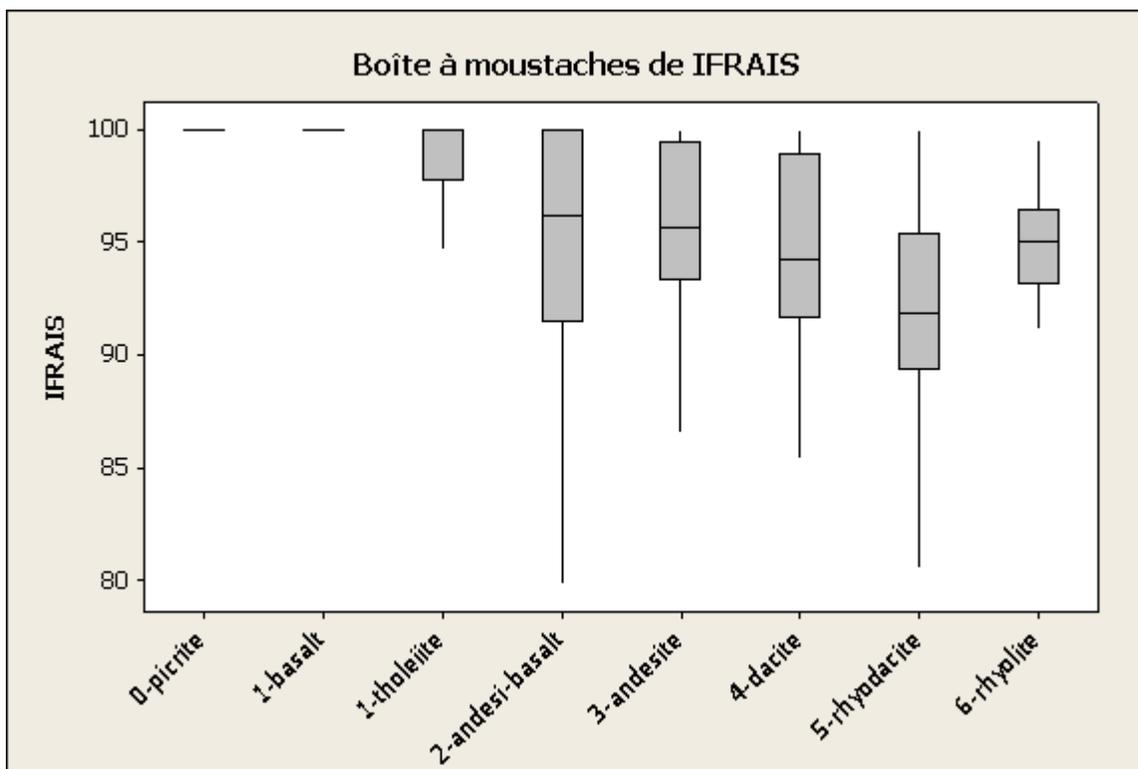


Figure 38. Dépendance de l'indice IFRAIS aux lithologies, roches volcaniques récentes.

La justification de NORMAT pour le « Ca Ratio » et la séparation simultanée du calcium entre anorthite et cpx est que cela permet de mieux détecter les altérations faibles. Il semble qu'un peu trop de calcium soit dirigé vers le clinopyroxène par NORMAT pour les roches volcaniques felsiques, puisque des excès d'aluminium, et donc des minéraux hydrothermaux, se forment même pour des roches fraîches.

Non-utilisation des éléments volatils dans le calcul des minéraux hydrothermaux

Les tests effectués à partir d'analyses pour lesquelles les éléments volatils ont été enlevés (LOI, H₂O+, H₂O-, CO₂ tous absents) ainsi qu'un examen attentif de la méthode telle que publiée indiquent que les minéraux hydrothermaux normatifs (HSer, HChl, HPara, HPyr, qui contiennent H₂O dans leur structure) sont produits même en l'absence d'eau ou de perte au feu dans l'analyse. En effet, l'eau des analyses n'est pas utilisée comme élément limitatif pour la formation des minéraux hydrothermaux ni pour la formation des minéraux métamorphiques.

Dépendance des indices ISER, IPARA, ICHLO, IPYRO ET IFRAIS aux lithologies

L'article original sur NORMAT indique que les indices ISER, IPARA, ICHLO ET IPYRO sont dépendants des lithologies. Par exemple, ICHLO tend à être plus haut pour les volcanites mafiques altérées par l'abondance de fer et magnésium dans le précurseur. Par contre, l'article mentionne que IFRAIS est en principe indépendant. Les tests effectués à partir de roches volcaniques fraîches montrent toutefois que IFRAIS est également dépendant des lithologies (Figure 39).

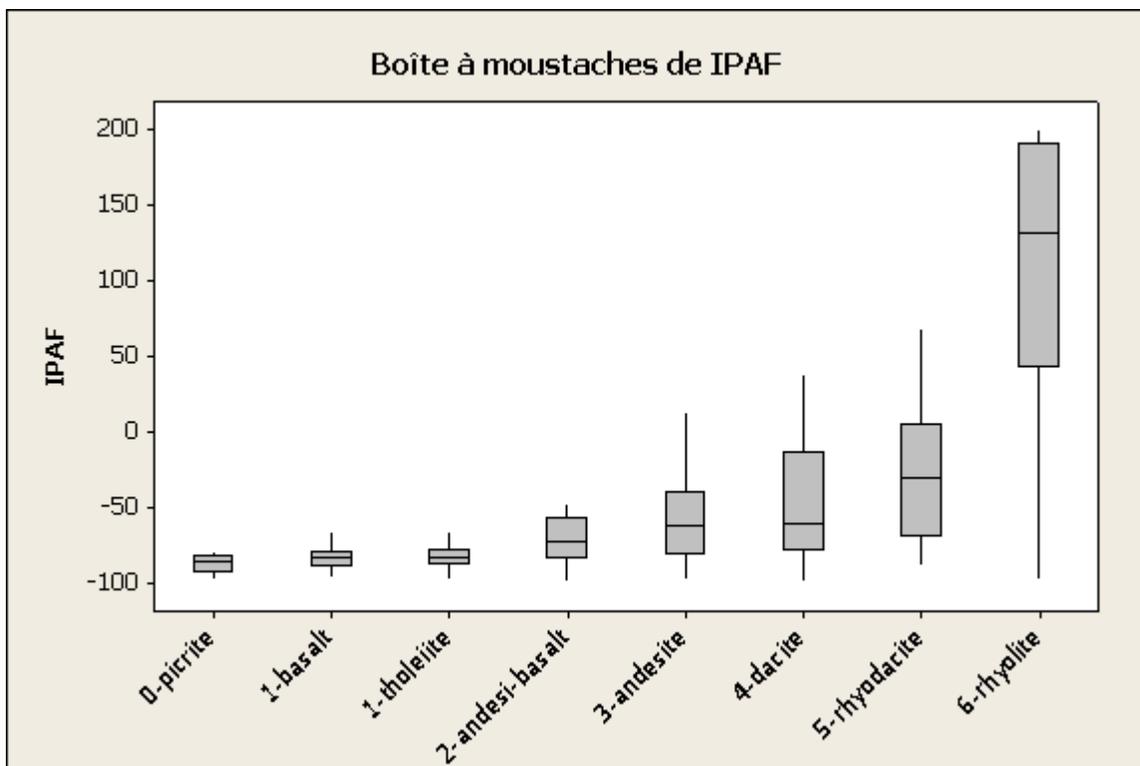


Figure 39. Dépendance de l'indice IPAF aux lithologies, roches volcaniques récentes.

6.1.3 Analyse du fer et les minéraux normatifs ferrifères

Certains minéraux métamorphiques contiennent Fe^{+3} plutôt que du Fe^{+2} , par exemple l'épidote. La magnétite contient également 50 % de Fe^{+3} . Des tests ont été effectués sur des analyses pour lesquelles le fer a été donné sous les deux formes tout en indiquant au logiciel de calcul d'utiliser les valeurs originales du fer. Pour évaluer l'influence de l'absence de Fe^{+3} dans une analyse, les valeurs de Fe^{+3} ont toutes été fixées à 0 dans un premier essai, et à 0,001 dans le deuxième essai, alors que les valeurs de Fe^{+2} ont été laissées aux valeurs analysées.

De façon surprenante, de la magnétite et de l'épidote normative ont été produites dans les deux essais même en l'absence de Fe^{+3} dans les analyses. Le Fe^{+3} ne semble donc pas en fait comptabilisé dans les calculs normatifs.

6.1.4 Calcul du CO₂ normatif, de la perte au feu analytique, de et de l'indice IPAF

Séquence de calcul du CO₂ normatif et de IPAF

Si le CO₂ n'est pas analysé, le calcul du CO₂ normatif se fait de la façon suivante:

- NORMAT commence par assigner une valeur de CO₂ temporaire de 0.
- NORMAT forme les carbonates normatifs (0 au départ).
- NORMAT fait ensuite le calcul des minéraux métamorphiques normatifs au faciès schiste vert.
- La somme de l'eau nécessaire pour former les minéraux métamorphiques est calculée.
- NORMAT compare la somme de l'eau nécessaire avec la perte au feu analytique.
- Si les deux sont égaux, c'est terminé et le CO₂ normatif est le CO₂ temporaire.
- Sinon, NORMAT assigne une petite partie de la perte au feu à du CO₂ temporaire (de façon incrémentale).
- Retour au départ avec une valeur de CO₂ temporaire un peu plus élevée.

La formule suivante permet le calcul de l'indice IPAF :

$$\text{IPAF} = (\text{PAF} - \text{PAF MIN}) / (\text{PAF MAX} - \text{PAF MIN})$$

PAF est la perte au feu analysée. PAF MIN est la quantité de perte au feu nécessaire pour accommoder la minéralogie normative métamorphique (normale) d'une roche, sans carbonates. PAF MAX est la quantité de perte au feu nécessaire si on prend tout le CaO, MgO, FeO et MnO de la roche et qu'on en fait des carbonates.

Prérequis lithologiques pour le calcul correct du CO₂ normatif et de l'indice IPAF

À partir de l'article original sur NORMAT et des tests effectués, on peut dire, que, pour que le calcul du CO₂ normatif, les conditions suivantes doivent être remplies :

- 1) le CO₂ a été analysé. Le CO₂ normatif est alors égal au CO₂ analysé si l'option du CO₂ est fixée à « Estimé » dans le logiciel ;

OU

- 2) le CO₂ n'est pas analysé, mais la perte au feu l'est, ET la roche ne contient que H₂O+, H₂O- et CO₂ comme volatils (donc pas de sulfures par exemple) ET la roche est métamorphisée au faciès des schistes verts ET la roche ne contient pas d'excès de H₂O- (causé par exemple par la présence d'argiles dans la roche) ;

OU

- 3) le CO₂ n'est pas analysé, mais la perte au feu l'est ET le soufre est analysé ET la roche est métamorphisée au faciès schiste vert ET la roche ne contient pas d'excès de H₂O-.

Il faut noter que si la perte au feu ni le CO₂ ne sont analysés, alors le calcul du CO₂ normatif ne peut être correct.

Des valeurs négatives de IPAF sont produites si la roche n'est pas au faciès schiste vert (roche plus anhydre, soit non-métamorphisée ou amphibolite-granulite). Dans ce cas, la roche contient en réalité moins de perte au feu réelle que sa composition schiste vert estimée (PAF < PAF MIN). L'évaluation du CO₂ normatif est alors également incorrecte. Des valeurs de IPAF supérieures à 100 peuvent être produites si d'autres volatils comme S ou H₂O- sont présents dans la roche et n'ont pas été analysés (la perte au feu réelle est alors plus grande que celle attribuable seulement aux carbonates potentiels).

Calcul de la perte au feu analytique

Dans le but de tester l'influence de l'absence d'éléments volatils fournis à NORMAT sur les analyses, une série d'analyses dans lesquelles tous les volatils ont été enlevés ont été traitées. De façon surprenante, la sortie a donné des valeurs de PAF₁₀₀ (qui normalement devrait être la somme des volatils analysés) supérieure à 0. Ces valeurs semblent inexplicables.

Dépendance de l'indice IPAF aux lithologies

L'indice IPAF est décrit comme étant indépendant aux lithologies (Piché et Jébrak 2004). Toutefois, IPAF montre un comportement curieux sur les volcanites récentes (**Figure 39**). Les volcanites mafiques montrent, comme attendu, des valeurs de IPAF à près de -100. Progressivement, toutefois, les valeurs de IPAF augmentent vers les lithologies felsiques, et deviennent près de 100 pour les rhyolites. Aucune de ces roches n'est en principe carbonatée. Cependant, il faut dire qu'elles violent le principe selon lequel NORMAT devraient être appliquée au faciès des schistes verts seulement.

6.1.5 Avantages et inconvénients de NORMAT

Avantages

- Calcul rapide de la minéralogie normative de la roche.
- L'évaluation du CO₂ normatif est efficace pour la grande majorité des roches au faciès schiste vert et permet une évaluation efficace de la carbonatation.
- Efficace pour la détection des minéraux d'altération hydrothermaux en contexte de VMS de type Noranda (indices IFRAIS, IPARA, ISER, ICHLO ET IPYRO).

Inconvénients

- Donne le résultat final en tant que minéraux d'altération formés, mais ne donne pas le processus d'altération à partir de la roche fraîche.

- La séquence de calcul des minéraux d'altération hydrothermaux est basée sur un type précis de gisement, c.-à-d. VMS de type Noranda. La séquence n'est pas nécessairement la même pour d'autres types de gisements, même VMS (ex. : type Mattabi, la séricite est au centre de la zone du mur et la chlorite est périphérique).
- Les indices IFRAIS et IPAF semblent dépendants des lithologies pour des roches non-altérées.
- La séquence de calcul est opaque; les minéraux hydrothermaux HPara, HSer, HChlo et HPyro servant au calcul des indices ne sont pas disponibles dans le résultat. Il est donc impossible de décortiquer ces indices en tant que numérateur et dénominateur.
- Les calculs de IPAF et CO₂ normatifs ne s'appliquent qu'à des roches au faciès des schistes verts ne contenant pas d'autres volatils que H₂O+ ou CO₂ (si ces autres volatils ne sont pas analysés).
- Donne toute une série d'indicateurs et de minéraux mais il est difficile de savoir lesquels utiliser selon le contexte.

6.2 Combinaison de NORMAT et de la méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux

Comme il a été mentionné précédemment, NORMAT donne le résultat final de l'altération mais ne permet pas de connaître le processus d'altération (création ou destruction de minéraux par rapport au précurseur).

La méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux permet de calculer la composition idéale du précurseur. Il peut être envisagé de calculer la minéralogie normative schiste vert par NORMAT de ce précurseur. Par la suite, les changements minéralogiques entre le précurseur et la roche altérée pourront être calculés.

NORMAT permet de calculer les minéraux normatifs en pourcentage poids, pourcentage molaire ou pourcentage volume. Si on calcule la minéralogie normative en pourcentage poids, on peut calculer les gains ou pertes de minéraux durant l'altération de façon absolue (g), qui tient compte du bilan de masse global de la roche :

$$\Delta MA_{\text{minéral}} = (C_{\text{TiO}_2, \text{frais}} / C_{\text{TiO}_2, \text{méta}}) * C_{\text{minéral, méta}} - C_{\text{minéral, frais}} \text{ (pour 100 g de précurseur).}$$

Cette approche de bilans de masse de minéraux a déjà été proposée par Cheng et Sinclair (1995), à partir de leur propres calculs de minéraux normatifs métasomatiques (déterminés à partir des modes – observations).

La **Figure 40** montre un exemple des gains/pertes de minéraux durant l'altération pour le forage NCB-99-53.

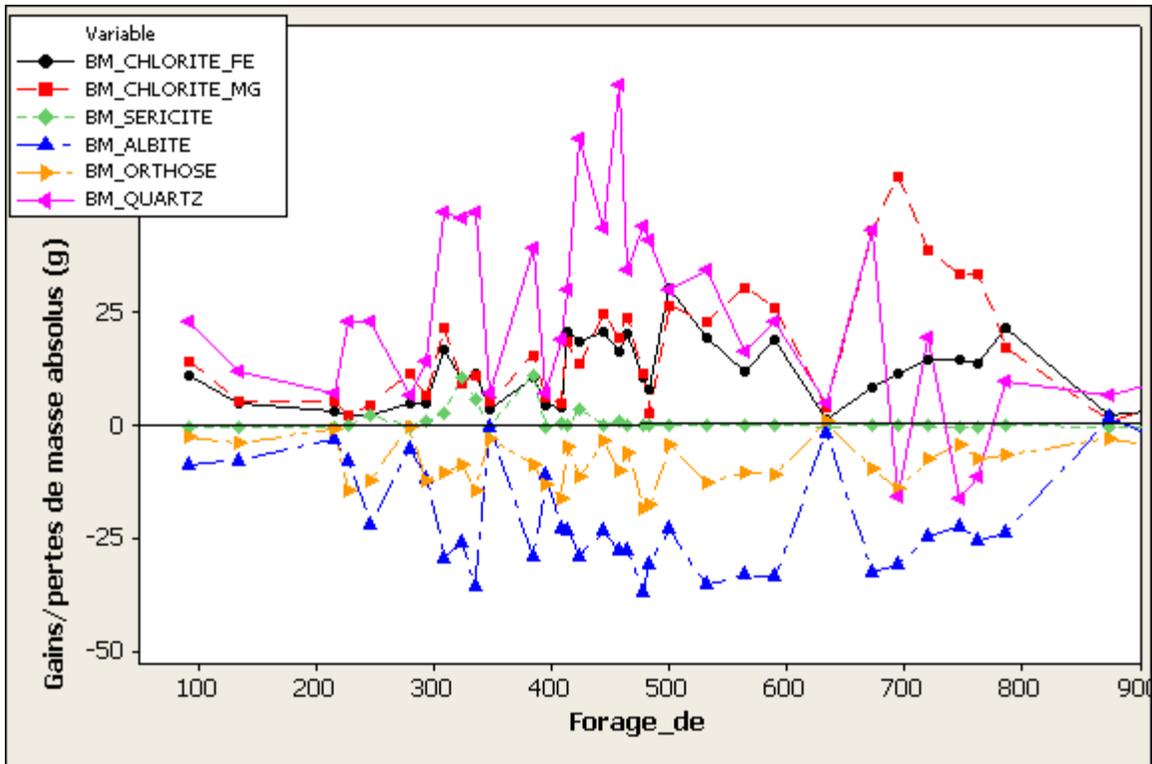


Figure 40. Bilan de masse des minéraux normatifs pour le forage NCB-99-53.

7 CONCLUSIONS

Un traitement optimal du métasomatisme passe de façon nécessaire par les méthodes de bilans de masse. Les ratios d'éléments simples et les diagrammes binaires d'éléments permettent d'identifier positivement les roches métasomatisées mais ne permettent pas d'obtenir une information fiable sur les processus métasomatiques.

Le projet actuel a permis de développer une méthode de calcul de la composition idéale en éléments majeurs d'une roche métasomatisée à partir de ses ratios d'éléments immobiles. Cette méthode fera l'objet de raffinement et de tests supplémentaires dans la phase 2 du projet. Cette approche permet de rendre pratique et facile l'utilisation des bilans de masse en exploration.

Les méthodes de minéraux normatifs permettent de connaître le résultat minéralogique final du processus d'altération. La combinaison de NORMAT et de la méthode de modélisation des précurseurs par réseaux neuronaux permet maintenant de connaître tous les paramètres de l'altération et du métasomatisme :

- L'état final (chimique) d'un échantillon est donné par l'analyse chimique de la roche altérée.
- L'état final (minéralogique) d'un échantillon est calculé par NORMAT.
- L'état initial (chimique) d'un échantillon est calculé par la méthode de modélisation des précurseurs réseaux neuronaux.
- L'état initial (minéralogique) d'un échantillon est calculé par NORMAT sur les résultats de la méthode précédente.
- Le processus métasomatique (chimique) d'un échantillon est calculé grâce aux équations de Gresens (1967) à partir des états chimiques initial et final.
- Le processus d'altération d'un échantillon est calculé grâce aux équations de Gresens (1967) à partir du bilan de masse global et à partir des états initial et final calculés par NORMAT.

BIBLIOGRAPHIE

- Barrett, T.J., MacLean, W. H. 1994. Chemostratigraphy and Hydrothermal Alteration in Exploration for VHMS Deposits in Greenstones and Younger Volcanic Rocks. In Lentz, D.R., ed., Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p. 433-467.
- Baumgartner, L.P., Olsen, S.N. 1995. A Least-Squares Approach to Mass Transport Calculations using the Isocon Method. *Economic Geology* v. 90, p.1261-1270.
- Best, M. 2003. *Igneous and metamorphic petrology*. Blackwell Science Ltd.
- Cadieux, A-M., Dubé, M., Williamson, K., Malo, M., Twomey, T. 2006. Characterization of hydrothermal alteration at the Red Lake mine, Northern Ontario. Commission Géologique du Canada, Recherches en cours, 2006-C2.
- Campbell, I.H., Leshner, C.M., Coad, P., Franklin, J.M., Gorton, M.P., Thurston. C.P. 1984. Rare-earth element mobility in alteration pipes below massive Cu-Zn-sulfide deposits. *Chemical geology* 45, p:188-189.
- Cheng, X., Sinclair, A.J. 1995. Metasomatic Norms and Mass Balance Chemico-mineralogic Models of Hydrothermal Alteration Systems. *Exploration and Mining Geology* vol 4, #4, p. 365-379.
- Coad, P.R. 1985. Rhyolite geology at Kidd Creek – a progress report. *Bulletin du CIM*, volume 78 no 874, p. 70-83.
- Condie, K.C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, p. 1-37
- Date, J., Watanabe, Y., Saeki, Y. 1983. Zonal Alteration around the Fukazawa Kuroko Deposits, Akita Prefecture, Northern Japan. *Economic Geology monograph* #5, p. 365-386.
- Davies, J.F., Whitehead, R.E. 2006. Alkali-Alumina and MgO-Alumina Molar Ratios of Altered and Unaltered Rhyolites. *Exploration and Mining Geology* vol 15, #1-2, p. 75-88.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. 1966. *An introduction to the rock forming minerals*.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. & Marchal, M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29, p. 183–210.
- Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration “Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration” *edited by* A.G. Gubins, 1997, p. 191–208
- Gaboury, D. 2004. Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères: Comparaison de la performance d'indicateurs d'altération. *Projet Consorem* 2000-02a.
- GEOROC. georoc.mpch-mainz.gwdg.de. Consulté le 30 janvier 2009.

- Grant, J.A. 1986. The Isocon Diagram: A simple solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration. *Economic Geology*, v. 81, p. 1976-1982.
- Grant, J.A. 2005. Isocon analysis : a brief review of the method and applications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, p. 1997-2004.
- Gresens, R.L. 1967. Composition-Volume Relationships in Metasomatism. *Chemical Geology* v.2 p. 291-306.
- Harris, J.R., Grunsky, E.C., Wilkinson, L., 1997. Developments in the effective use and interpretation of litho geochemistry in regional exploration programs: application of GIS technology. In: Gubins, A.G. (Ed.), *Proceedings of Exploration 97: 4th Decennial Int. Conf. Mineral Exploration*, Toronto, pp. 285–292.
- Hashiguchi, H., 1983, Practical application of low Na₂O anomalies in footwall acid lava for delimiting promising areas around the Kosaka and Fukazawa kuroko deposits, Akita Prefecture, Japan, *in* Kuroko and related volcanic massive sulphide deposits, *Economic Geology Monograph* 5, 387-394.
- Hughes, C.J. 1973. Spilites, keratophyres, and the igneous spectrum. *Geological Magazine*, vol 109 #6, p. 513-527.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., and Horiuchi, M., 1976, Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on models of volcanism of underlying dacite and alteration halos: *Mining Geology*, **26**, 105-117.
- Ispolatov, V., Lafrance, B., Dubé, B., Hamilton, M. Creaser, R. 2005. *Geology, Structure, and Gold Mineralization, Kirkland Lake and Larder Lake Areas (Gauthier and Teck Townships): Discover Abitibi Initiative. Rapport OGS OFR-6159.*
- Kishida, A., Kerrich, R., D. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology* #82.
- Koopman, E.R., Hannington, M.D., Santaguida, F. and Cameron, B.I. 1999. Petrology and geochemistry of proximal hydrothermal alteration in the mine rhyolite at Kidd Creek. *Eco. Geol., Monogr.* 10, pp. 267-296.
- Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H., Huston, D.L. 2001. The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho geochemistry association with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology* 96, p. 957-972.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. & Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology* 27, p. 745–750.
- Leitch, C.H.B., Lentz, D.R. 1994. The Gresens approach to mass balance constraints of alteration systems: methods, pitfalls, examples. In Lentz, D.R., ed., *Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems*. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p. 161-192.
- MacLean, W.H. Kranidiotis, P. 1987. Immobile Elements as Monitors of Mass Transfer in Hydrothermal Alteration: Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Québec. *Economic Geology* v 82, p. 951-962.

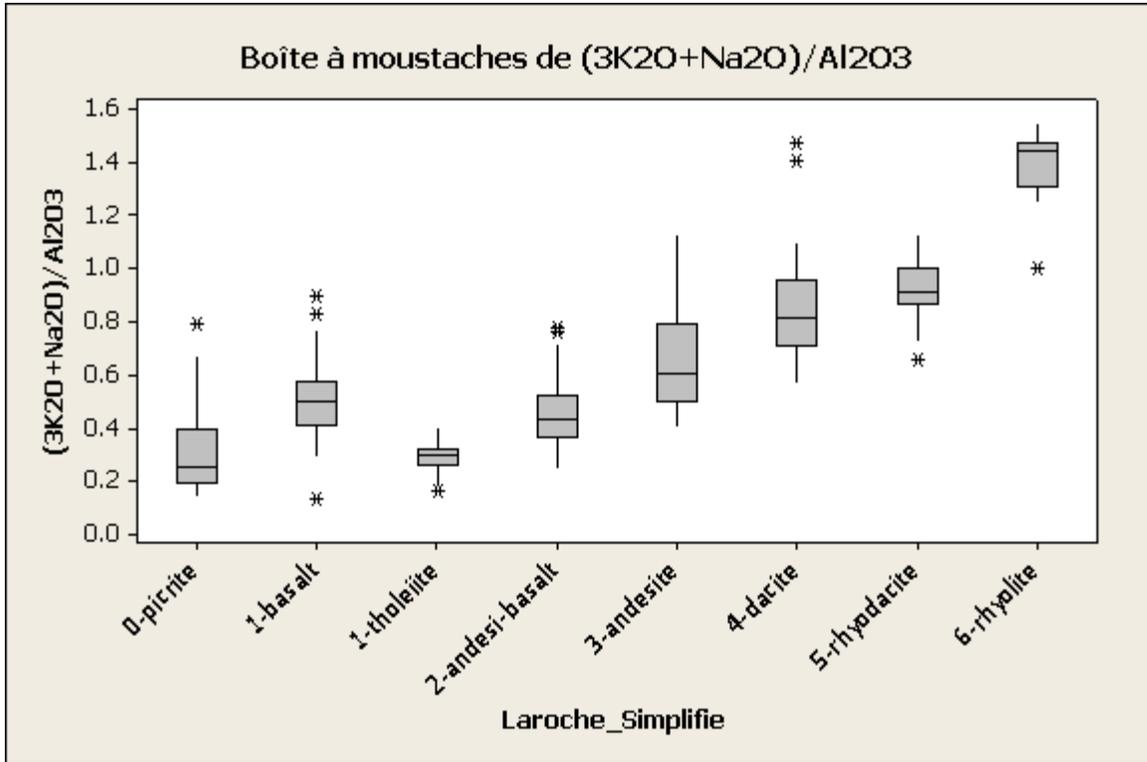
- MacLean, W.H. Barrett, T.J. 1993. Lithogeochemical techniques using immobile trace elements. *Journal of Geochemical Exploration* 48, p. 109-133.
- McCuaig, T.C., Kerrich, R. 1994. P-T-t-Deformation-Fluid Characteristics of Lode Gold Deposits: Evidence from Alteration Systematics. In Lentz, D.R., ed., *Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems*. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p.339-379.
- Middlemost, E.A.K. 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical geology* 77, p. 19-26.
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science* 274, 321–355.
- Nicholls, J., Gordon, T.M. 1994. Procedures for the calculation of axial ratios on Pearce element-ratio diagrams. *The Canadian Mineralogist* 32, 969-977.
- Neurosolutions, version 5.0. 2005. Neurodimensions, Inc (logiciel).
- Pearce, T.H. 1968. A contribution to the theory of variation diagrams. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 19, 142-157.
- Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 82, p. 59-77.
- Saeki, Y., and Date, J., 1980, Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits, Akita Prefecture: *Mining Geology*, **30**, 4, 241-250.
- Salmon, B., Lavigne, M., Gauthier, J. 2007. Prefeasibility study on the Caber deposit - Technical report on the caber and Caber North deposits. Document MRNF GM-63307, 205 p.
- Shand, S. J., 1943. *Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite*. New York: John Wiley & Sons.
- Spitz, G., and Darling, R., 1978, Major and minor element lithogeochemical anomalies surrounding the Louvem copper deposit, Val D'Or, Québec: *Canadian Journal of Earth Sciences*, **15**, 7, 1161-1169.
- Stanley, C.R., Madeisky, H.E. 1994. Lithogeochemical Exploration for Hydrothermal Ore Deposits Using Pearce Element Ratio Analysis. In Lentz, D.R., ed., *Alteration and Alteration Processes association with Ore-forming Systems*. Geological Association of Canada, Short Course Notes v11, p.193-211.
- Verma, S.P., Torres-Alvarao, I.S., Sotelo-Rodriguez, Z.T. 2002. SINCLAS: standard igneous norm and volcanic rock classification system. *Computers and geosciences* 28, p. 711-715.
- Winchester, J. A. & Floyd, P. A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, p. 325–343.

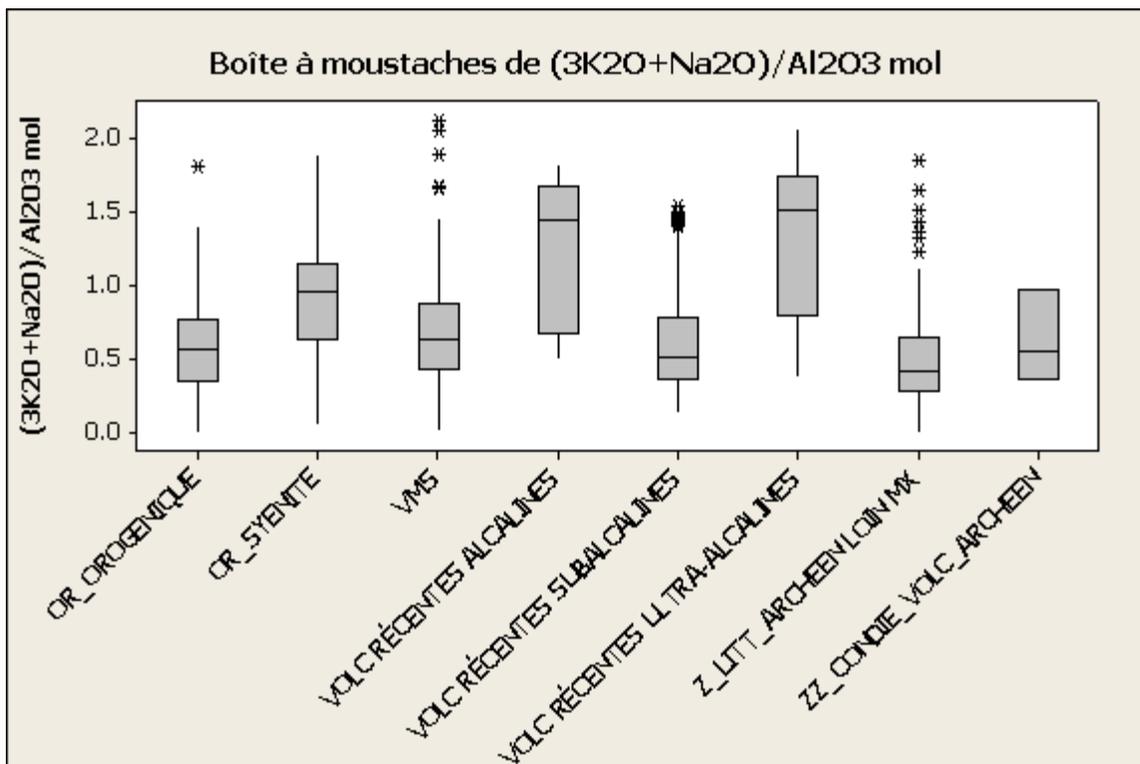
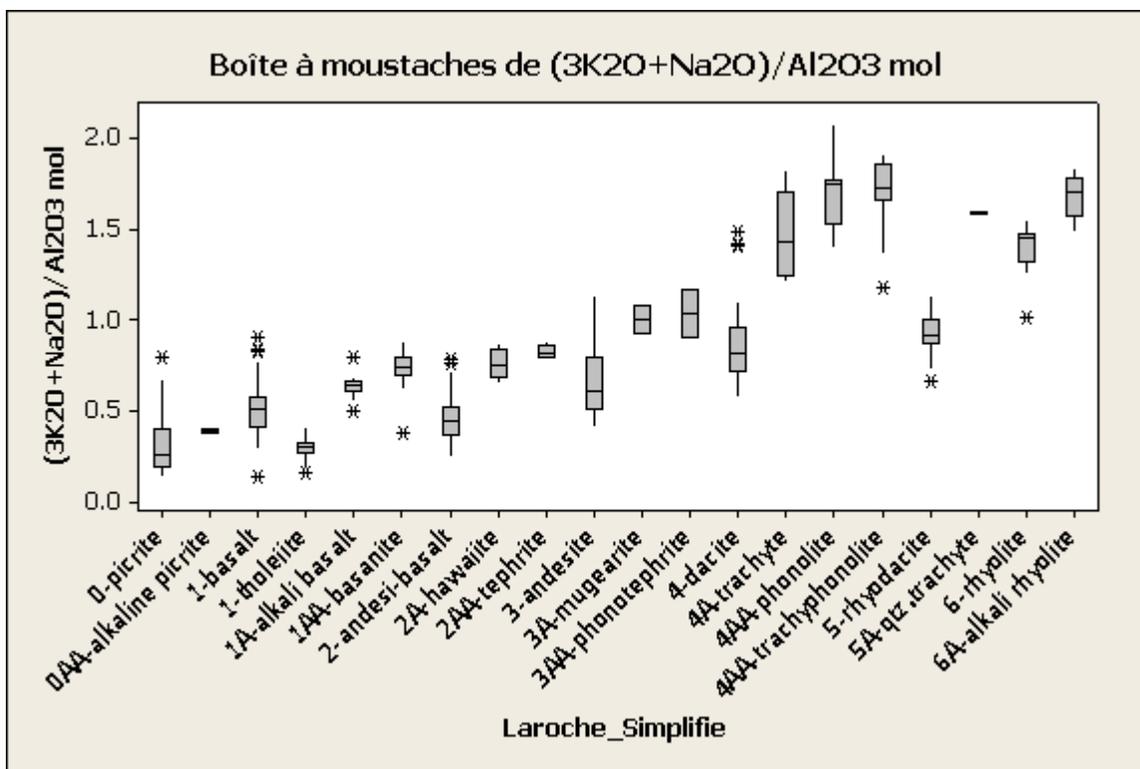
ANNEXE 1 - FICHES DETAILLEES DE COMPILATION DES RATIOS GEOCHIMIQUES SIMPLES (INDICES UNAIRES)

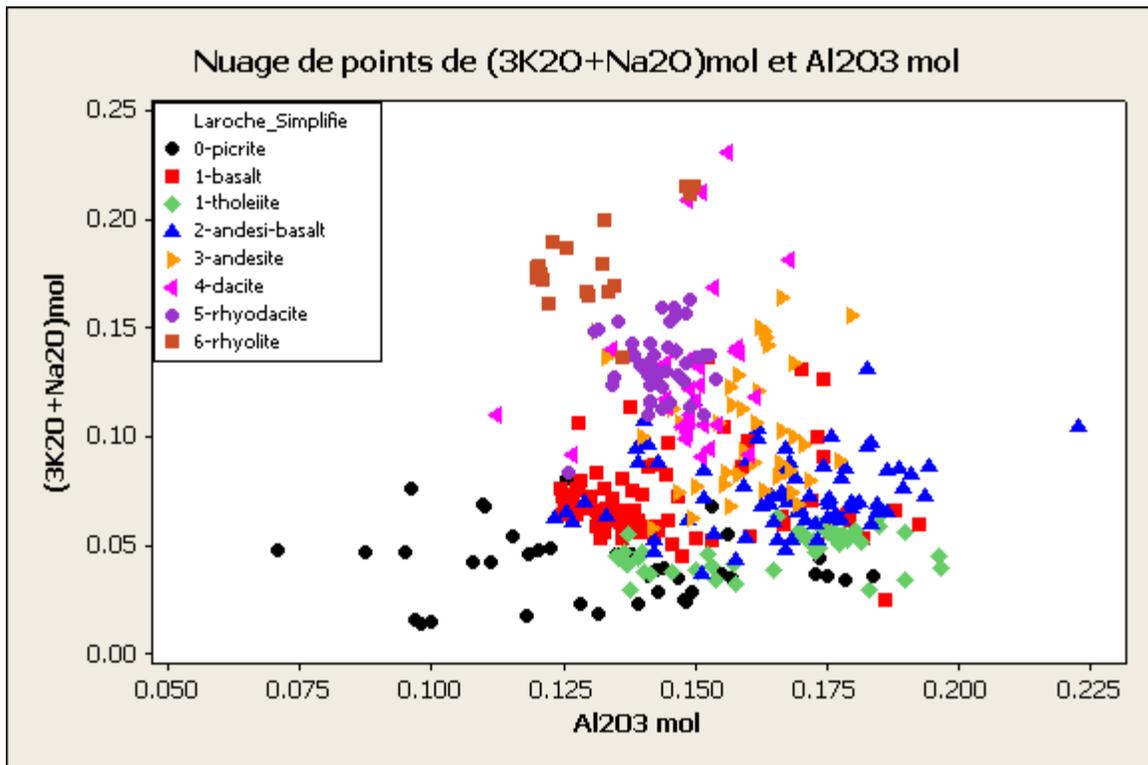
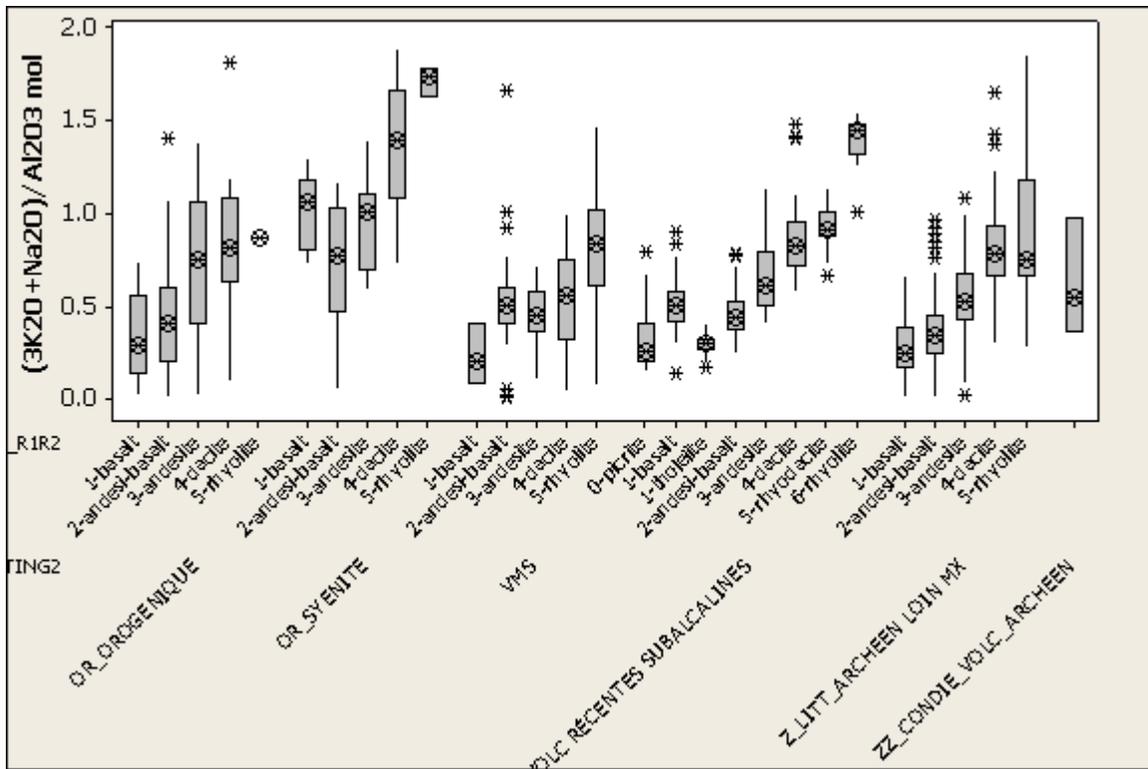
FICHE 1A - Saturation en Muscovite+albite

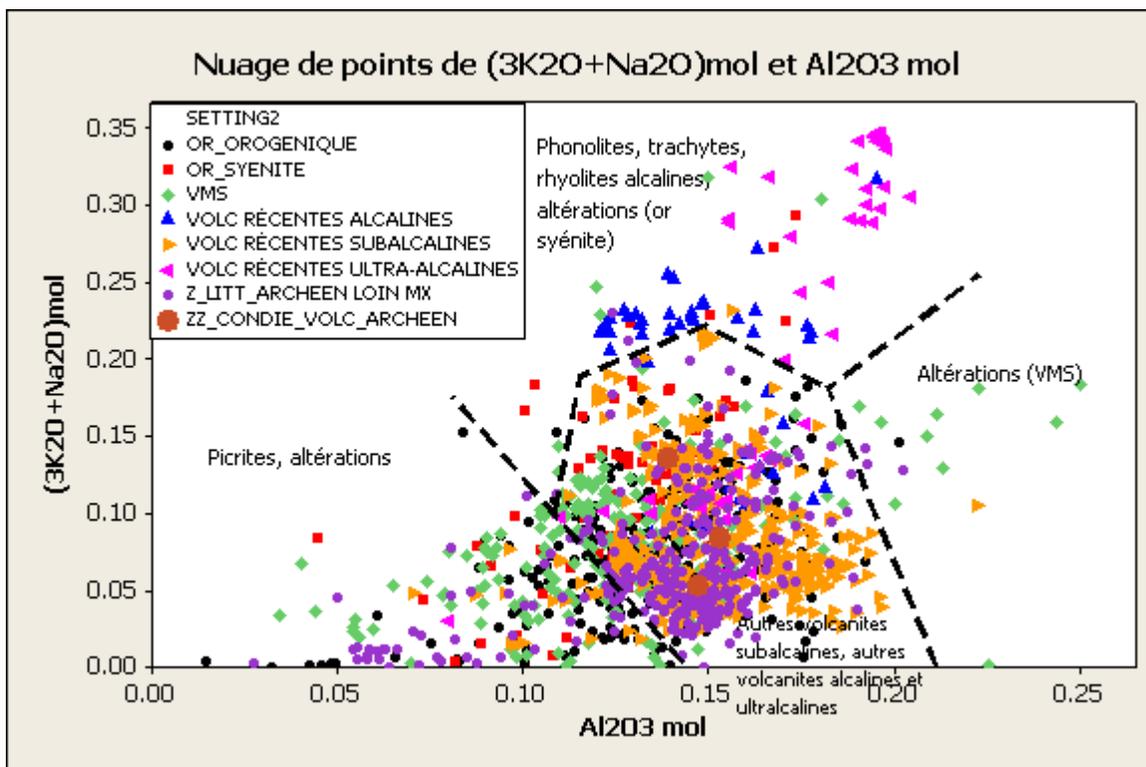
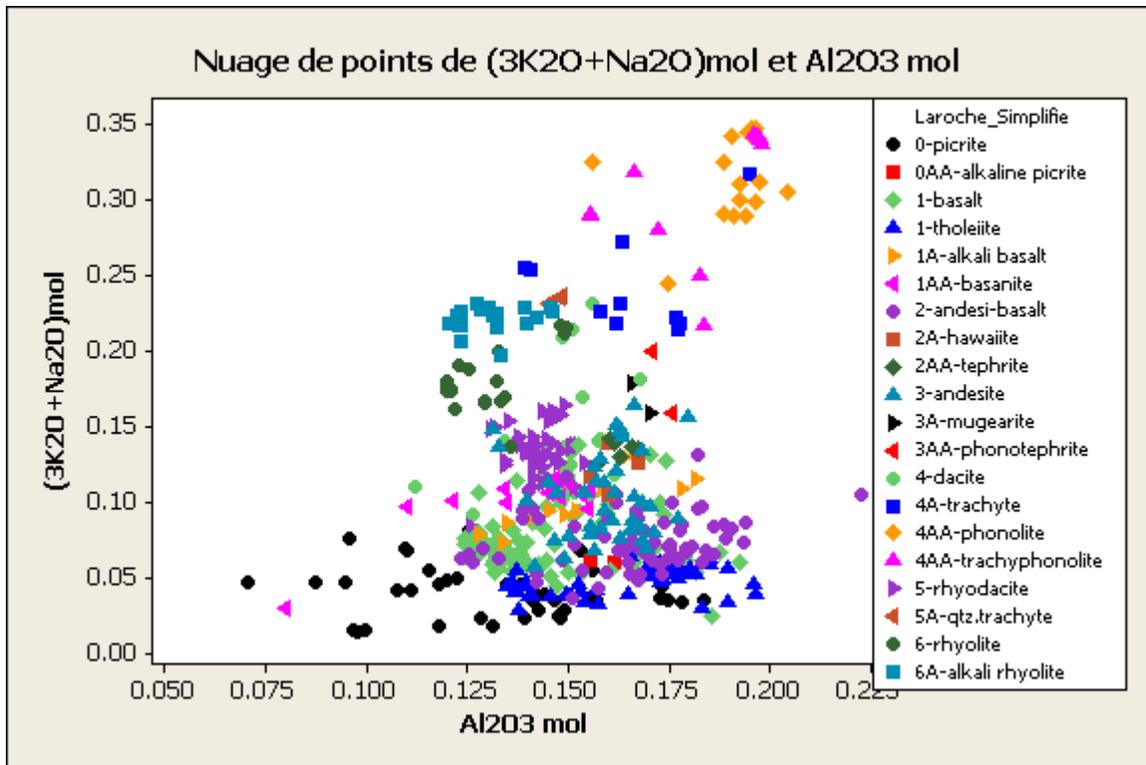
Méthode	Saturation en Muscovite+albite
Formule	$(3K + Na)/Al$ ou $(3K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$ Note : les calculs doivent être effectués sur des données transformées en moles (ratio de 0 pour la chlorite)
Référence originale	Kishida, A., Kerrich, R., D. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. Economic Geology #82, 1987
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	Cet indice représente la saturation en muscovite et albite, et est en principe indépendant des lithologies
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les tests effectués sur les roches volcaniques récentes montrent que l'indice est très fortement dépendant des lithologies. Les valeurs de l'indice varient de 0,3 pour les tholéiites jusqu'à 1,4 pour les rhyolites. Les équivalents alcalins montrent des augmentations des valeurs de l'indice de 0,25 à 0,5 selon les lithologies.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Comme les valeurs de l'indice sont fortement dépendantes des lithologies, on ne peut fixer de seuil absolu pour cet indice. Lorsque l'on compare des lithologies similaires (basées sur les diagrammes de classification Al-Ti pour les roches altérées et sur la classification de De La Roche pour les roches fraîches), on note des différences systématiques pour les roches fraîches vs altérées. Toutefois, un diagramme binaire Na_2O molaire vs. Al_2O_3 molaire permet de distinguer différents champs. Les roches volcanites subalcalines, sauf les picrites, se trouvent au centre du diagramme. Les roches alcalines felsiques (phonolites, trachytes, rhyolites alcalines) ainsi que certaines

altérations associées à l'or syénitique se trouvent dans un autre champs. Certaines altérations VMS se trouvent à droite du diagramme, montrant des valeurs en Al_2O_3 plus élevées, probablement par pertes de masse. Vers l'origine se retrouvent les volcanites subalcalines picritiques (basaltes magnésiens) ainsi des échantillons d'altérations VMS, or orogénique et or syénitique.



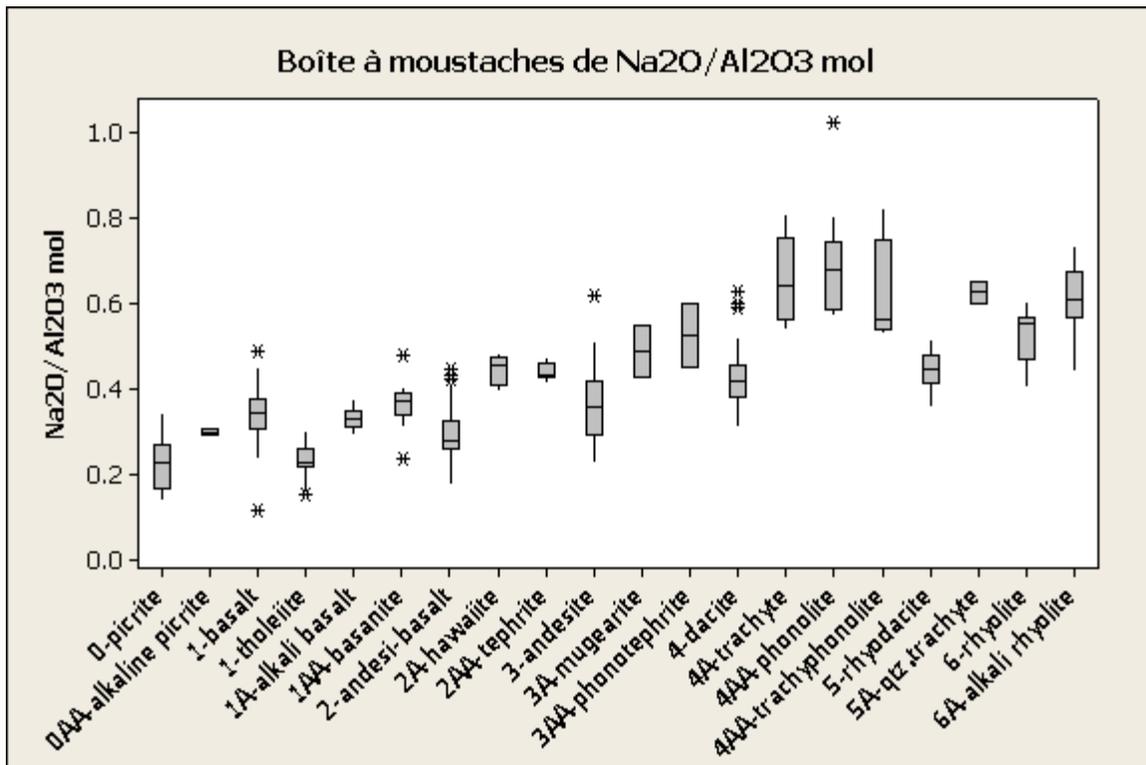
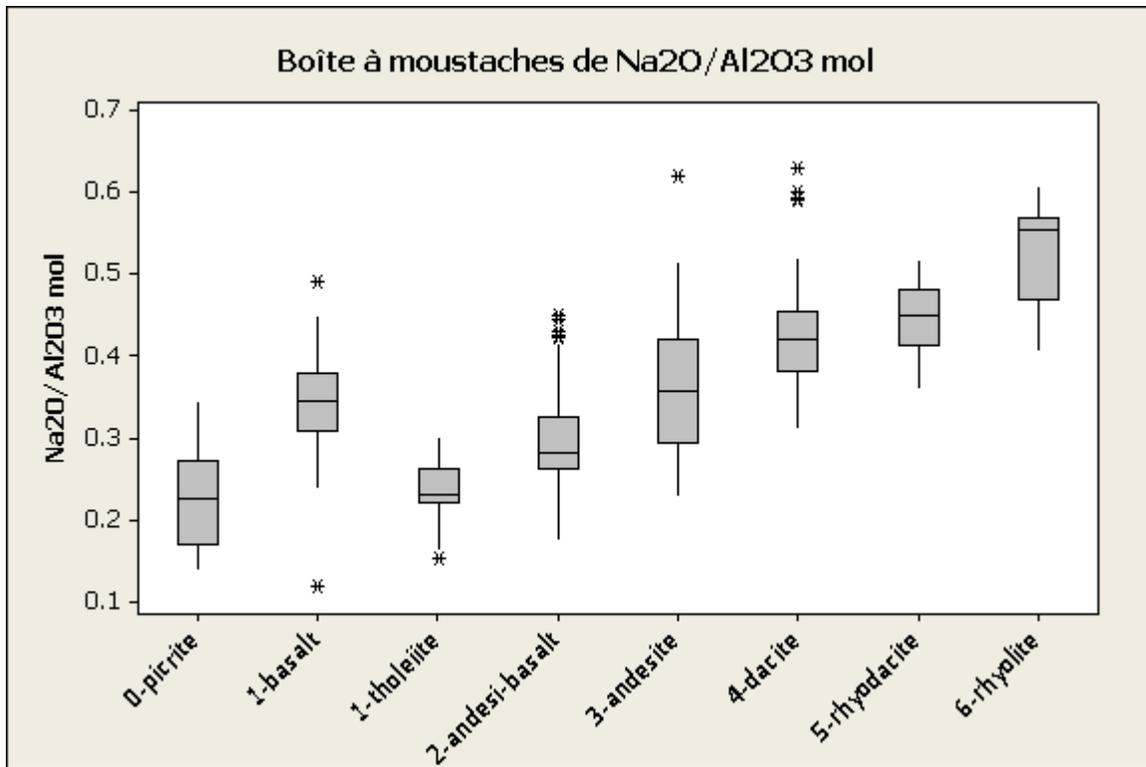


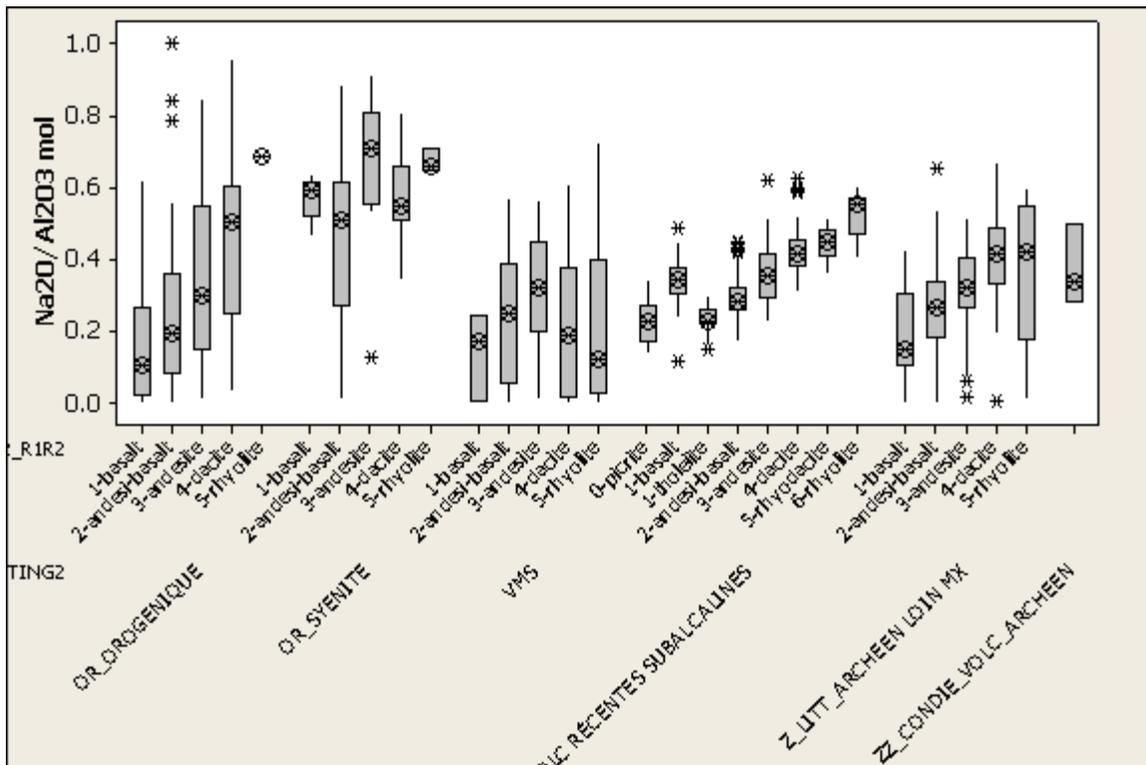
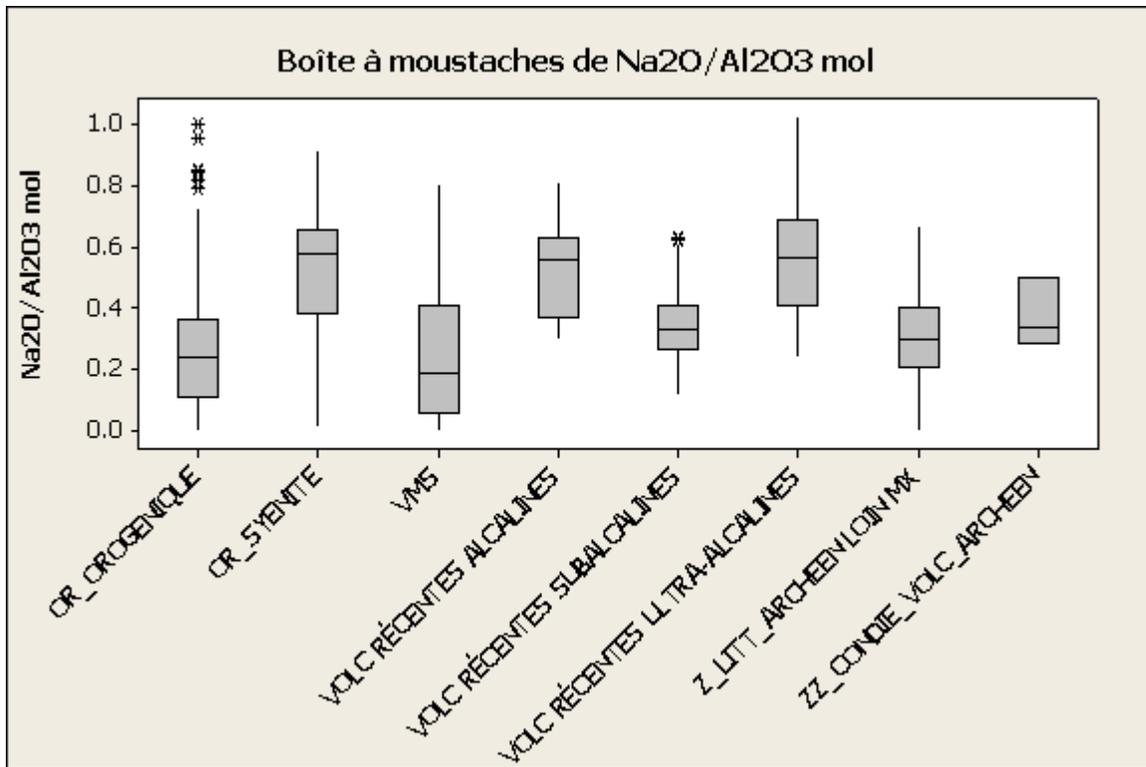


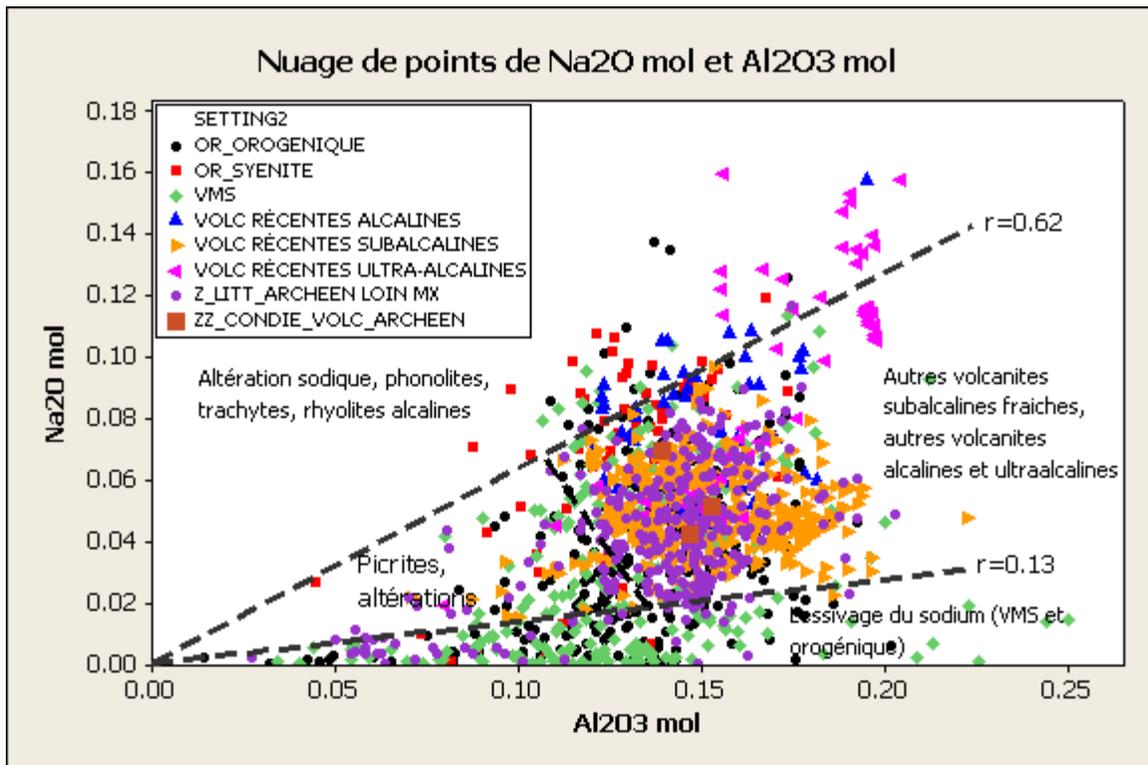
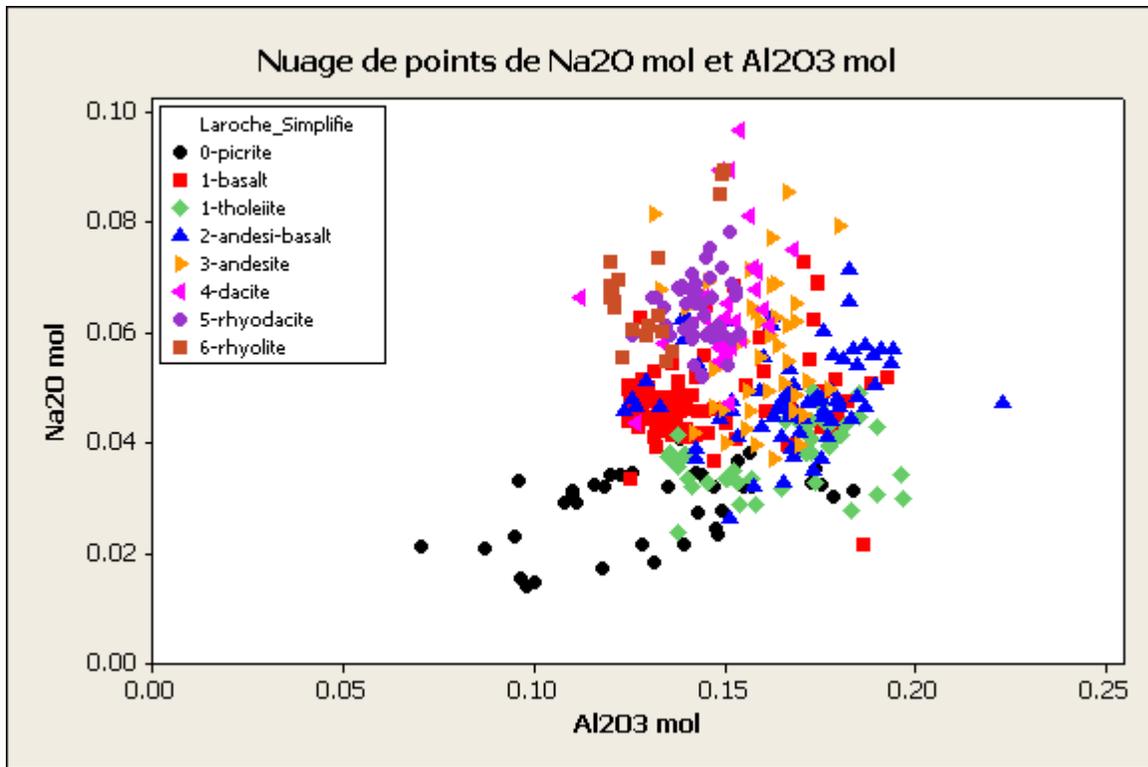


FICHE 1B - Saturation en albite

Méthode	Saturation en albite
Formule	Na/Al ou Na ₂ O/Al ₂ O ₃ Note : les calculs doivent être effectués sur des données transformées en moles.
Référence originale	Kishida, A., Kerrich, R., D. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. Economic Geology #82, 1987
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	Cet indice représente la saturation en albite, et est en principe indépendant des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de cet indice dépendent fortement des lithologies. On trouve des valeurs de 0,25 pour les tholéiites subalcalines; les valeurs augmentent graduellement jusqu'à 0,5 pour les rhyolites subalcalines. Les équivalents alcalins des lithologies subalcalines voient leurs valeurs augmenter d'environ 0,2 pour l'ensemble des lithologies.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Étant donné la dépendance de cet indice aux lithologies, il n'est pas possible de fixer un seuil absolu. Toutefois, la comparaison des roches fraîches aux altérations montre que, pour des lithologies subalcalines équivalentes, les valeurs moyennes diminuent en contexte de VMS mais sont très variables (probablement lessivage du Na, d'autres fois des ajouts). En contexte d'or syénitique, les valeurs de l'indice sont très élevées pour toutes les lithologies. Dans le cas de l'or orogénique, les valeurs sont en moyenne semblables aux roches fraîches, mais montrent une plus grande variabilité, probablement due à des types d'altérations variables. Certaines valeurs limites de l'indice permettent d'identifier des altérations. Des valeurs de 0,13 ou moins indiquent un lessivage du sodium. Des valeurs supérieures à 0,625 indiquent des altérations sodiques (VMS ou or syénitiques) ou des roches volcaniques alcalines ou ultra-alcalines.

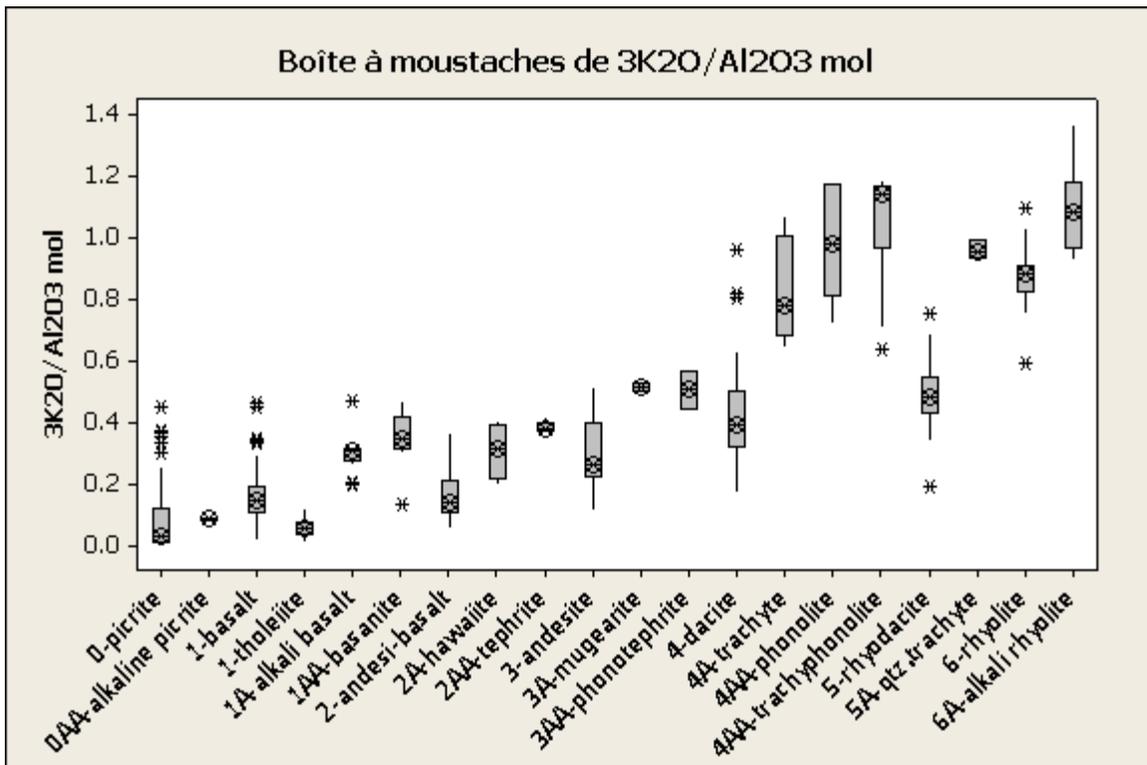
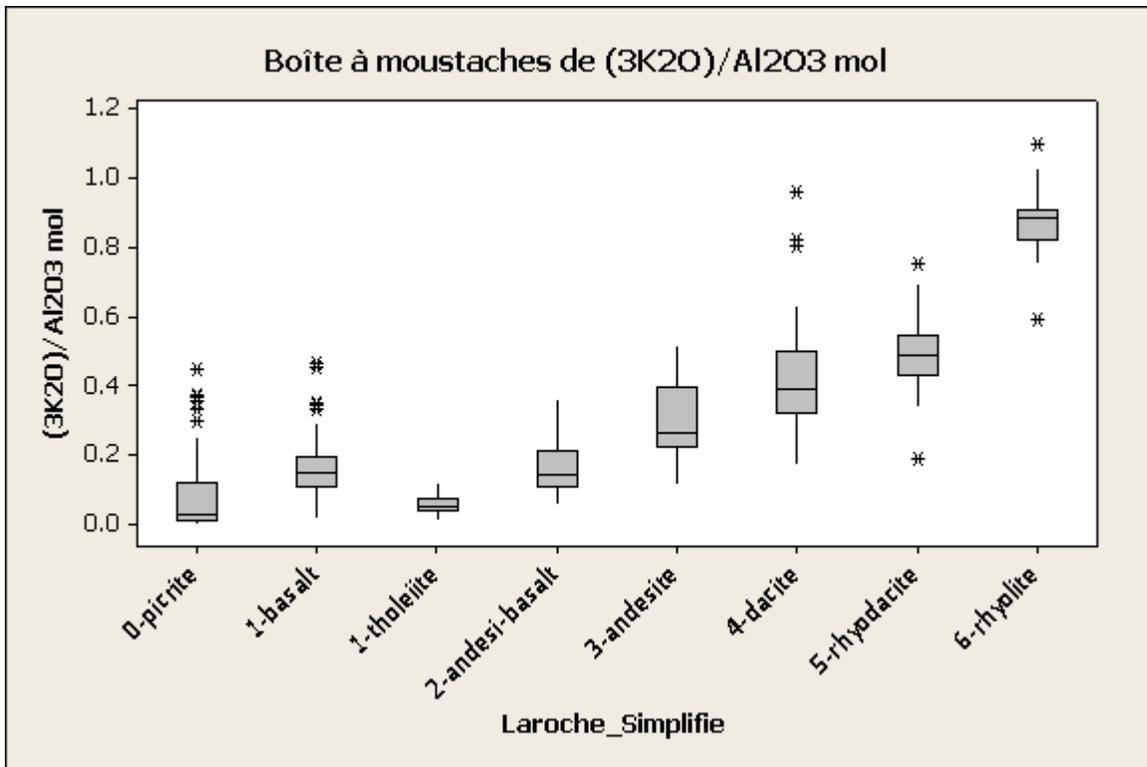


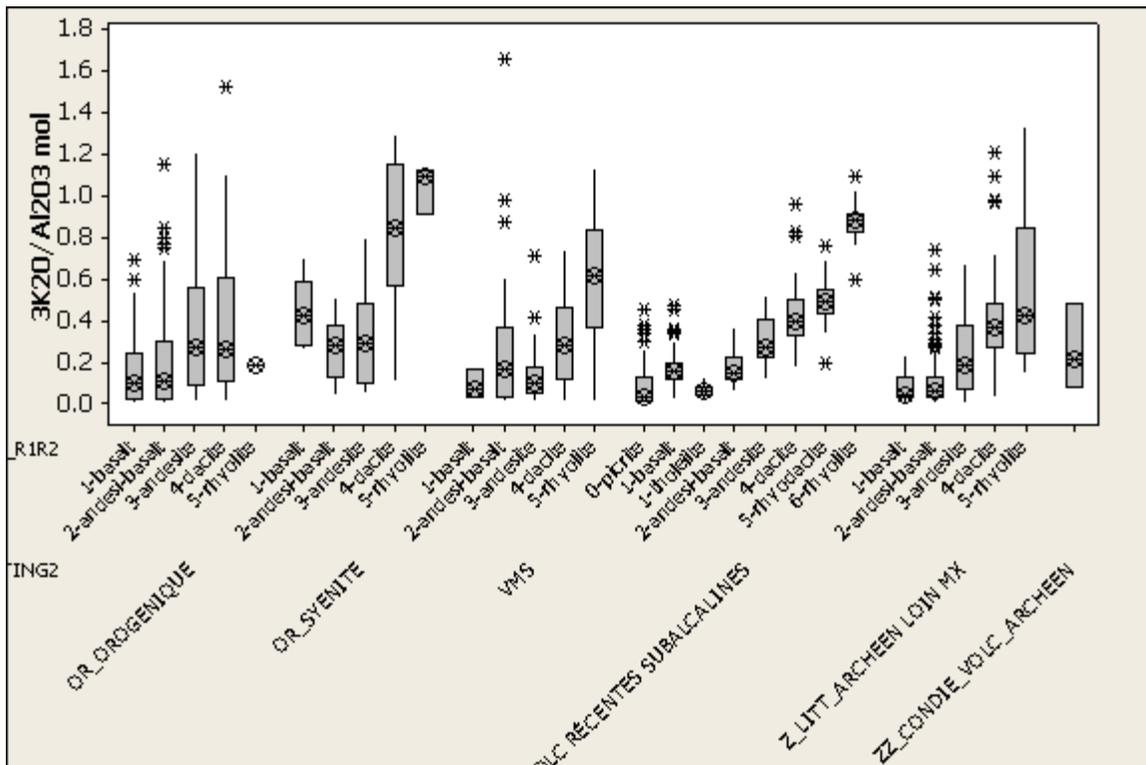
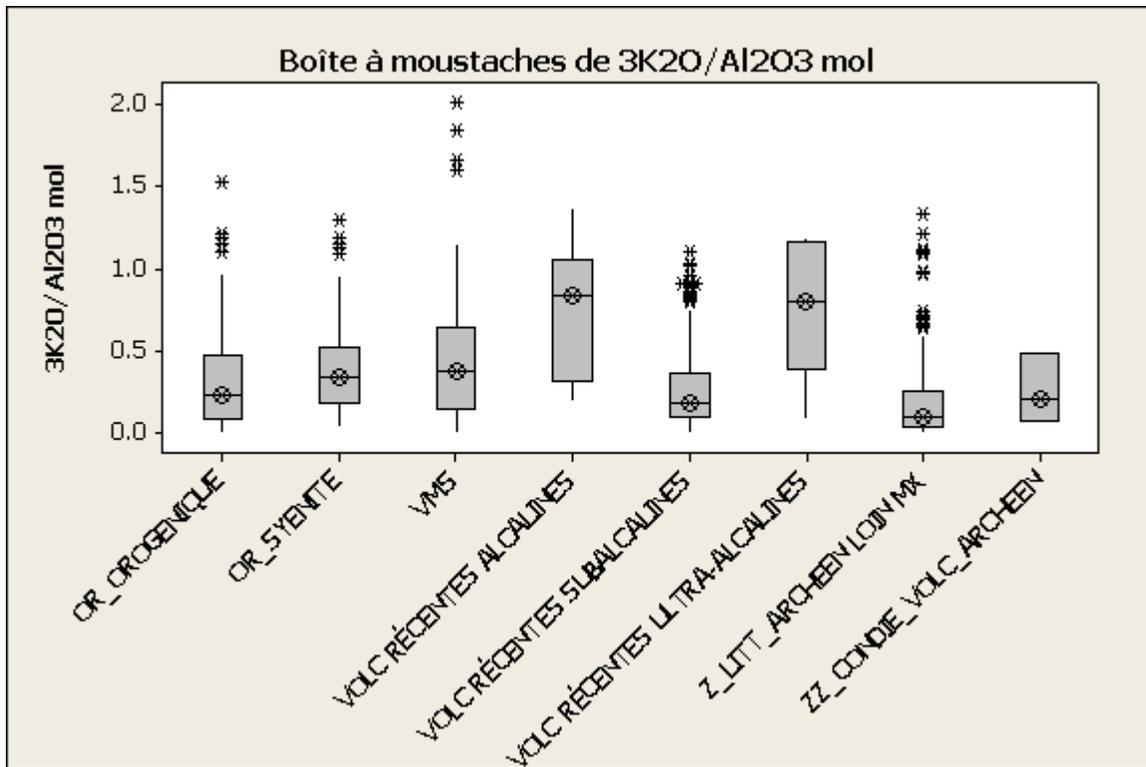


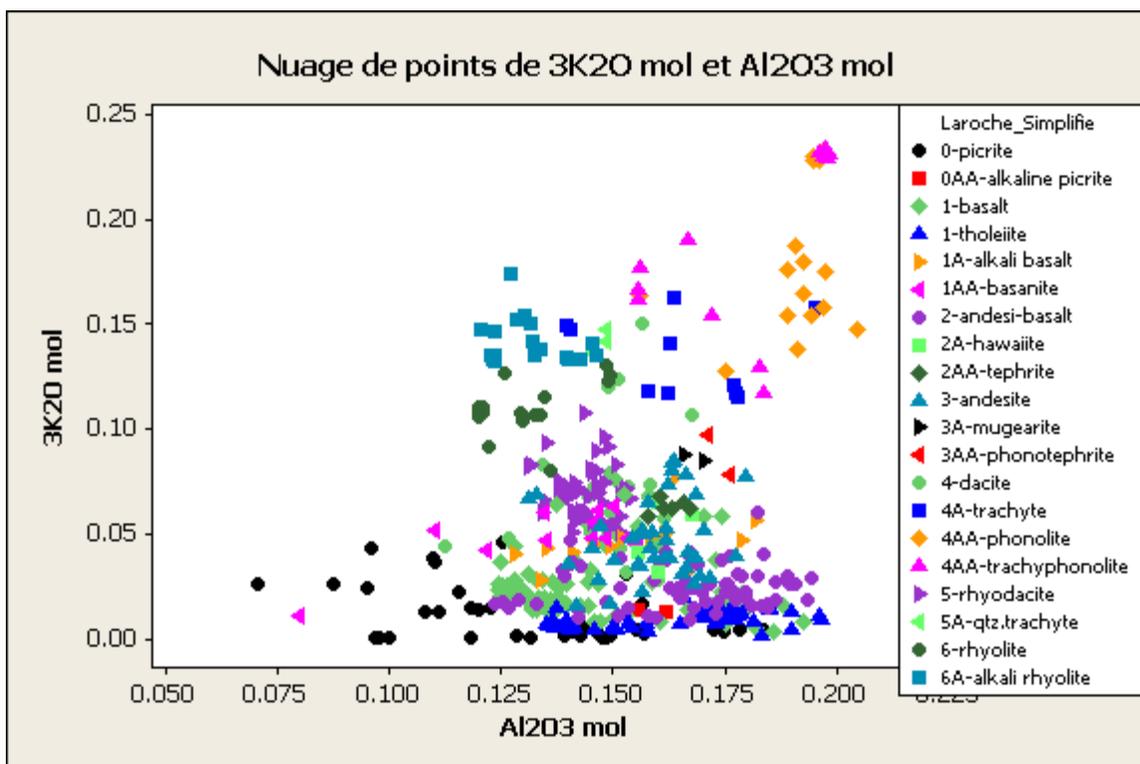
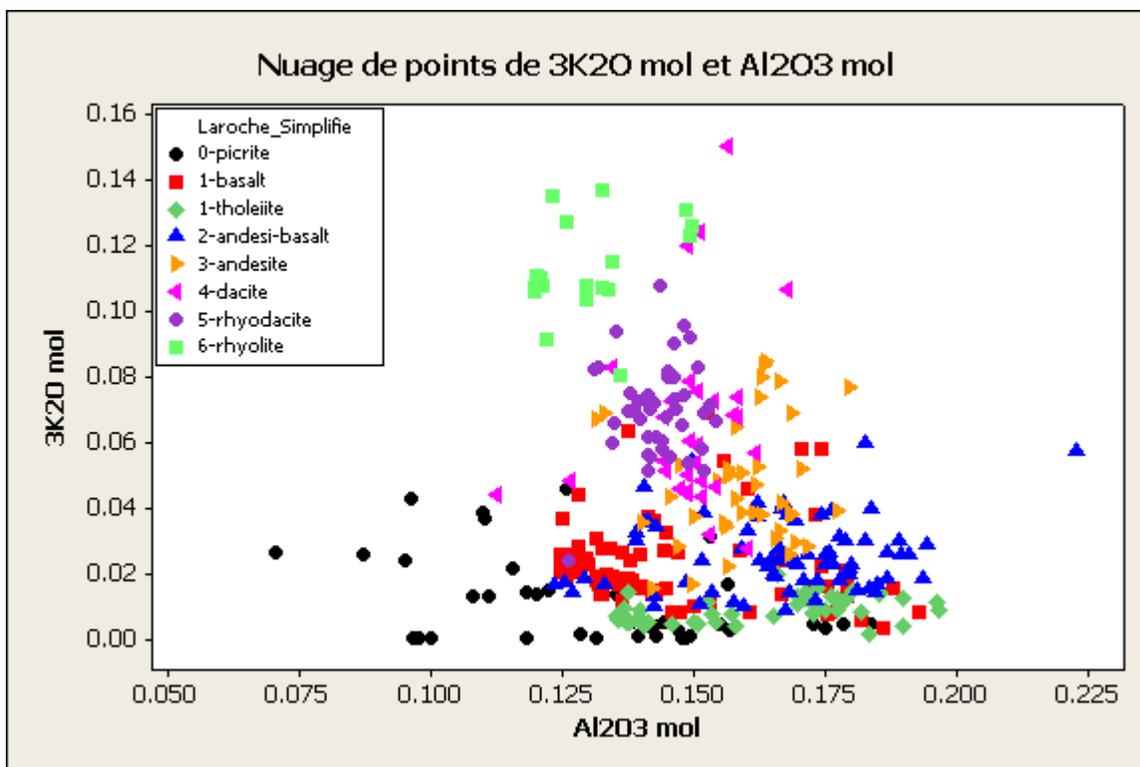


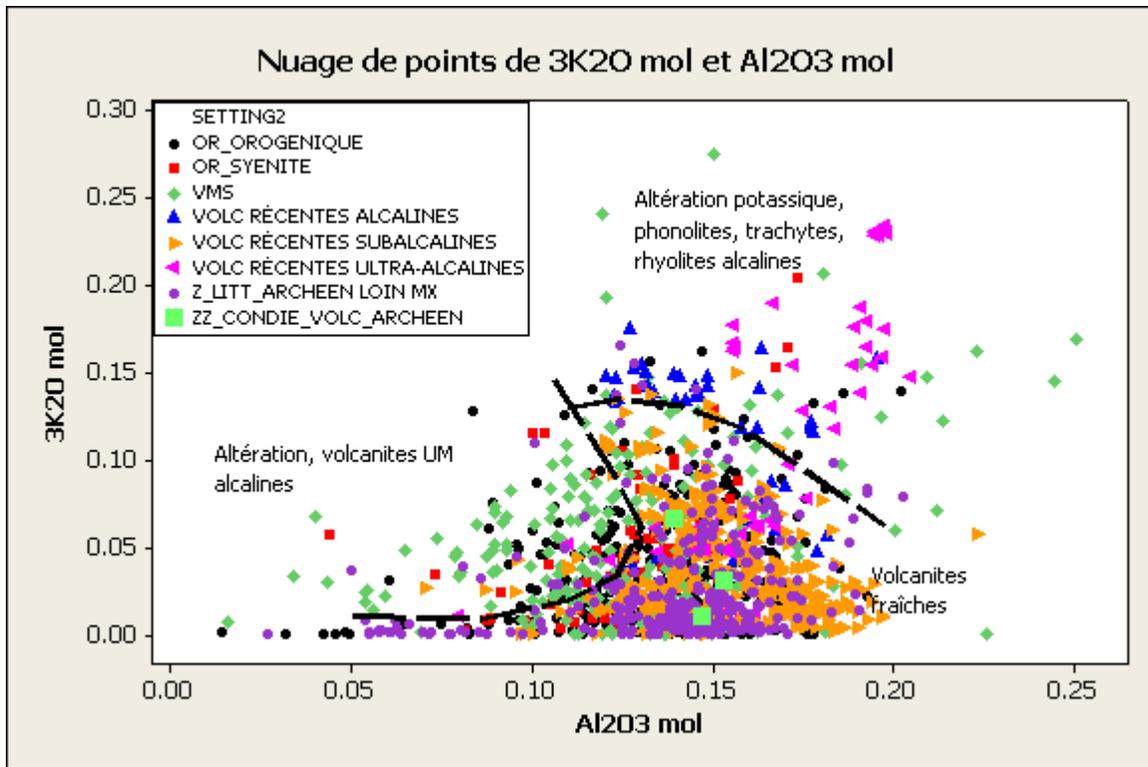
FICHE 1C – Saturation en muscovite

Méthode	Saturation en muscovite
Formule	$3K/Al$ ou $3K_2O/Al_2O_3$ Note : les calculs doivent être effectués sur des données transformées en moles.
Référence originale	Kishida, A., Kerrich, R., D. 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. Economic Geology #82, 1987
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	Cet indice représente la saturation en muscovite, et est en principe indépendant des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de cet indice sont fortement dépendantes des lithologies. Elles passent d'environ à 0,1 pour les tholéiites et jusqu'à 0,9 pour les rhyolites.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	



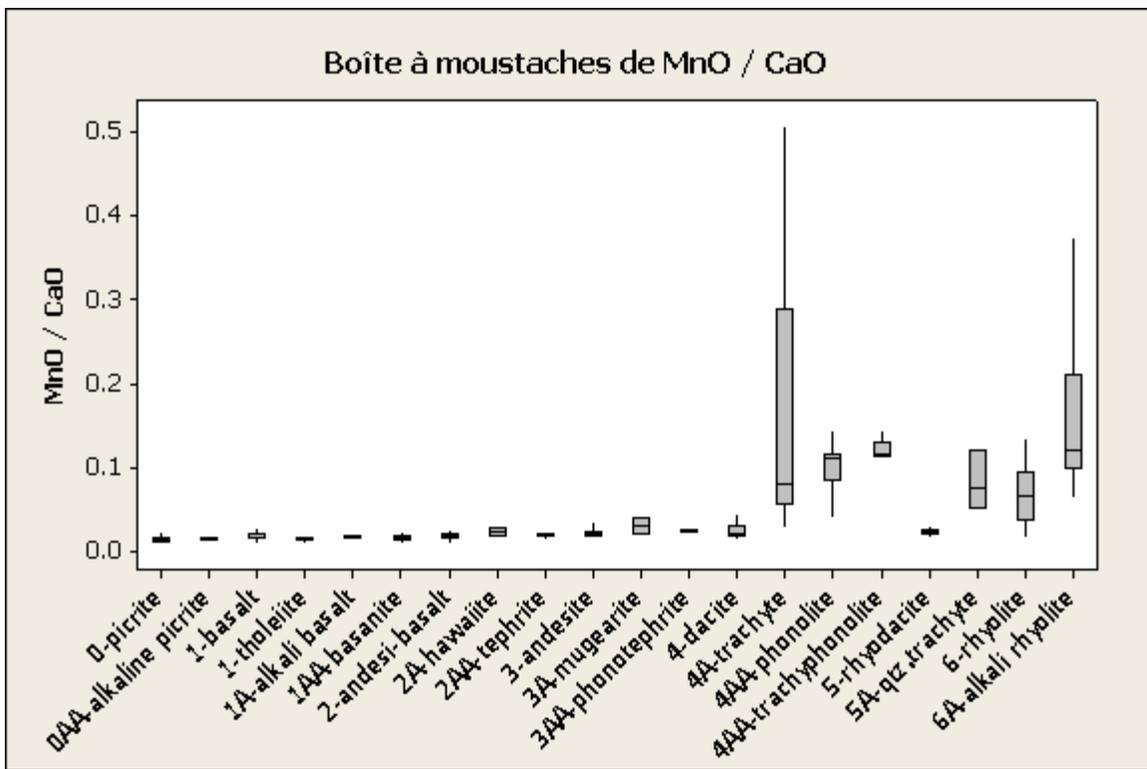
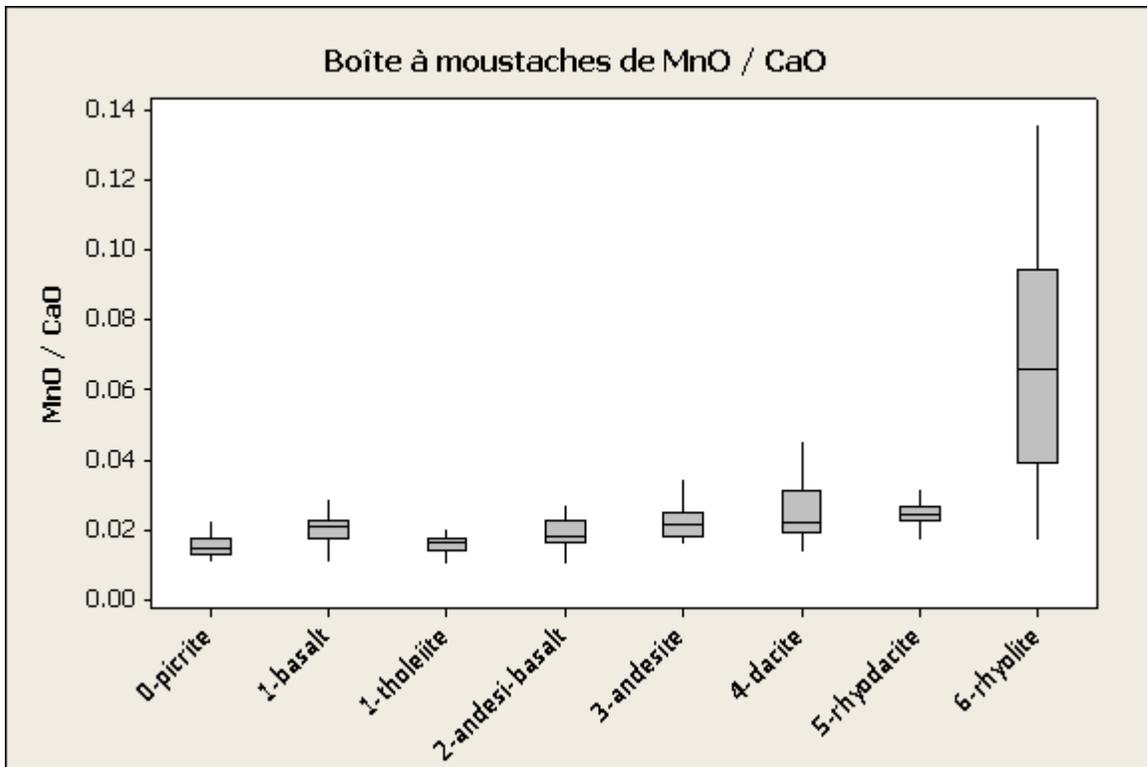


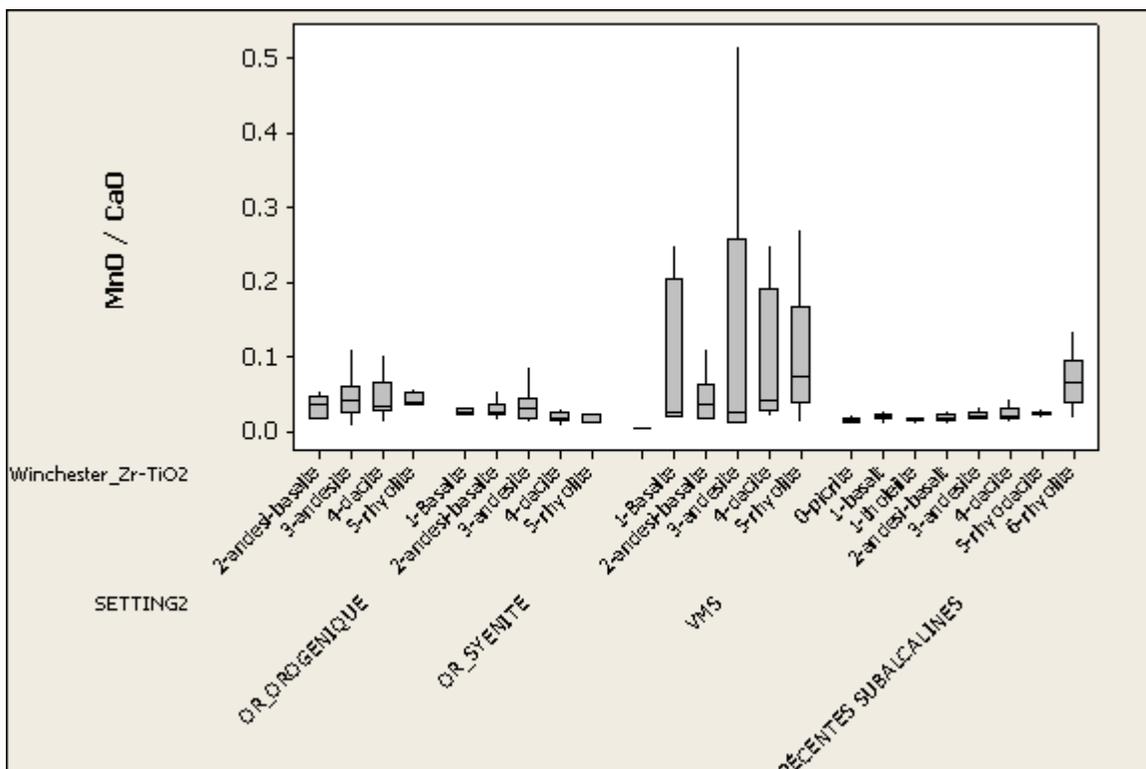
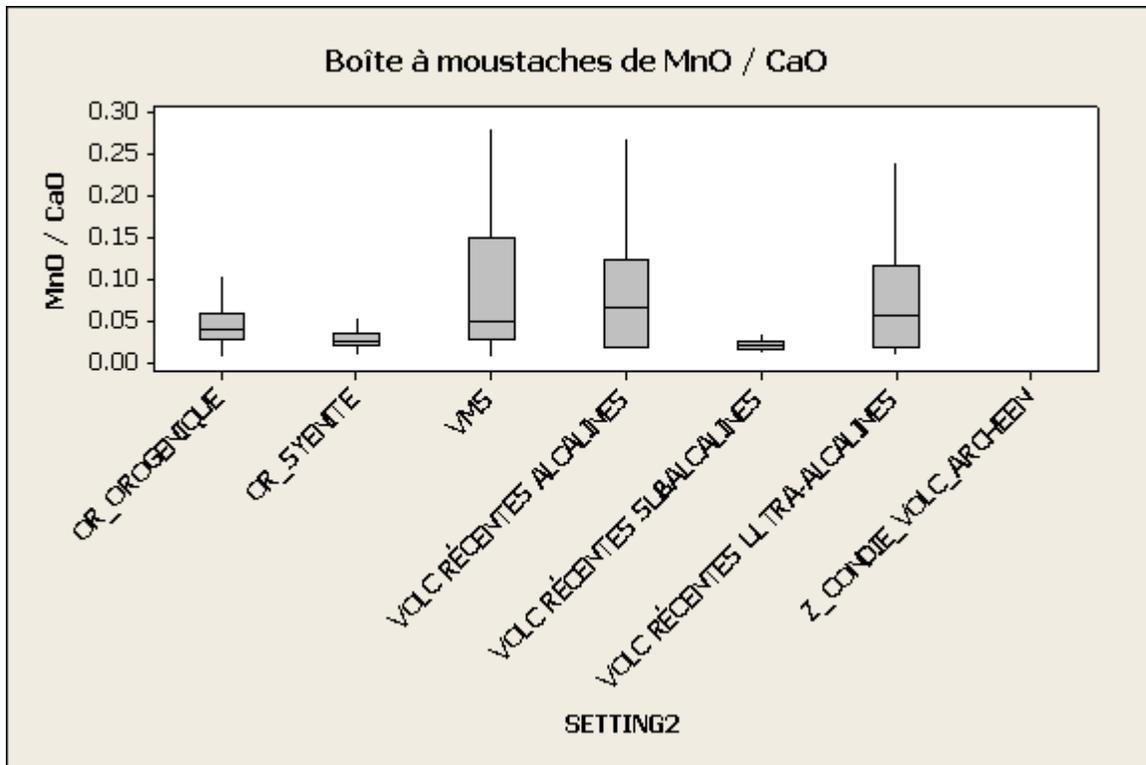


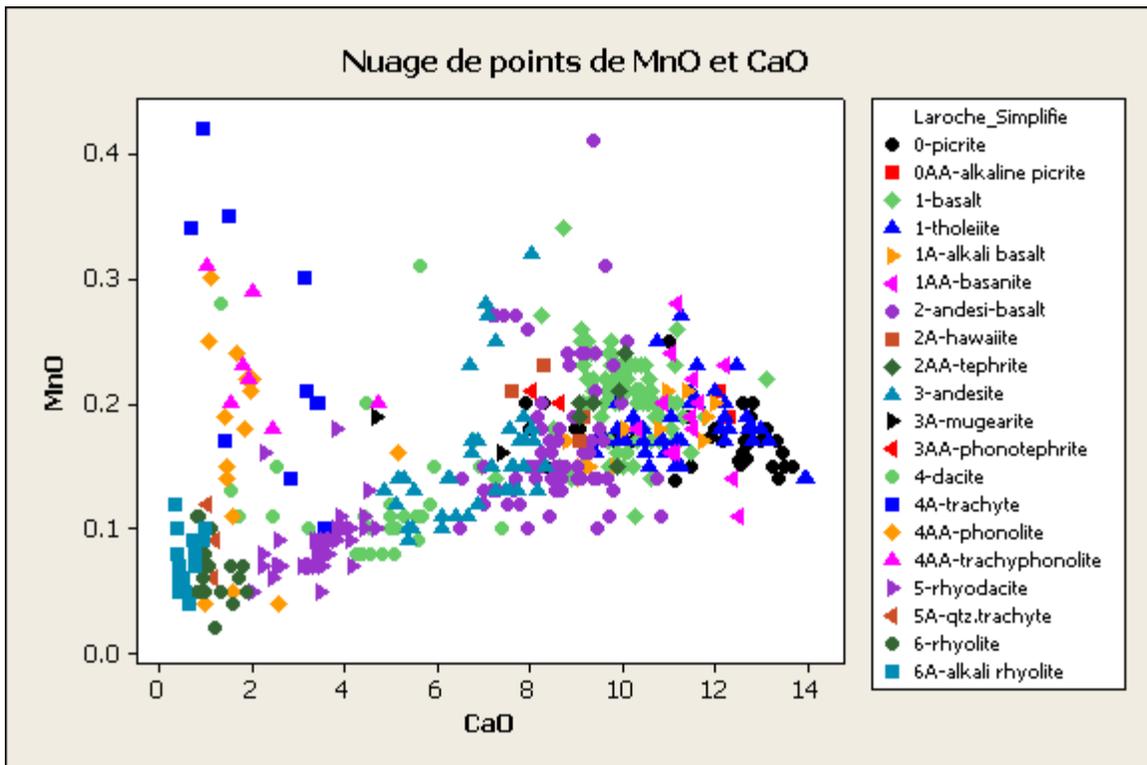
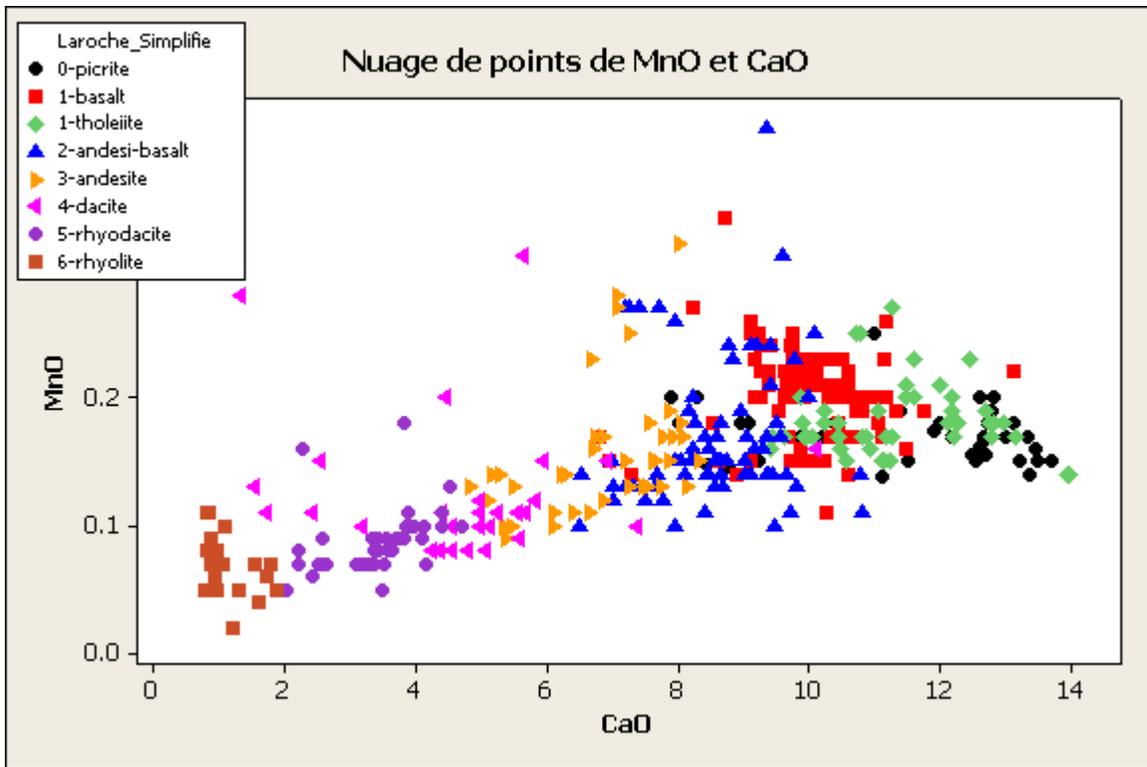


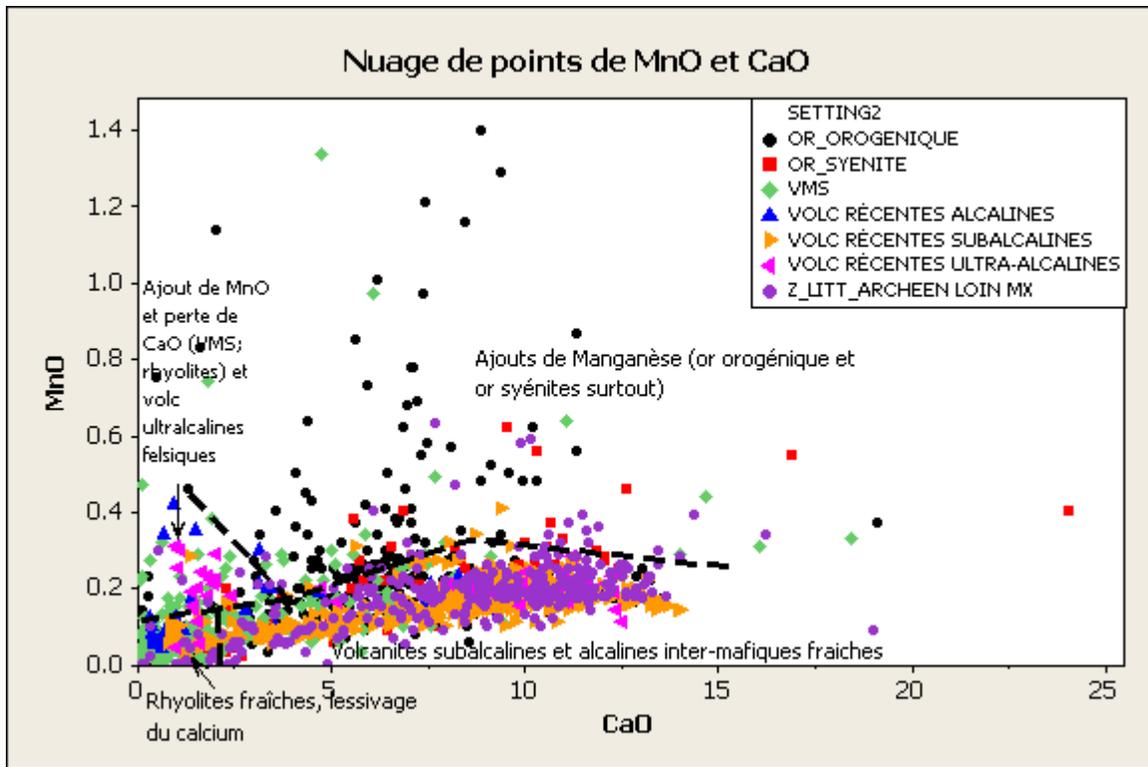
FICHE 1D – MnO/CaO

Méthode	
Formule	MnO/CaO
Référence originale	
Note référence originale	CAMIRO
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Cet indice d'altération est dépendant des lithologies. Ses valeurs varient de 0,018 pour les tholéiites, et augmentent jusqu'à 0,07 pour les rhyolites. La relation semble non-linéaire, puisque l'on remarque une hausse brutale pour les rhyolites. Les équivalents alcalins ont des valeurs plus élevées, particulièrement pour les lithologies felsiques alcalines qui montrent des augmentations spectaculaires du ratio. Il faut toutefois noter que les rhyolites des contextes d'altération ne montrent pas ce type d'enrichissement.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	La dépendance de l'indice aux lithologies rend difficile de fixer un seuil, en particulier à cause du cas des rhyolites qui montrent des ratios élevés. Il est intéressant de noter sur le diagramme X-Y MnO vs CaO que les échantillons d'orogénique (rappel : Casa Berardi) montrent des enrichissements très marqués en MnO. Les échantillons d'or syénitique montrent également des enrichissements importants. Les contextes de VMS quant à eux ne montrent pas d'enrichissement en MnO mais plutôt des pertes en CaO, qui font augmenter les valeurs du ratio.





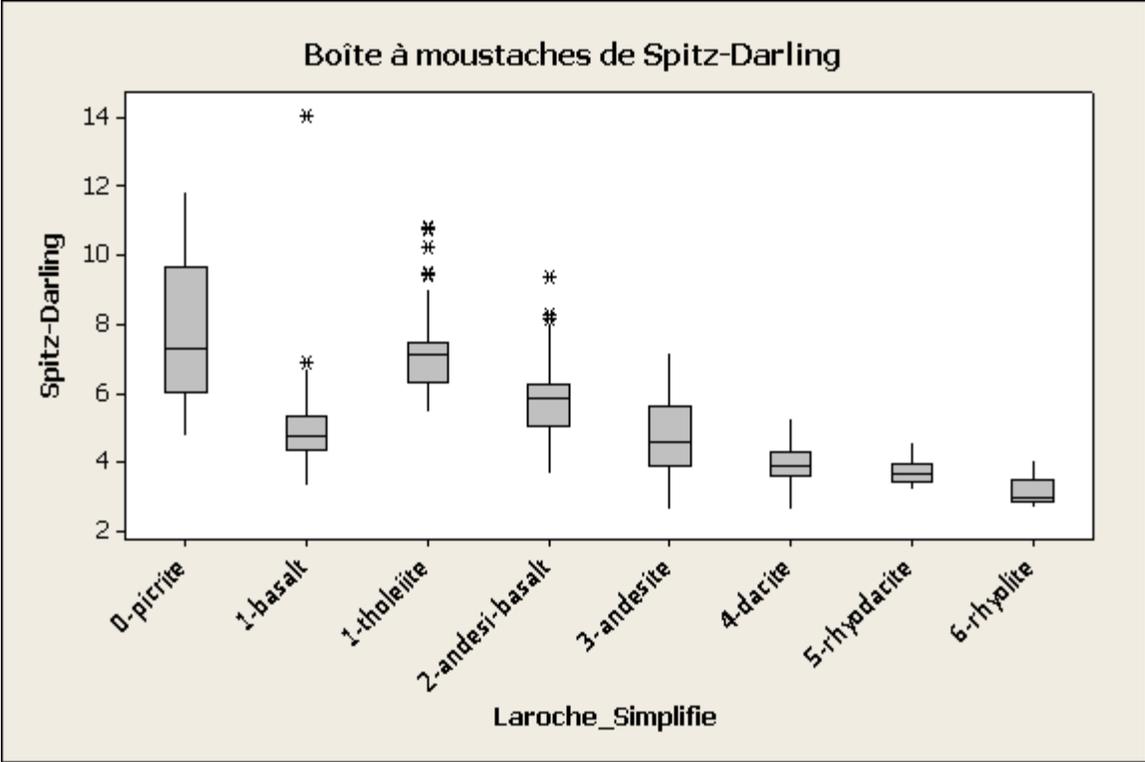


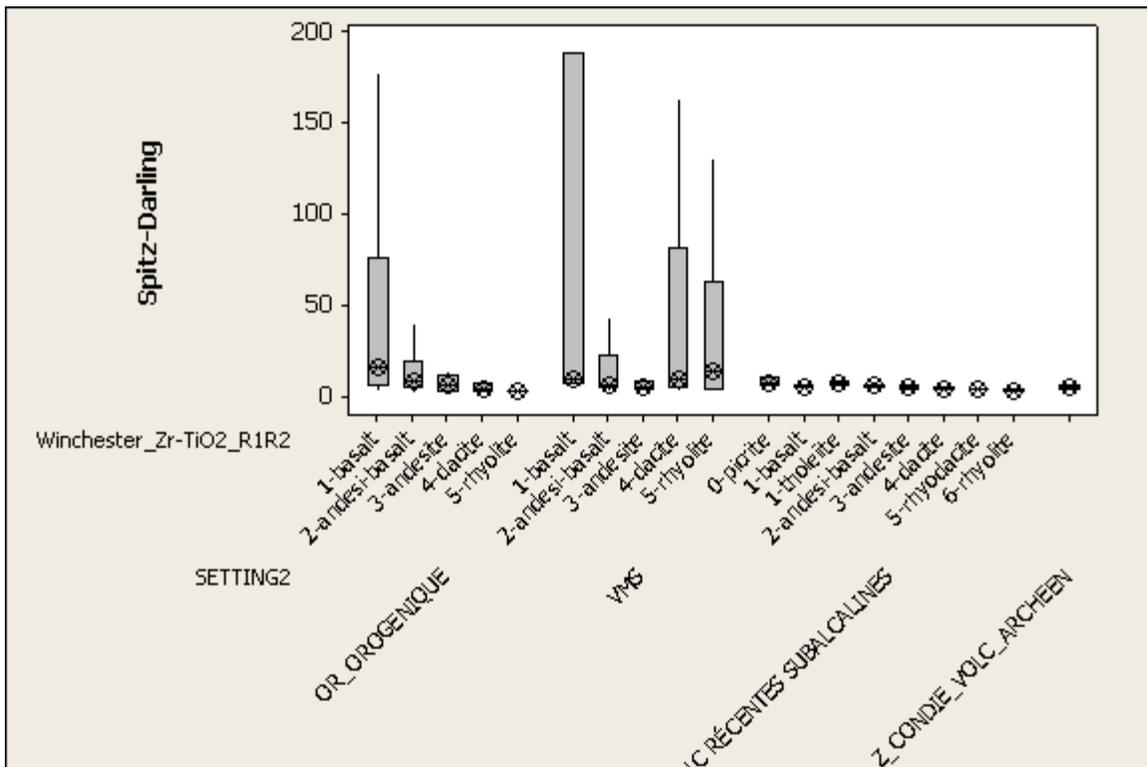
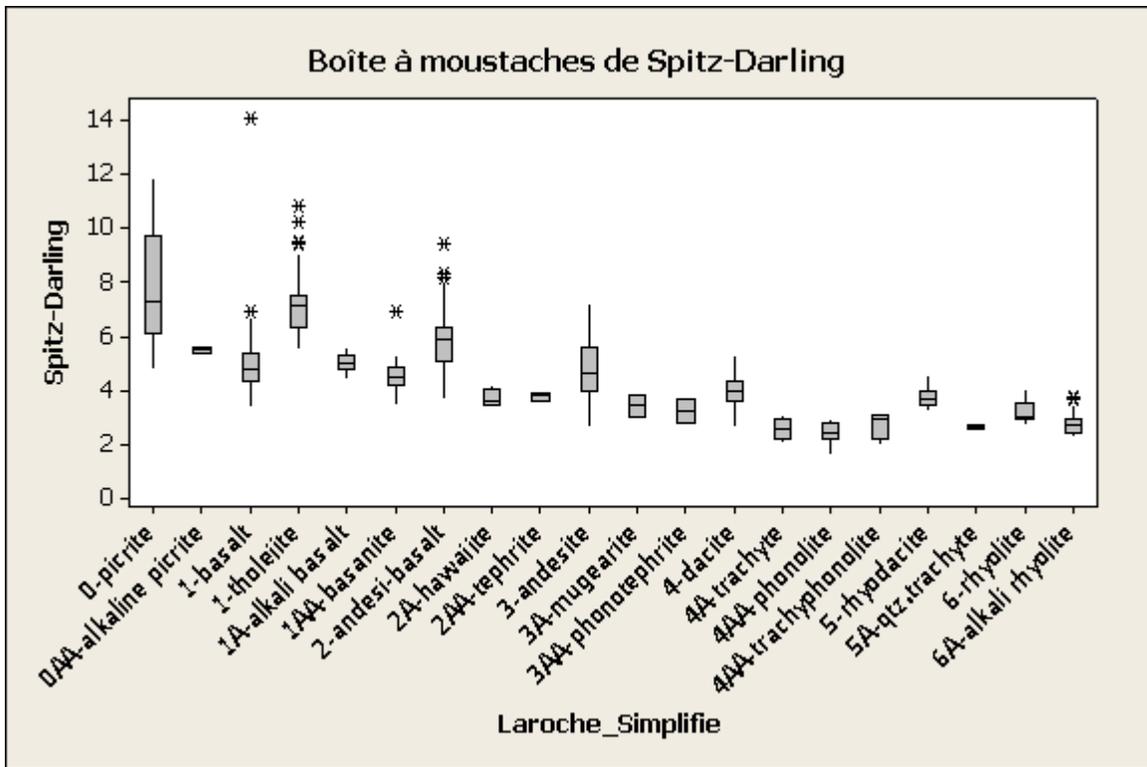


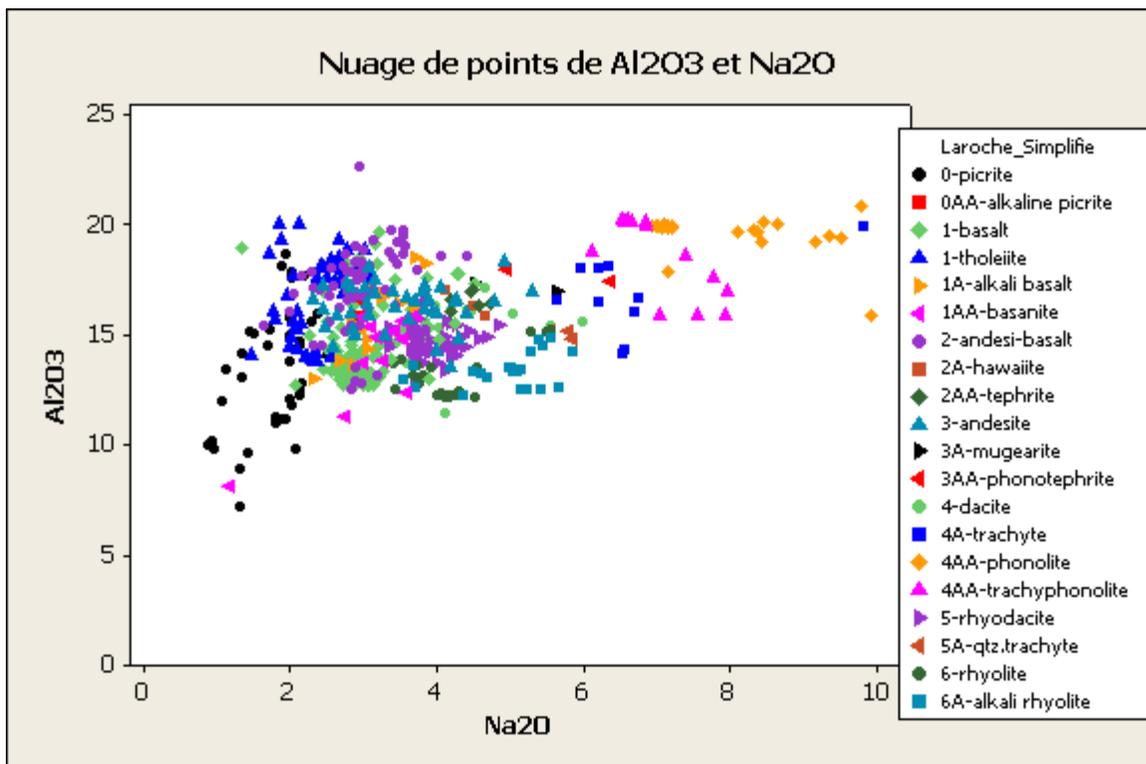
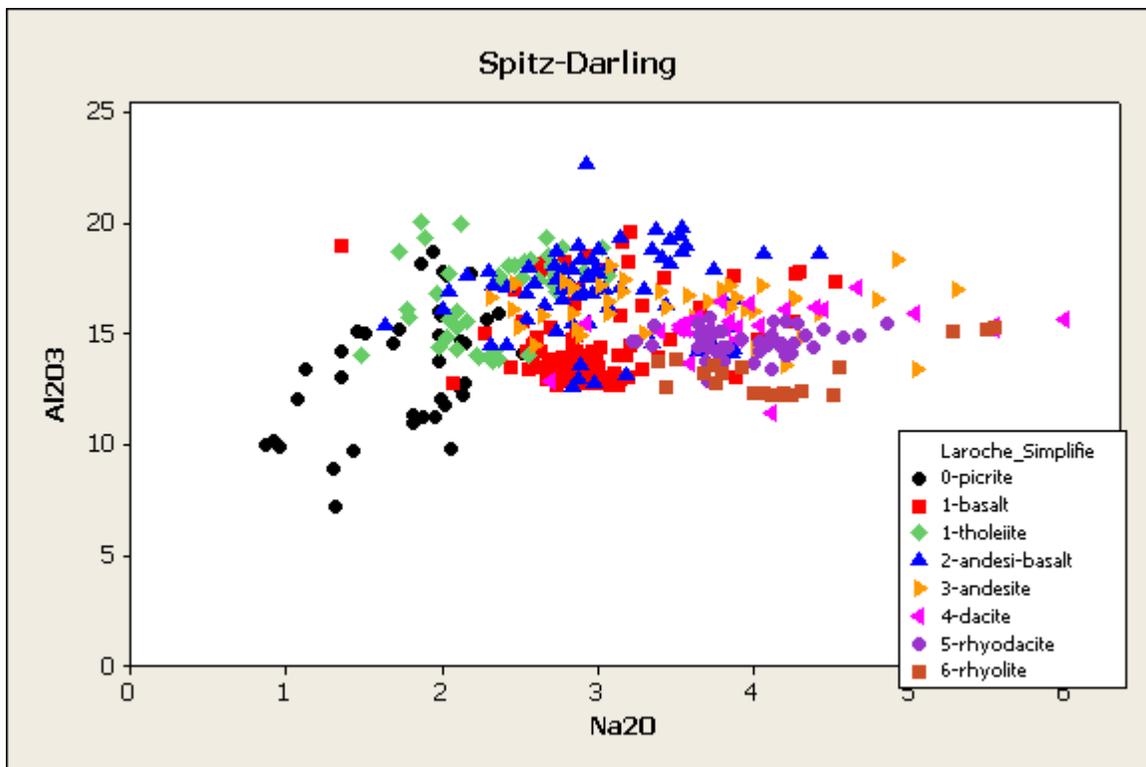
FICHE 1E – Spitz-Darling

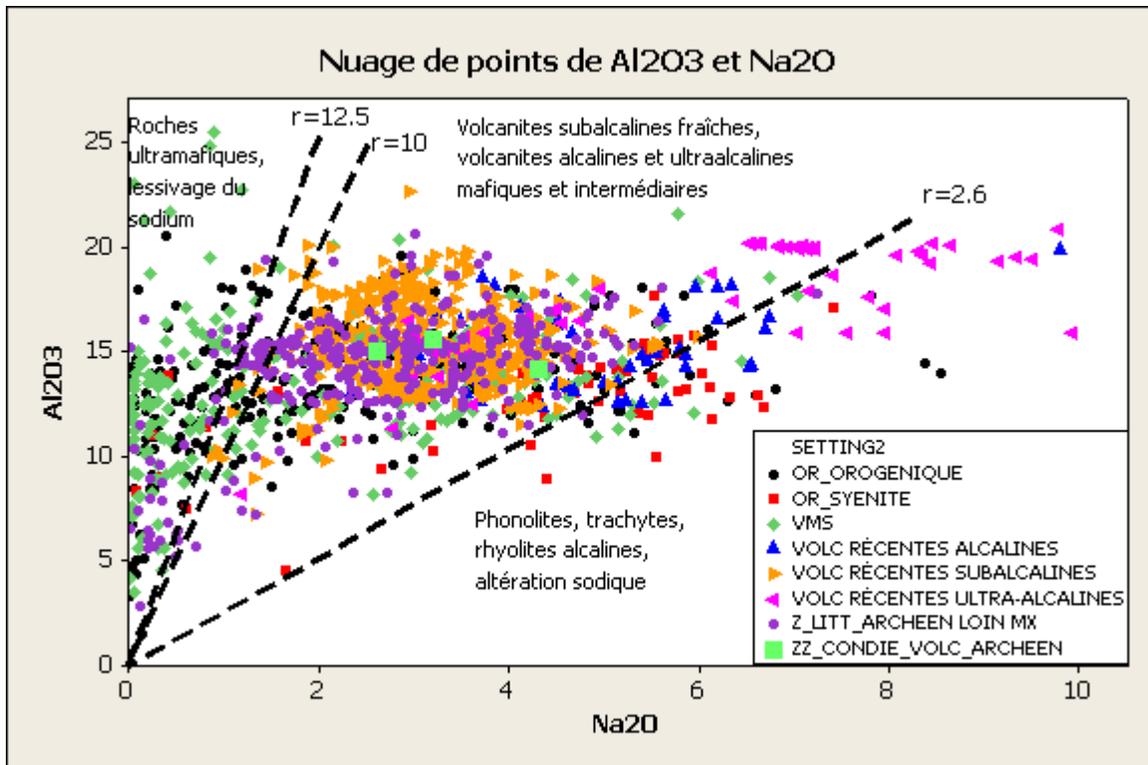
Méthode	Spitz-Darling
Formule	Al_2O_3 / Na_2O
Référence originale	Spitz, G., and Darling, R., 1978, Major and minor element lithogeochemical anomalies surrounding the Louvem copper deposit, Val D'Or, Québec: Canadian Journal of Earth Sciences, 15 , 7, 1161-1169.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Aucune
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Roches ignées seulement.
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'article original mentionne des différences dans les valeurs de l'indice selon les lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de l'indice sont fortement dépendantes des lithologies. La médiane varie entre 7,1 pour les tholéiites à 3 pour les rhyolites. Le caractère alcalin des roches tend à faire diminuer le ratio. Par exemple, les basaltes alcalins ont un ratio similaire aux andésites subalcalines. Toutefois, les variations dues à l'alcalinité sont plus faibles que celles dues au fractionnement.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	10
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	<p>Le seuil d'anomalie de 10 donné dans la publication originale permet effectivement avec la séparation entre des roches fraîches et altérées pour toutes les lithologies sauf les picrites et les tholeiites. Des valeurs de l'indice supérieures à 12,5 sont limitées aux roches altérées. Des valeurs du ratio inférieures à 2,5 sont limitées aux roches altérées et aux volcanites alcalines felsiques (rhyolites alcalines, phonolites, trachytes).</p> <p>Toutefois, cette valeur seuil de 10 pour l'indice est probablement trop élevée pour les lithologies plus felsiques. Par exemple, pour les rhyolites, un ratio de 4,5 permet déjà de séparer les rhyolites fraîches récentes des rhyolites altérées.</p> <p>Les seuils recommandés pour les roches subalcalines seraient les suivants :</p> <p>Tholeiites-picrites : >12,5 Basaltes : >10</p>

	Andésites : >8 Dacites : >5 Rhyolites : >4,5
--	--







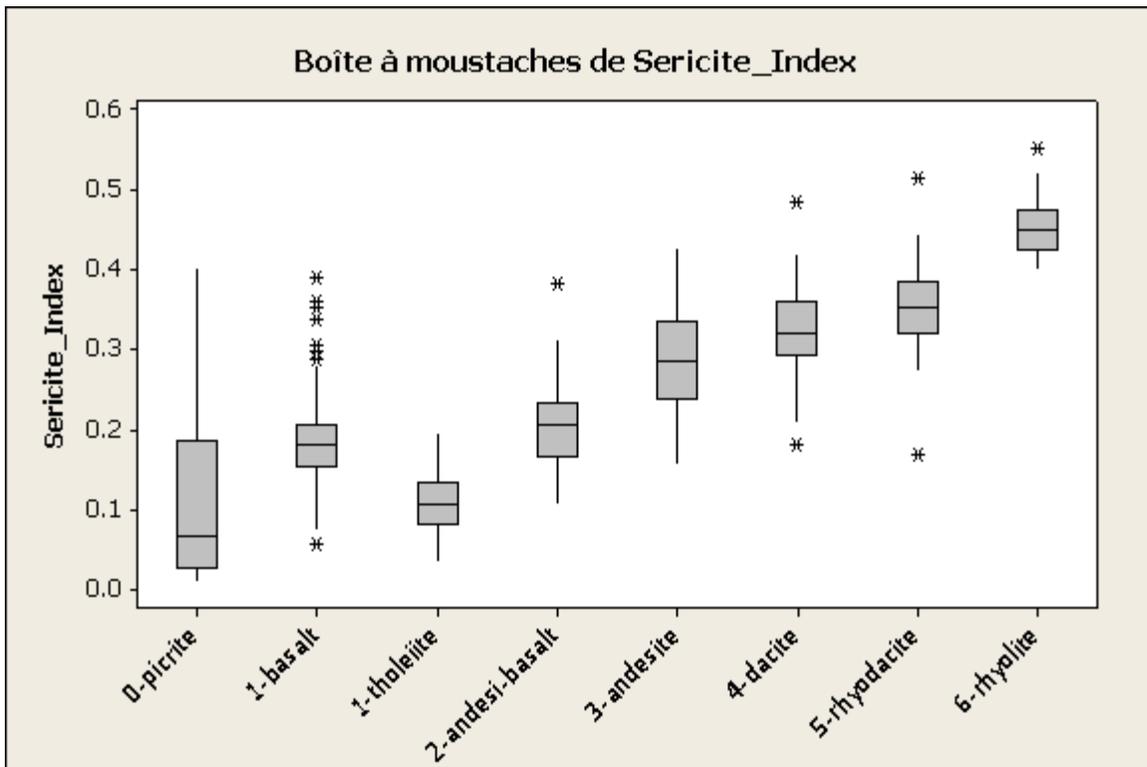


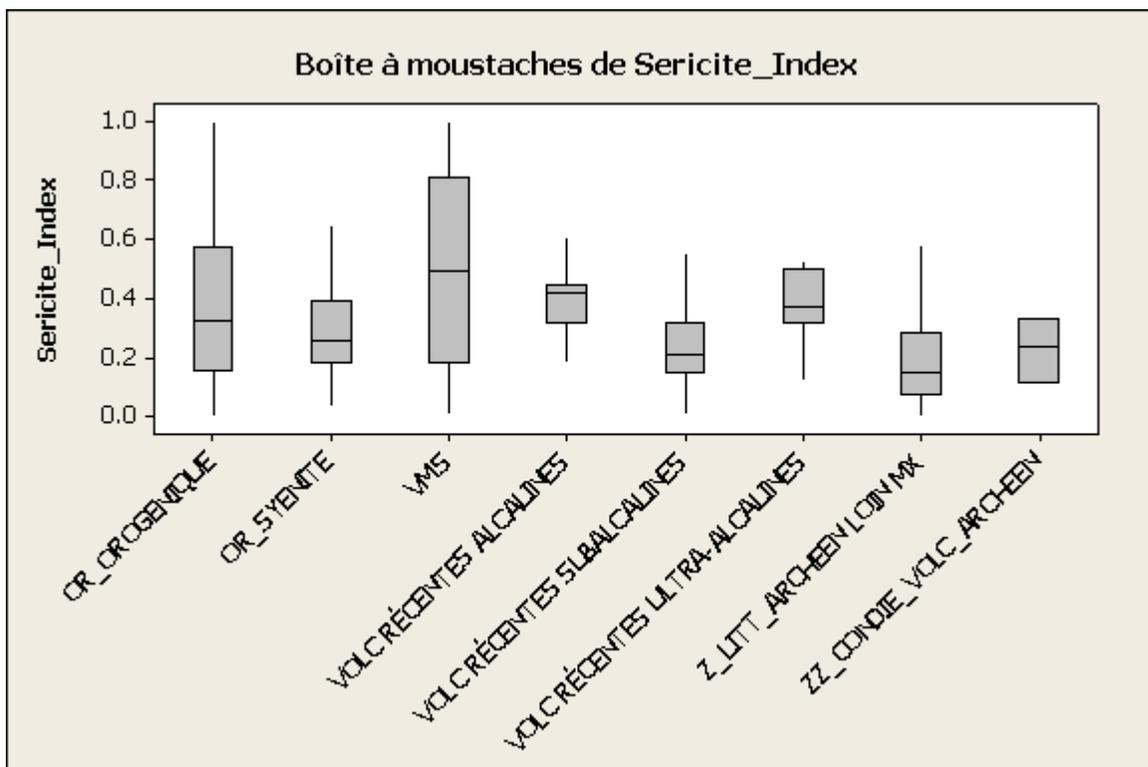
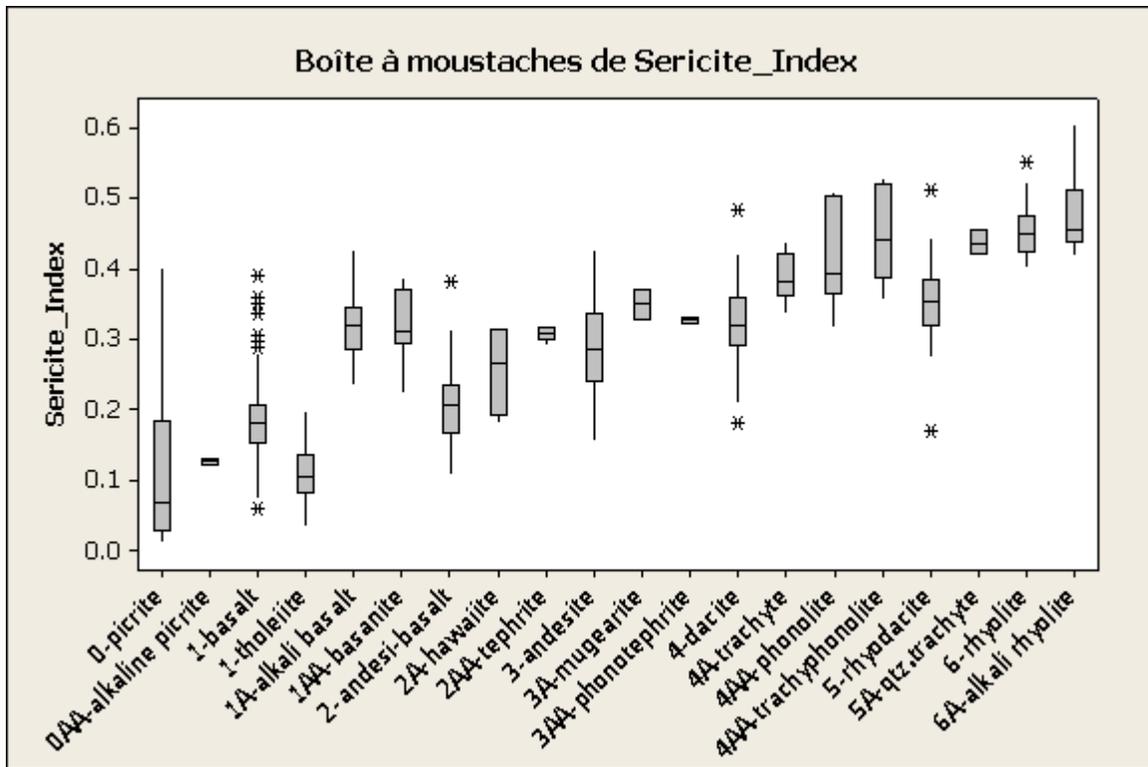
FICHE 1F – Sericite Index

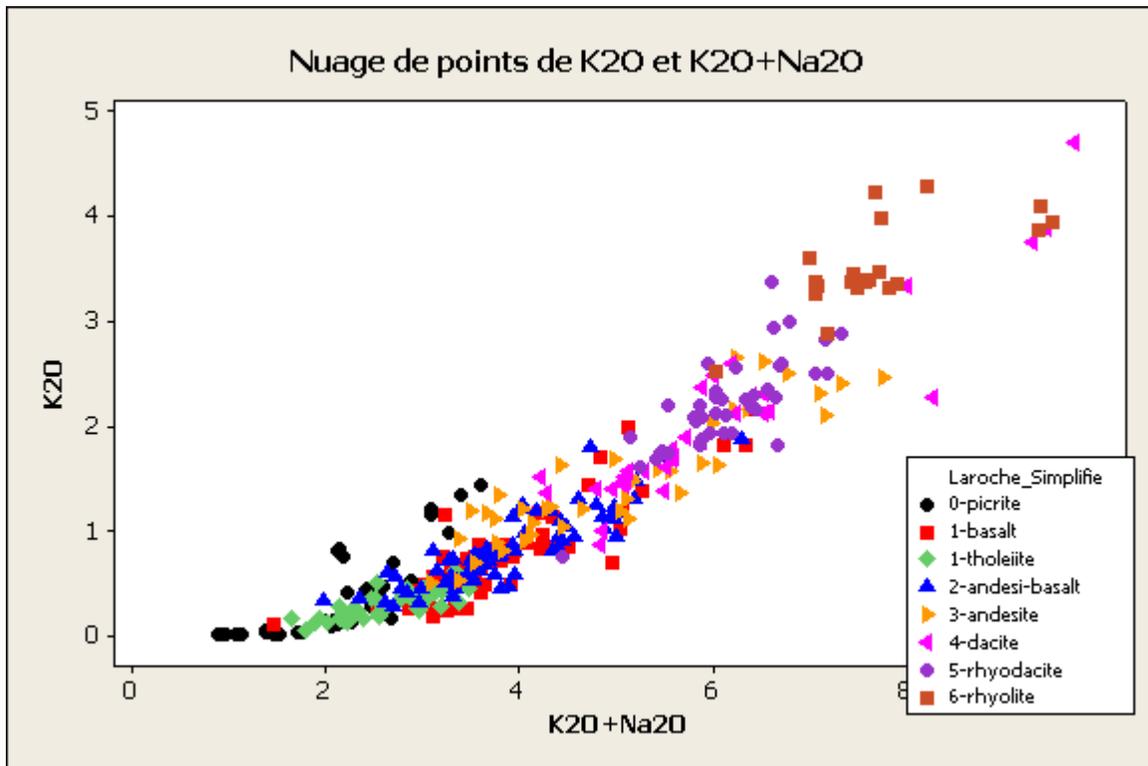
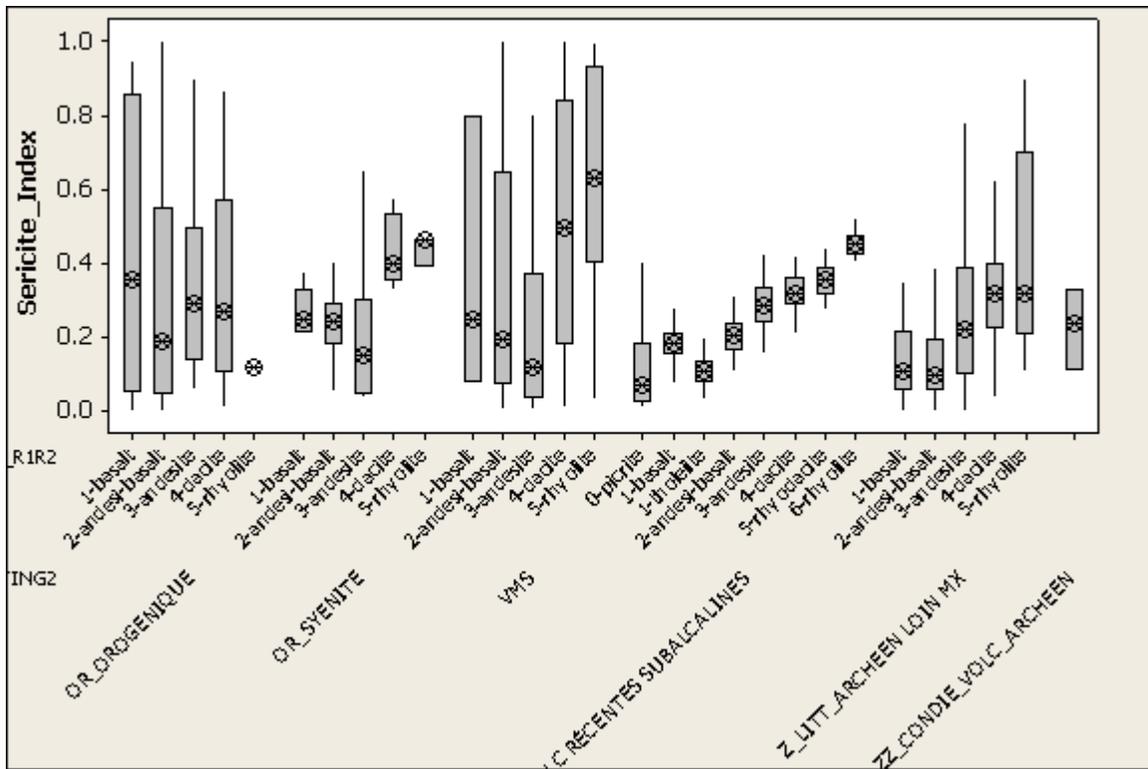
Méthode	Sericite Index
Formule	$K_2O / (K_2O + Na_2O)$
Référence originale	Saeki, Y., and Date, J., 1980, Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits, Akita Prefecture: <i>Mining Geology</i> , 30 , 4, 241-250.
Note référence originale	Note : l'article original est en japonais. Seul un résumé en anglais est disponible.
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" <i>edited by</i> A.G. Gubins, 1997, p. 191–208
Éléments nécessaires	K_2O , Na_2O
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	N/A
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	N/A
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Seules les roches ignées devraient être traitées. Les roches sédimentaires donnent des valeurs anormales.
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	N/A
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	<p>Les valeurs de l'indice sont dépendantes des lithologies. Sur le diagramme binaire K_2O vs K_2O+Na_2O, les roches volcaniques fraîches montrent des ratios qui varient entre 0,12 pour les basaltes subalcalins à 0,5 pour les rhyolites sub-alcalines. Les équivalents alcalins augmentent les valeurs de l'indice de 0,05 à 0,1, ce qui est relativement mineur par rapport à la différence entre basaltes et rhyolites. On peut toutefois définir une équation linéaire qui comprend une constante et qui permet d'obtenir une valeur de l'indice similaire pour toutes les lithologies volcaniques fraîches sauf les roches ultramafiques. En effet, le diagramme binaire montre bien un aplatissement de la tendance au niveau des picrites.</p> <p>Une variante de l'indice indépendante des lithologies serait donc $(K_2O+1)/(0,5(K_2O+Na_2O))$. Cet indice est alors plus indépendant des lithologies. Une valeur de 1 indique une altération absente. Plus les valeurs s'en éloignent, plus les valeurs sont indicatrices d'altération.</p>
Seuil d'anomalie selon la référence originale	N/A
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Le diagramme binaire K_2O vs K_2O+Na_2O indique que les volcaniques récentes définissent un secteur très précis du diagramme. Il faut noter que le diagramme de Hughes donne la même information. Comme il a été mentionné

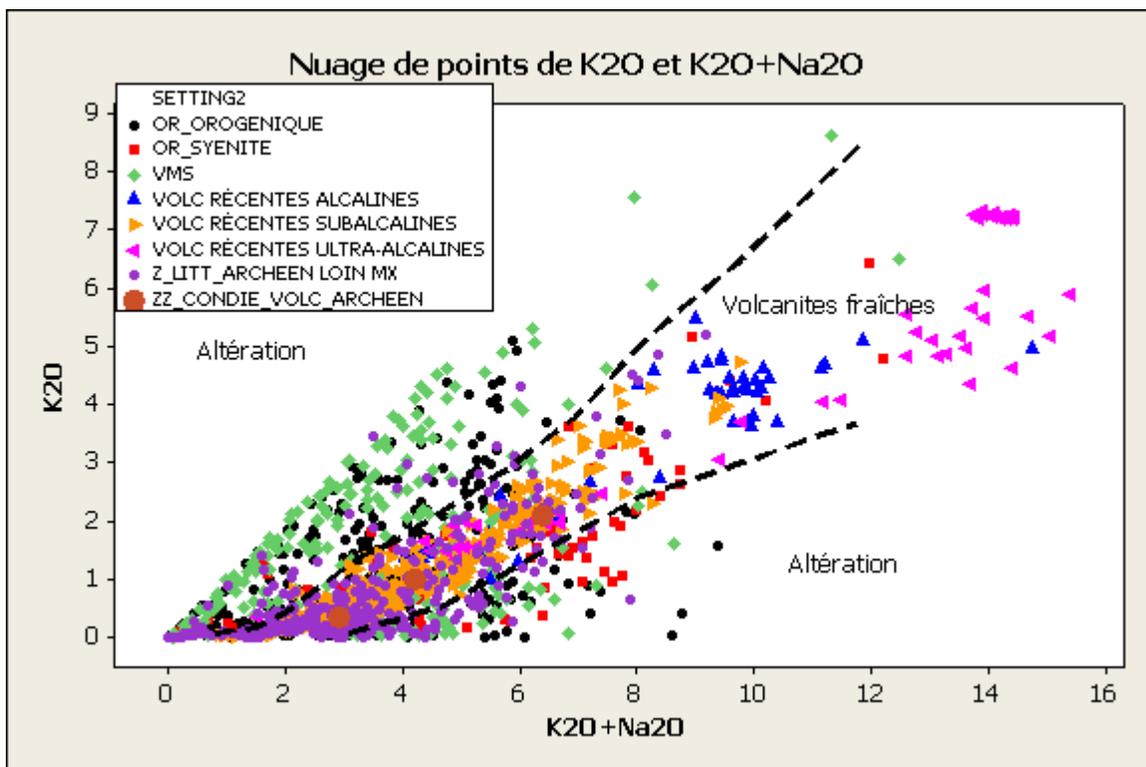
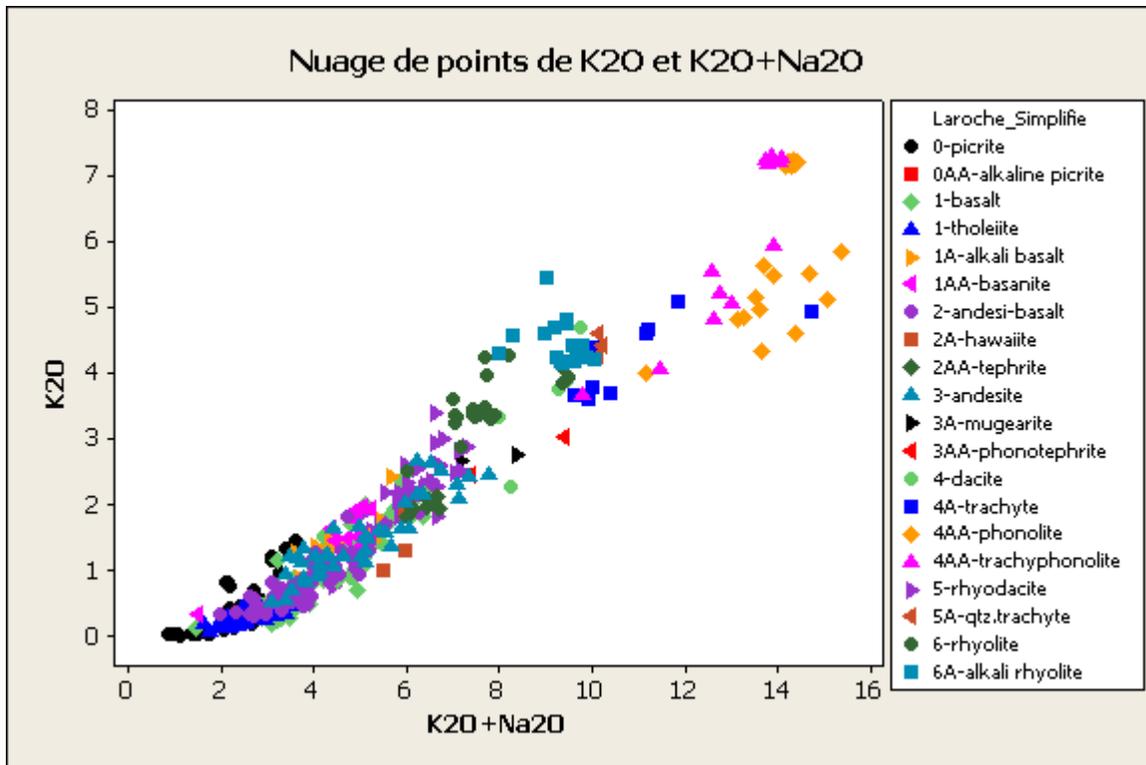
précédemment, le champ des roches volcaniques fraîches n'est pas défini par une droite passant par l'origine sur ce même diagramme. Il n'est donc pas possible de fixer une valeur fixe de l'indice pour séparer les roches fraîches des altérations. Toutefois, les champs sur le diagramme permettent de séparer les roches fraîches de l'altération.

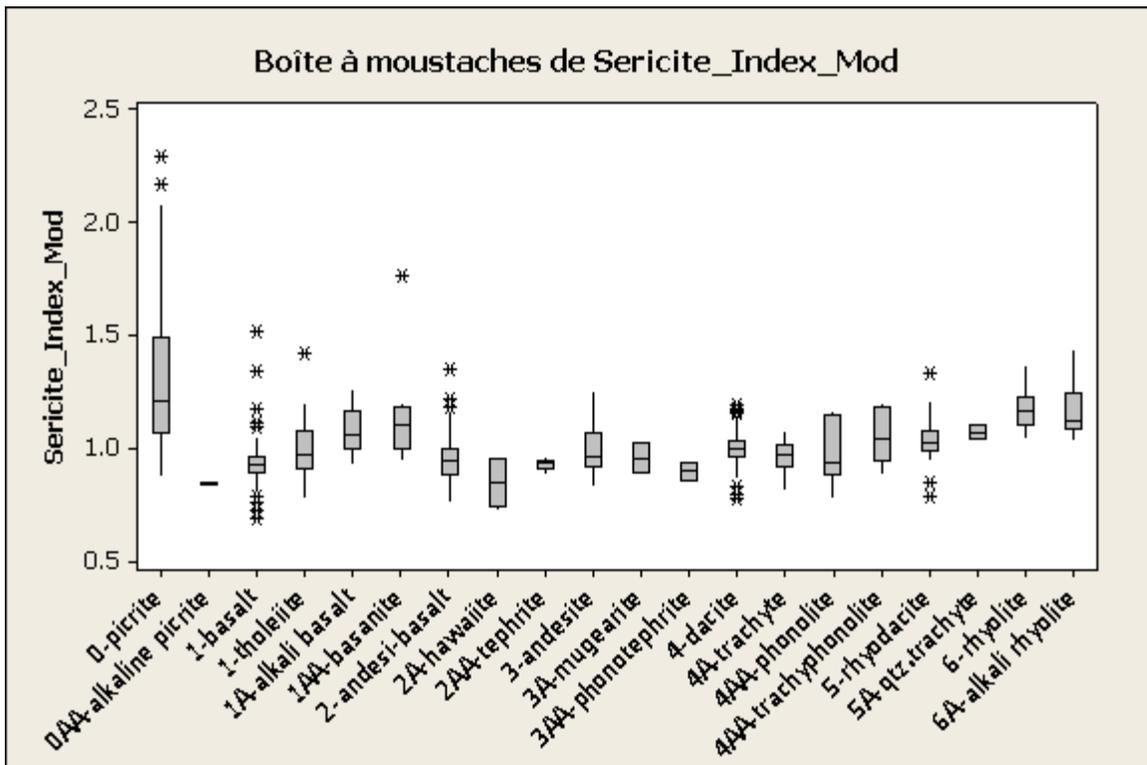
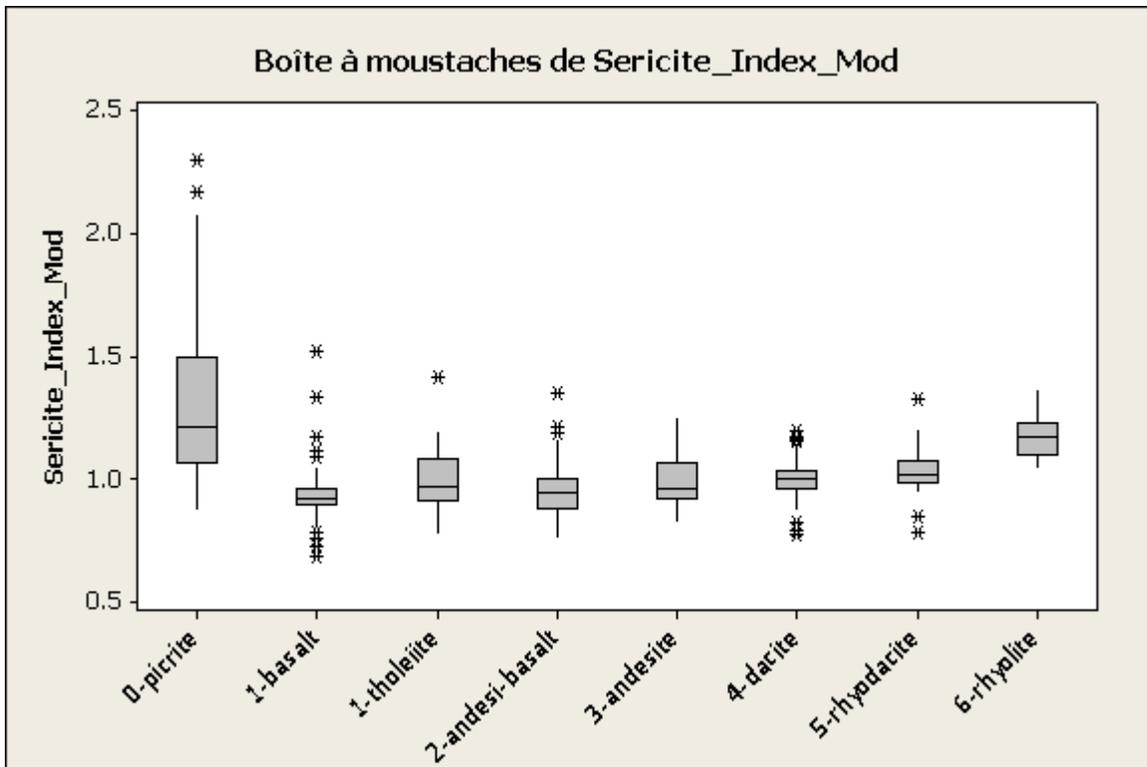
En utilisant le diagramme K_2O+1 vs $0,5(K_2O+Na_2O)$ on peut proposer un seuil pour les roches fraîches. À partir de ce diagramme, on peut fixer des seuils de 0,75 à 1,4 pour les roches fraîches. Des valeurs plus faibles montrent une altération et les plus élevées montrent une altération également. Il faut noter que ce seuil n'est pas valide pour les picrites.

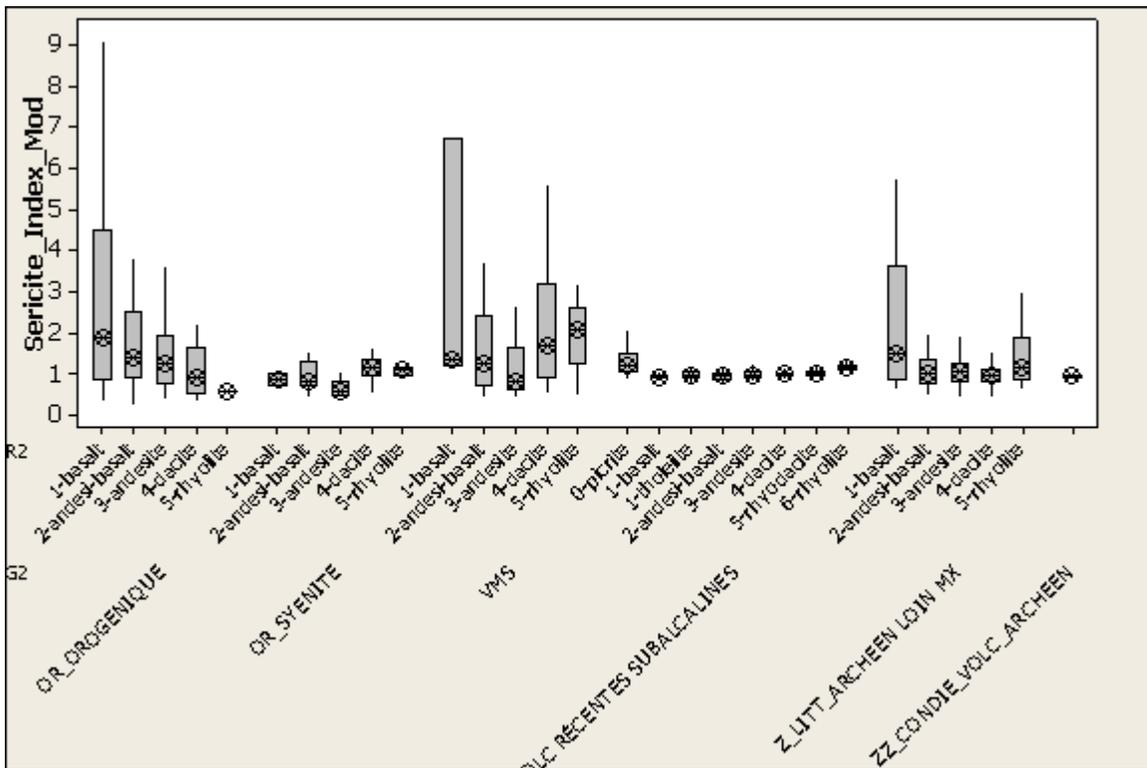
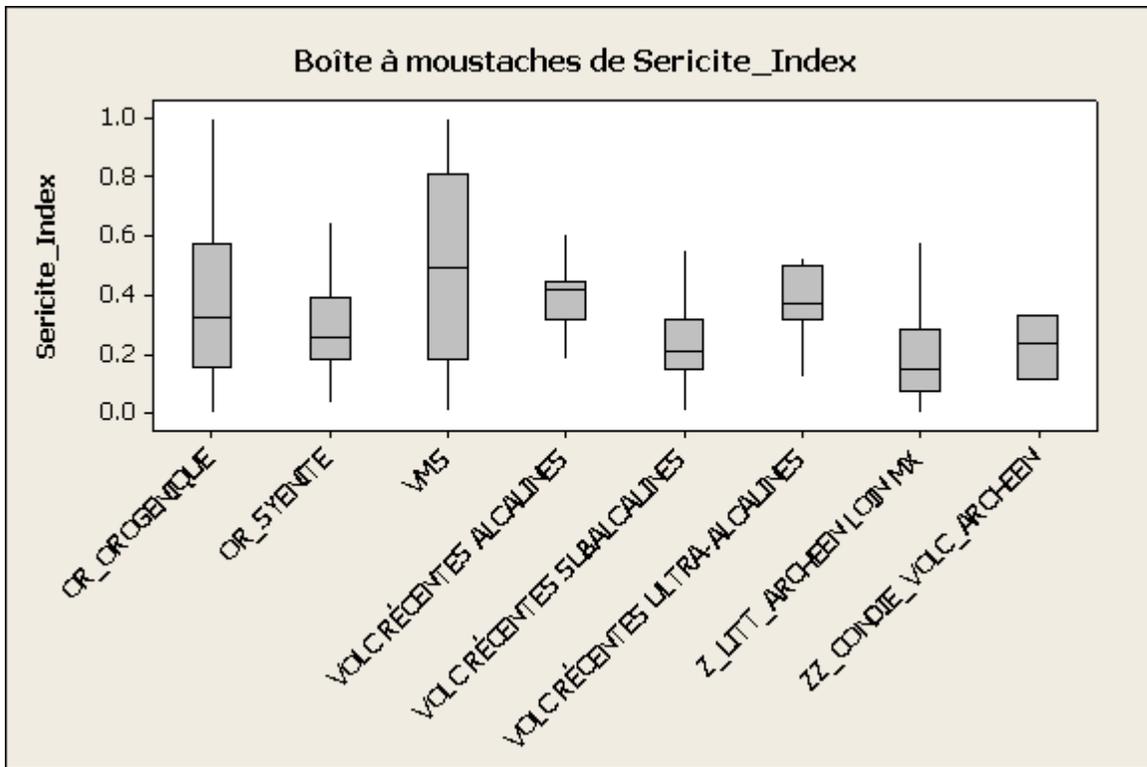


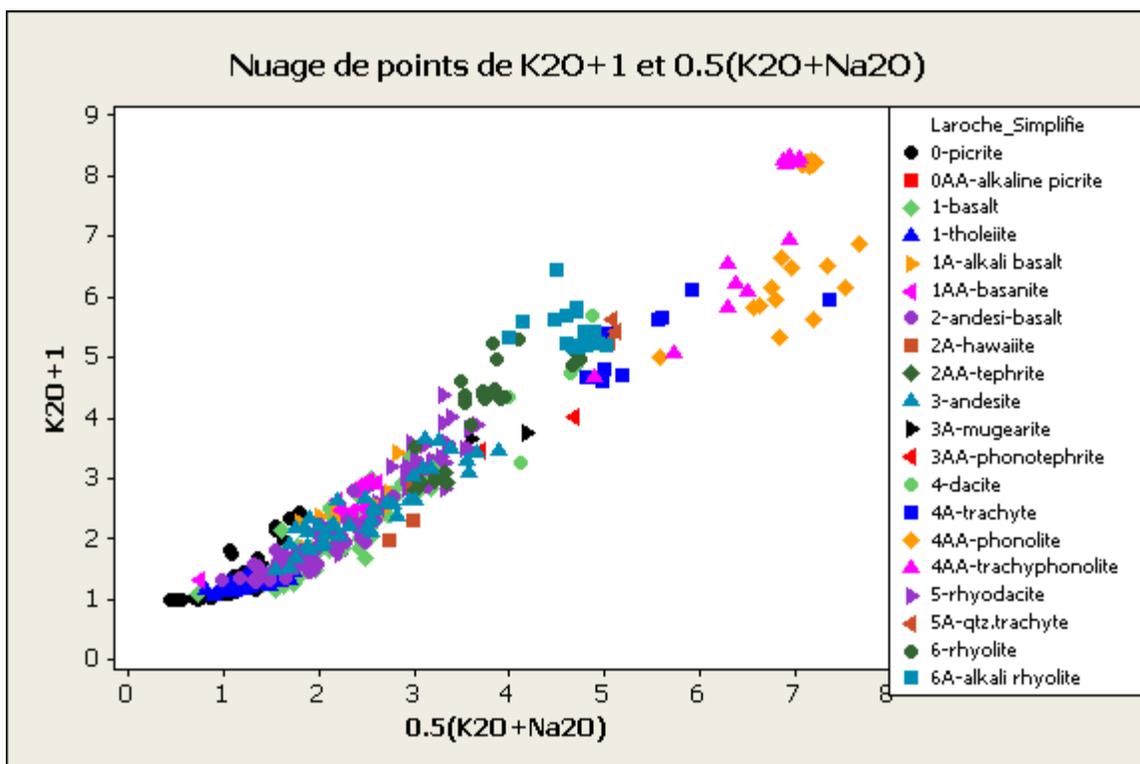
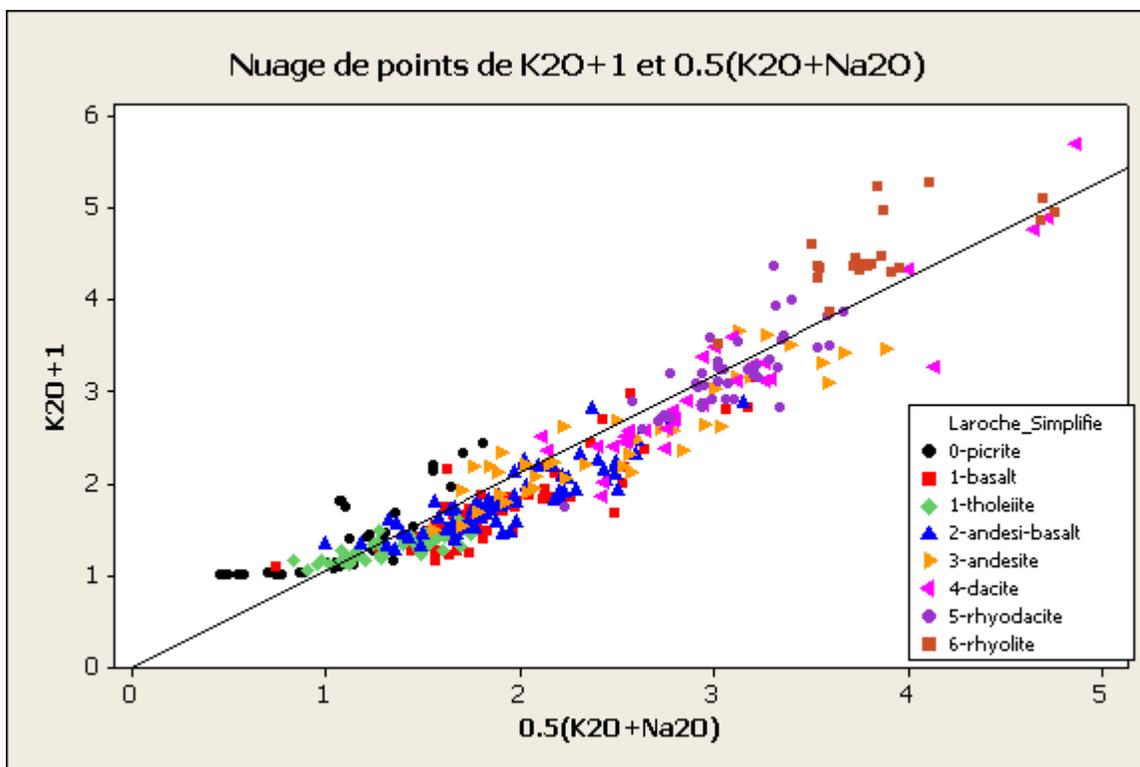


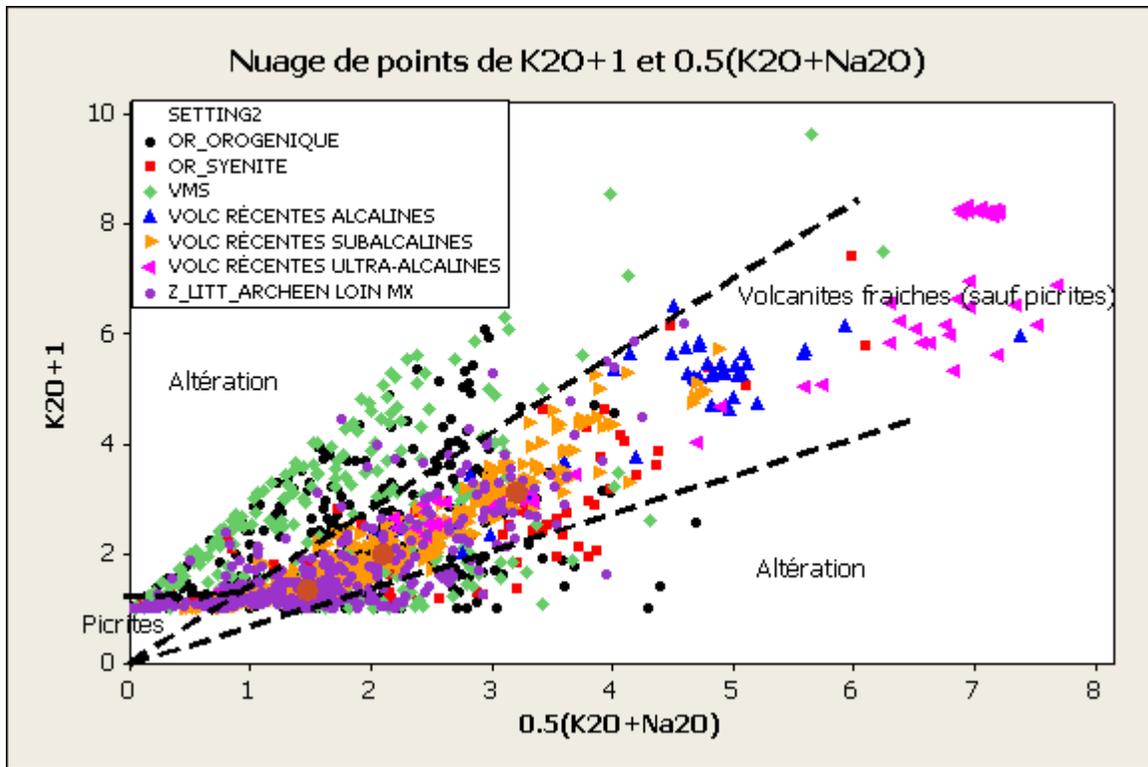








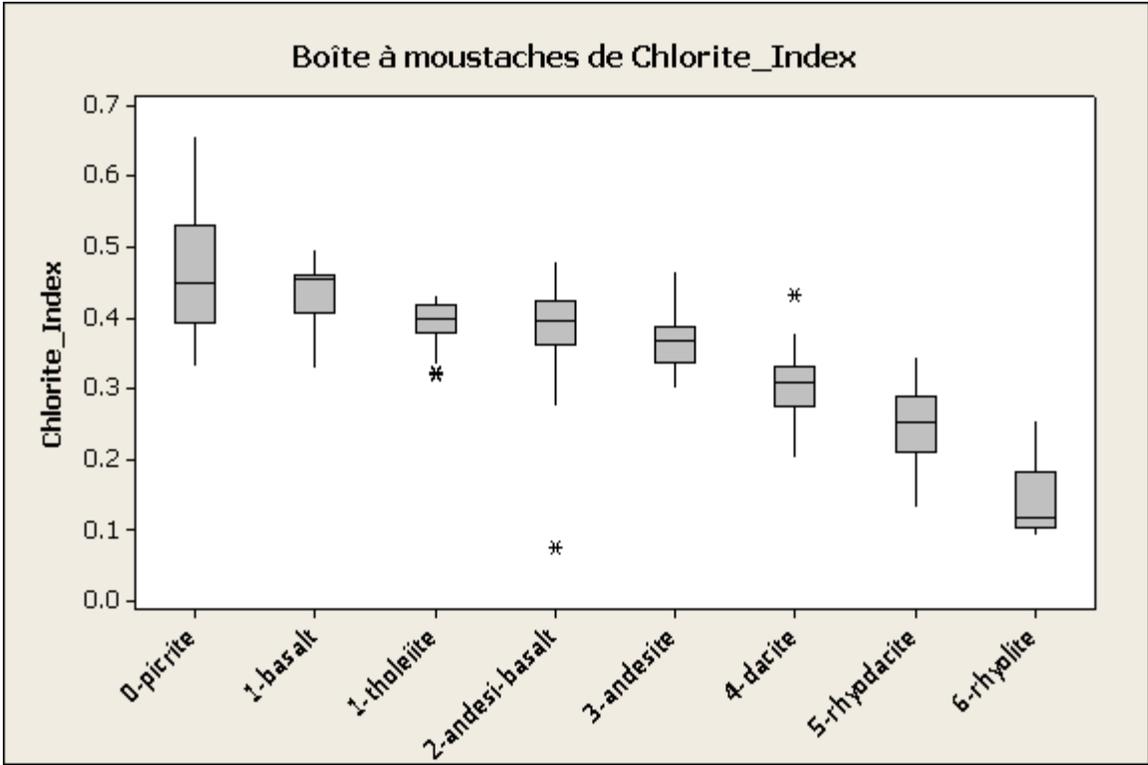


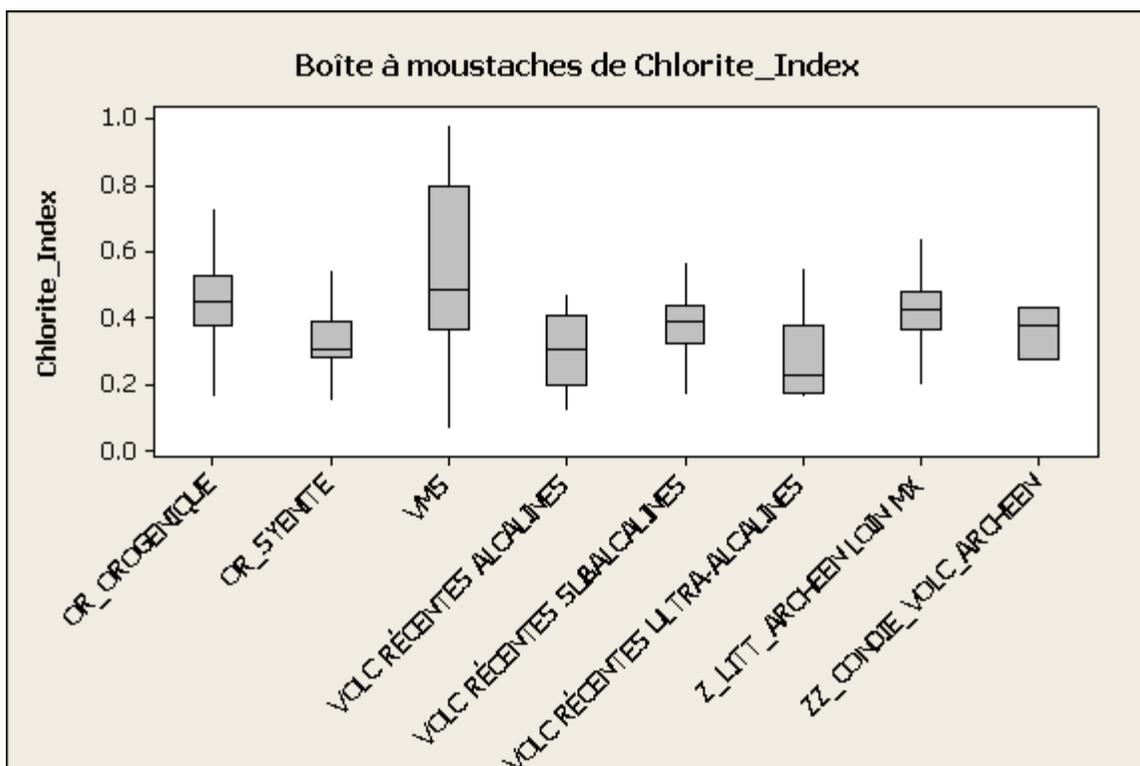
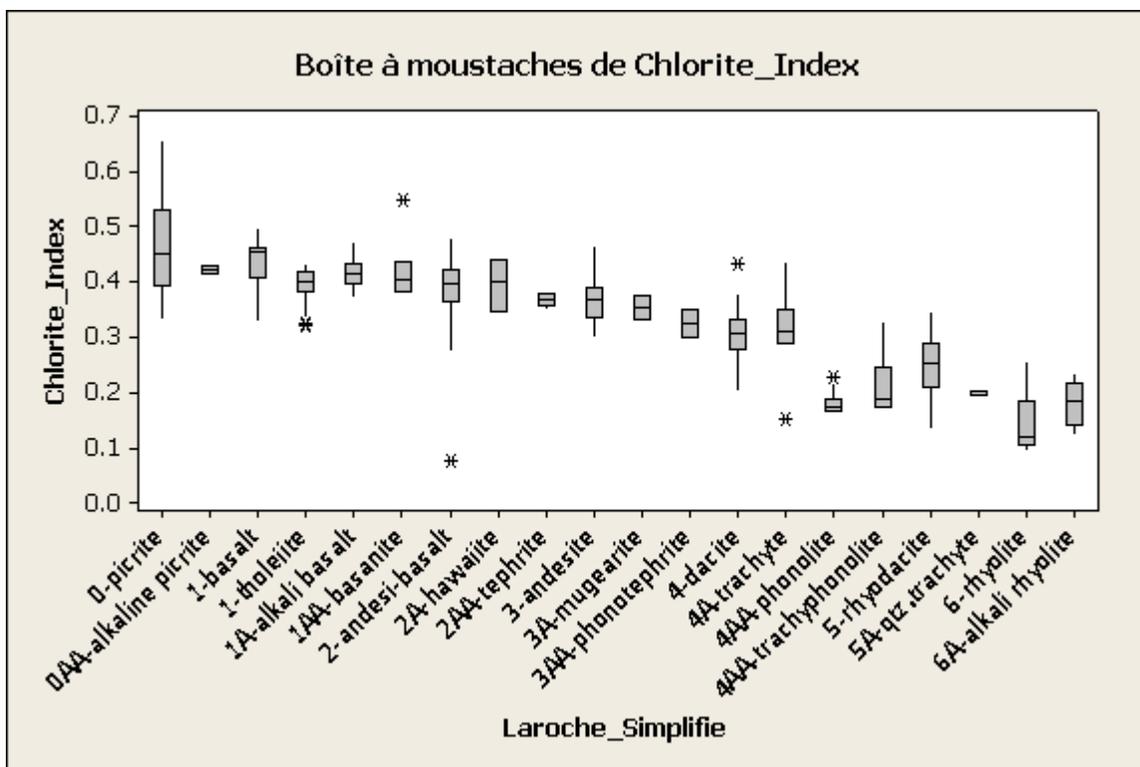


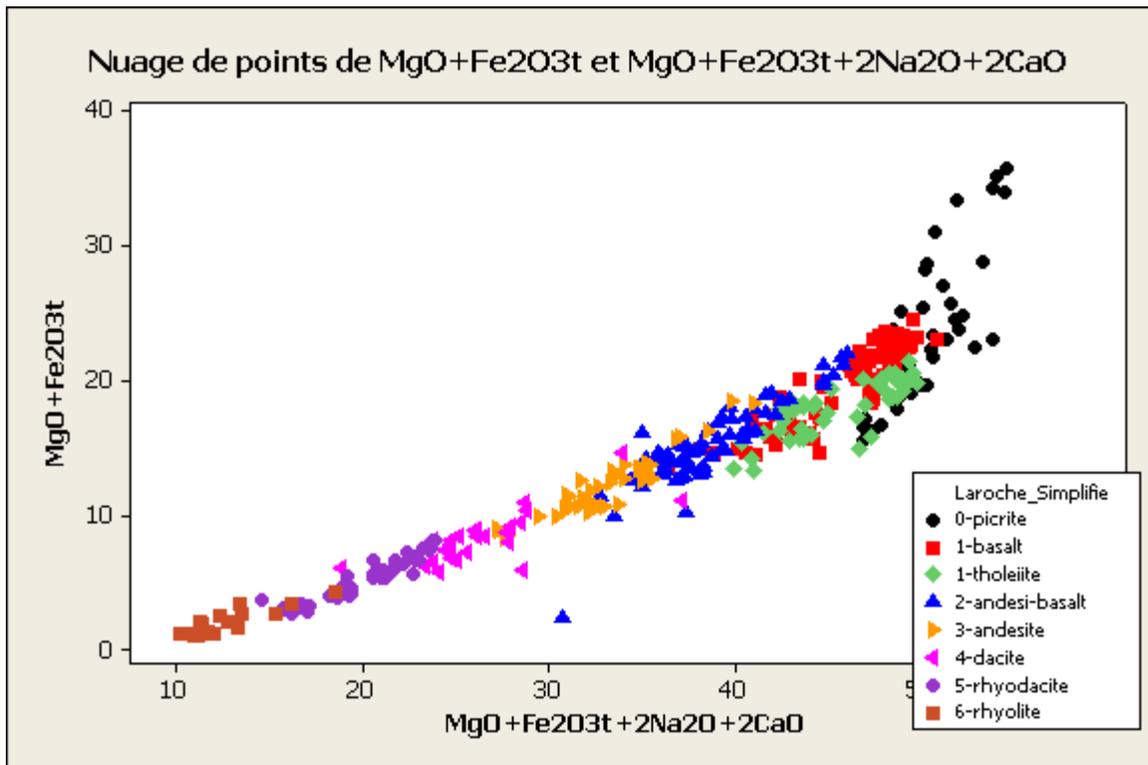
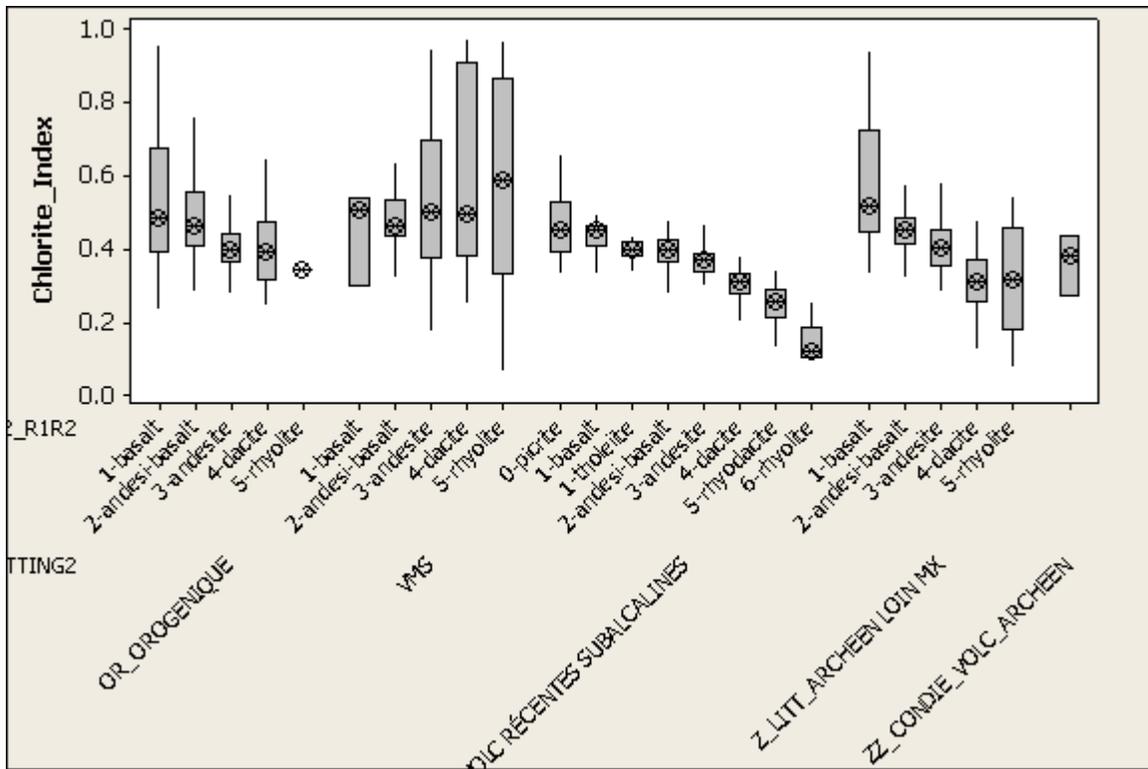
FICHE 1G – Chlorite Index

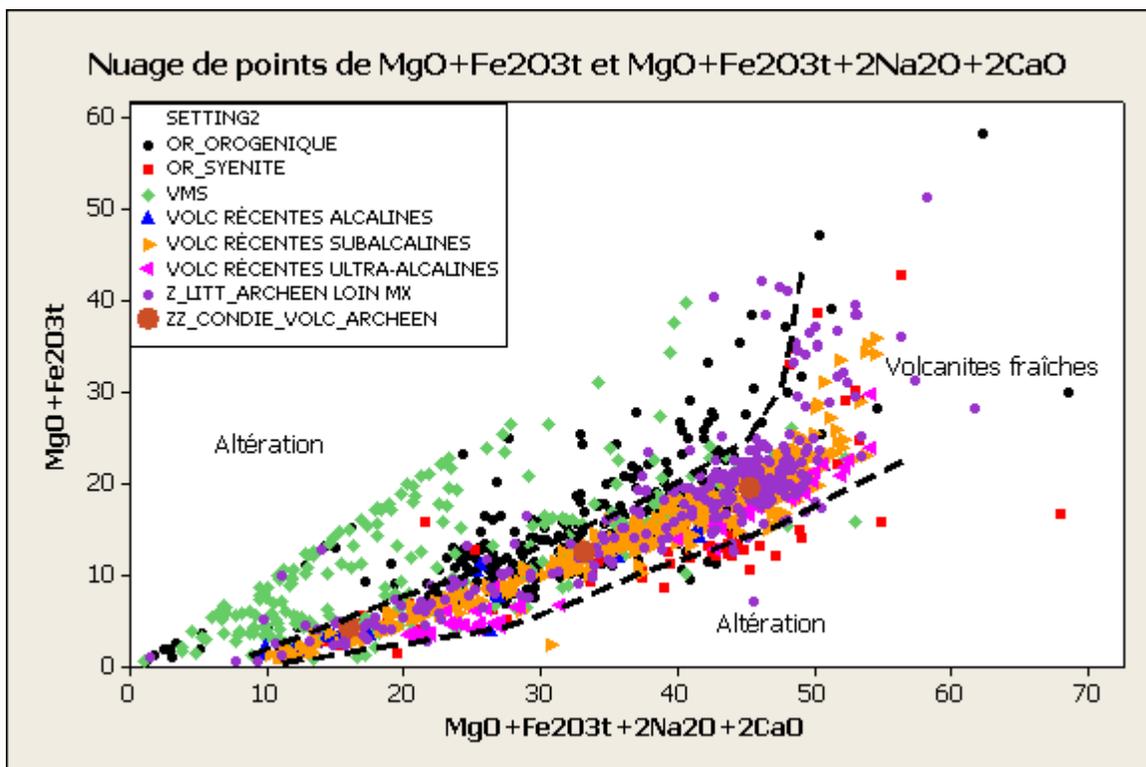
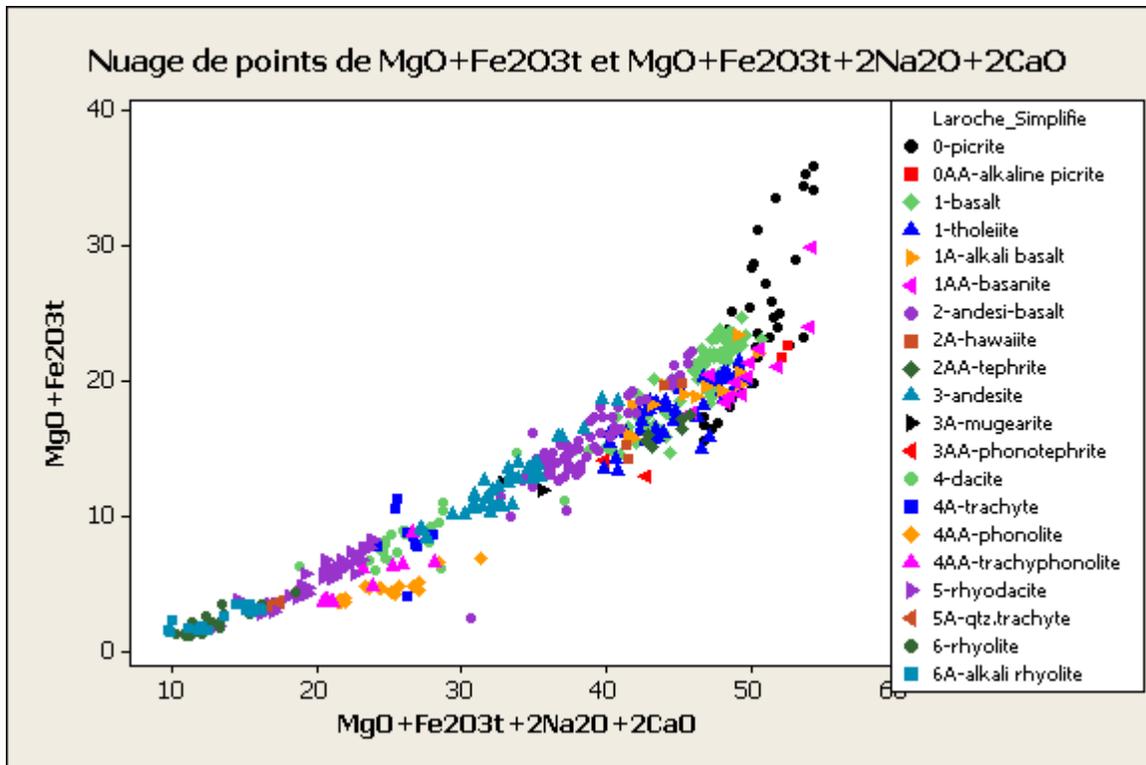
Méthode	Chlorite Index
Formule	$\frac{\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}}{\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} + 2\text{CaO} + 2\text{Na}_2\text{O}}$ <p>Note : L'article de Franklin (1997) ne mentionne pas qu'il faut utiliser Fe₂O₃ total. Par contre, comme la chlorite contient en fait le FeO, il ne ferait pas de sens d'utiliser le vrai Fe₂O₃; il est probable que ce soit le Fe₂O₃ total à utiliser.</p>
Référence originale	Saeki, Y., and Date, J., 1980, Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits, Akita Prefecture: Mining Geology, 30 , 4, 241-250.
Note référence originale	Note : l'article original est en japonais. Seul un résumé en anglais est disponible.
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by A.G. Gubins, 1997, p. 191–208
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Roches ignées seulement
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	<p>Les valeurs de l'indice sont fortement dépendantes des lithologies. Les valeurs pour les basaltes subalcalins sont d'environ 0,4 alors qu'elles sont de 0,18 pour les rhyolites subalcalines. L'alcalinité tend à faire augmenter les valeurs de l'indice pour les basaltes mais diminuer pour les dacites. La diminution est assez importante pour les lithologies plus felsiques.</p> <p>Sur le diagramme binaire $(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}) / (\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} + 2\text{CaO} + 2\text{Na}_2\text{O})$, les valeurs des roches volcaniques récentes et fraîches se distribuent le long d'une droite qui ne passe pas par l'origine. C'est pourquoi les valeurs de l'indice varient selon les lithologies. Il faut noter que les picrites constituent une exception et divergent vers du nuage linéaire des autres lithologies.</p> <p>Toutefois, comme pour le cas de l'indice séricite, il est possible d'en dériver un indice qui soit indépendant des lithologies. À partir du calcul de la pente et de l'ordonnée à l'origine, on peut obtenir l'indice $(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} + 5) / 0,5 * (\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} + 2\text{CaO} + 2\text{Na}_2\text{O})$.</p>
Seuil d'anomalie selon la référence originale	

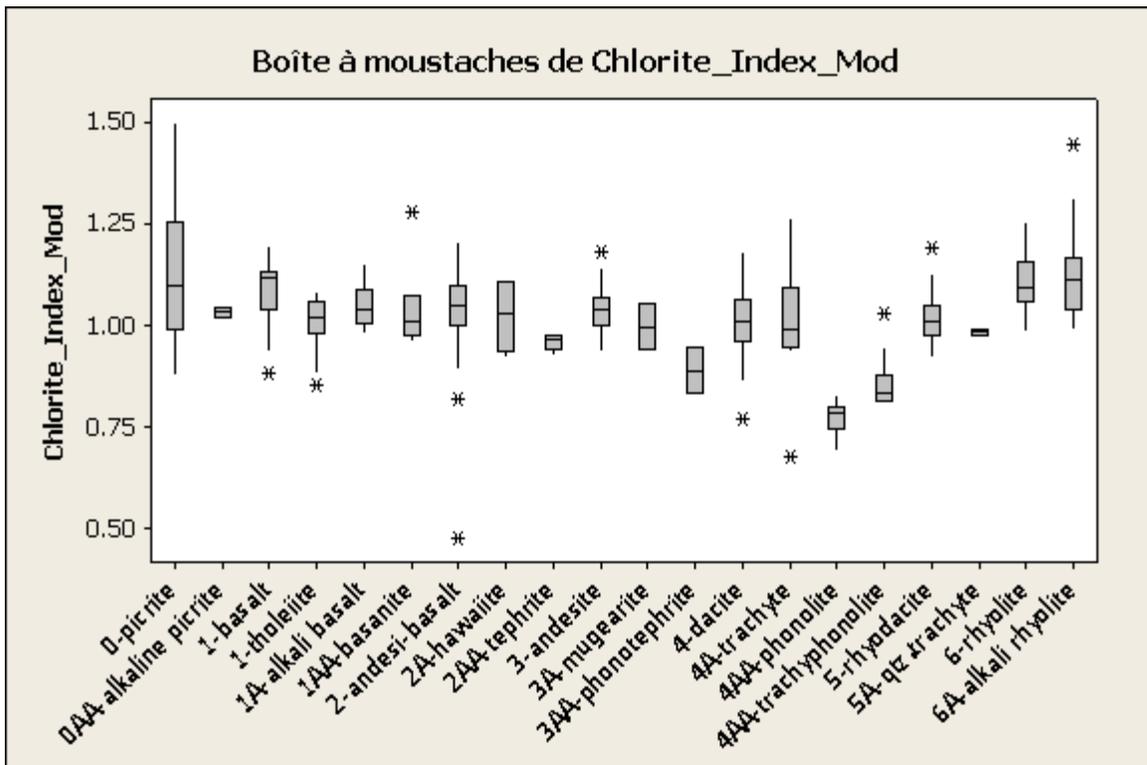
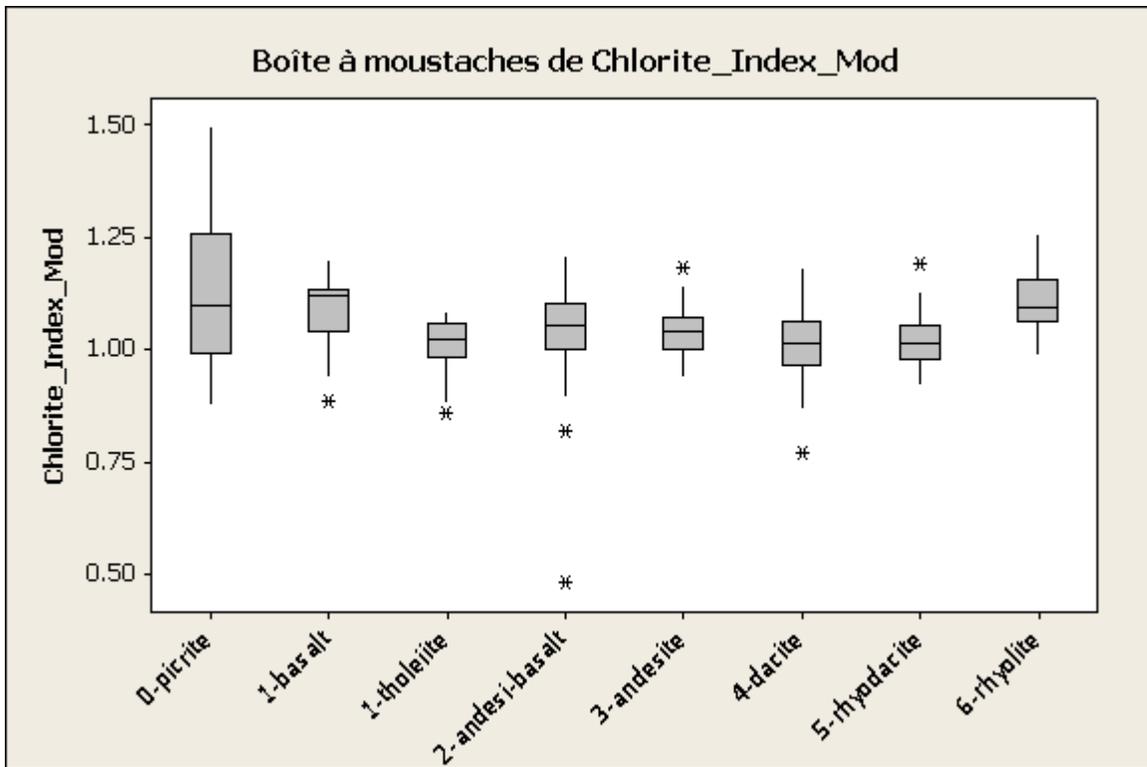
<p>Seuil d'anomalie inféré selon les tests</p>	<p>Le diagramme $(MgO + Fe_2O_3t) / (MgO + Fe_2O_3t + 2CaO + 2Na_2O)$ indique que les volcaniques récentes définissent un secteur très précis du diagramme, très distinct des roches altérées. Comme il a été mentionné précédemment, le champ des roches volcaniques fraîches n'est pas défini par une droite passant par l'origine sur ce même diagramme. Il n'est donc pas possible de fixer une valeur fixe de l'indice pour séparer les roches fraîches des altérations. Pour les basaltes, la valeur seuil proposée est de 0,5, de 0,45 pour les andésites et de 0,3 pour les rhyolites.</p> <p>L'indice modifié $(MgO + Fe_2O_3t + 5) / 0,5*(MgO + Fe_2O_3t + 2CaO + 2Na_2O)$ permet de fixer un seul seuil pour les roches volcaniques alcalines ou subalcalines, de basalte à rhyolite. Des valeurs supérieures à 1,25 indiquent une altération, et valeurs inférieures à 0,9 indiquent une altération également. Il faut noter que les roches ultramafiques comme les picrites doivent être exclues pour la détermination de l'altération. Toutefois, elles peuvent facilement être différenciées sur le diagramme X-Y correspondant à l'indice. Les roches ultralcalines différenciées (phonolites et trachytes) doivent être exclues pour l'altération calco-sodique.</p>
--	---

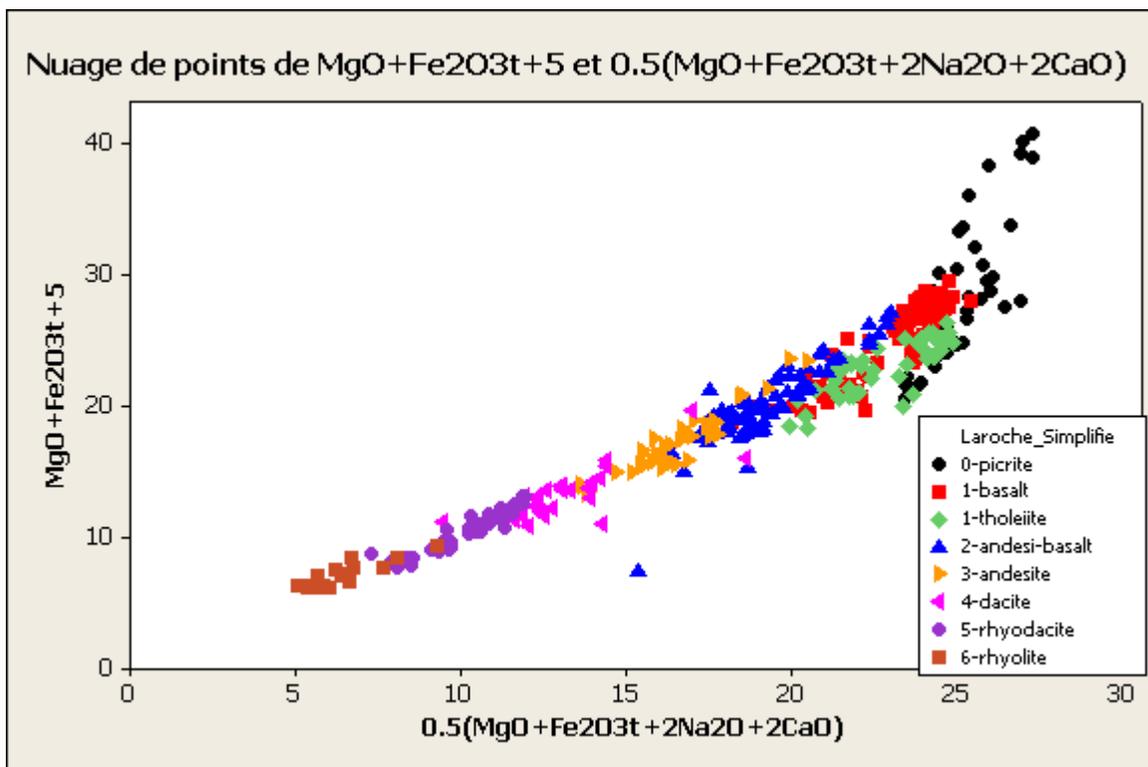
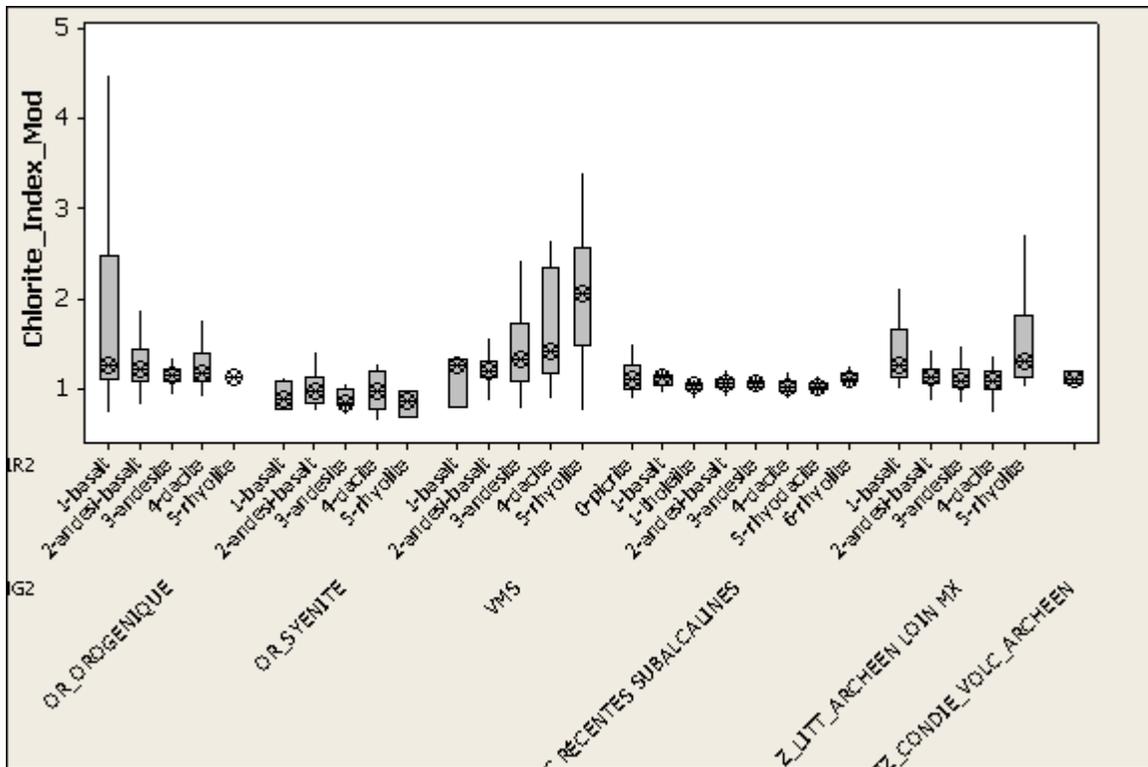


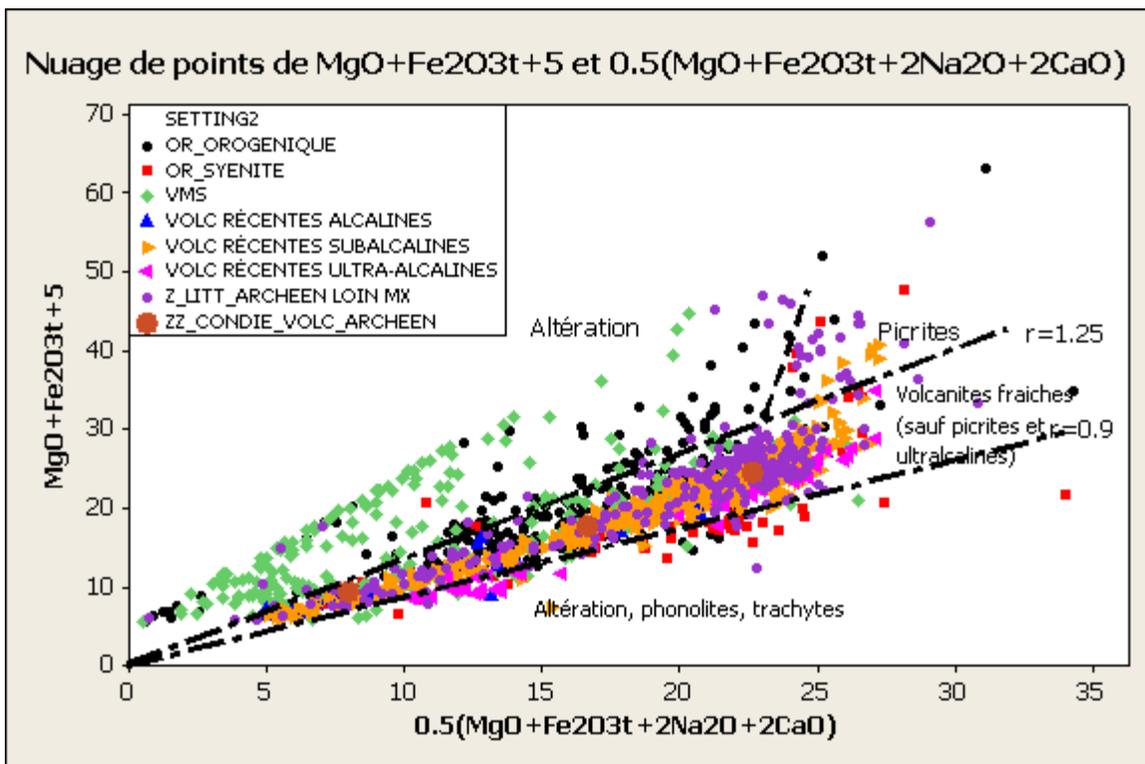
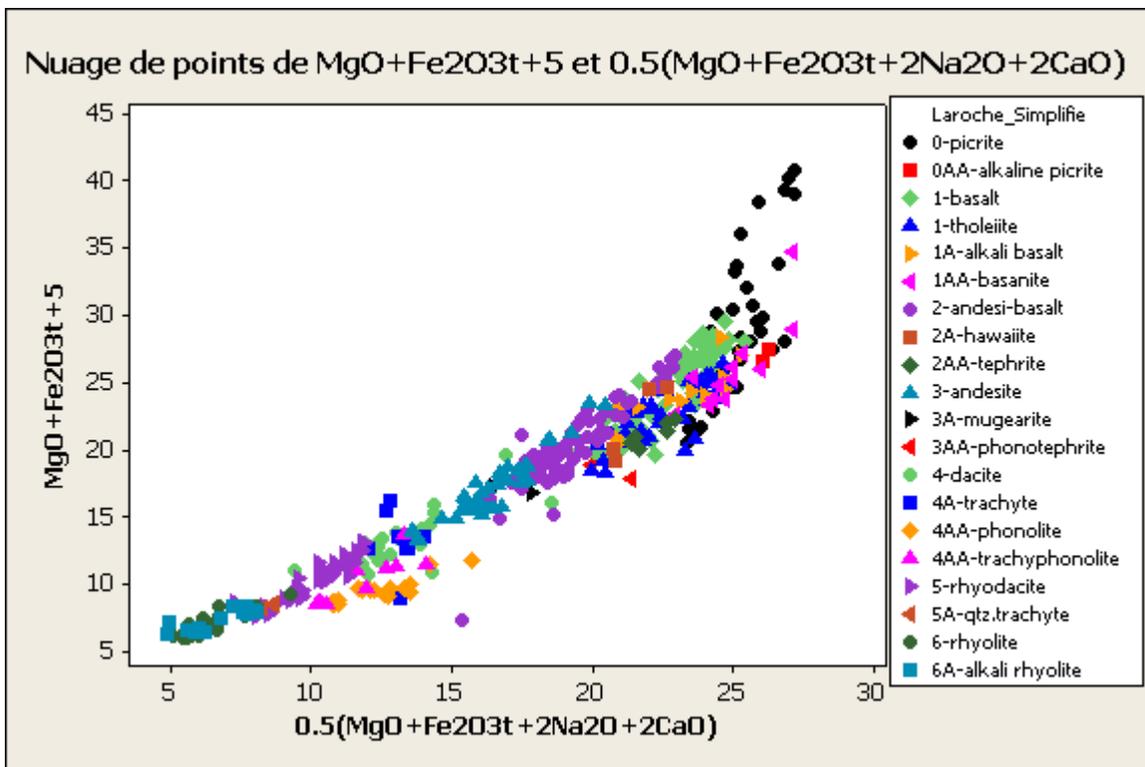










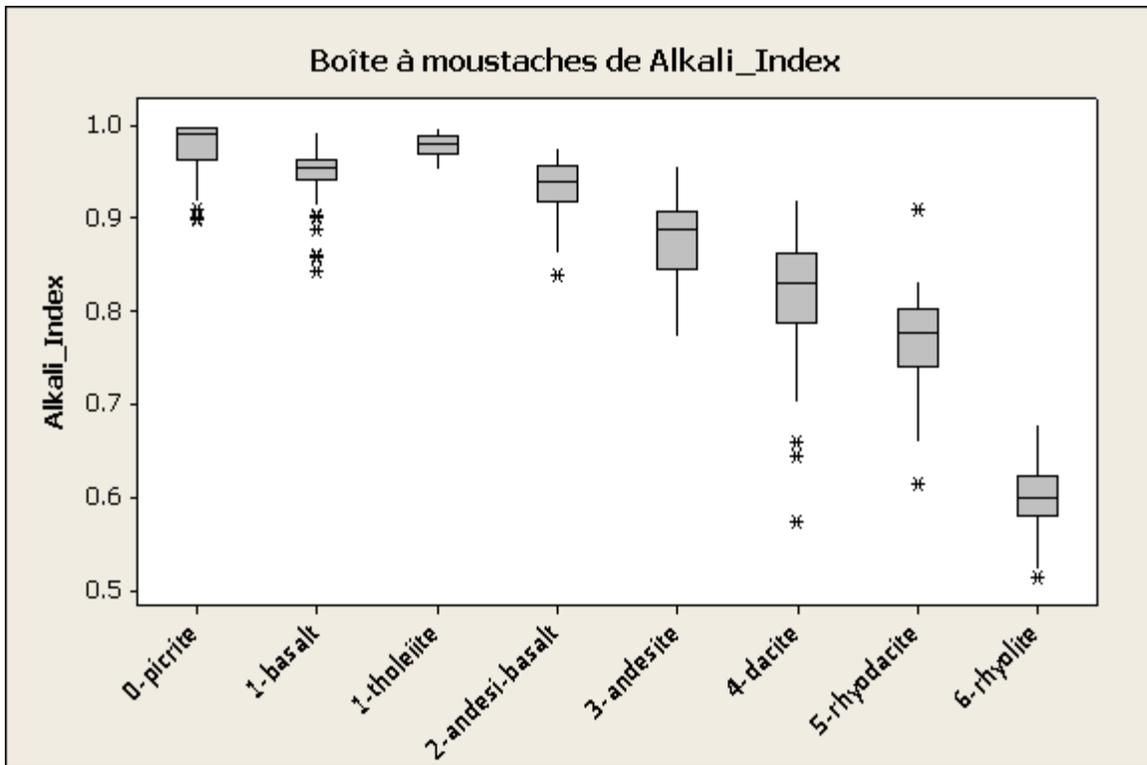


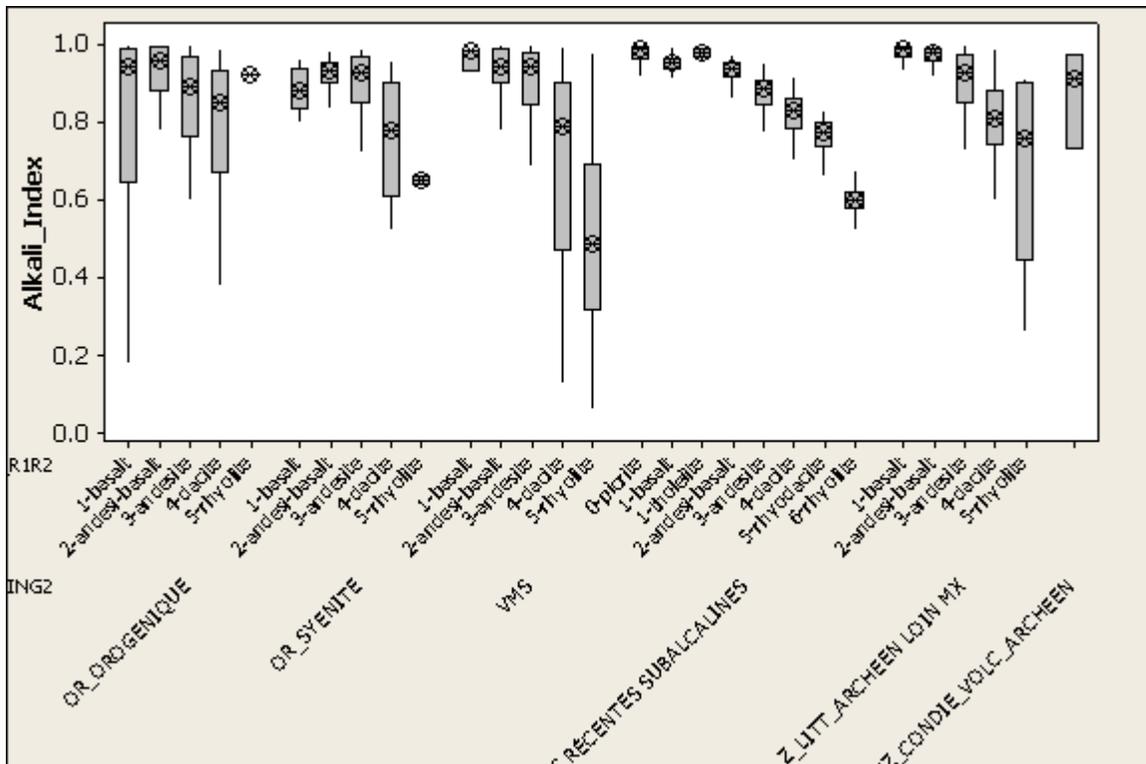
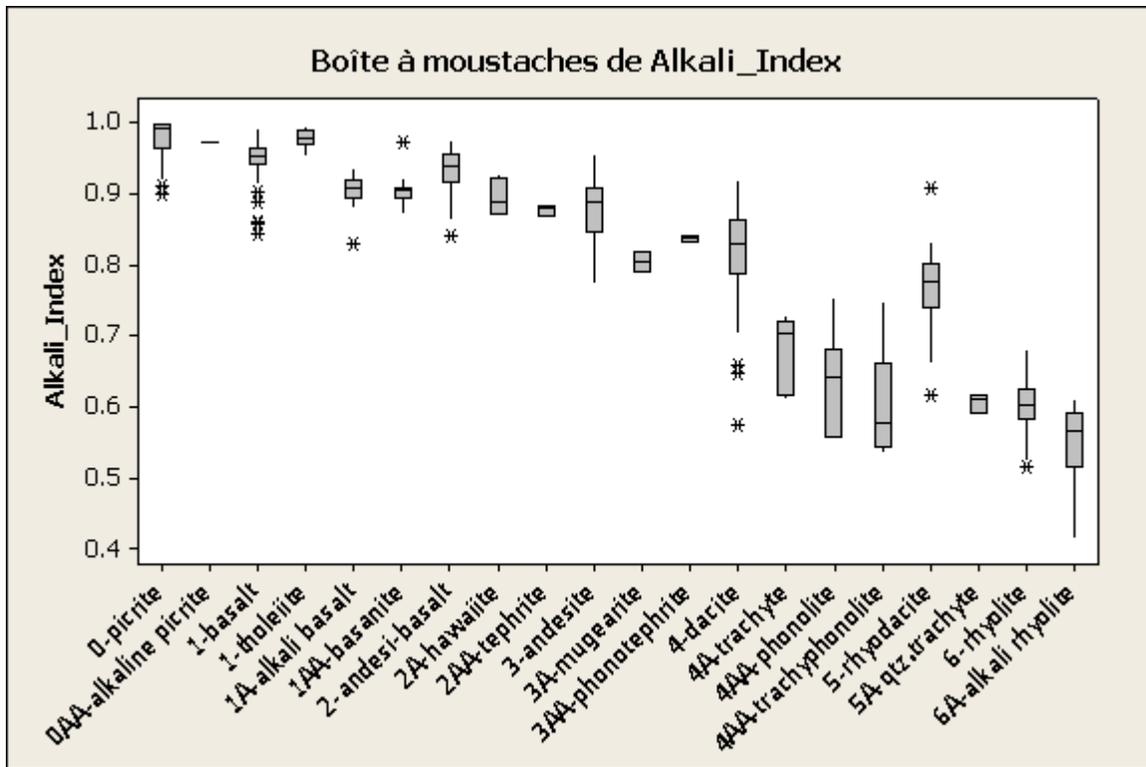
FICHE 1H – Alkali Index

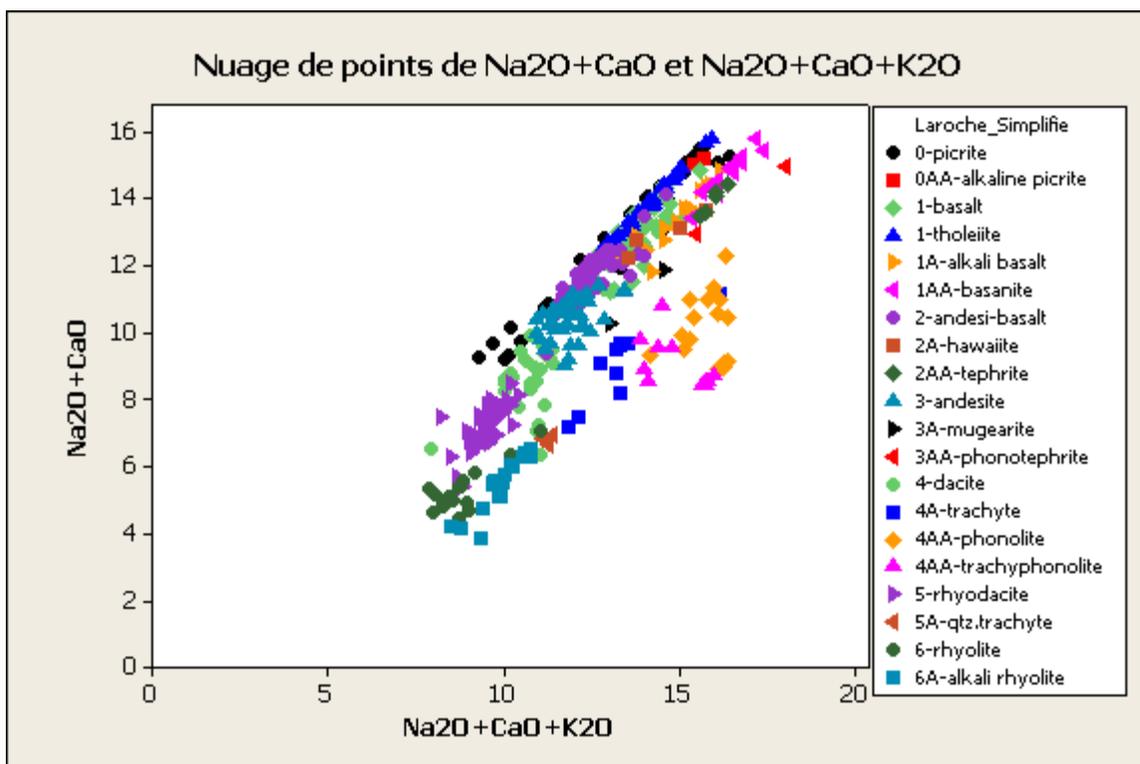
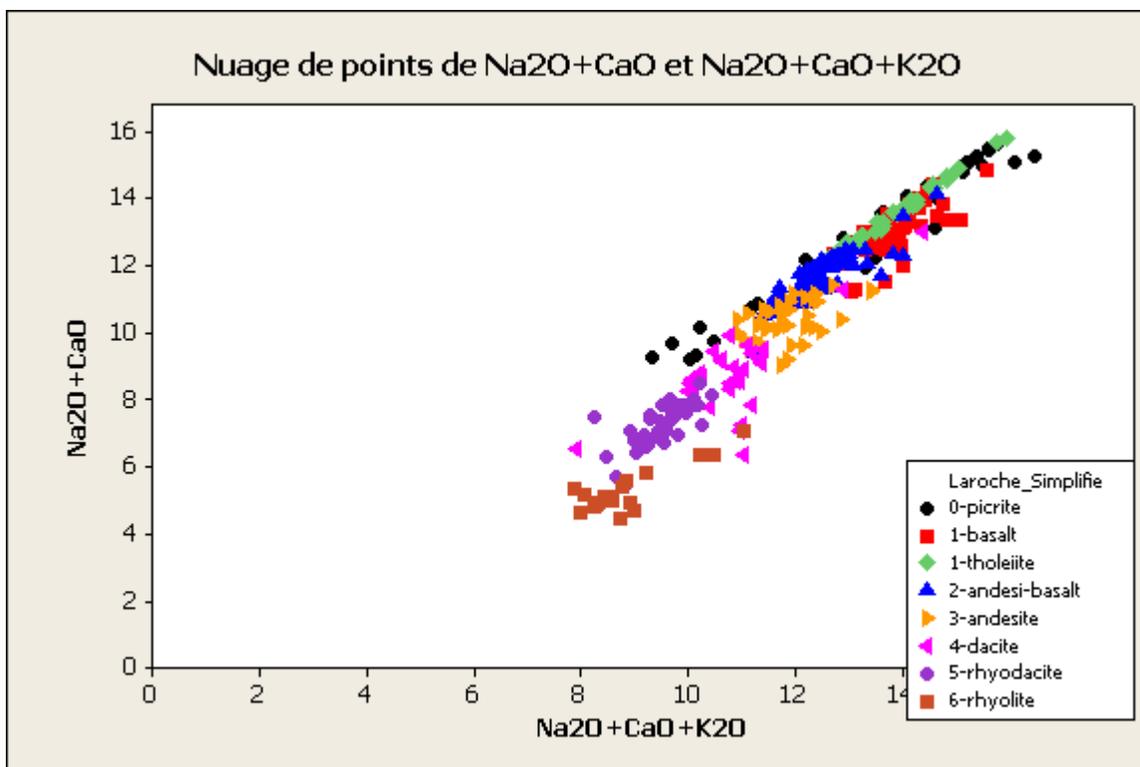
Méthode	Alkali Index
Formule	$(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{K}_2\text{O})$ Saeki, Y., and Date, J., 1980, Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits, Akita Prefecture: Mining Geology, 30 , 4, 241-250.
Référence originale	Saeki, Y., and Date, J., 1980, Computer applications to the alteration data of the footwall dacite lava at the Ezuri kuroko deposits, Akita Prefecture: Mining Geology, 30 , 4, 241-250.
Note référence originale	Note : l'article original est en japonais. Seul un résumé en anglais est disponible.
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" <i>edited by</i> A.G. Gubins, 1997, p. 191–208.
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	L'indice est dépendant des lithologies. On trouve des valeurs de 0,6 pour les rhyolites subalcalines, de 0,8 pour les dacites subalcalines et de 0,97 pour les tholéïtes. L'alcalinité des roches fait diminuer les valeurs de l'indice de 0,05 à 0,15 environ selon les lithologies. Sur le diagramme binaire $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}) / (\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, les valeurs des roches volcaniques récentes et fraîches se distribuent le long de deux droites qui ne passent pas par l'origine; une de ces droites regroupe les roches subalcalines alors que l'autre inclut les roches alcalines et ultraalcalines. C'est pourquoi les valeurs de l'indice varient selon les lithologies. L'alcalinité provoque une donc diminution de la pente qui est particulièrement évidente pour les trachytes et les phonolites. Les rhyolites montrent également une telle diminution.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Le seuil d'anomalie à utiliser pour cet index dépend des lithologies volcaniques. Sur le diagramme $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ vs $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, on constate que les roches altérées des altérations VMS, plutôt que d'être regroupées sur des pentes

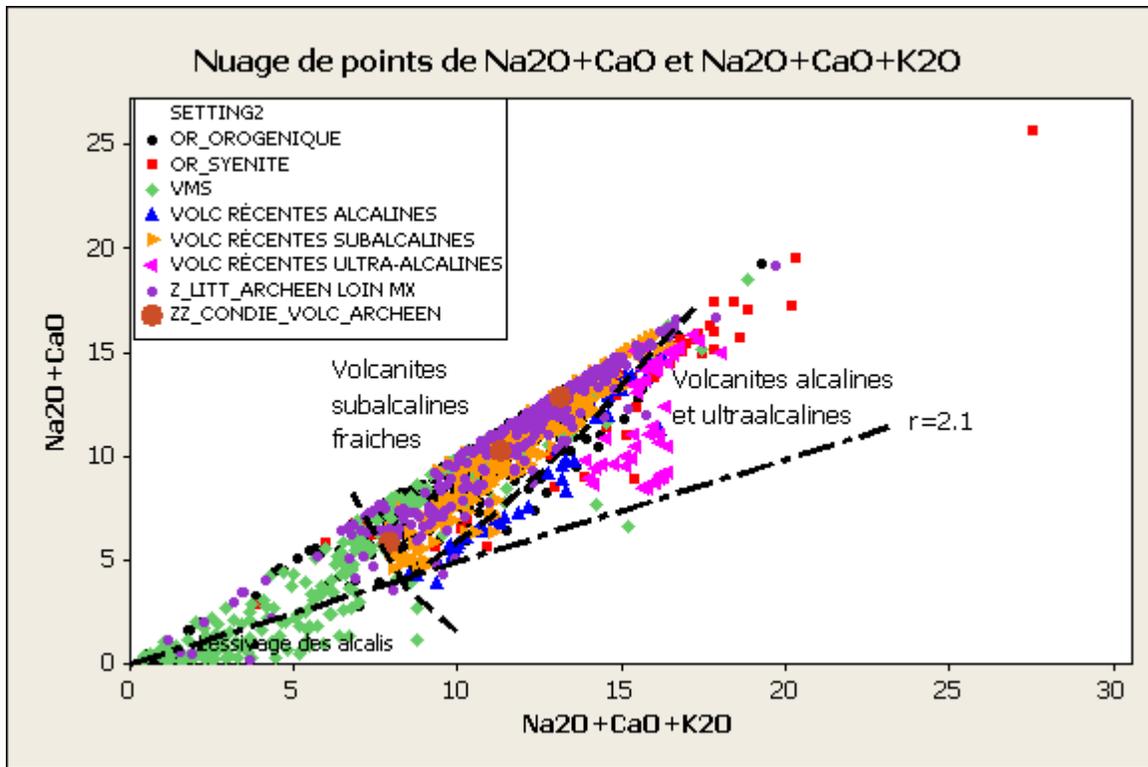
différentes des roches fraîches, sont en fait regroupées près de l'origine du graphique. Ces échantillons près de l'origine montrent un lessivage du potassium en plus du sodium et du calcium. De façon absolue, on peut fixer un seuil de 2,1 comme limite pour cette altération pour l'ensemble des lithologies. Des valeurs inférieures indiquent un lessivage du sodium et du calcium mais moins du potassium. Sur le diagramme X-Y, on voit qu'environ la moitié des échantillons des altérations VMS qui sont rapprochés de l'origine sont identifiés à l'aide de ce seuil.

On constate que cet index ne permet donc pas d'identifier au moins la moitié des échantillons des altérations VMS qui sont près de l'origine du diagramme X-Y et qui sont clairement distincts des roches fraîches. Il est donc grandement préférable d'utiliser le diagramme X-Y plutôt que cet indice.





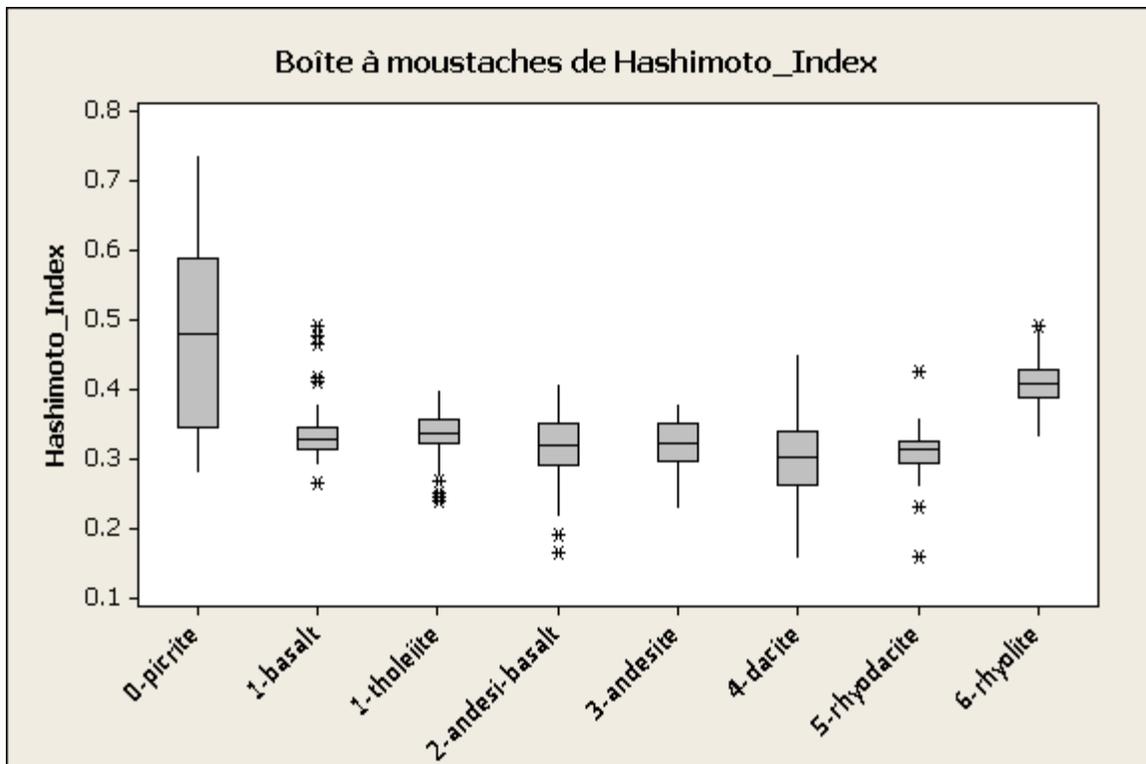


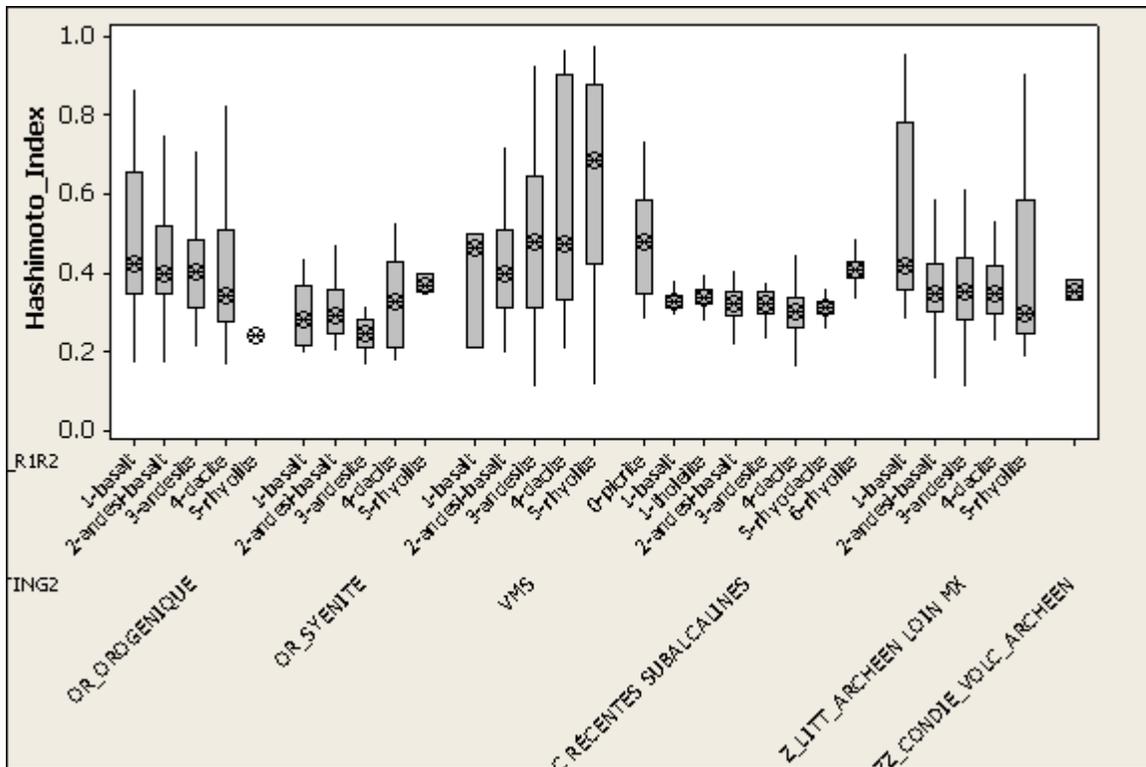
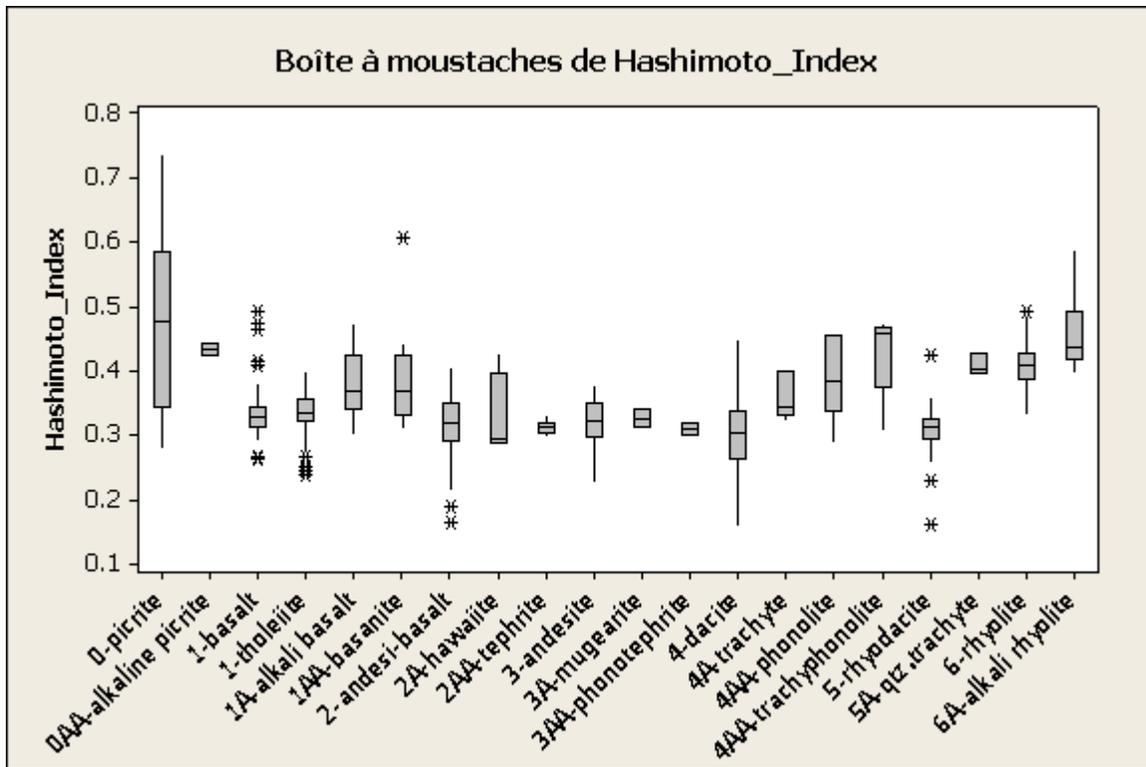


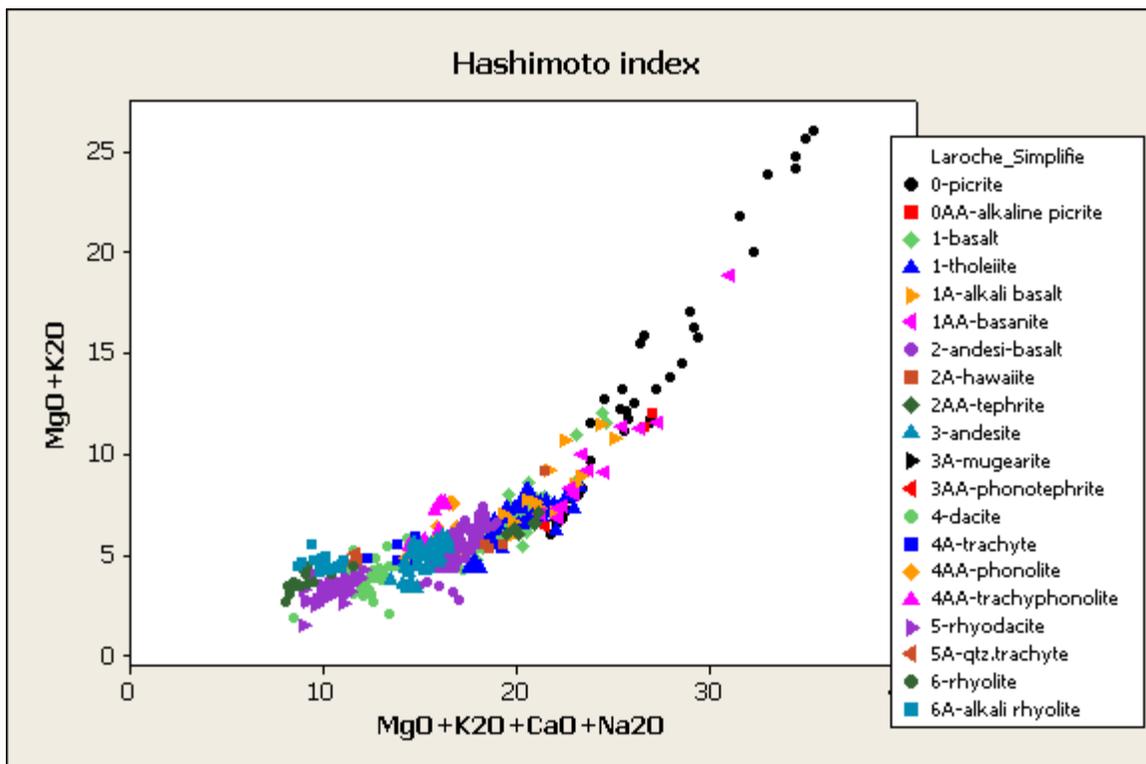
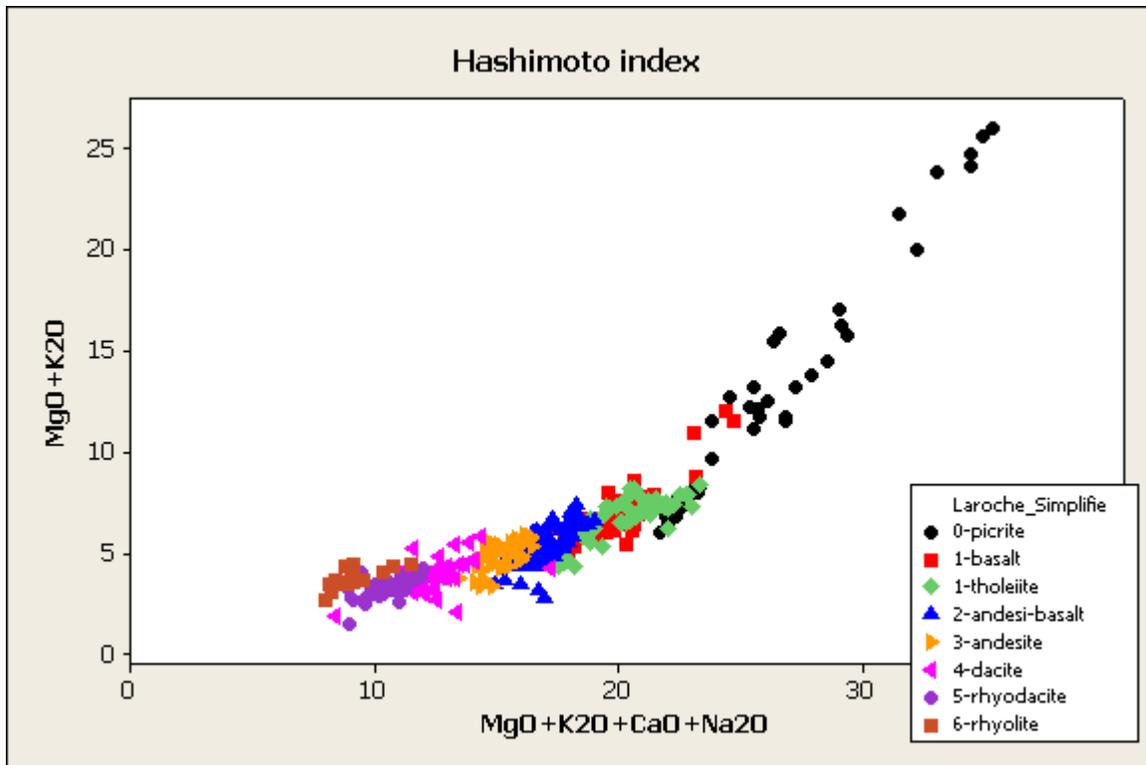
FICHE 11 – Hashimoto Index

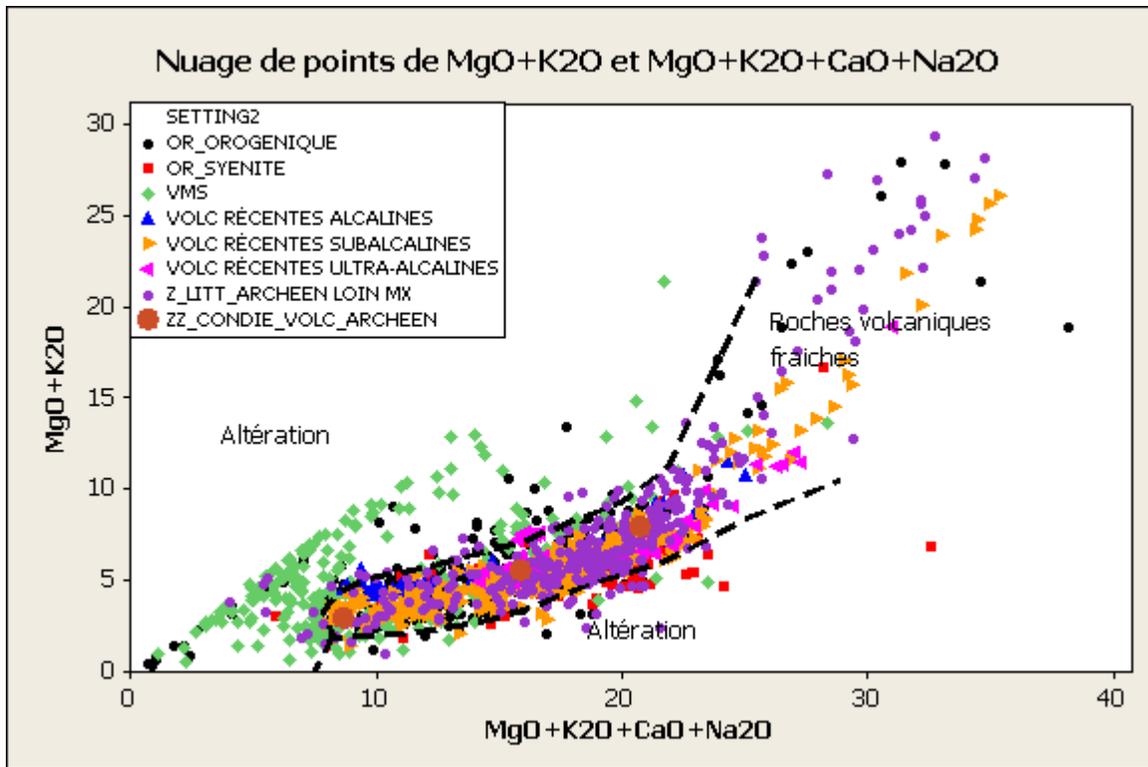
Méthode	Hasimoto Index
Formule	$(\text{MgO}+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$
Référence originale	Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., and Horiochi, M., 1976, Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on models of volcanism of underlying dacite and alteration halos: <i>Mining Geology</i> , 26 , 105-117.
Note référence originale	Note : l'article original est en japonais. Seul un résumé en anglais est disponible.
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" <i>edited by</i> A.G. Gubins, 1997, p. 191–208 Harris, J.R., Grunsky, E.C., Wilkinson, L., 1997. Developments in the effective use and interpretation of lithogeochemistry in regional exploration programs: application of GIS technology. In: Gubins, A.G. (Ed.), <i>Proceedings of Exploration 97: 4th Decennial Int. Conf. Mineral Exploration</i> , Toronto, pp. 285–292. Date, J., Watanabe, Y., Saeki, Y. 1983. Zonal Alteration around the Fukazawa Kuroko Deposits, Akita Prefecture, Northern Japan. <i>Economic Geology Monograph #5</i> , p. 365.-386.
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de l'indice sont relativement constantes pour les lithologies variant de basalte à rhyodacite, avec une médiane de 0,32. Les picrites, rhyolites, les trachytes et les phonolites montrent toutefois des valeurs plus élevées, avec des médianes de 0,40 à 0,45. Les basaltes et andésites alcalines ne montrent pas de différences avec leurs équivalents subalcalins. Lorsque l'on examine le diagramme binaire $\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}$ vs $\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$, on constate que la plupart des lithologies sauf les rhyolites, les phonolites et les picrites se retrouvent tous sur une droite passant par l'origine. Ces deux groupes ont des valeurs plus élevées. Les valeurs plus élevées de l'indice pour ces roches primitives sont causées probablement par l'augmentation du magnésium de ces

	<p>lithologies.</p> <p>La dépendance aux lithologies de l'indice Hashimoto n'est pas linéaire. Il n'est donc pas possible de proposer une transformation linéaire pouvant rendre l'indice indépendant des lithologies.</p>
Seuil d'anomalie selon la référence originale	<p>Harris et al., 1997 donnent un seuil de 0,49 pour les volcanites de la ceinture de Swayze, basé sur un diagramme de probabilité de distribution. Date et al., 1983 suggèrent un seuil de 0,92 (92 %) pour les dacites. Ce dernier seuil apparaît excessivement élevé.</p>
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	<p>Pour les lithologies subalcalines, de basalte à rhyodacite, un seuil de 0,43 sur l'indice permet de séparer les roches fraîches de l'altération. Ce même seuil peut être appliqué aux basaltes et andésites alcalines. Pour les basaltes magnésiens, les trachytes et les phonolites, on peut utiliser un seuil de 0,49. Pour les rhyolites, un seuil de 0,52 est suggéré.</p> <p>L'utilisation du diagramme X-Y correspondant est préférable à l'indice, puisque des champs appropriés peuvent être tracés pour identifier l'altération.</p>



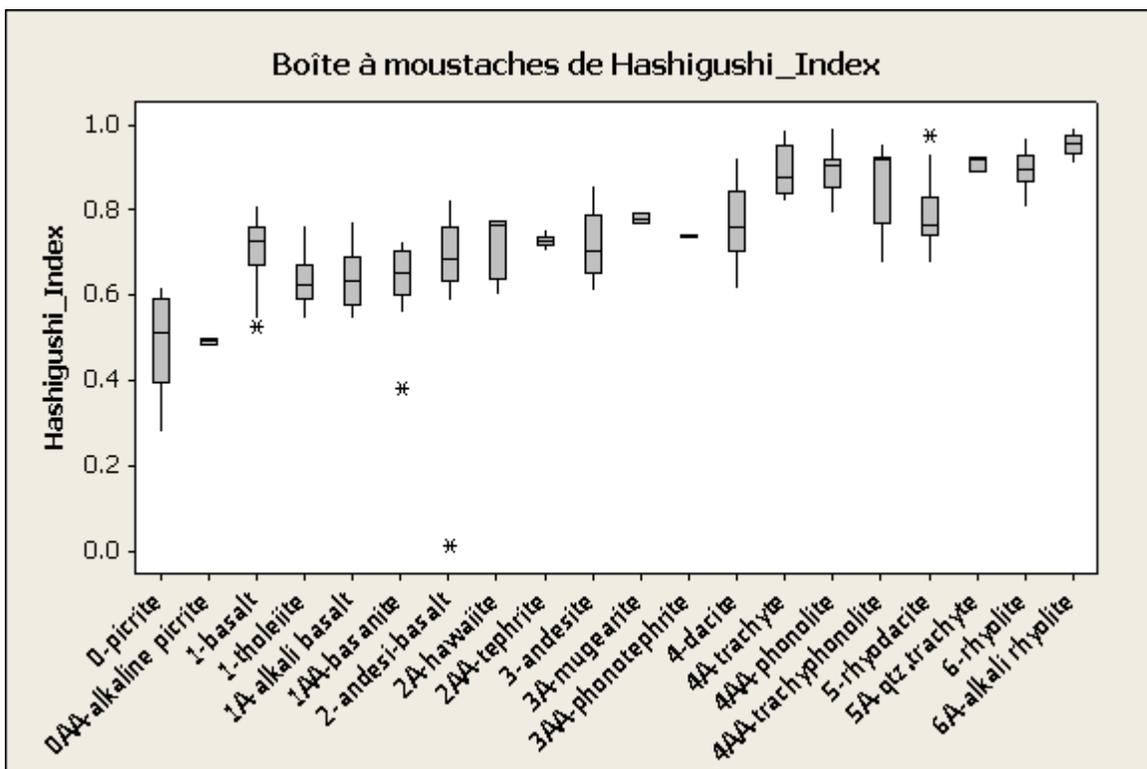
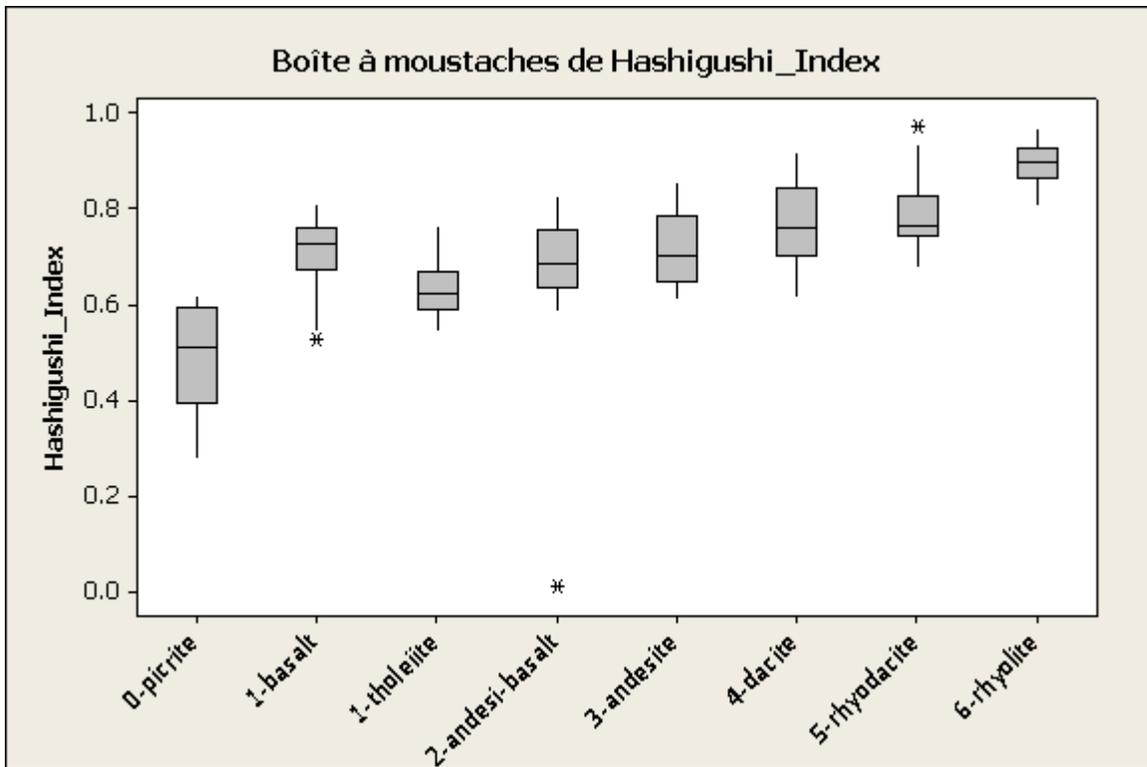


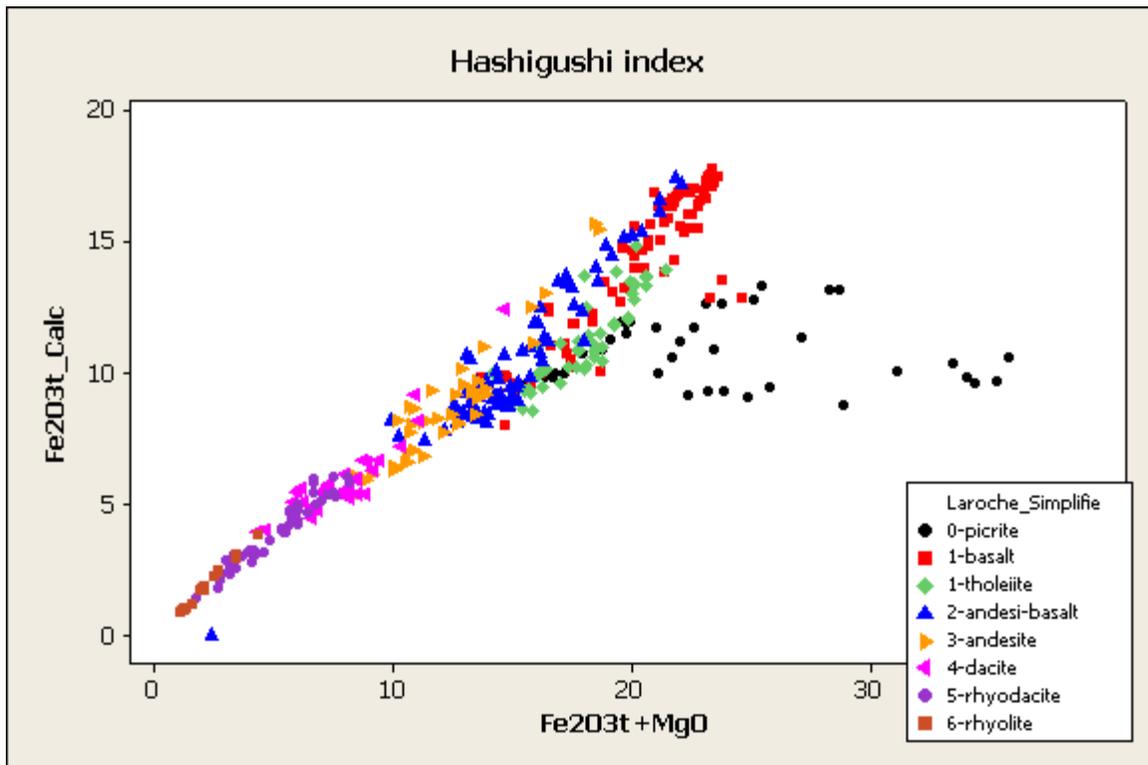
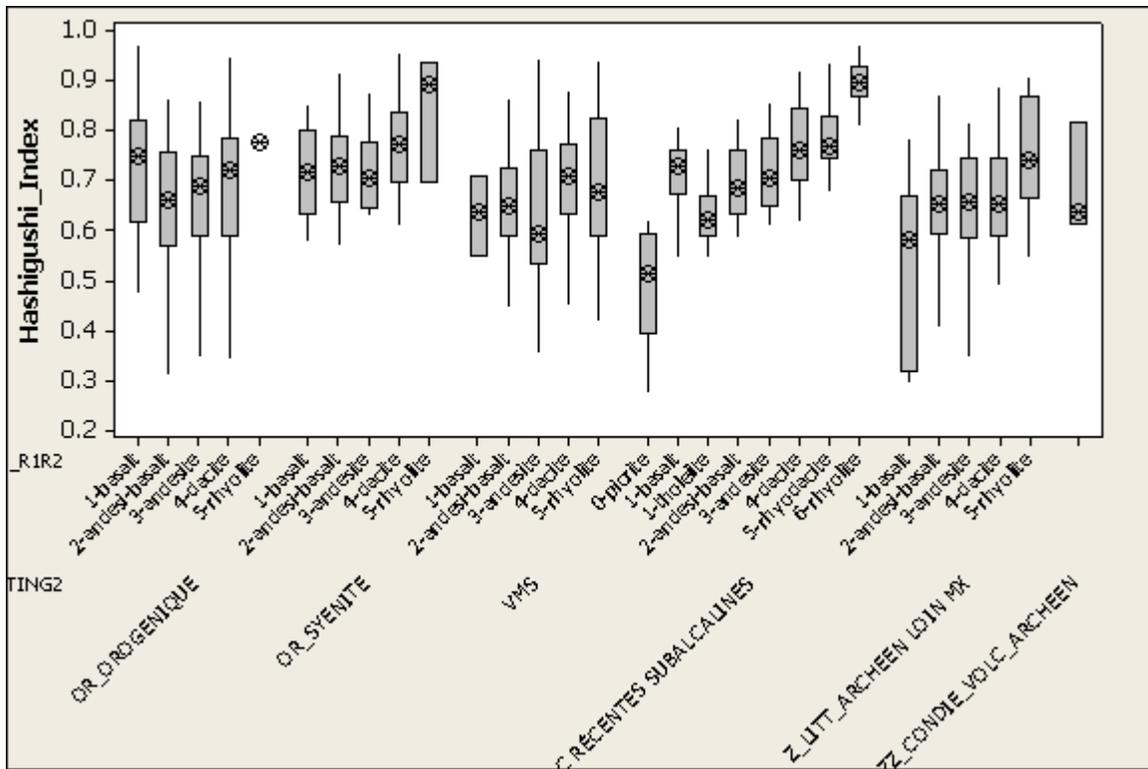


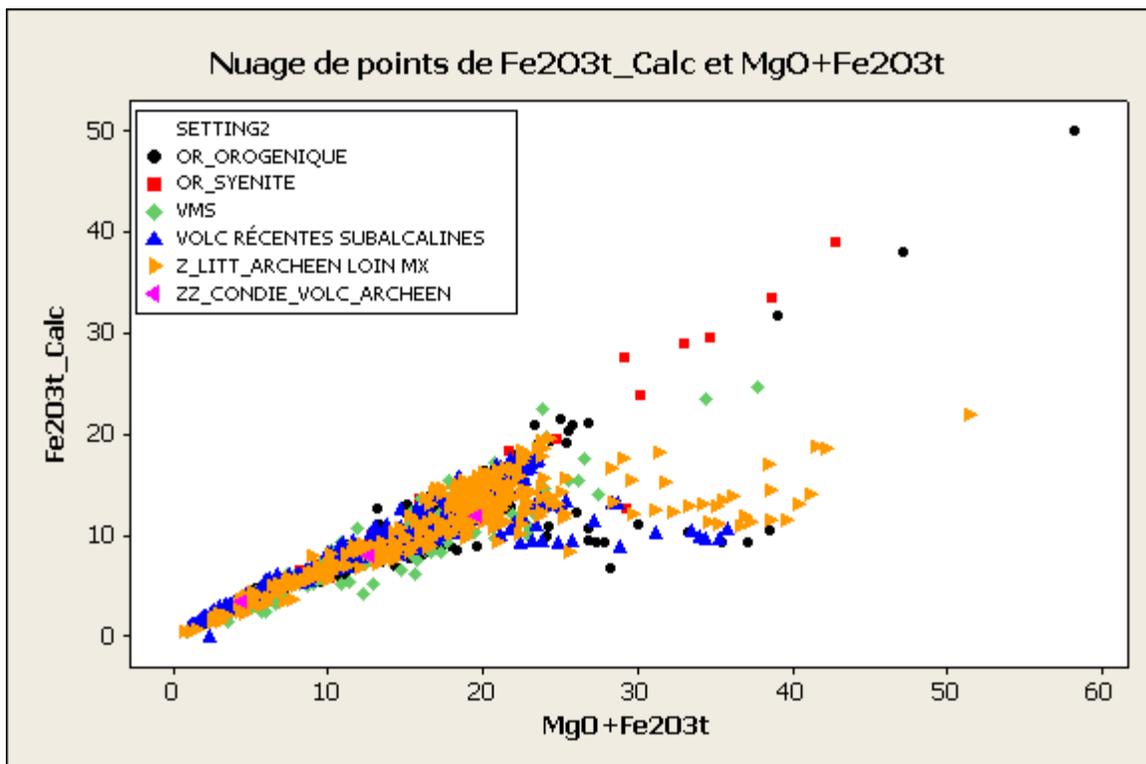
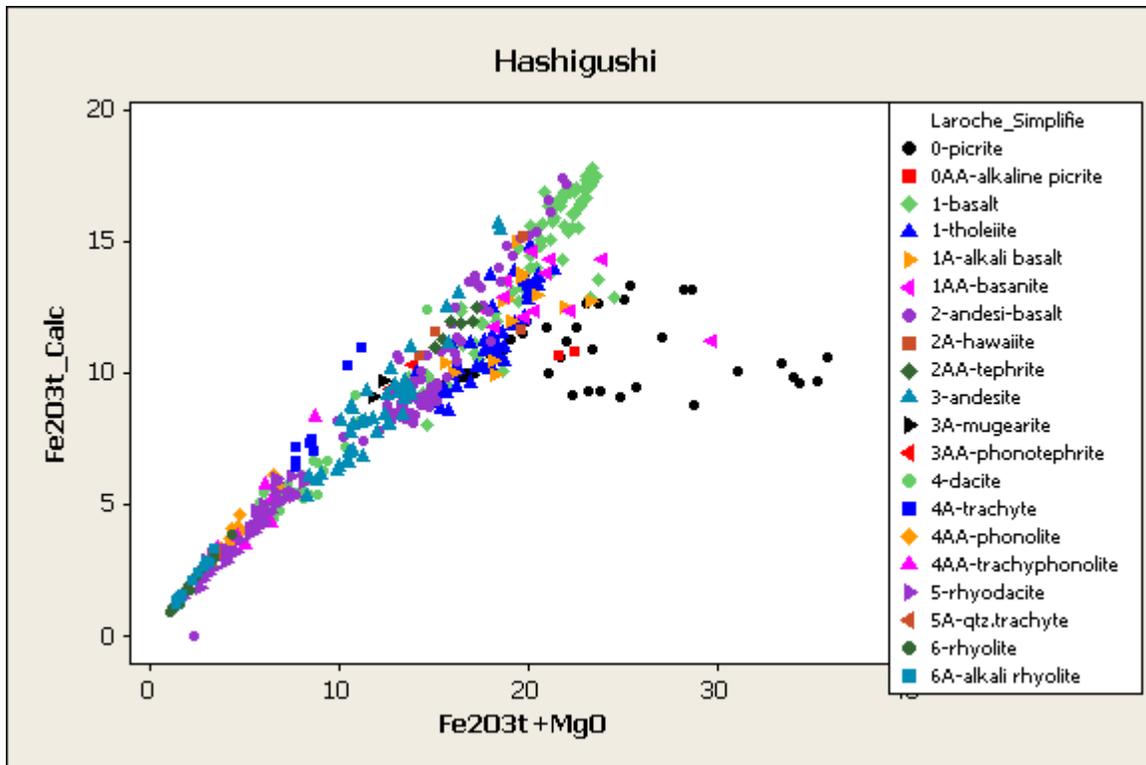


FICHE 1J – Hashigushi Index

Méthode	Hashigushi index
Formule	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t} / (\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}+\text{MgO})$
Référence originale	Hashiguchi, H., 1983, Practical application of low Na^2O anomalies in footwall acid lava for delimiting promising areas around the Kosaka and Fukazawa kuroko deposits, Akita Prefecture, Japan, <i>in</i> Kuroko and related volcanic massive sulphide deposits, Economic Geology Monograph 5, 387-394.
Note référence originale	
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" <i>edited by</i> A.G. Gubins, 1997, p. 191–208
Éléments nécessaires	NOTE : VOIR SI L'ORIGINAL MENTIONNE FE2O3 TOTAL OU NON
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de cet indice d'altération sont nettement dépendantes des lithologies, avec une augmentation graduelle du ratio de basalte à rhyolite. Il faut noter également que les andésites ferrifères ont des valeurs nettement plus élevées, dues probablement au fractionnement tholéitique. L'alcalinité fait augmenter les valeurs d'environ 0,1 pour les équivalents alcalins des lithologies subalcalines.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	L'examen du diagramme $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ vs $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}+\text{MgO}$ indique qu'il y a très peu de différences entre les volcanites fraîches et les altérations. Cet indice semble apparemment assez peu sensible aux altérations en réalité. Le diagramme X-Y correspondant à l'indice ne donne pas de meilleurs résultats.

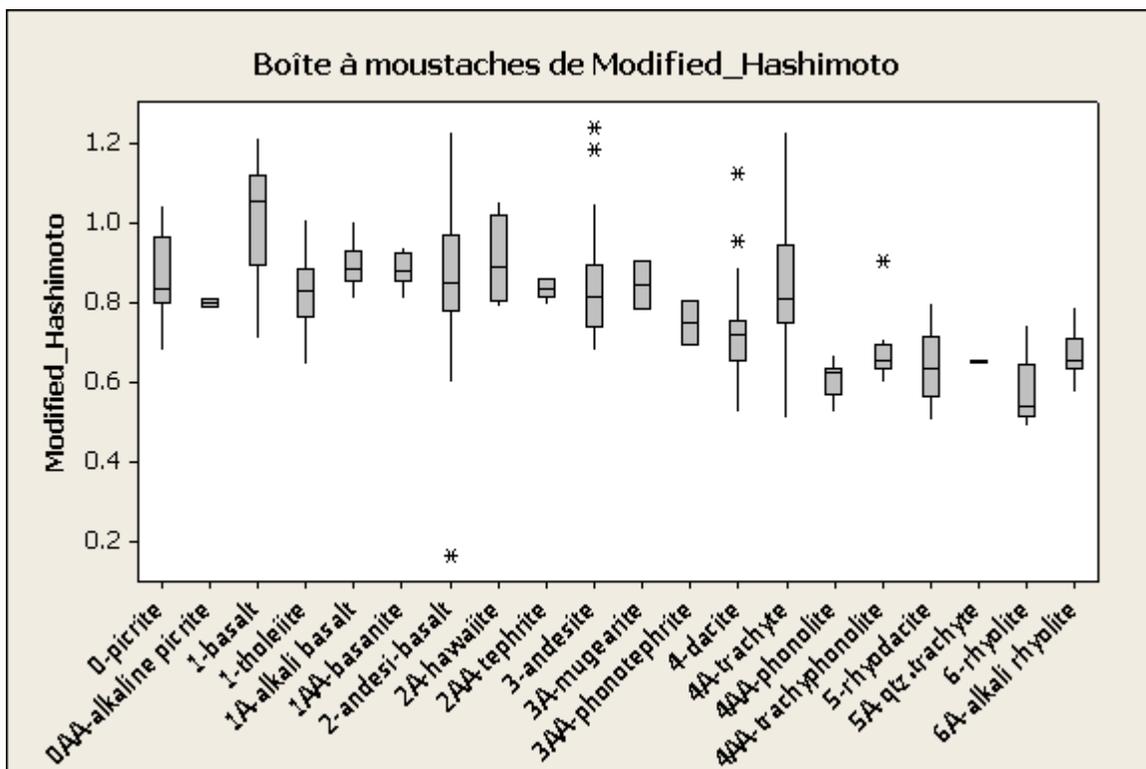
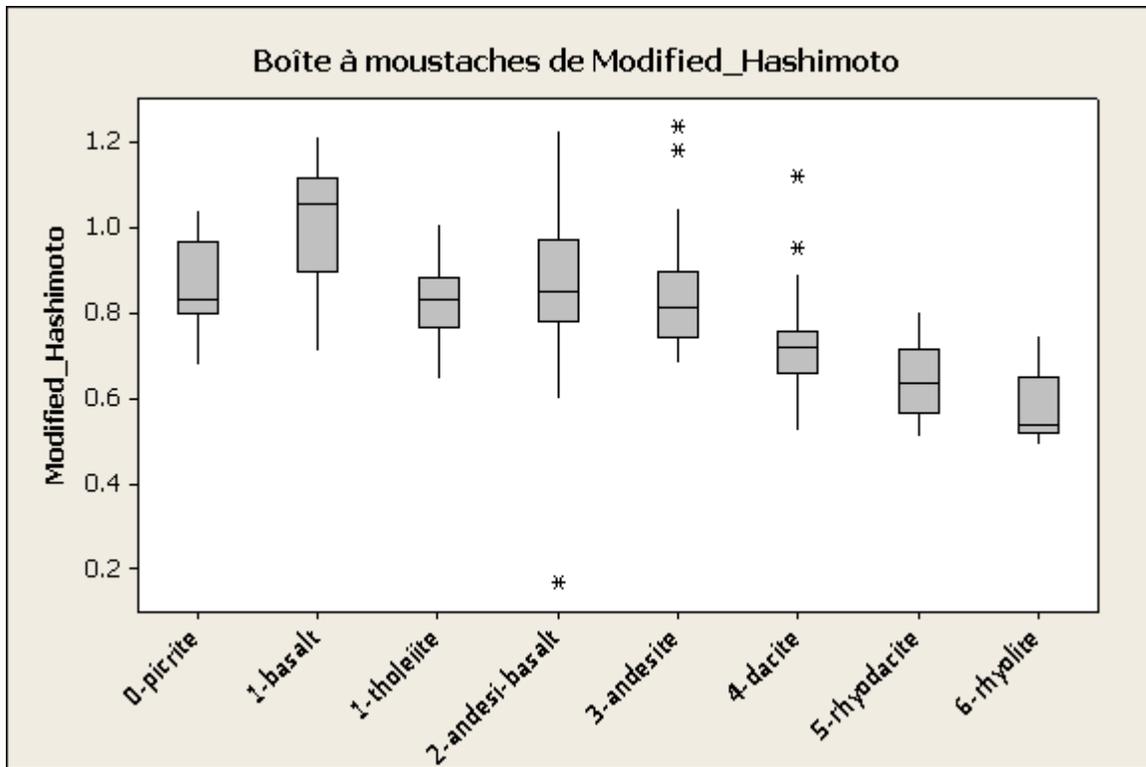


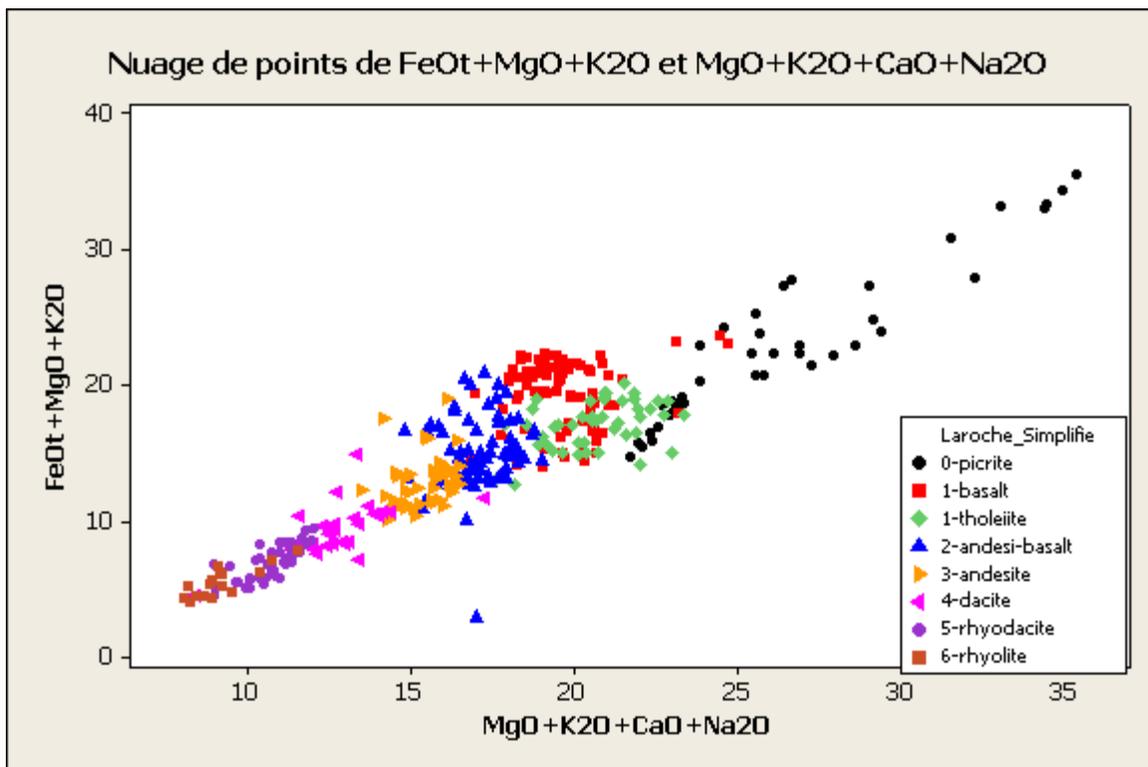
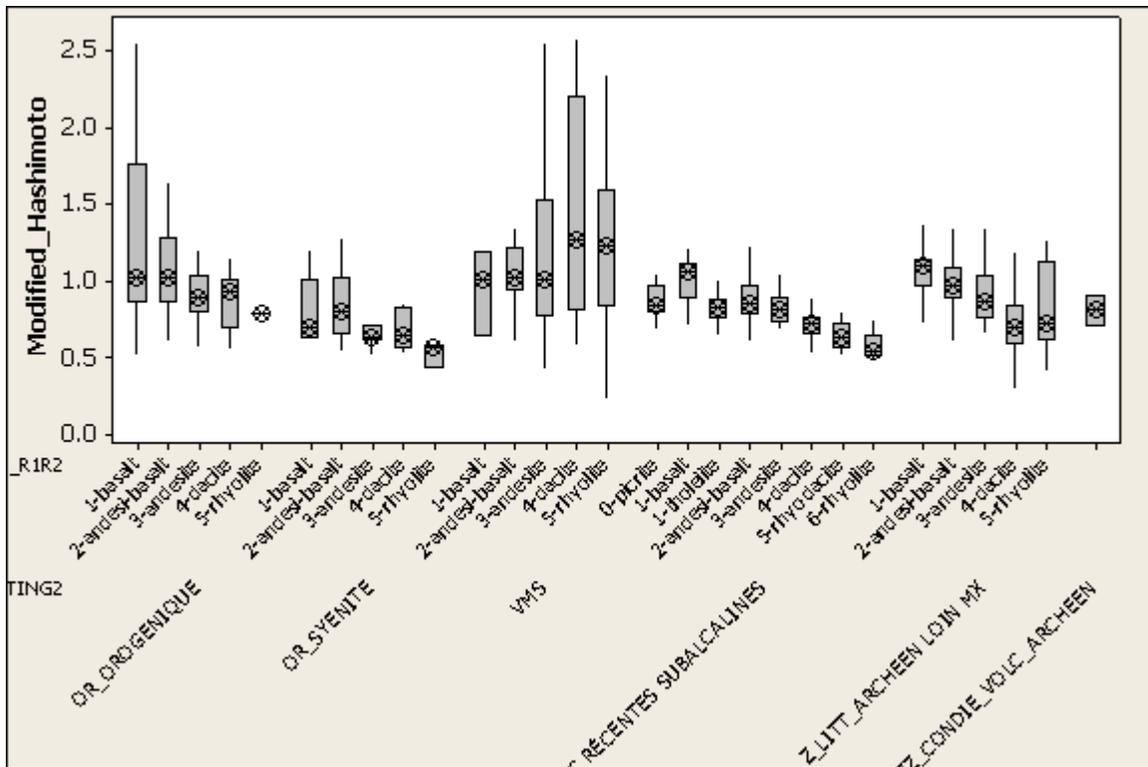


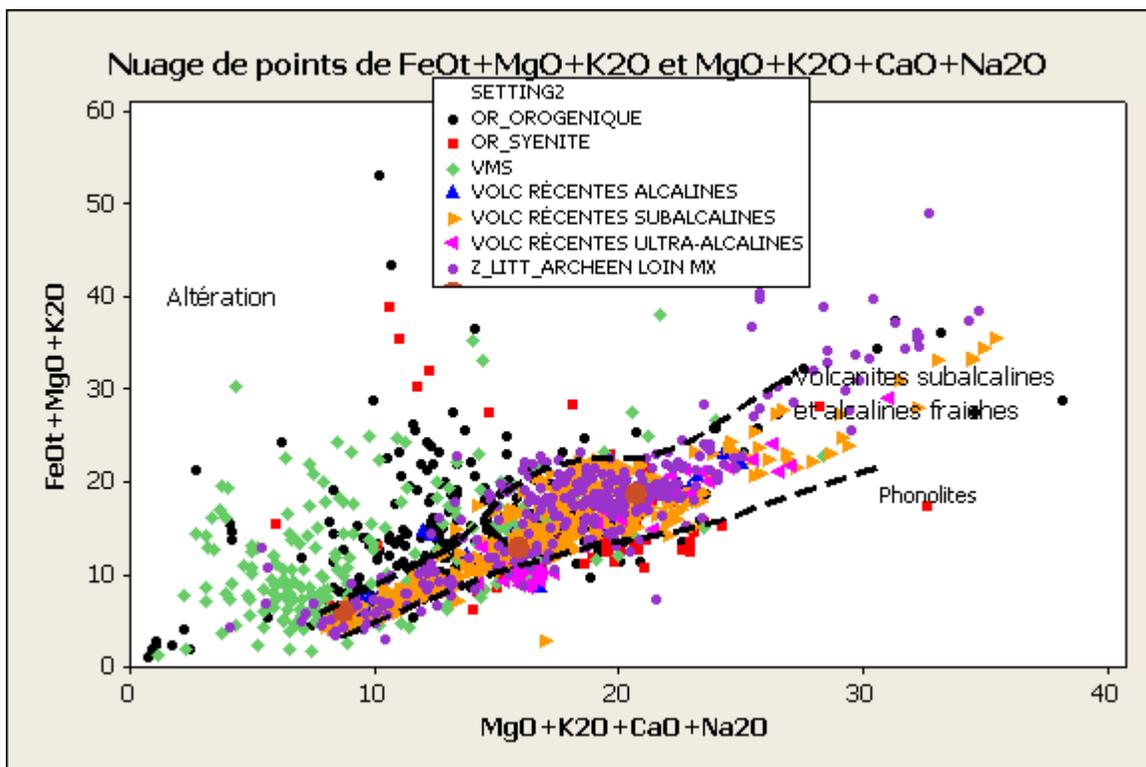
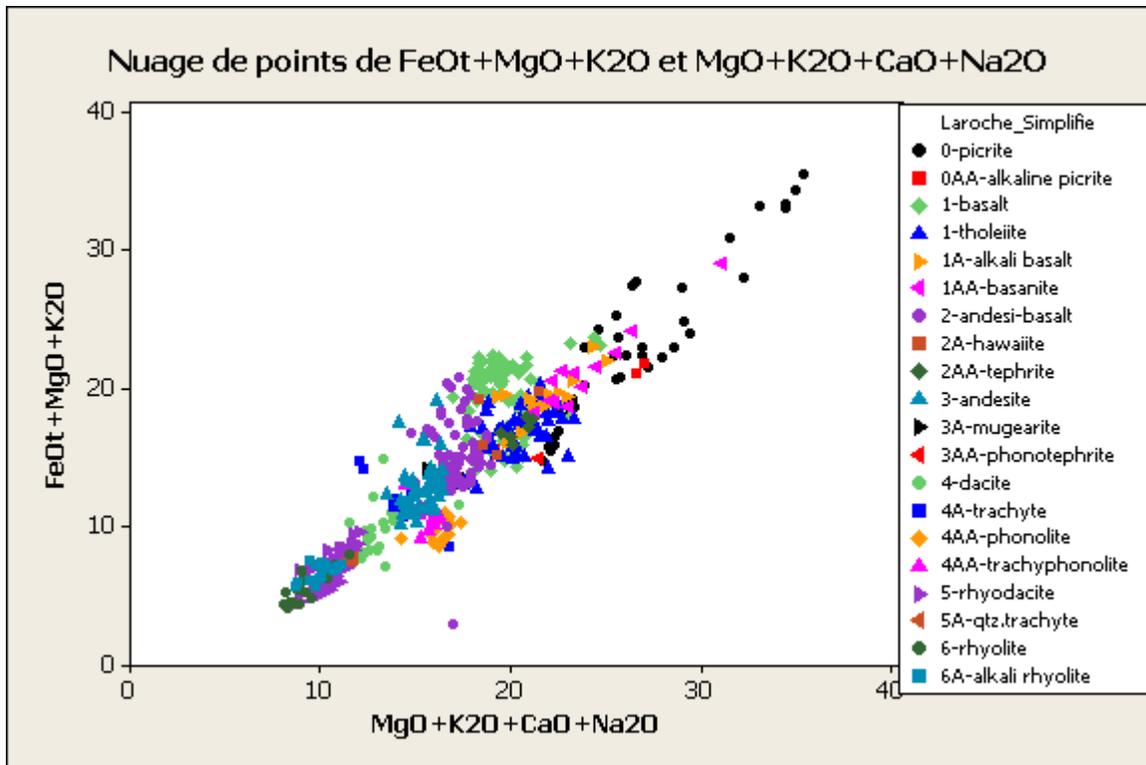


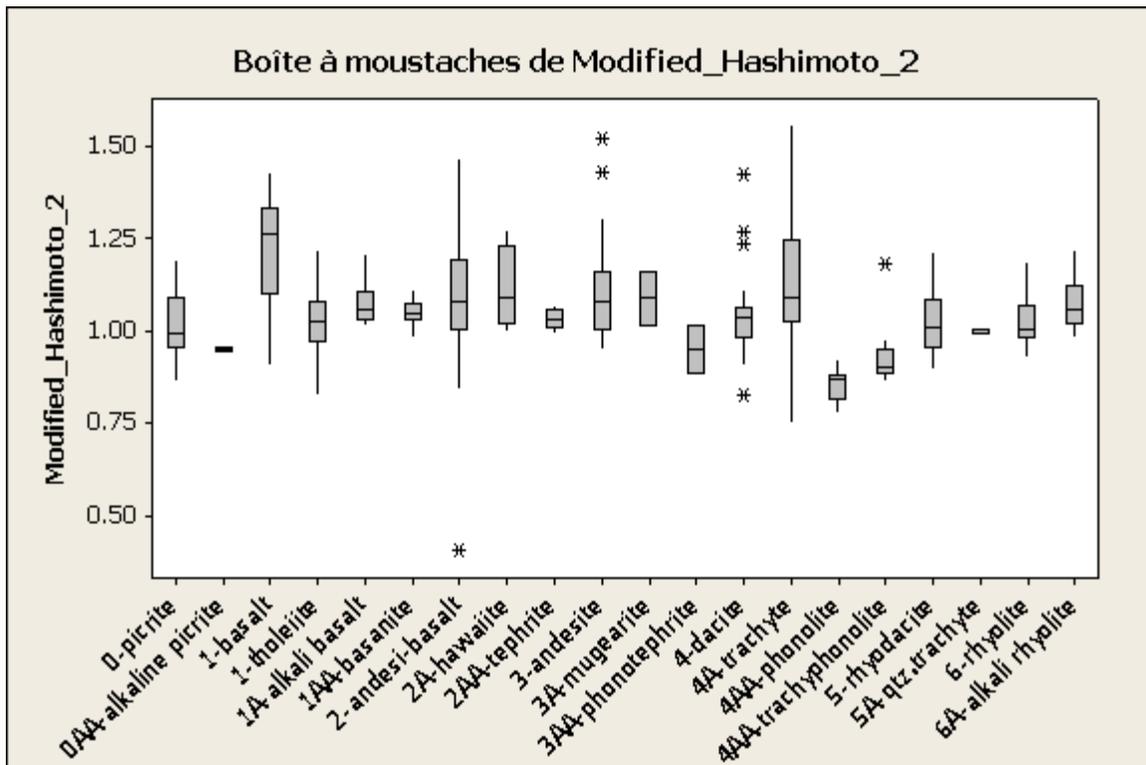
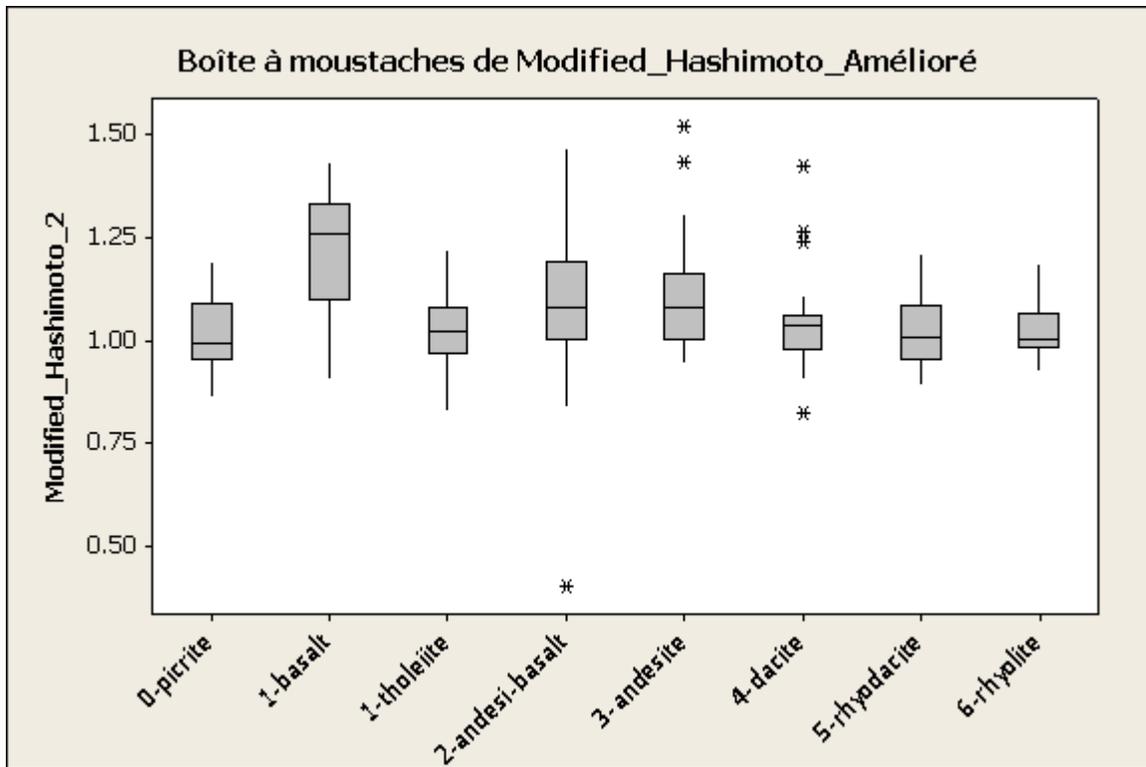
FICHE 1K – Modified Hashimoto

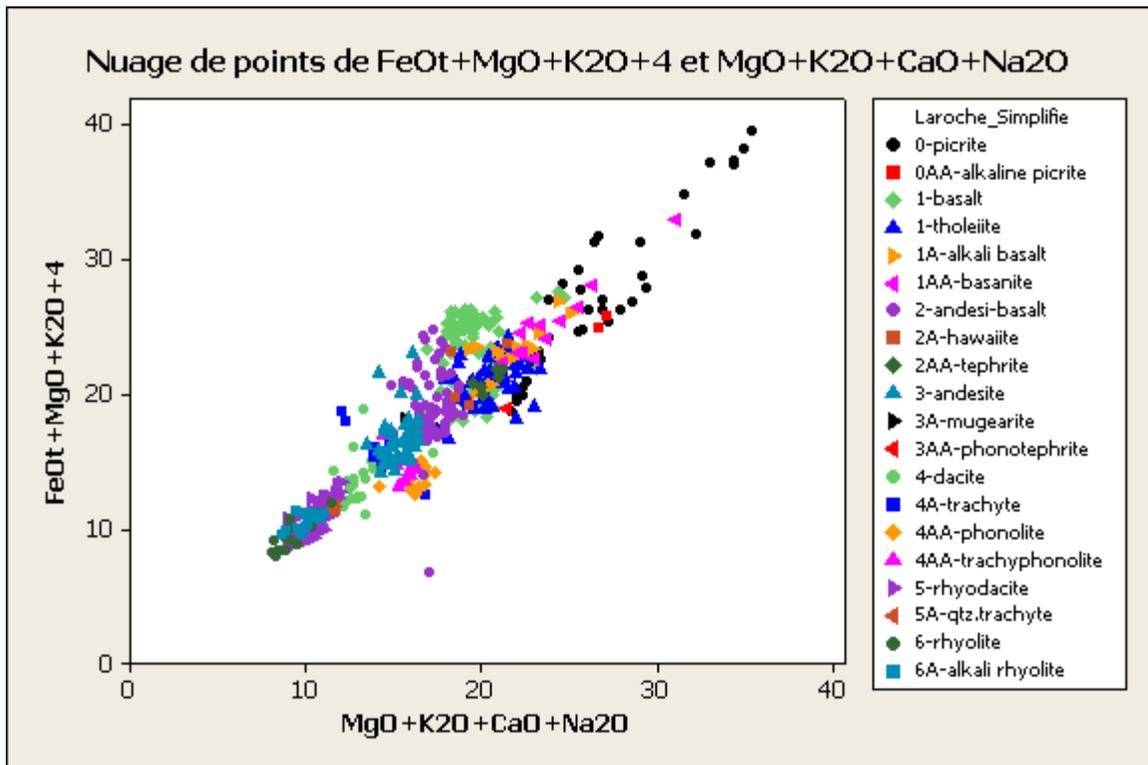
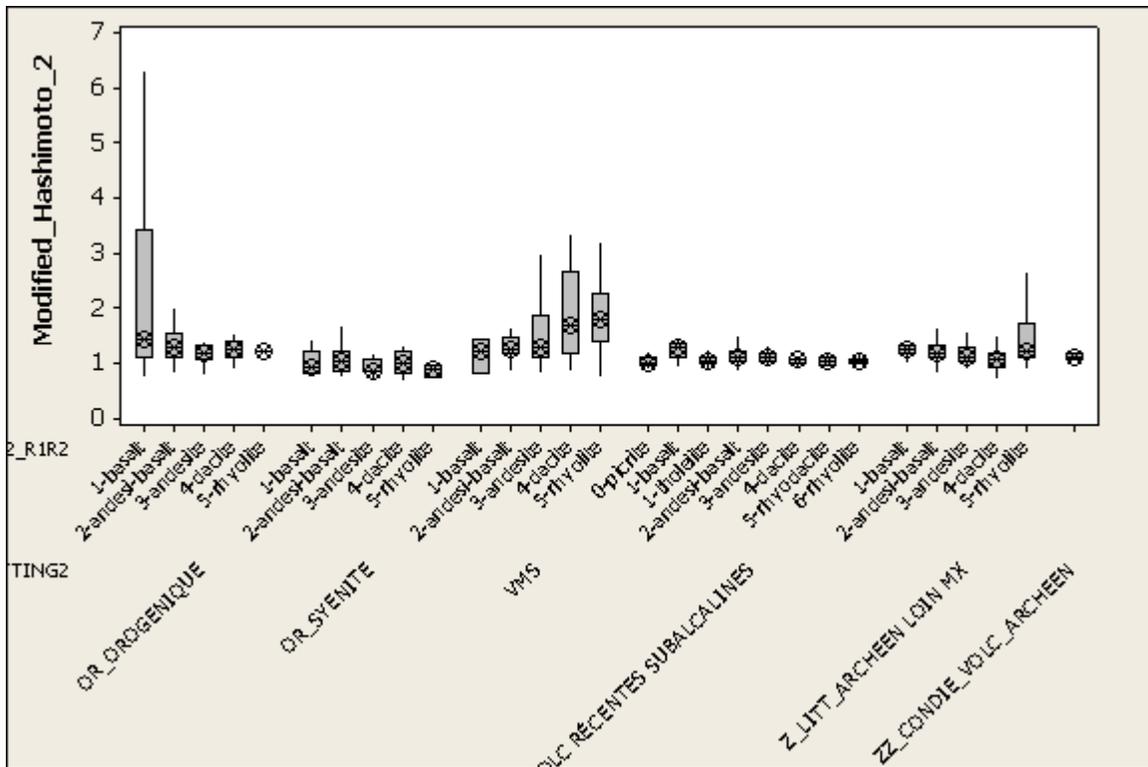
Méthode	Modified Hashimoto
Formule	$(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$
Référence originale	Coad, P.R., 1985, Rhyolite geology at Kidd Creek—a progress report: Cim Bulletin, 78 , 70-83.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de l'indice sont dépendantes des lithologies. On trouve des valeurs de 0,85 pour les tholeiites, 0,8 pour les andésites, 0,7 pour les dacites et 0,55 pour les rhyolites. Le caractère alcalin tend à faire varier les valeurs de l'indice d'environ 0,1.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Les seuils d'anomalies doivent être dépendants des lithologies. On peut obtenir un seuil d'anomalie moins dépendant des lithologies en modifiant légèrement l'indice en le remplaçant par $(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+4) / (\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$. Pour l'ensemble des lithologies, une valeur de 1,5 permet de séparer les roches fraîches de l'altération Mg-K-Fe. On peut utiliser les champs tracés sur les diagrammes X-Y pour obtenir une meilleure identification des échantillons altérés.

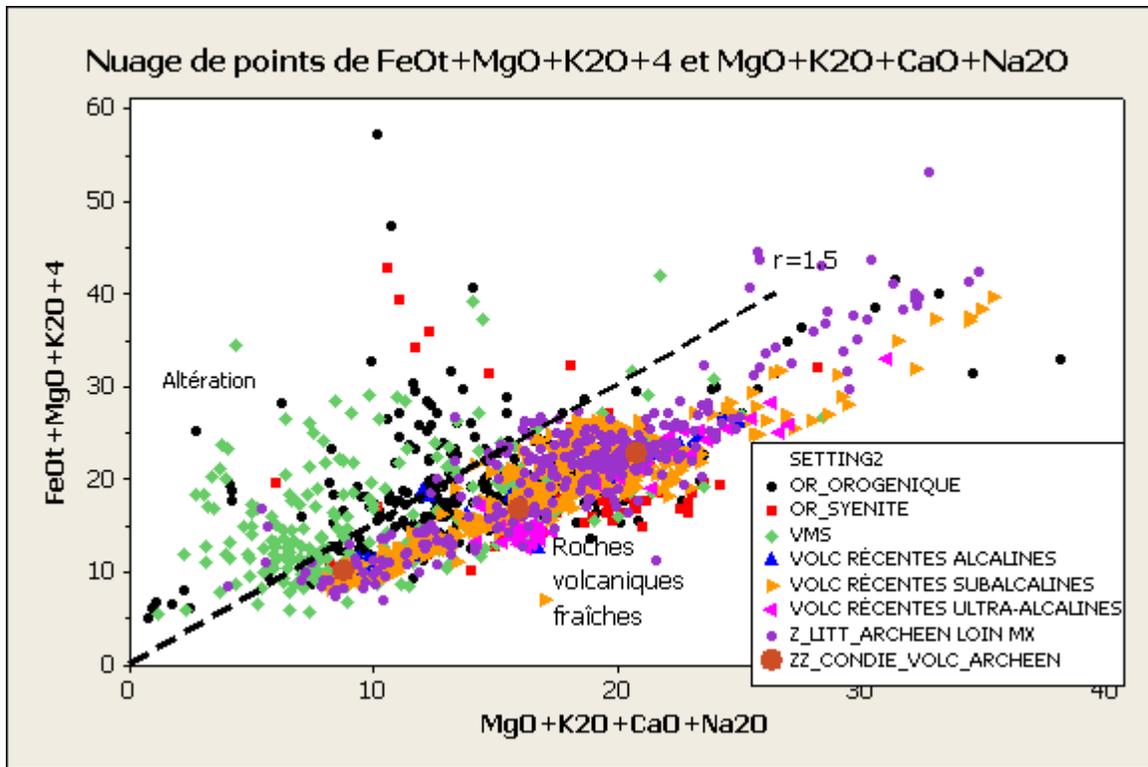








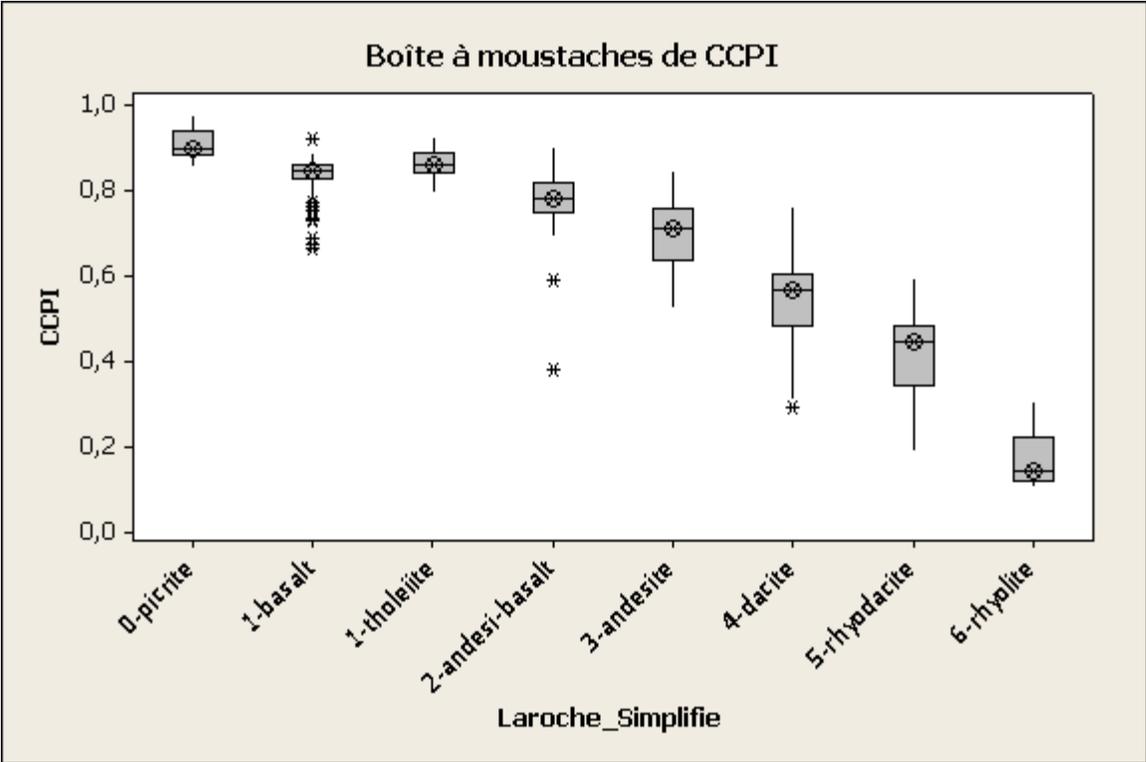


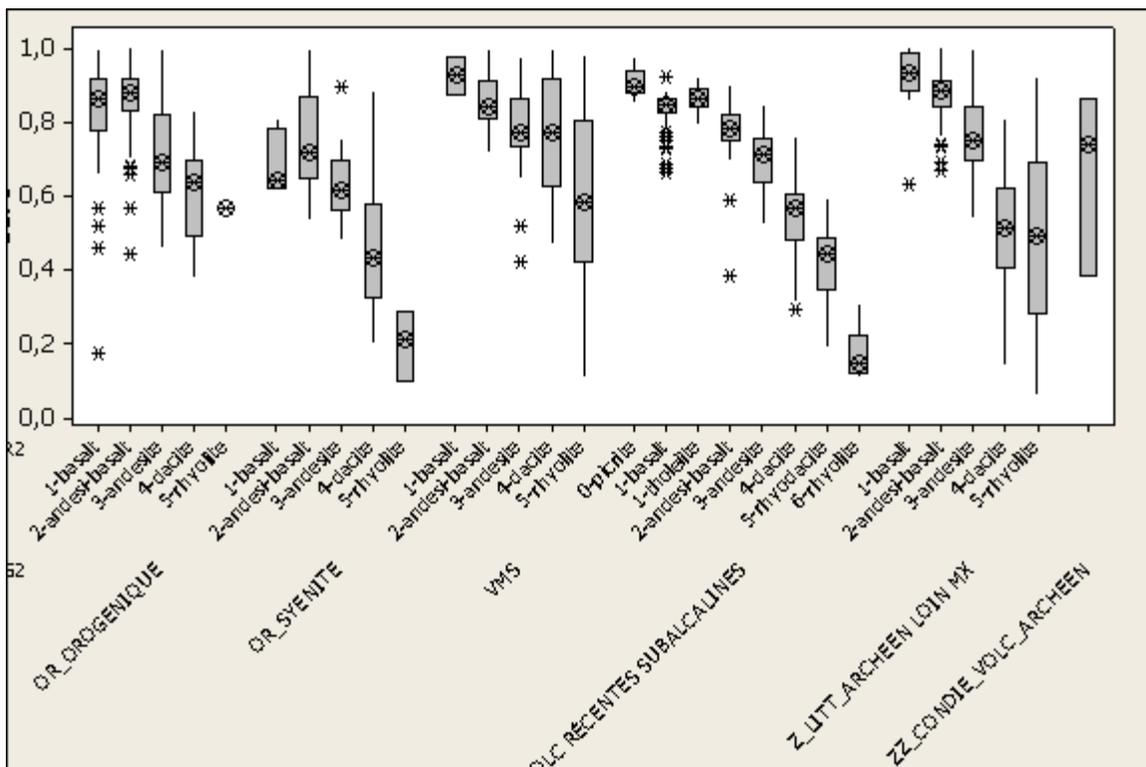
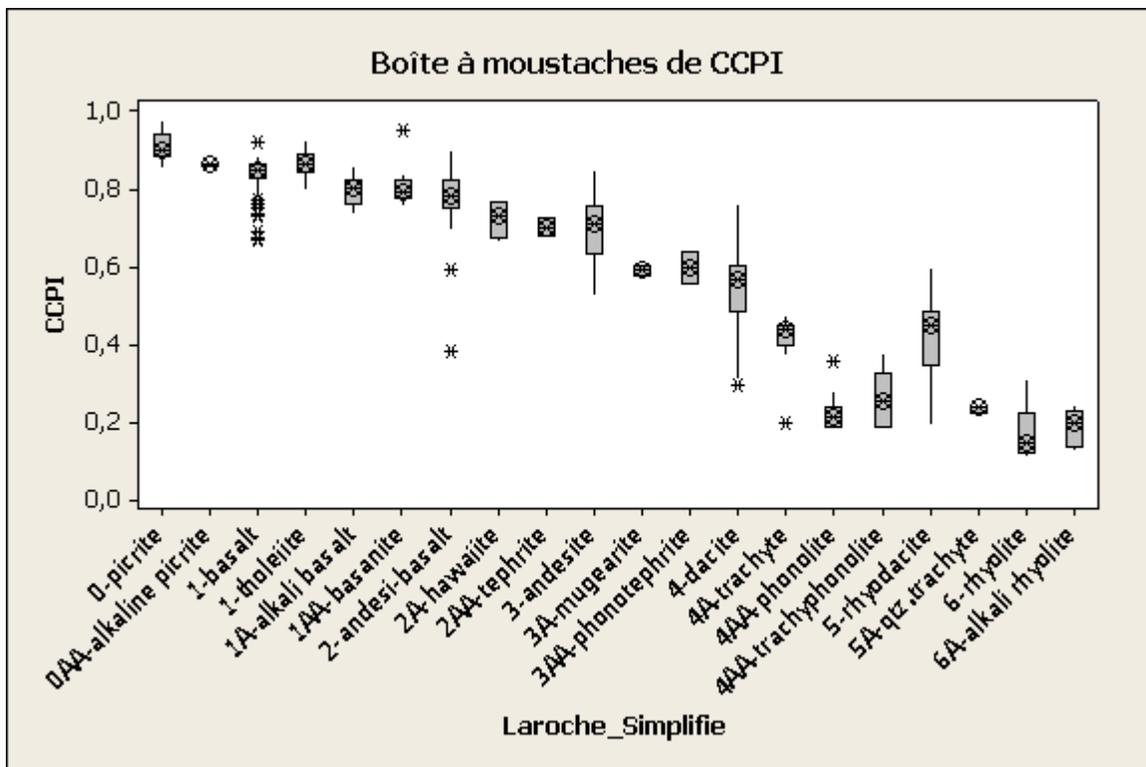


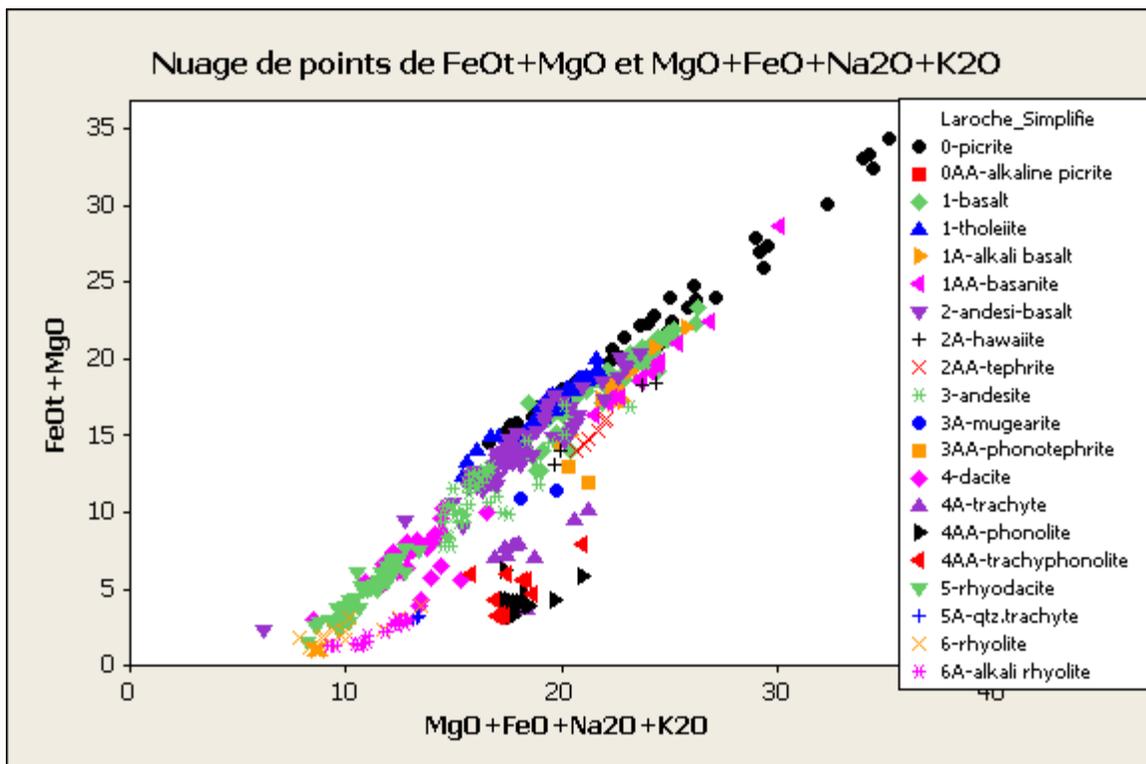
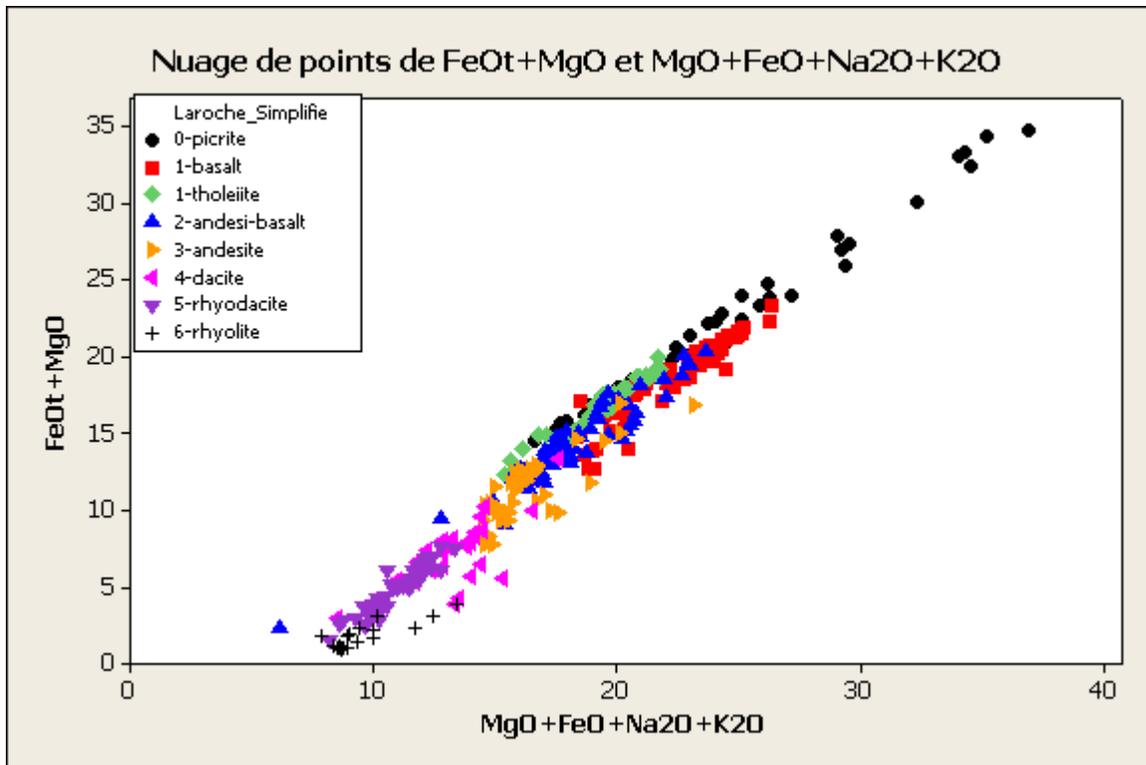
FICHE 1L – CCPI (Chlorite-Carbonate-Pyrite) Index

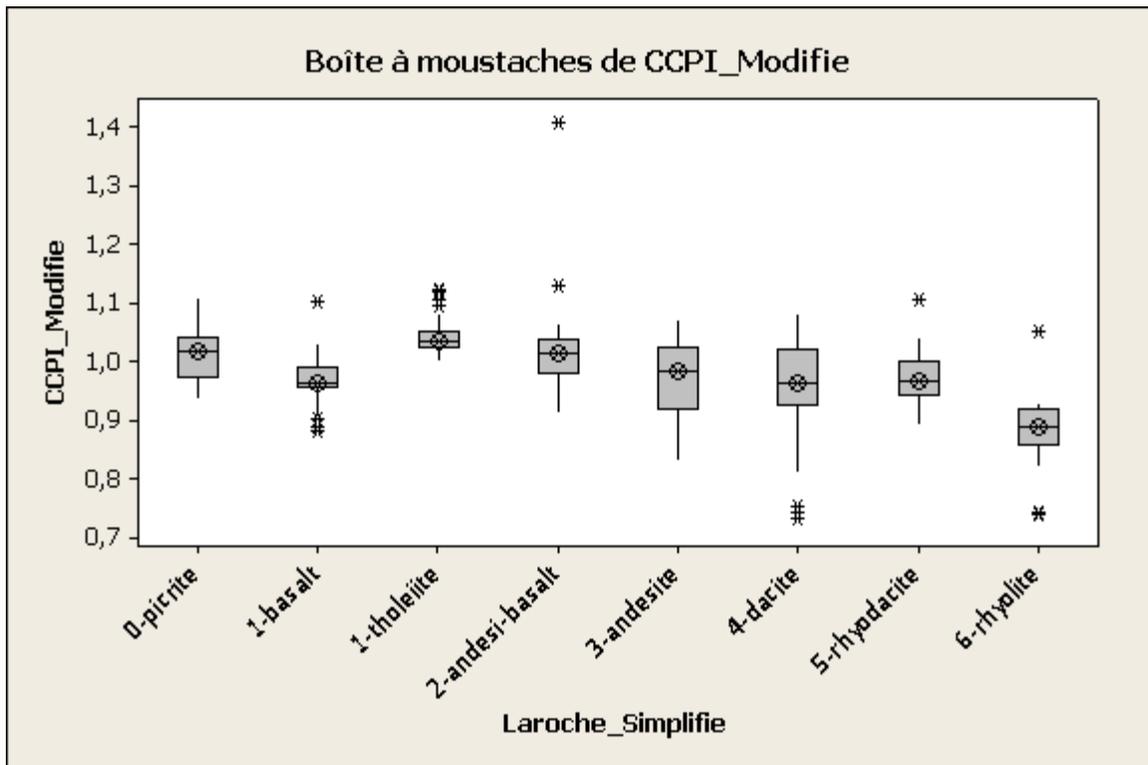
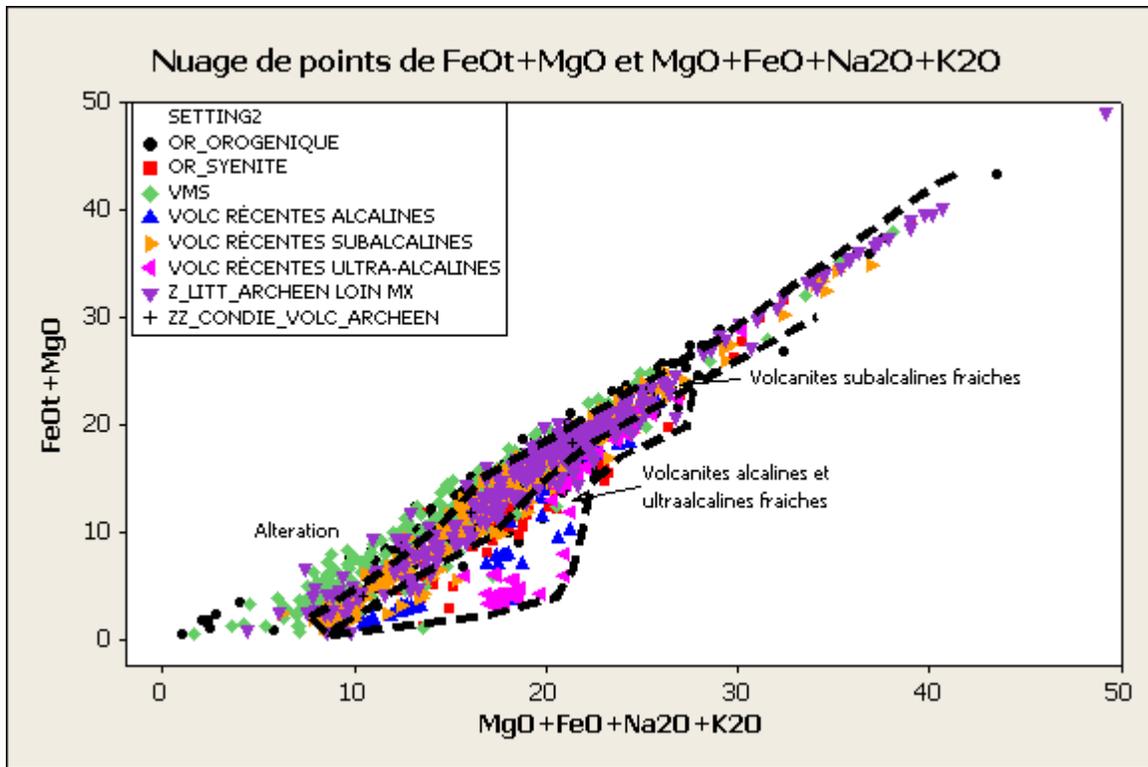
Méthode	CCPI (Chlorite-Carbonate-Pyrite Index)
Formule	$(\text{FeO}+\text{MgO})/(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$
Référence originale	Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H., Huston, D.L. 2001. The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry association with volcanic-hosted massive sulfide deposits. <i>Economic Geology</i> 96, p. 957-972.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	FeO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'article original mentionne que l'indice est dépendant des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs du CCPI sont fortement dépendantes des lithologies. Les valeurs sont d'environ 0,9 pour les volcanites mafiques fraîches et diminuent systématiquement jusqu'à environ 0,1 pour les rhyolites non altérées. Toutefois, les valeurs du CCPI pour les volcanites subalcalines fraîches se trouvent sur une droite qui ne passe pas par l'origine. Il est donc facile de dériver un index d'altération qui ne soit pas dépendant des lithologies à partir de cet index. Un nouvel indice de formule $(\text{FeO}+\text{MgO}+8,5)/1,25(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$. Seules les roches alcalines intermédiaires à felsiques (mugéarites, trachytes, phonolites et rhyolites alcalines) restent à des valeurs de l'indice différent après cette transformation.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	La forte dépendance du CCPI aux lithologies rend impossible la détermination d'un seuil unique. Un seuil doit être déterminé pour chaque lithologie, individuellement. Le diagramme binaire du CCPI pour les roches volcanites total (fraîches et altérées) montre les limites de cet indice. Il est très difficile de séparer les roches fraîches des altérations dans les cas des volcanites mafiques par cet indice. Pour les volcanites felsiques, la séparation est plus nette. Ceci est probablement dû au fait que les volcanites mafiques contiennent peu de Na ₂ O et K ₂ O par rapport à FeO et MgO, et que l'altération ne peut changer beaucoup alors

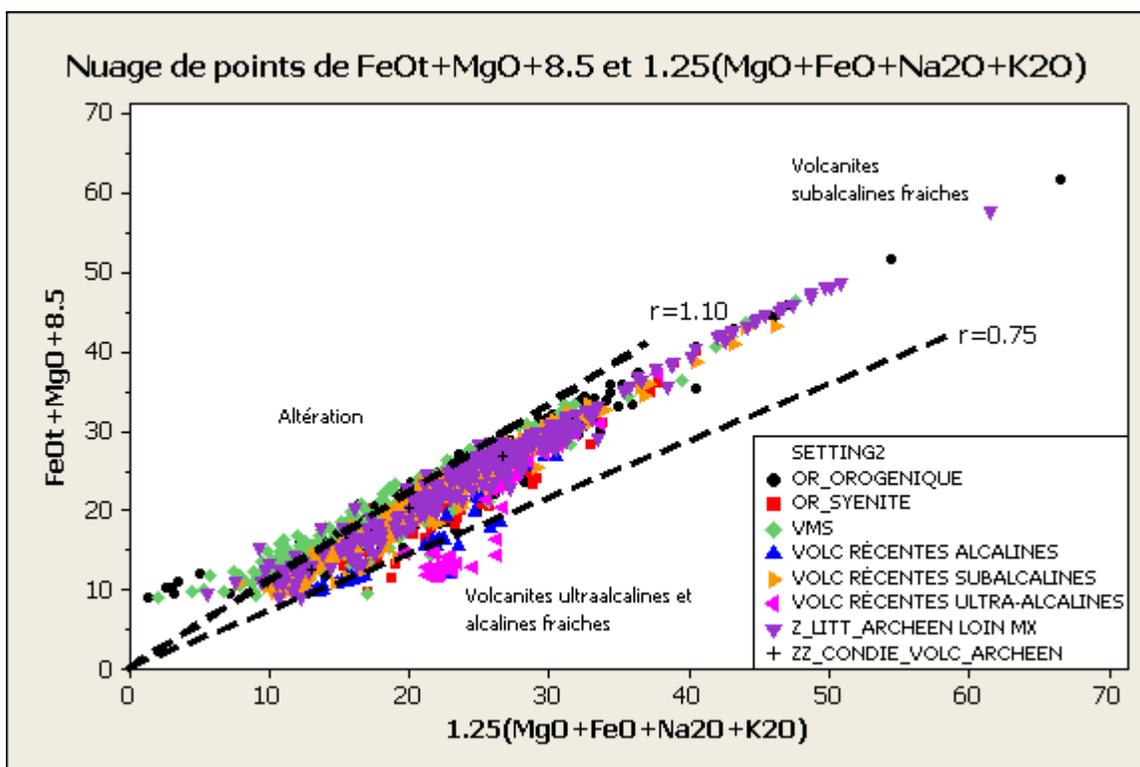
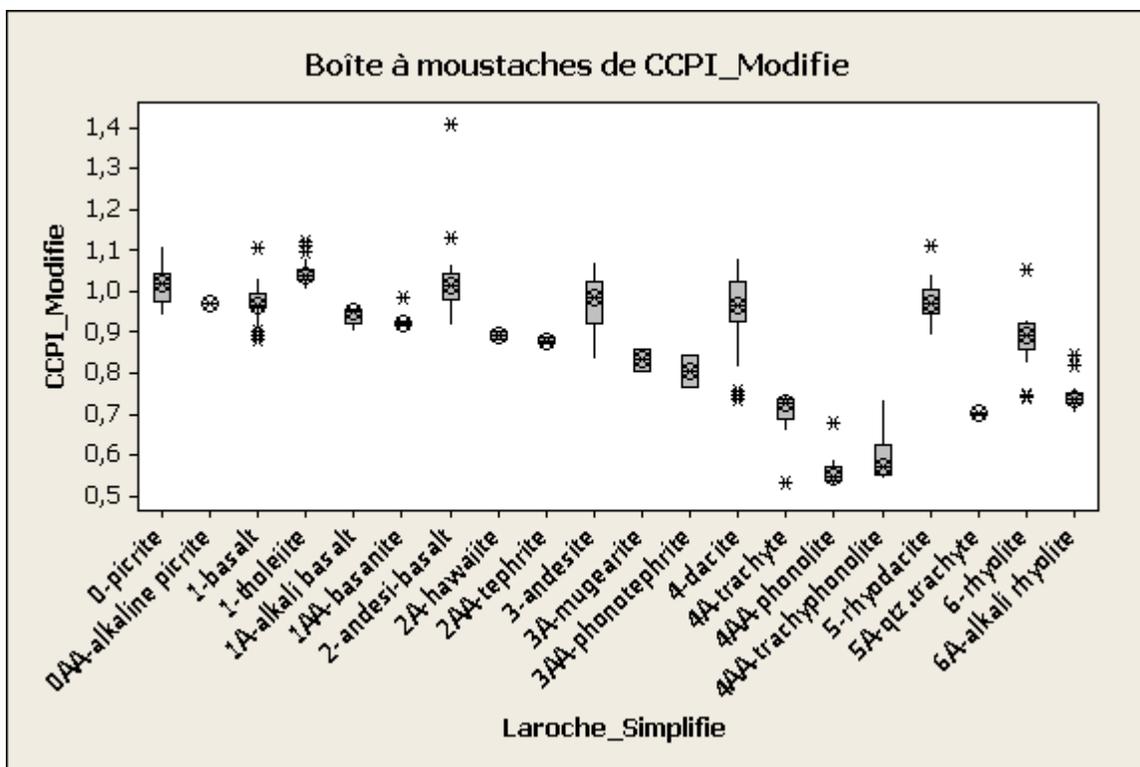
	<p>les valeurs de l'indice.</p> <p>L'indice modifié permet de fixer un seuil absolu pour la détermination des altérations. Des valeurs supérieures à 1,10 ou inférieures à 0,75 indiquent que les roches sont altérées. Il faut noter que ce seuil ne s'applique pas aux trachytes, mugéarites, rhyolites alcalines et phonolites. Étant donné la faible différence entre les roches mafiques altérées et fraîches sur cet indice, il ne s'applique pas non plus à ces roches.</p>
--	--











ANNEXE 2 – DIAGRAMMES BINAIRES

FICHE 2A – Diagrammes de Hugues

Nom du diagramme :	Diagramme de Hugues
Ordonnée (Y):	$K_2O + Na_2O$
Abscisse (X) :	$(K_2O / (K_2O + Na_2O)) * 100$
Référence originale :	Hugues, C.J. 1973. Spillites, keratophyres, and the igneous spectrum. Geological Magazine #109, p. 513-527.
Note référence originale :	
Références additionnelles :	
Transformation anhydre?	Non mentionné par l'auteur
Transformation 100 %?	Non mentionné par l'auteur
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Aucune
Conditions lithologiques selon la référence originale	Aucune
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Aucune
Seuils d'anomalie selon la référence originale	Les champs indiquant l'altération sont donnés sur le diagramme original, joint par la suite. Aucune indication d'une intensité de l'altération n'est donnée sur le diagramme par contre.
Seuils d'anomalie inférés selon les tests	<p>Les champs d'altération indiqués sur le diagramme original sont confirmés par les tests effectués sur les banques de référence. L'essentiel des analyses de roches volcaniques récentes, alcalines ou non, se trouve dans le spectre igné du diagramme. Seules quelques roches très alcalines dépassent les champs tracés vers le haut et quelques roches ultramafiques alcalines tombent dans le champ des keratophyres mais il s'agit de roches de compositions exceptionnelles. La majorité des volcanites archéennes provenant d'études pétrogénétiques et éloignées des minéralisations connues se trouve également dans le champ des roches fraîches.</p> <p>Il faut noter ici encore que le processus réel qui mène aux champs déterminés sur le diagramme peut varier selon le protolithe. Voir la section 4 pour une discussion de ce sujet.</p>

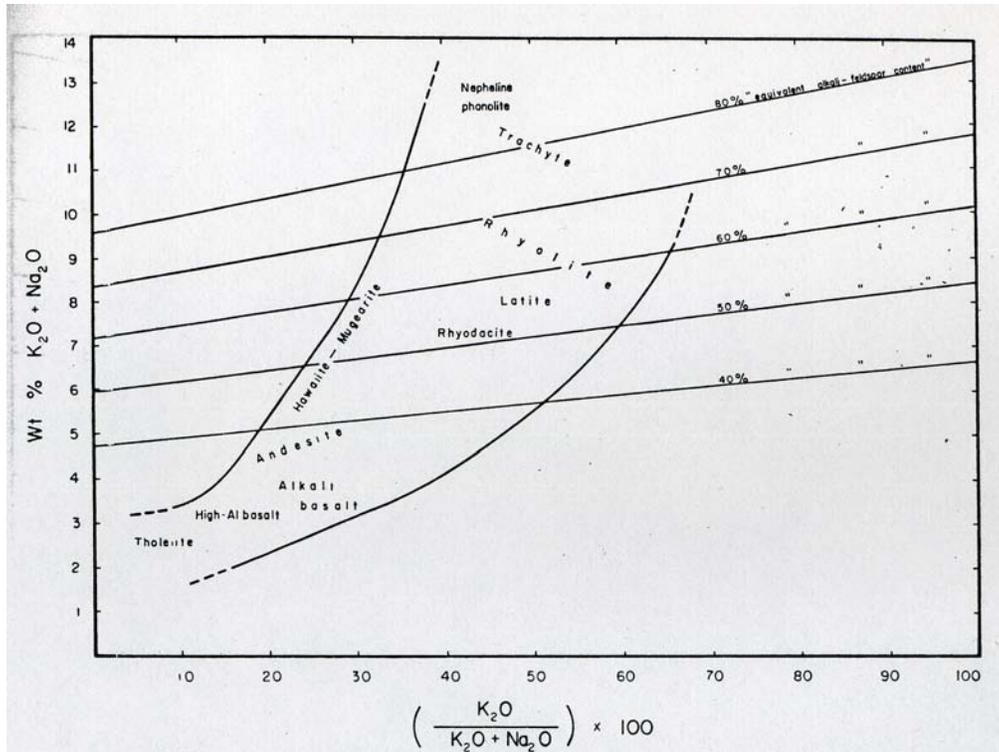
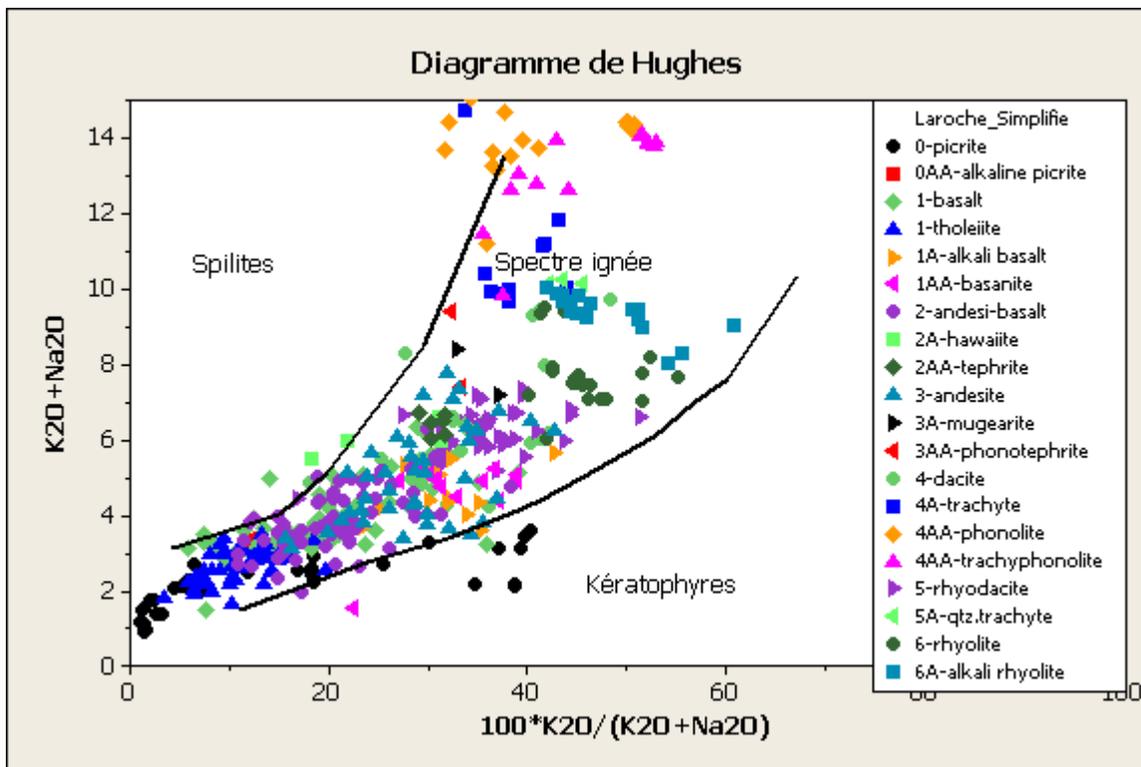
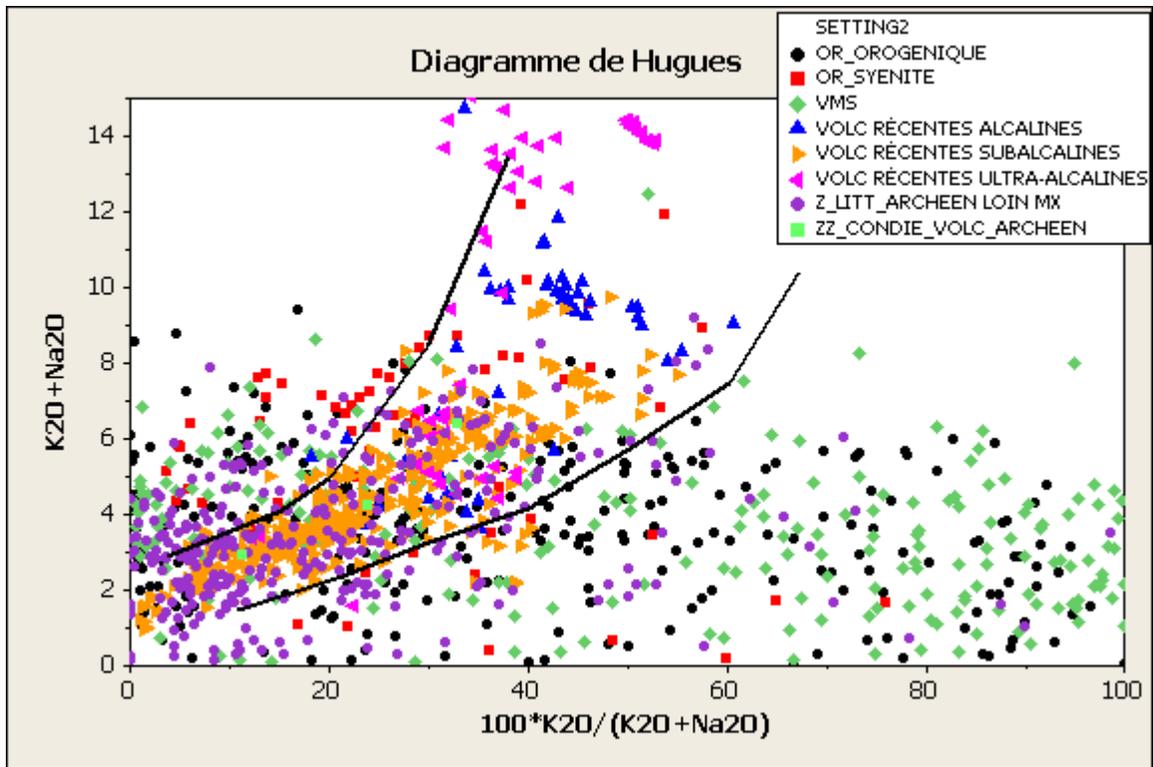


Figure 4. 'The igneous spectrum', including within its envelope all the rocks and rock suites of Figures 1, 2 and 3, and showing the approximate positions of various volcanic rocks. The 'equivalent alkali-feldspar content' is simply the weight percent of alkali feldspar assuming all the alkali content of the rock to be in the form of alkali-feldspar.





FICHE 2B – Alkali-Aluminium

Nom du diagramme :	Alkali-aluminium
Ordonnée (Y):	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Les valeurs utilisées doivent être en moles.
Abscisse (X) :	$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Les valeurs utilisées doivent être en moles.
Référence originale :	Davies, J.F., Whitehead, R.E. 2006. Alkali-Alumina and MgO-Alumina molar ratios of altered and unaltered rhyolites. <i>Exploration and mining geology</i> #15, nos 1-2, p. 76-88.
Note référence originale :	
Références additionnelles :	
Transformation anhydre?	Non mentionné par l'auteur
Transformation 100 %?	Non mentionné par l'auteur
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Aucune
Conditions lithologiques selon la référence originale	Ce diagramme s'applique correctement seulement aux rhyodacites et aux rhyodacites subcalines, c.-à-d. les roches pour lesquelles l'aluminium est essentiellement sous la forme de feldspath plagioclase sodique et de feldspath potassique. L'article original ne mentionne toutefois pas de quelle façon on devrait définir les rhyolites et les rhyodacites à utiliser.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Le diagramme réalisé pour les roches volcaniques récentes de composition rhyolitique et rhyodacitique (telles que déterminées par R1-R2, De La Roche, 1980) montre que les rhyodacites passent sous la droite ligne (oligoclase-andésine)-feldspath potassique qui limite en principe l'altération. En réalité, les rhyodacites devraient donc être exclues de ce diagramme.
Seuils d'anomalie selon la référence originale	Sur le diagramme, les roches fraîches devraient se placer à l'intérieur du triangle albite-feldspath potassique et (oligoclase-andésine)-feldspath potassique. Lorsque l'on franchit la ligne (oligoclase-andésine)-feldspath potassique vers le bas, il s'agit d'une altération. Une tendance altération albite-muscovite se trouverait sur la ligne albite-muscovite. On peut également définir la tendance paragonite-muscovite par une ligne (0,33, 0)-(0, 0,33). L'origine du diagramme correspond à des altérations à chlorite ou épidote dans lesquelles l'aluminium se retrouve dans des minéraux autres que les feldspaths plagioclases ou potassiques.
Seuils d'anomalie inférés selon les tests	Les rhyolites récentes, telles qu'identifiées par R1-R2, se placent dans le champ des roches fraîches sur le diagramme. Elles se placent au même endroit sur le diagramme que les rhyolites cénozoïques étudiées par Davies et Whitehead dans l'article original. Par contre, les rhyolites archéennes des études pétrogénétiques et éloignées des minéralisations (identifiées par le ratio $\text{Zr}/\text{TiO}_2 > 0,07$) se trouvent plutôt dans la partie gauche du diagramme. Cette situation est également similaire à ce qui est noté pour des rhyolites archéennes non-associées à des minéralisations étudiées par les auteurs de l'article. Les auteurs attribuent cette différence de composition à de l'altération, étant donné que les roches intrusives des deux époques ont des compositions qui se

superposent.

On note d'ailleurs que le champ occupé par les rhyolites des altérations VMS n'est pas très différent de celui occupé par les rhyolites archéennes éloignées des minéralisations, que ce soit selon données actuelles ou celles de Davies et Whitehead)

Ceci indique que la mobilité en K_2O et Na_2O dans les rhyolites archéennes est très répandue et très variable (souvent appauvrissements modestes en Na_2O et enrichissement en K). Les auteurs notent d'ailleurs que ces appauvrissements sont souvent semblables à ceux qui se retrouvent dans les zones d'altération périphériques des VMS. La conclusion est donc que les altérations périphériques des VMS ne sont pas trop caractéristiques et semblent être répandues dans l'ensemble des rhyolites archéennes.

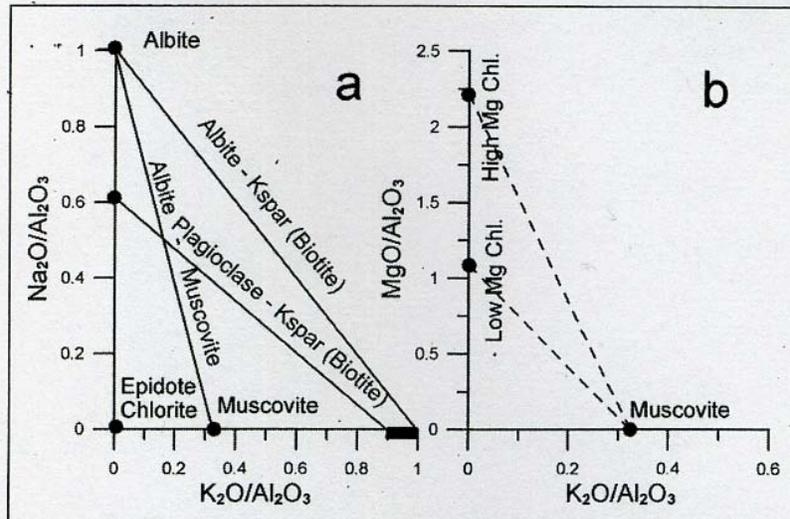


Fig. 1. Molar ratio plots. (a) Alkali-alumina ratios for plagioclase, K-feldspar, muscovite, and alumina-bearing ferromagnesian minerals. (b) MgO/Al_2O_3 vs. K_2O/Al_2O_3 plot showing the muscovite-chlorite relationship.

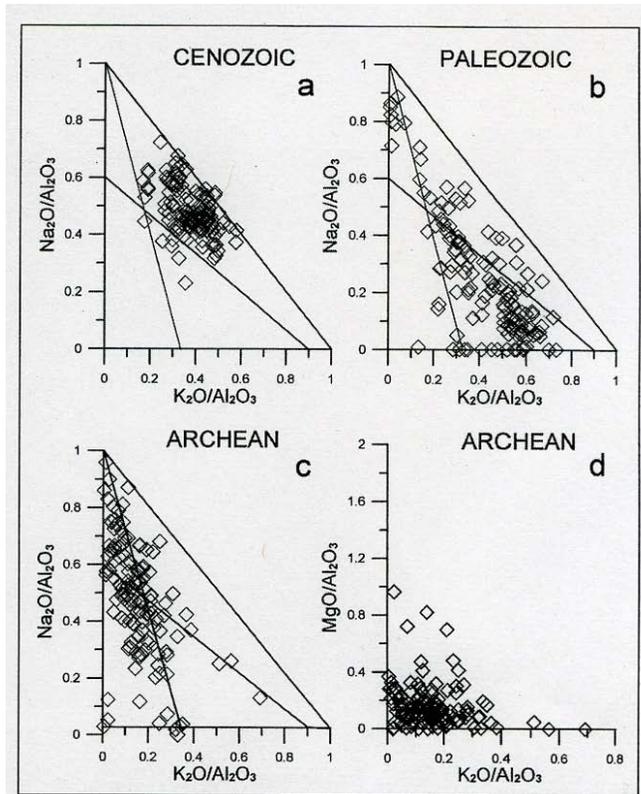


Fig. 3. (a–c) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio plots of felsic volcanic rocks remote from mineral deposits: (a) unaltered Cenozoic rocks; (b) and (c) variably altered Paleozoic and Archean rocks, respectively. (d) $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio plot of the Archean rocks. For sources of data see Appendix.

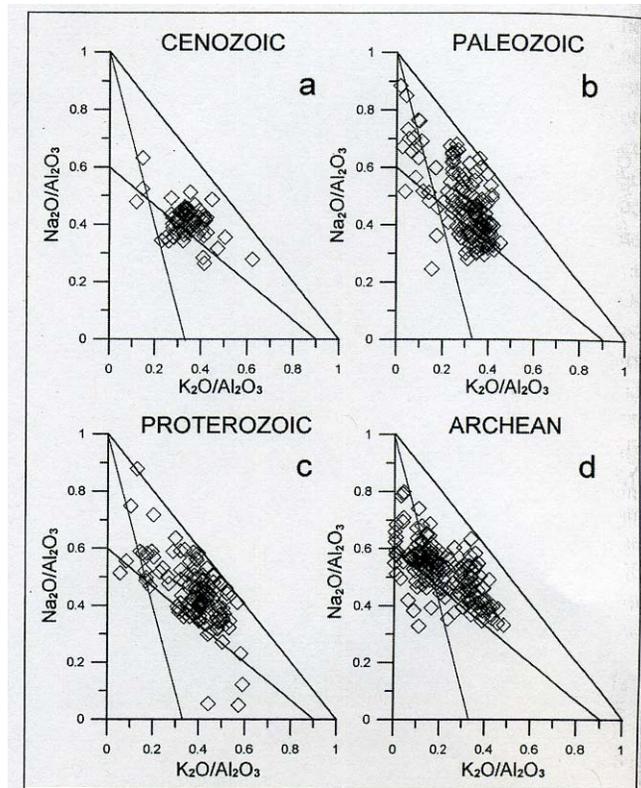
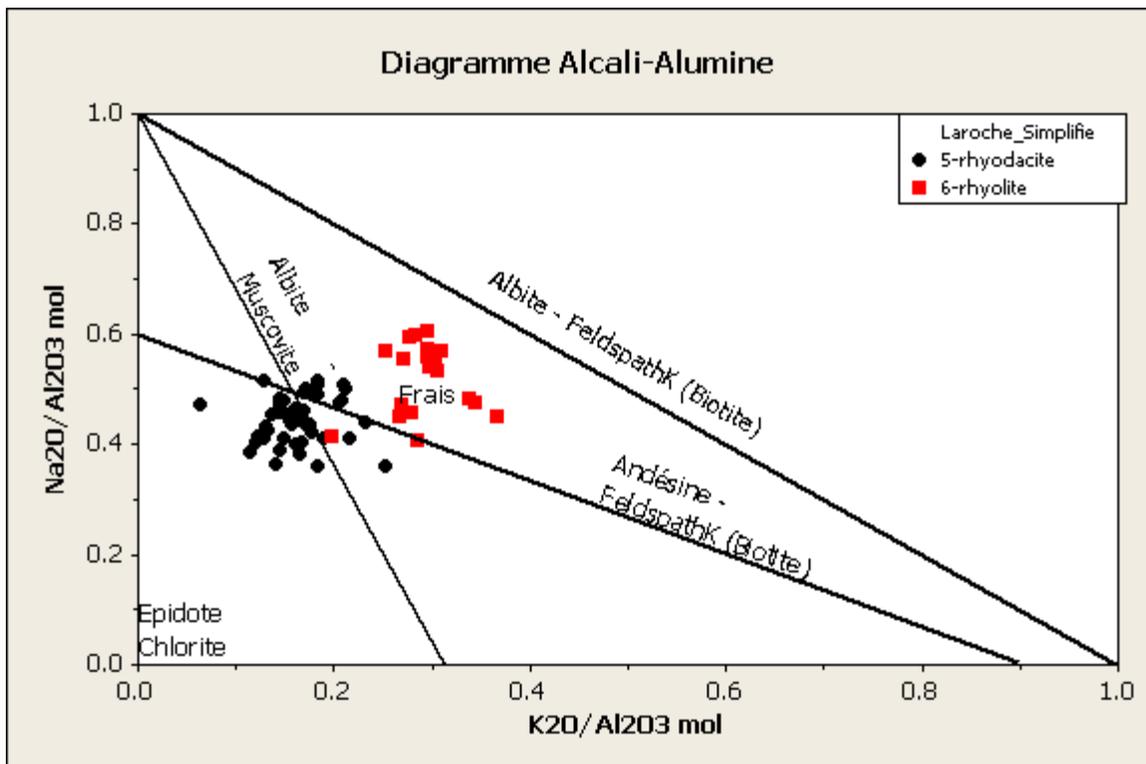
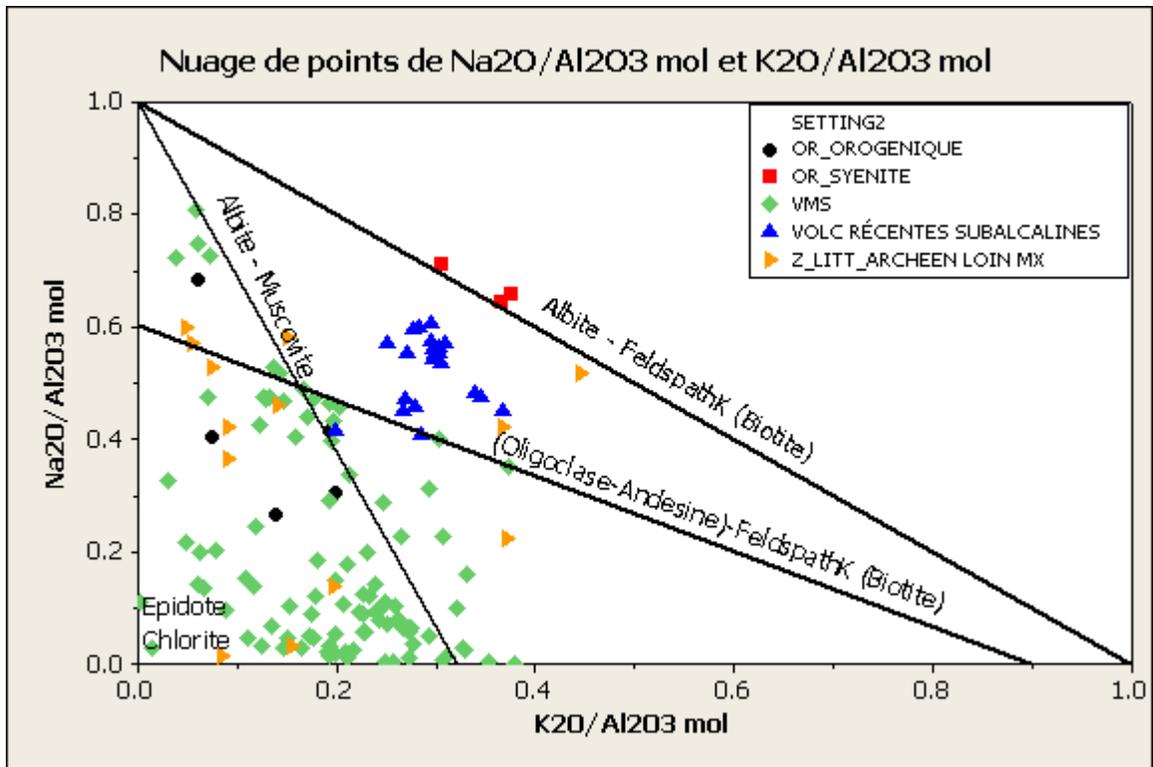


Fig. 4. Alkali-alumina molar ratio plots of Cenozoic, Paleozoic, Proterozoic, and Archean granitoid intrusions.





FICHE 2C – MgO - Aluminium

Nom du diagramme :	MgO-aluminium
Ordonnée (Y):	MgO/Al ₂ O ₃ . Les valeurs utilisées doivent être en moles.
Abscisse (X) :	K ₂ O/Al ₂ O ₃ . Les valeurs utilisées doivent être en moles.
Référence originale :	Davies, J.F., Whitehead, R.E. 2006. Alkali-Alumina and MgO-Alumina molar ratios of altered and unaltered rhyolites. Exploration and mining geology #15, nos 1-2, p. 76-88.
Note référence originale :	
Références additionnelles :	
Transformation anhydre?	Non mentionné par l'auteur
Transformation 100 %?	Non mentionné par l'auteur
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Aucune
Conditions lithologiques selon la référence originale	Ce diagramme s'applique correctement seulement aux rhyodacites et aux rhyodacites subalcalines.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Le diagramme réalisé pour les roches volcaniques récentes de composition rhyolitique et rhyodacitique (identifiées par R1-R2) montre que les rhyodacites fraîches s'éloignent vers le pôle de la chlorite pauvre en Mg. Elles devraient donc être exclues du diagramme.
Seuils d'anomalie selon la référence originale	Aucun seuil d'anomalie précis n'est mentionné dans la publication originale. Toutefois, les altérations en chlorite devraient apparaître en s'approchant de l'ordonnée sur le graphique.
Seuils d'anomalie inférés selon les tests	Aucune rhyolite récente ne se déplace de l'abscisse du diagramme. Toutefois, plusieurs volcanites archéennes provenant des études pétrogénétiques et éloignées de minéralisations (identifiées par Zr/TiO ₂ > 0.07) se retrouvent au centre du diagramme. Les altérations réellement intéressantes sont représentées par les quelques points des altérations VMS situées près du pôle de la chlorite en haut à gauche.

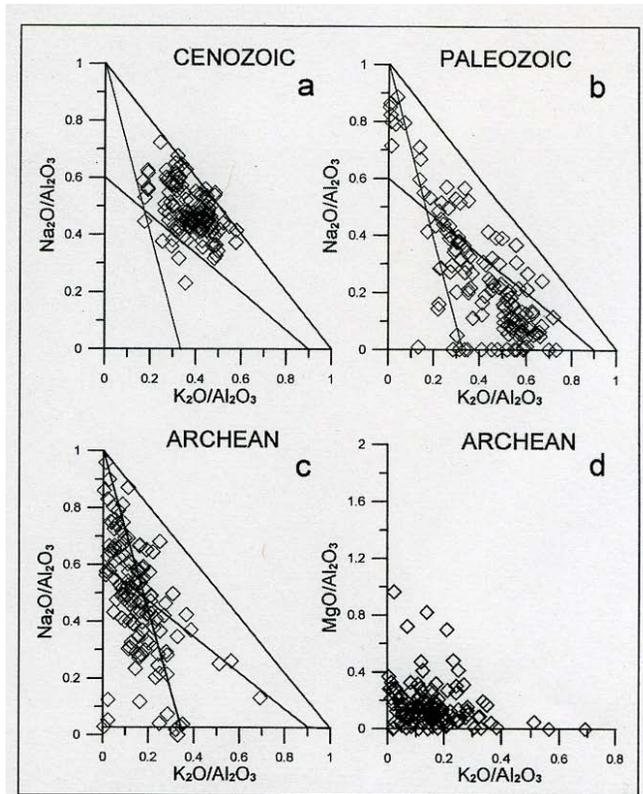
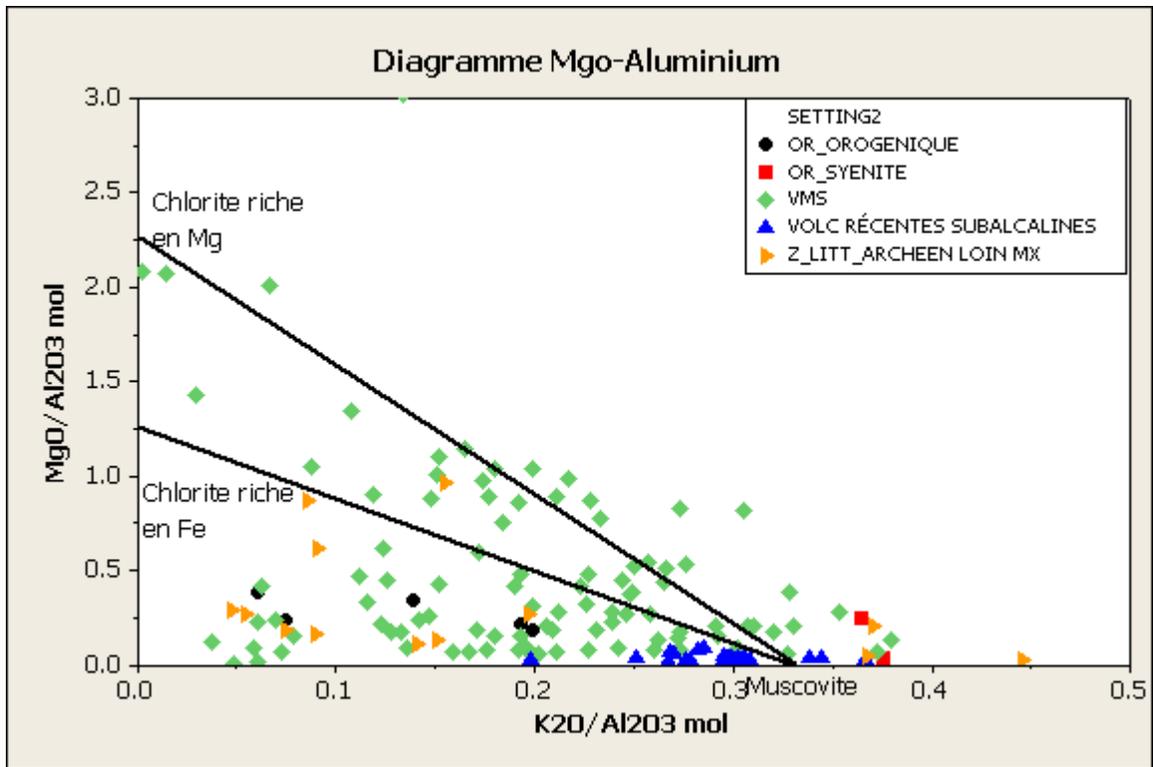
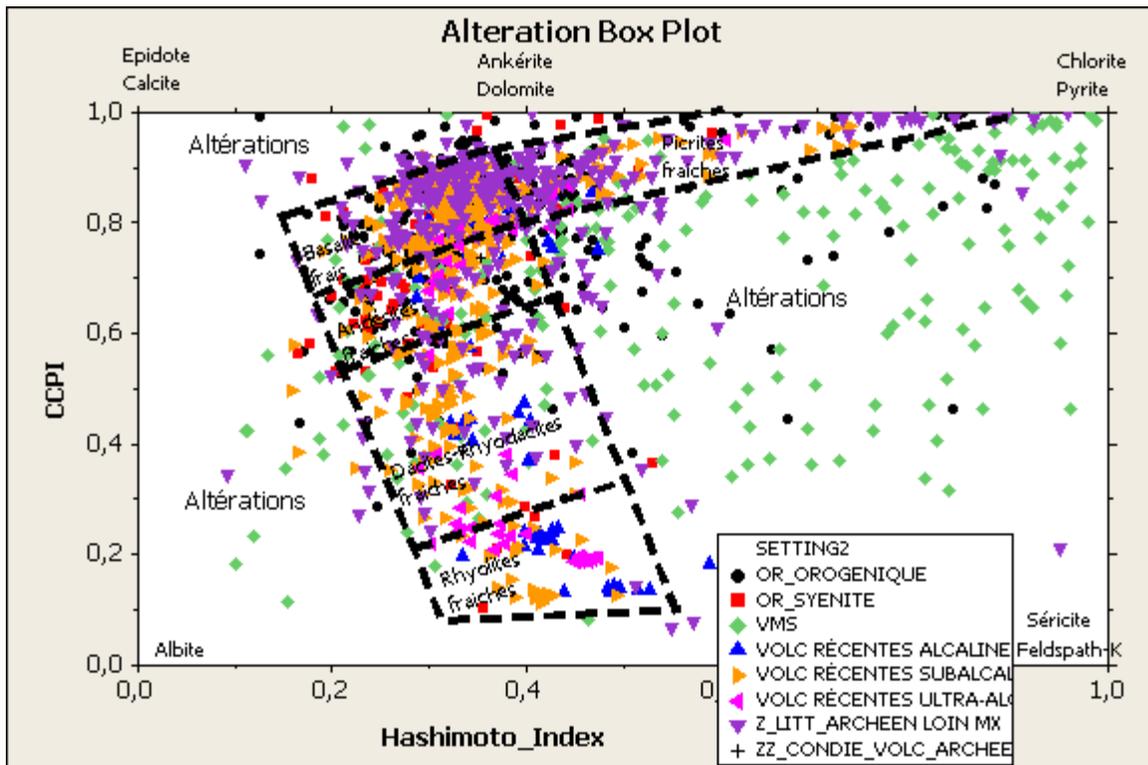
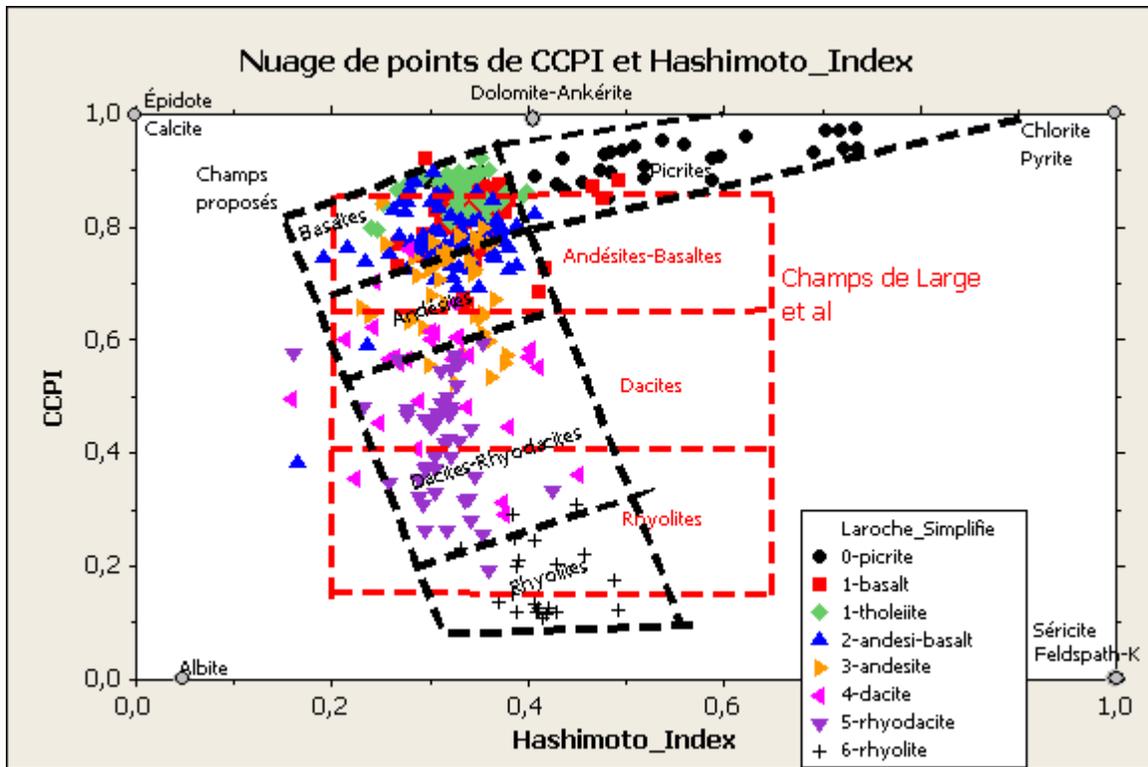


Fig. 3. (a–c) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio plots of felsic volcanic rocks remote from mineral deposits: (a) unaltered Cenozoic rocks; (b) and (c) variably altered Paleozoic and Archean rocks, respectively. (d) $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio plot of the Archean rocks. For sources of data see Appendix.



FICHE 2D – Alteration Box plot

Nom du diagramme :	Alteration Box Plot
Ordonnée (Y):	Indice CCPI (Chlorite-Carbonate-Pyrite Index)
Abscisse (X) :	Indice Hashimoto (AI)
Référence originale :	Large, R.R., Gemmel, J.B., Paulick, H., Huston, D.L. 2001. The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry association with volcanic-hosted massive sulfide deposits. <i>Economic Geology</i> 96, p. 957-972.
Note référence originale :	
Références additionnelles :	
Transformation anhydre?	Non mentionné par l'auteur
Transformation 100 %?	Non mentionné par l'auteur
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Aucune
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Seuils d'anomalie selon la référence originale	L'article original montre une boîte dans laquelle se trouvent les lithologies fraîches. Cette boîte est montrée sur la figure montrée plus loin. Les altérations intéressantes en contexte VMS se retrouvent vers la droite du diagramme en principe. La position de différents minéraux d'altération est montrée sur le diagramme.
Seuils d'anomalie inférés selon les tests	Le champ des roches fraîches proposé par Large et al., est superposé aux données sur les roches volcaniques subalcalines fraîches. On constate que la forme de boîtes proposée par les auteurs est plutôt incorrecte. La boîte s'étend beaucoup trop vers la droite pour les lithologies felsiques. De même, elle doit être allongée vers le bas et vers le haut pour les rhyolites et les basaltes. Le champ des roches fraîches de Large et al., ne tient pas compte non plus des roches ultramafiques. On peut proposer une nouvelle boîte pour les roches fraîches qui tient mieux compte des lithologies. La boîte tient compte des changements des valeurs des indices pour différentes lithologies fraîches. Ces champs sont valables pour les roches autant pour les lithologies subalcalines qu'alcalines ou hyperalcalines.

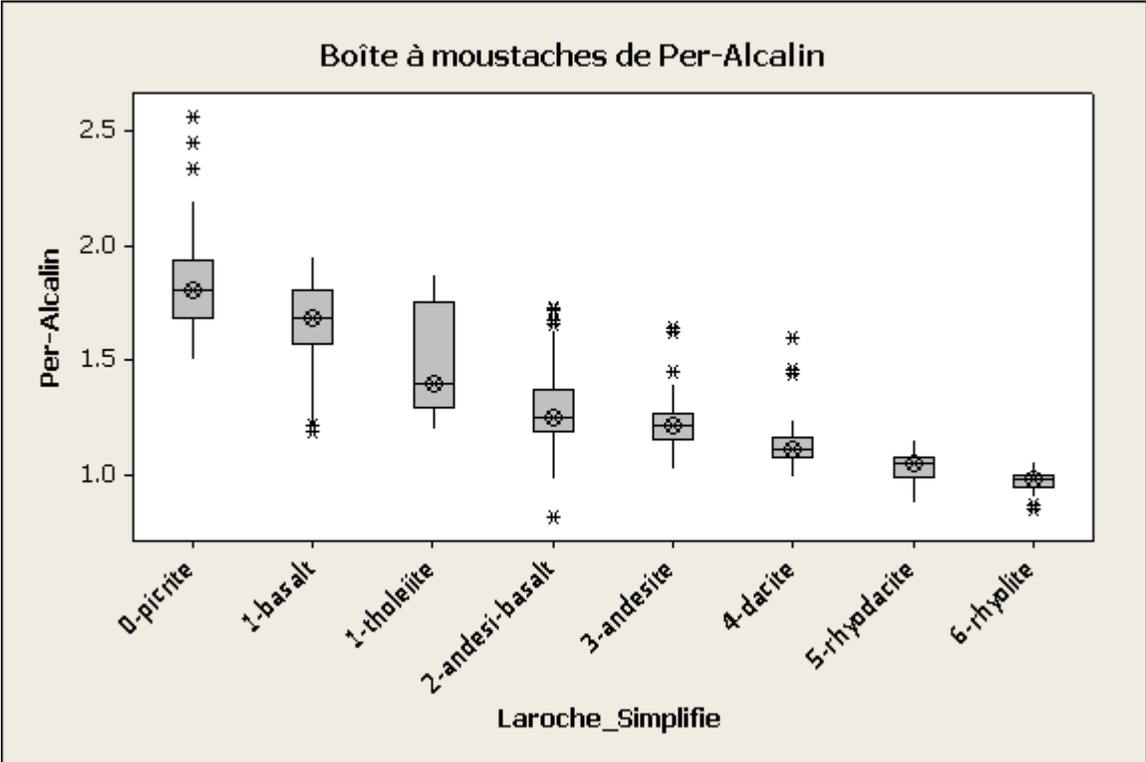


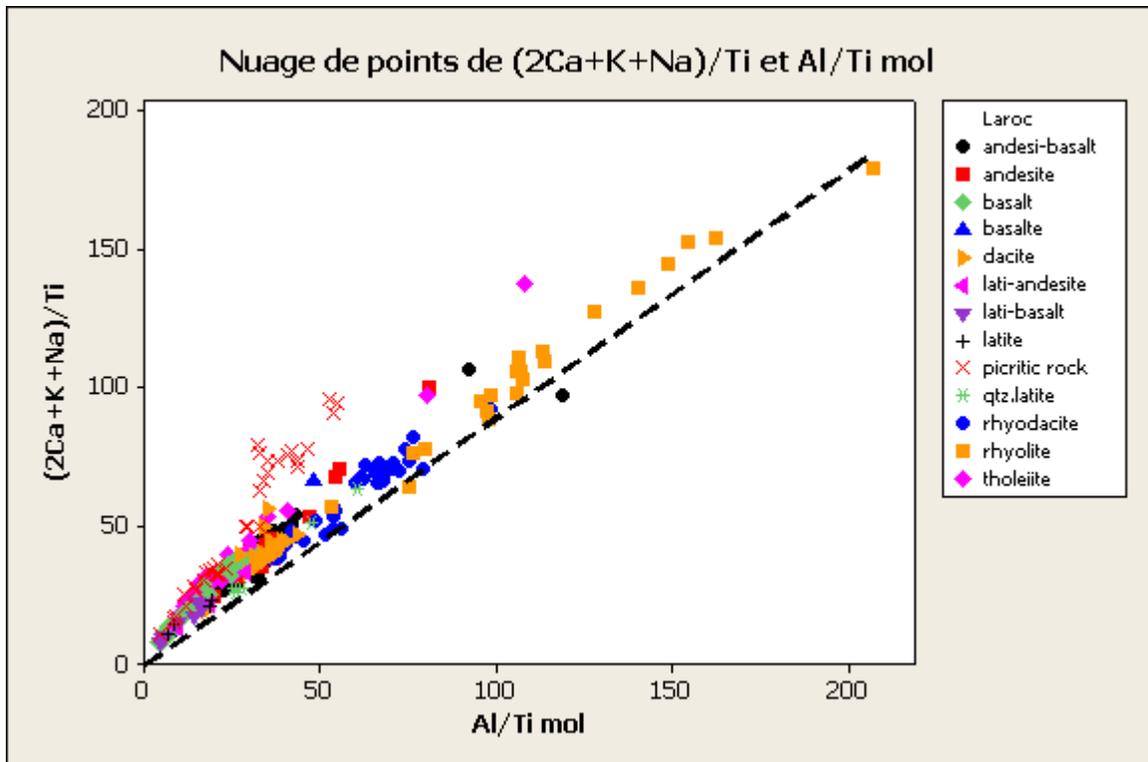
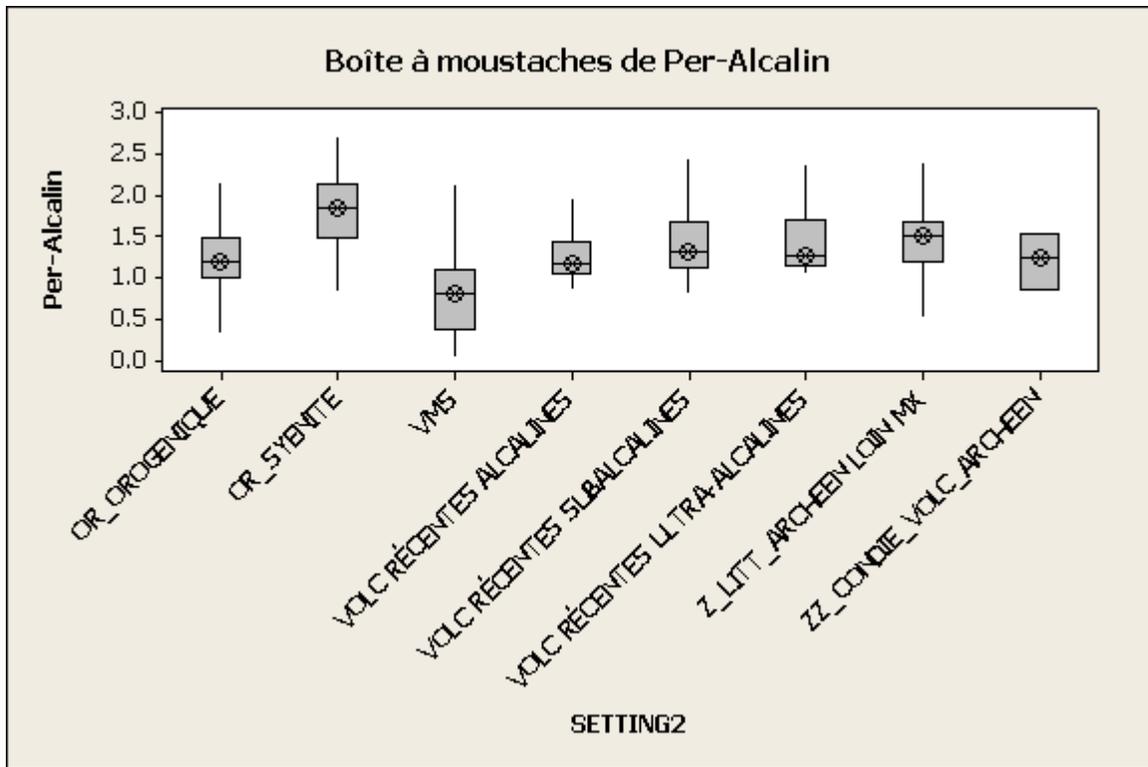
ANNEXE 3 – FICHES DÉTAILLÉES DES RATIOS D'ÉLÉMENTS DE PEARCE APPLIQUÉS AU METASOMATISME

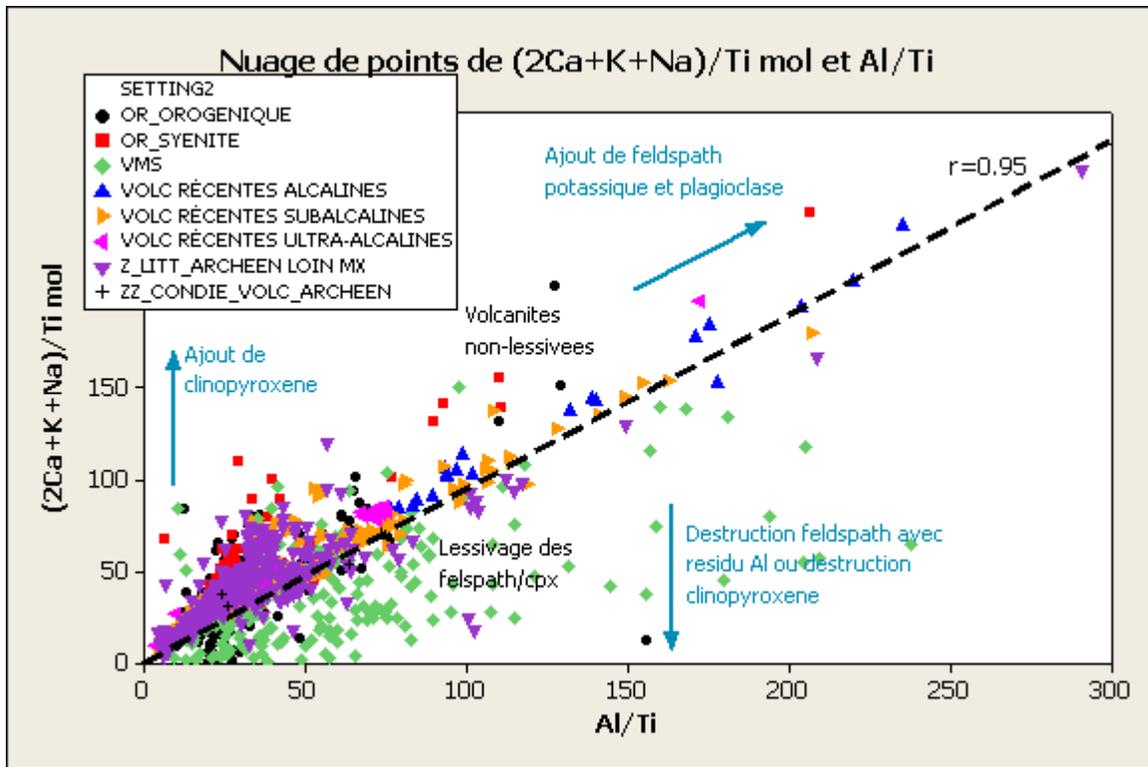
FICHE 3A – Per-Alcalin

Méthode	PER-Alcalin
Formule	$((Na + K + 2Ca)/Ti) / (Al/Ti)$ Note : les éléments utilisés doivent être transformés en moles.
Référence originale	
Note référence originale	
Références additionnelles	Franklin, J.M. 1997. Lithogeochemical and Mineralogical Methods for Base Metal and Gold Exploration "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" <i>edited by</i> A.G. Gubins, 1997, p. 191–208 Gaboury, D. 2004. Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères : Comparaison de la performance d'indicateurs d'altération. Projet Consorem 2000-02a.
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	La méthode des ratios d'éléments de Pearce suppose un précurseur commun aux roches étudiées. Le précurseur peut être par exemple un magma source commun. L'indice PER-alcalin se base sur l'hypothèse que la composition en Al, K, Na et Ca de la roche s'explique par le fractionnement des feldspaths. Si c'est le cas, les échantillons devraient s'aligner sur une valeur de 1. Or, les protolithes des roches plus mafiques contiennent des phases calciques additionnelles comme le clinopyroxène qui ne sont pas modélisées dans ce cas. Pour obtenir des résultats corrects, on devrait donc limiter l'utilisation du Per-Alcalin pour l'altération aux rhyolites.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Cet indice devrait être limité aux rhyolites. Toutes les autres lithologies violent l'hypothèse de base, puisqu'elles ont des valeurs supérieures à 1.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	On constate, que, de façon absolue que les roches volcaniques fraîches ne franchissent pas un ratio de 0,95 sur le graphique. Les rhyolites se trouvent sur une pente

	<p>semblable, ce qui indique que pour ces roches l'hypothèse du fractionnement des feldspaths pour expliquer les compositions de Na, Ca, Al et K est correcte. Cette hypothèse n'est pas valide pour toutes les autres lithologies. Des valeurs plus faibles indiquent un excès d'aluminium par rapport à Ca, K et Na, puisque l'aluminium des roches est normalement concentré uniquement dans les feldspaths. Donc le seuil d'anomalie absolu du ratio est de 0,95 pour les rhyolites. Toute rhyolite ayant un ratio qui est inférieur montre obligatoirement un excès en aluminium.</p>
--	--



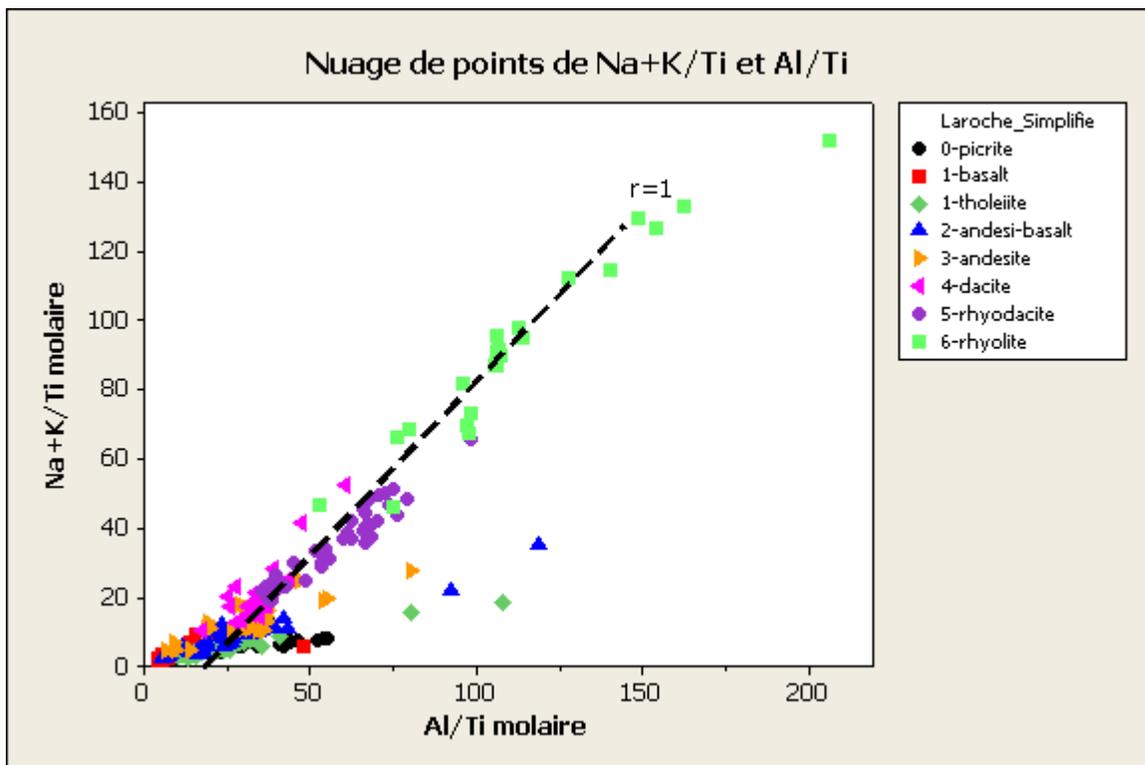


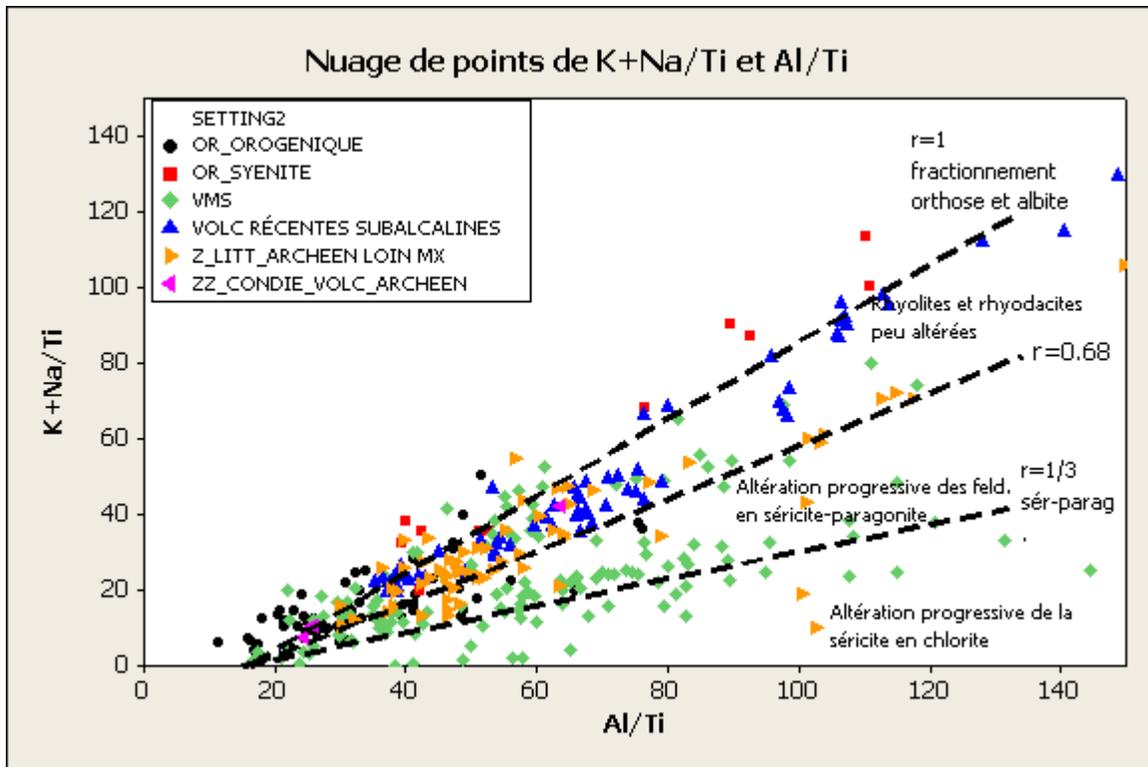


FICHE 3B – Per-Felsiques

Méthode	Per-Felsiques
Formule	Diagramme (Na+K)/Z vs. Al/Z Z est un élément immobile comme TiO ₂ , Zr, etc. Plusieurs ratios sont dérivés de la méthode : Perte absolue en Na+K : (Al/Z) – ((Na+K)/Z – X0 Perte relative en Na+K : $(1 - (((Na+K)/Z) / ((Al/Zr) - x0))) * 100\%$ % séricitisation : $(1 - (((Na+K)/Z) / ((Al/Zr) - x0))) * 1,5 * 100\%$ % chloritisation : $(1/3 - (((Na+K)/Z) / ((Al/Zr) - x0))) * 3 * 100\%$ X0 est l'abscisse à l'origine. ~0,01 pour Zr comme Z, 17 pour TiO ₂ comme Z. Note : calculs doivent être effectués sur des données transformées en moles.
Référence originale	Stanley, C., Medeisky, H. 1994. Lithogeochemical Exploration for hydrothermal ore deposits using Pearce Element Ratios Analysis. In: Lentz, D.R., Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems. Geological Association of Canada Short Course notes, v.11, p.193-211.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	
Transformation anhydre?	Peu importe
Transformation 100 %?	Peu importe
Conditions géochimiques selon la référence originale	Aucune
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Limité aux rhyolites et rhyodacites seulement. La méthode est basée sur les ratios d'éléments de Pearce. Pour être valide, elle doit être appliquée à des roches provenant d'une source magmatique commune (ex : magma source similaire). Comme elle utilise Al, Na, K, cela suppose que l'essentiel des compositions de ces trois éléments est, pour des rhyolites fraîches, contrôlé par le fractionnement des feldspaths. Les auteurs de cet indice mentionnent donc à juste titre qu'il doit s'appliquer aux rhyolites et rhyodacites.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	Le diagramme X-Y indique que l'hypothèse pétrogénétique tient pour les rhyolites et les rhyodacites.
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	Pour des roches fraîches de composition rhyodacitique à rhyolitique, les valeurs devraient être sur une pente de 1.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	La pente de 1 est confirmée par les tests effectués.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	La droite de fractionnement des feldspaths ne passe pas par l'origine. De ce fait, on doit utiliser une ordonnée à l'origine pour calculer les anomalies. Les auteurs suggèrent d'utiliser des indices incluant une valeur d'abscisse à l'origine (variable

	selon l'élément Z utilisé). On doit donc utiliser les ratios suggérés pour déterminer les anomalies. Une pente de 1/3 sur le graphique indique la présence de séricite/paragonite. Une pente plus basse indique de la chloritisation.
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	<p>En isolant des échantillons de rhyolites et rhyodacites fraîches et altérées, on peut confirmer la concentration des échantillons de volcanites récentes le long de la pente de 1. On remarque que les échantillons de l'archéen montrent des pentes légèrement plus faibles que 1, ce qui indique que ces échantillons montrent une certaine altération (perte de Na et/ou K). Certains échantillons des contextes orogéniques et d'or syénitique montrent des pentes supérieures à 1, indiquant un excès de Na et/ou K dans ces roches. Il est très intéressant de constater une certaine concentration d'échantillons des contextes de VMS sur une pente de 1/3 (composition de la séricite/paragonite). Ceci représente la barrière chimique créée par la stabilité importante de la séricite en contexte d'altération.</p> <p>Aucune rhyolite ou rhyodacite récente n'a une pente inférieure à 0,68 (cette valeur correspond à la perte relative en Na+K). Cette valeur peut être considérée comme un seuil absolu pour détecter l'altération significative. Cette valeur permet également de circonscrire la plupart des rhyolites archéennes des études pétrogénétiques.</p>



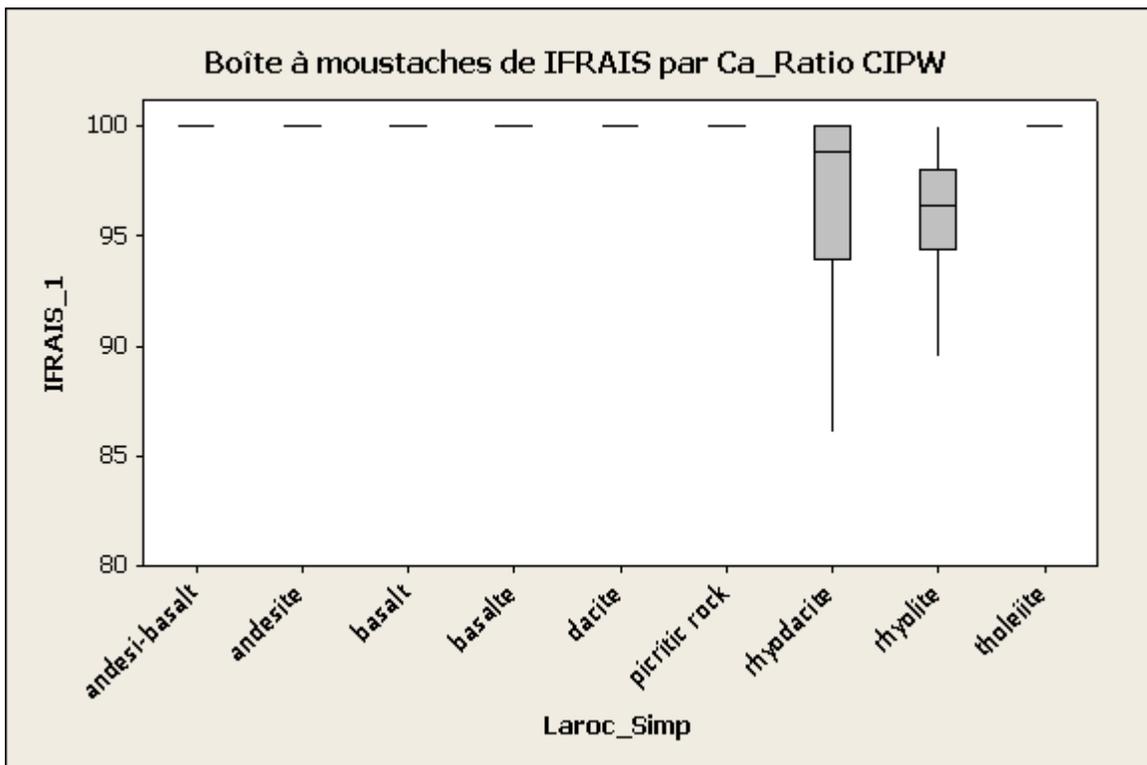
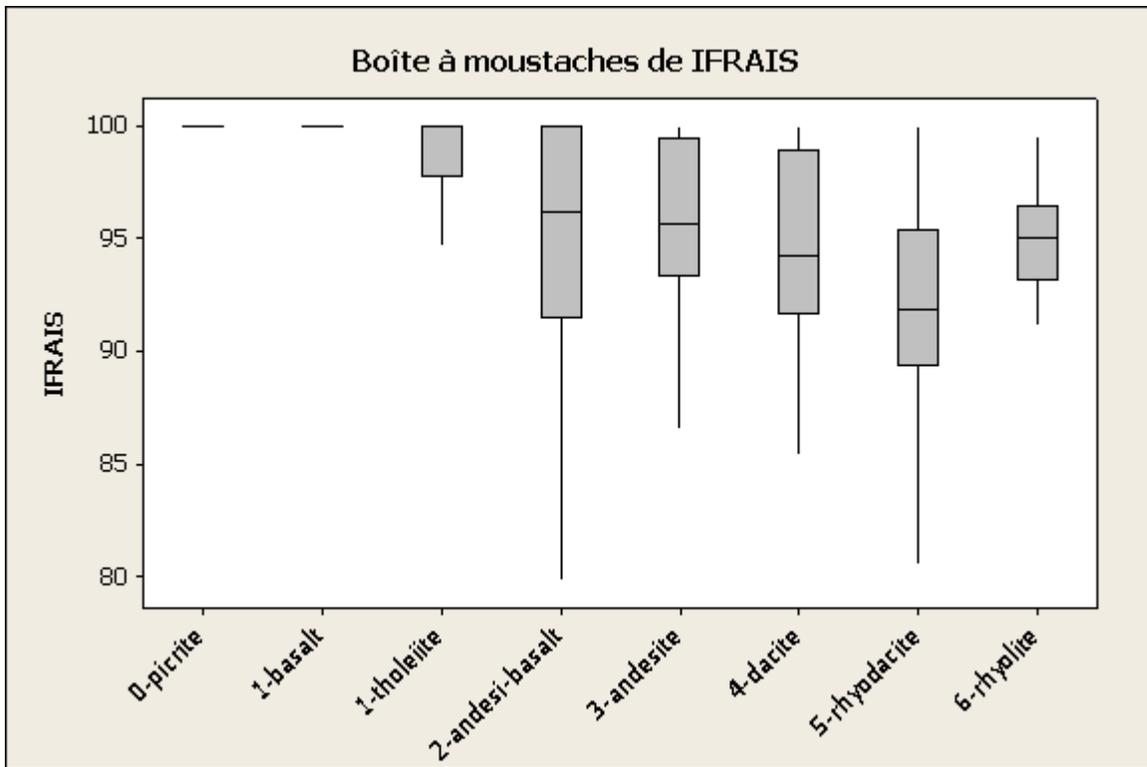


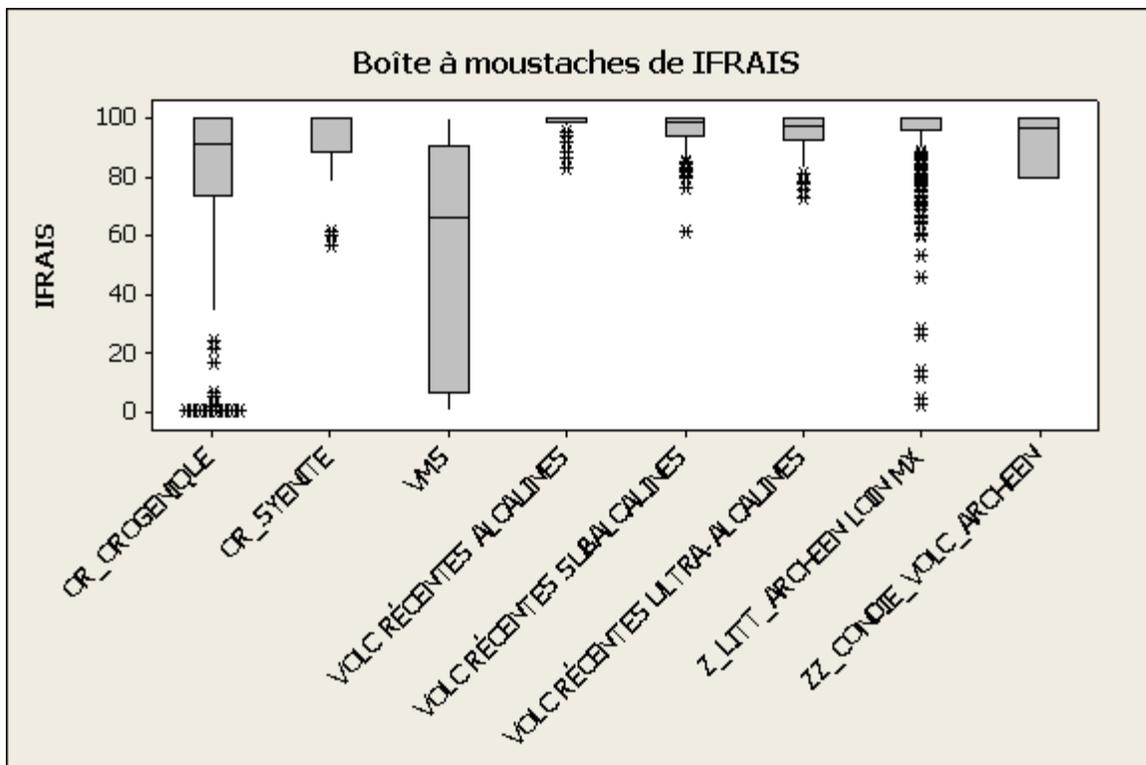
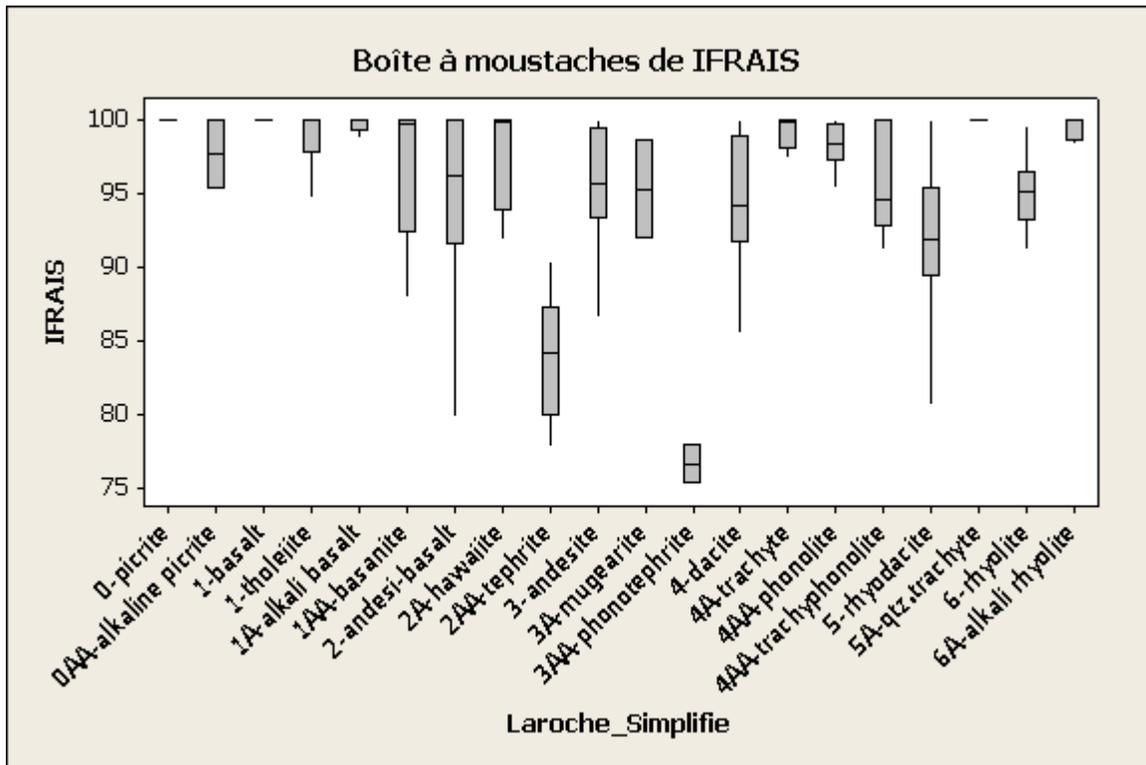
ANNEXE 4 – FICHES DETAILLEES DE COMPILATION DES INDICES DE NORMAT

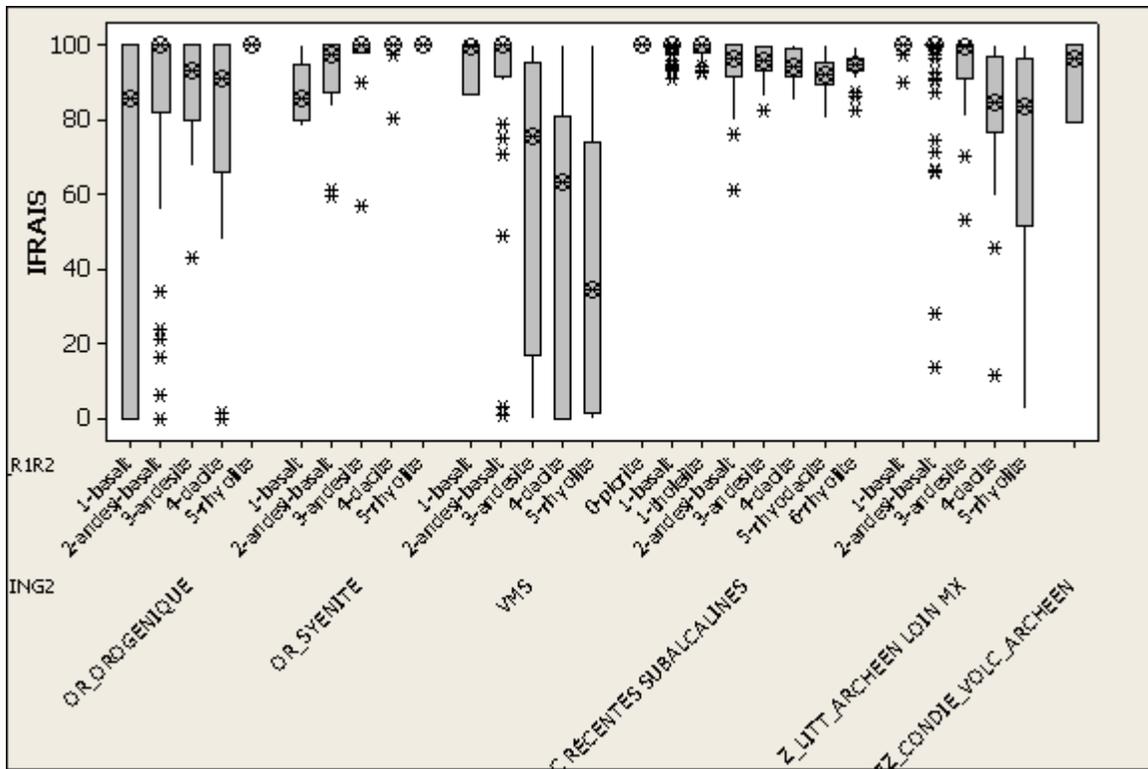
FICHE 4A – Normat Indice IFRAIS

Méthode	Normat Indice IFRAIS
Formule	$HChl+HPara+HPyro+HSer/(HChl+HPara+HPyro+HSer+An+Cpx+Ab+Or)$ Cette formule utilise des minéraux normatifs (H signifie hydrothermal) qui ne sont pas fournis dans le résultat final de Normat. La chlorite, séricite, paragonite et pyrophyllite fournies dans le résultat final ne sont PAS celles qui sont utilisées pour ce calcul.
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Pour que les valeurs de l'indice IFRAIS indique correctement la présence de minéraux hydrothermaux, le protolithe non-altéré ne doit pas contenir de minéraux peralumineux (ex : corindon, minéraux du groupe des spinels contenant de l'aluminium). Il faut donc exclure les lithologies comme les shales pélitiques ou les roches volcaniques franchement peralumineuses. De même, certaines roches ultramafiques primitives contenant du spinel doivent être exclues.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice IFRAIS est en principe indépendant des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de IFRAIS montrent une certaine diminution graduelle des tholeiites vers les rhyolites. Une certaine dépendance aux lithologies est donc évidente. Les équivalents ultra-alcalins des lithologies subalcalines tendent à montrer une diminution des valeurs de l'indice pour les volcanites mafiques à intermédiaires (basanites, téphrites) d'environ 5-10. Cette dépendance aux lithologies est artificielle et est probablement due à la formation artificielle de paragonite et de séricite hydrothermale causée par la règle de division du calcium utilisée par Normat (voir la

	<p>section sur les seuils de IFRAIS pour l'explication).</p> <p>Comme les composantes de l'indice ne sont pas fournies dans les valeurs de sortie de Normat, il n'est pas possible d'examiner cet indice sur un diagramme X-Y.</p>
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	<p>En principe, les roches volcaniques fraîches utilisées sont pour la plupart métalumineuses à légèrement peralumineuses et devraient avoir des indices de IFRAIS de 100. Toutefois, on remarque qu'un nombre important d'échantillons a des indices de IFRAIS inférieurs à 100.</p> <p>Les minéraux hydrothermaux utilisés par l'indice IFRAIS (hPara, hSer, hChl, hPyro) sont formés à partir de l'excès d'aluminium dans la roche restant après la formation des feldspaths normatifs et du clinopyroxène. On constate si on compare les valeurs de IFRAIS et le ratio A/CNK (qui indique le caractère peralumineux de la roche) que même pour des échantillons qui sont dans le champ métalumineux ($A/CNK < 1$), les valeurs de IFRAIS sont inférieures à 100. Il semble y avoir une certaine surévaluation de l'altération lorsque la valeur du ratio A/CNK augmente.</p> <p>Il est probable que cette surévaluation se produit par la règle de subdivision simultanée de l'aluminium entre le clinopyroxène et l'anorthite. Le ratio de division du calcium entre l'anorthite et le clinopyroxène envoie probablement trop de calcium vers le clinopyroxène, ce qui ne crée pas assez d'anorthite et provoque un excès d'aluminium artificiel. Dans les roches volcaniques mafiques, les valeurs de calcium sont probablement suffisamment élevées pour que tout l'aluminium soit épuisé par la formation de l'anorthite.</p> <p>Pour tester cette hypothèse, l'option « CIPW » a été utilisée dans le calcul des minéraux normatifs. Cette option du logiciel de Normat permet de former d'abord l'anorthite en utilisant tout le calcium ou l'aluminium restant avant de former le clinopyroxène. Cette approche est celle de la norme CIPW. On constate effectivement que les valeurs de IFRAIS pour les roches subalcalines sont ramenées vers 100. Si on examine le diagramme IFRAIS vs A/CNK pour cette méthode, on constate alors que la plupart des roches altérées, sauf celles qui sont réellement peralumineuses, ont des valeurs de 100.</p> <p>Il faut noter aussi qu'un examen détaillé de la séquence de calcul de Normat indique que la quantité d'eau dans les analyses n'est pas prise en compte pour former les minéraux d'altération hydrothermaux, qui en fait en contiennent. Lorsque l'on examine les valeurs analysées en H_2O+ pour les roches volcaniques fraîches, on constate que des minéraux hydrothermaux (indice IFRAIS < 100) sont formés même dans les cas où les quantités d'eau disponibles dans les analyses sont très faibles. Une amélioration possible de Normat serait de comptabiliser la quantité d'eau disponible dans le calcul.</p> <p>Comme les valeurs de IFRAIS semblent dépendantes des lithologies, on ne peut fixer un seuil absolu qui permette de séparer les roches altérées des roches fraîches. Mais en général, les valeurs inférieures à 85 sont limitées aux roches altérées.</p>



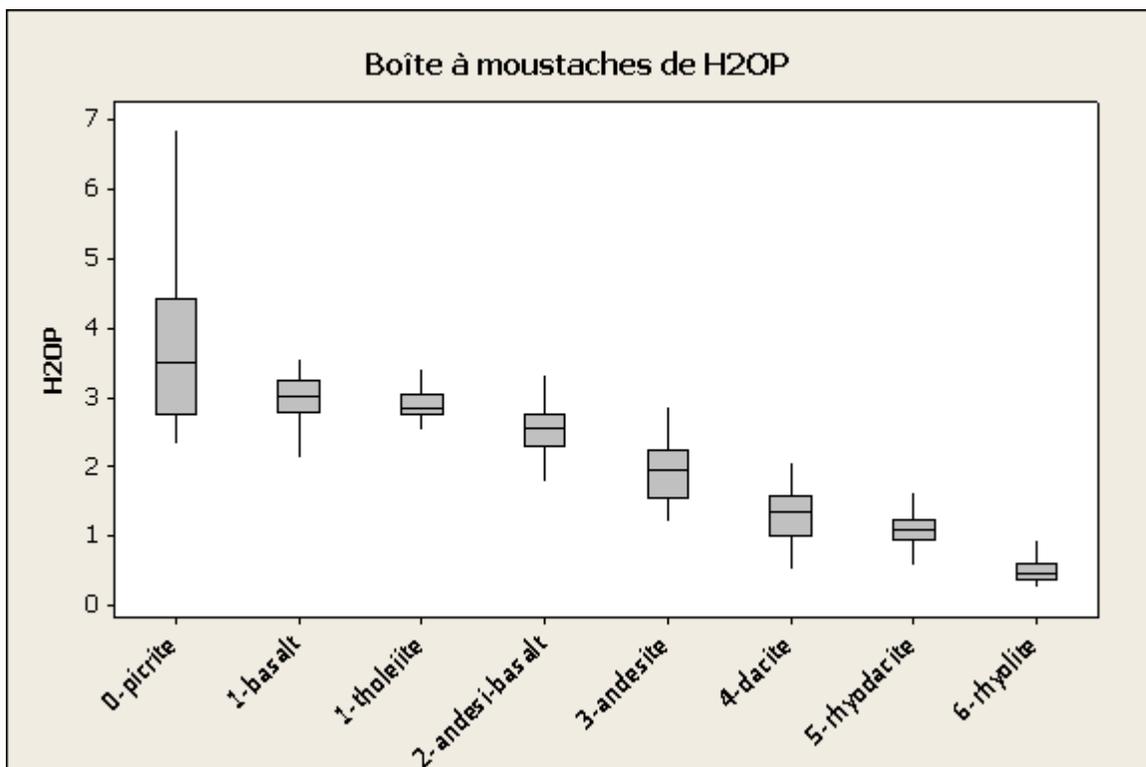
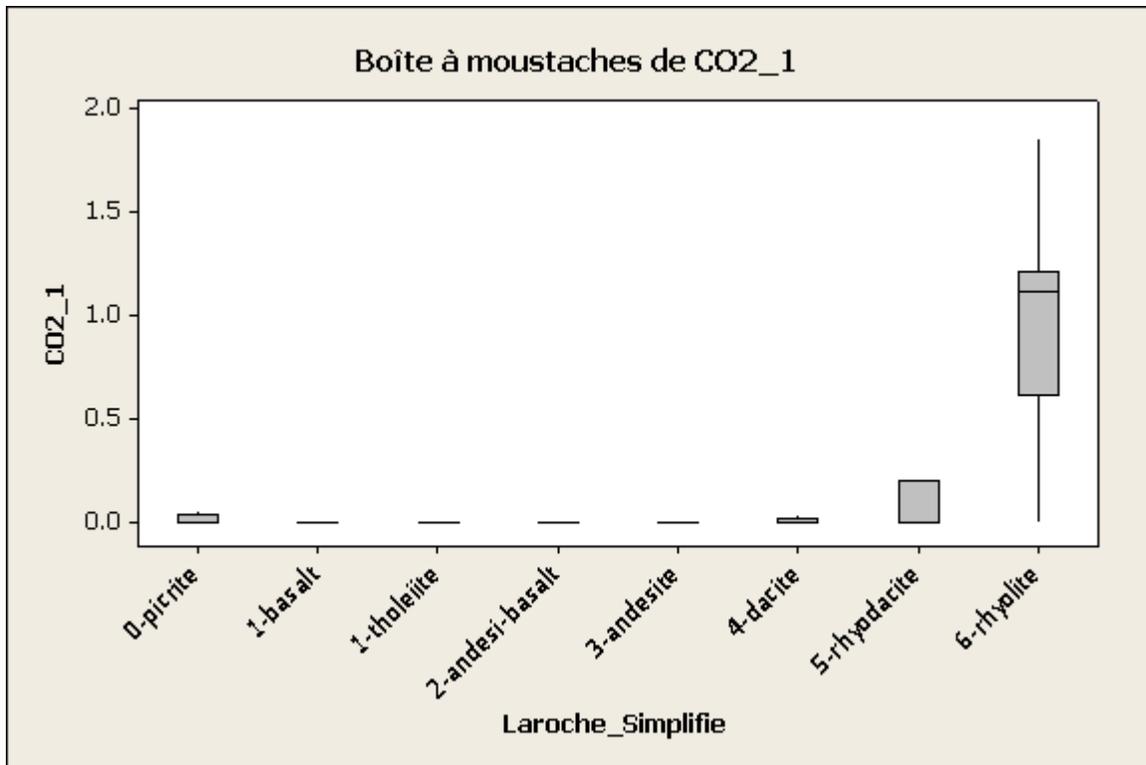


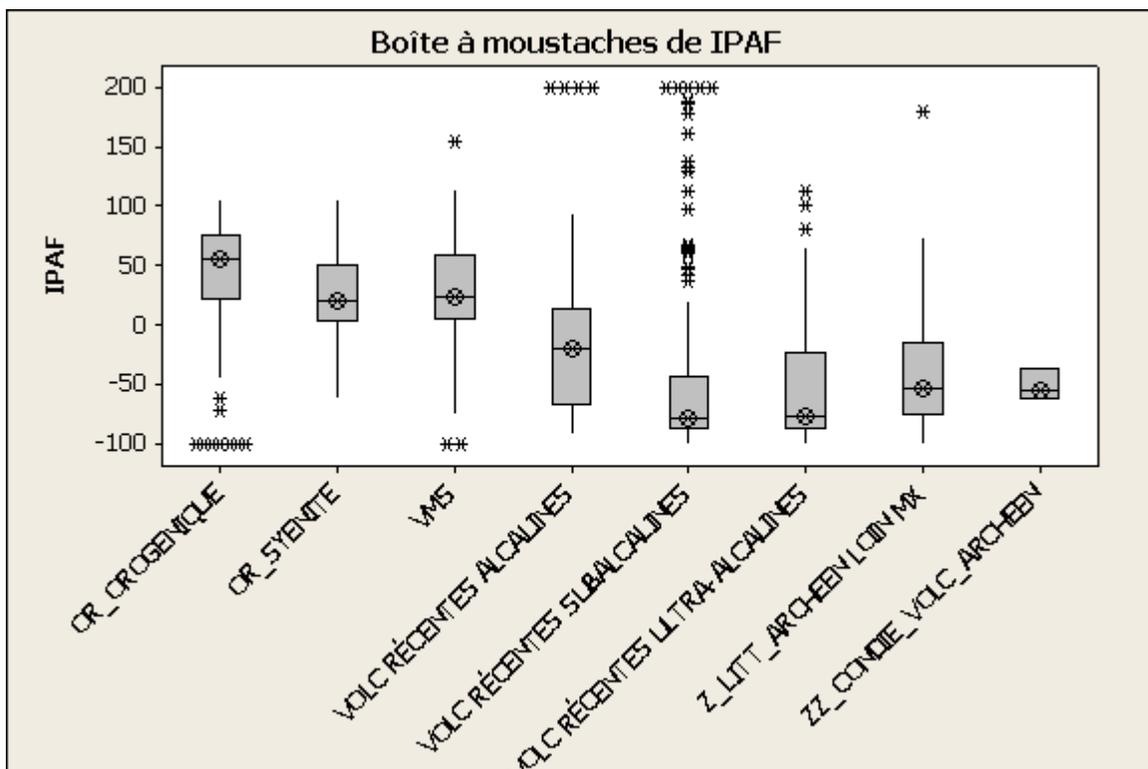
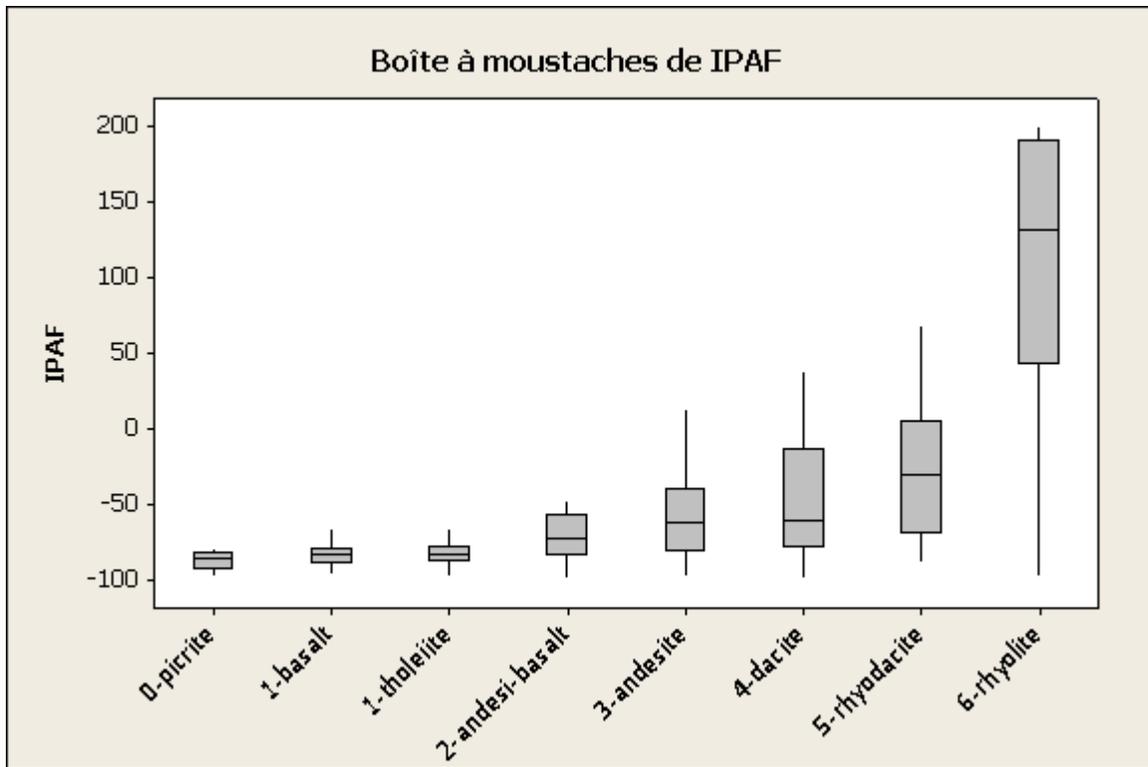


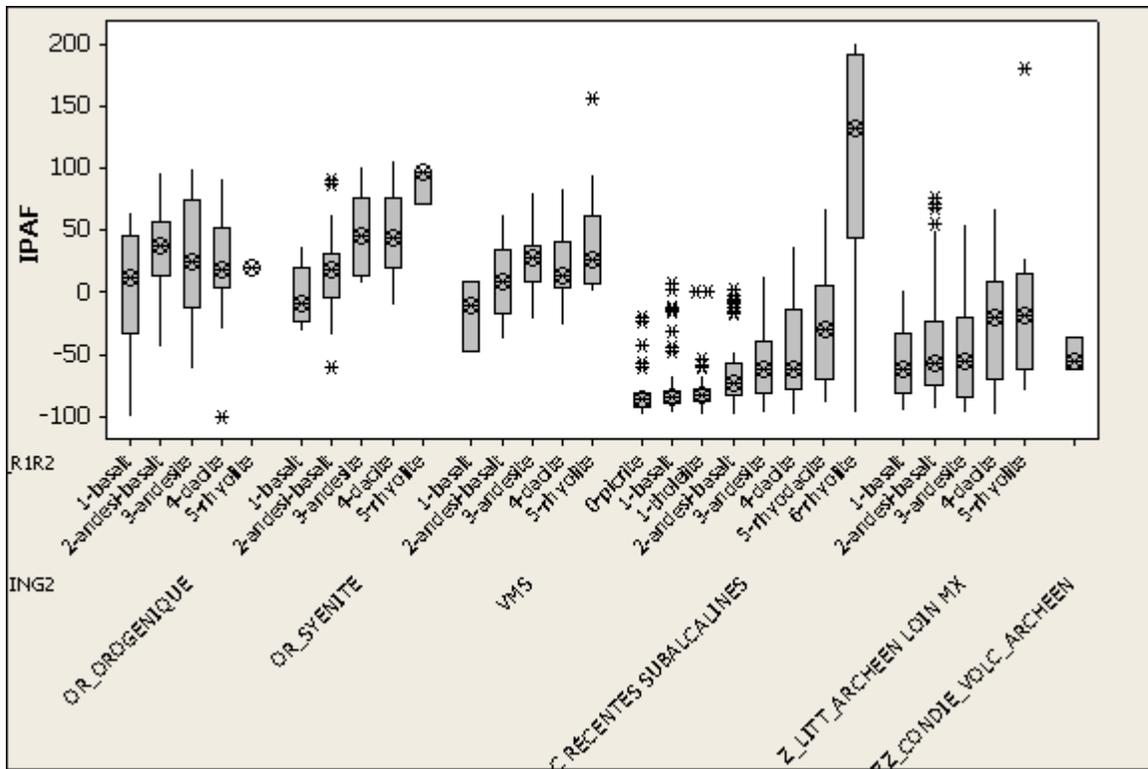
FICHE 4B – Normat Indice IPAF

Méthode	Normat Indice IPAF
Formule	$100 * (PAF - PAF_MIN) - (PAF_MAX - PAF_MIN)$ Note : L'article original utilise une nomenclature différente des variables en sortie données par le logiciel.
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il est absolument nécessaire d'avoir des données sur PAF, ou H ₂ O et CO ₂ , pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	Si le CO ₂ est analysé, la mesure de IPAF sera en principe correcte. Si le CO ₂ n'est analysé, la perte au feu doit être analysée. La perte au feu de l'échantillon doit alors être constituée uniquement de CO ₂ , H ₂ O+ et H ₂ O- pour que le calcul de l'indice IPAF, soit correct. Si d'autres volatiles (S, Cl, etc.) sont présents en grande quantité et qu'ils ne sont pas analysés, la valeur de PAF analysée sera anormalement haute et donnera un indice IPAF trop élevé.
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	NORMAT semble calculer des valeurs de CO ₂ normatives même dans le cas où la perte au feu n'est pas analysée. En effet, la plupart des analyses de roches volcaniques fraîches utilisées ici ont des valeurs de H ₂ O+ mais pas de LOI ni de CO ₂ , et des valeurs de CO ₂ normatives sont tout de même calculées pour ces échantillons. En l'absence de PAF, NORMAT semble calculer une somme des volatiles qui est transformée en PAF normative qui est redistribuée en H ₂ O+ normatif et CO ₂ normatif. Cette redistribution dépend des lithologies; les valeurs pour H ₂ OP montrent une image-miroir de celles du CO ₂ , étant plus élevées pour les roches plus mafiques et diminuent vers les roches plus felsiques. Donc, d'après ces tests, si le CO ₂ n'est pas analysé, la perte au feu doit l'être absolument pour avoir des résultats cohérents.
Conditions lithologiques selon la référence originale	La roche doit être au faciès schiste vert pour que l'indice IPAF donne les résultats corrects. De roches métamorphisées au faciès amphibolite ou à des faciès plus élevés, ainsi que les roches non-métamorphisées, donnent des valeurs de IPAF qui sont négatives. Ces valeurs négatives sont causées par des valeurs de perte au feu réelles qui sont plus faibles que la perte au feu minimale selon la minéralogie normative calculée (PAF_MIN). Les roches qui ont subi des altérations argileuses, avec des valeurs de H ₂ O- élevées, donneront également des valeurs anormalement pour l'indice IPAF, sans toutefois contenir de carbonates.

Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	Selon la référence originale, l'indice IPAF est indépendant des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	<p><i>Roches volcaniques récentes et fraîches</i></p> <p>Contrairement à ce qui est indiqué dans l'article original, les valeurs de l'indice IPAF semblent montrer une dépendance étroite aux lithologies, pour les roches volcaniques fraîches et récentes. Les valeurs de l'indice augmentent de façon graduelle des basaltes magnésiens vers les rhyolites. La plupart des valeurs de IPAF sont négatives, ce qui indique correctement que les roches ne sont pas du faciès schiste vert (ici ce sont des roches volcaniques non-métamorphisées).</p> <p>Lorsque l'on regarde les variations du CO₂ normatif selon les lithologies, on constate que les rhyodacites et les rhyolites ont du CO₂ normatif. Quoique le CO₂ réel ne soit pas disponible pour ces analyses, il est peu probable que ces roches volcaniques fraîches soient en réalité carbonatisées. Il faut noter que la perte au feu n'était pas analysée pour l'ensemble de ces analyses; il ne devrait pas apparaître de CO₂ normatif dans ces analyses.</p> <p>Il faut noter toutefois que l'utilisation de roches volcaniques fraîches et non-métamorphisées viole l'hypothèse de base de NORMAT selon laquelle les roches doivent être au faciès schiste vert.</p> <p>On peut noter la même tendance d'augmentation des valeurs de IPAF des basaltes vers les rhyolites pour les roches volcaniques provenant de contextes minéralisés.</p> <p>Les résultats de la banque de données de roches archéennes d'études pétrogénétiques éloignées des minéralisations montrent des valeurs de IPAF qui sont négatives. En principe, cela signifie que ces roches ne sont pas au faciès des schistes verts.</p> <p><i>Dépendance de IPAF aux lithologies</i></p> <p>L'évaluation du CO₂ normatif et de H₂O normatif de Normat est donc dépendante des lithologies.</p>
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Le seuil d'anomalie n'est pas mentionné dans la référence originale.
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	La présence de fausses anomalies en IPAF (CO ₂ normatif produit) pour les roches n'ayant pas d'analyse de perte au feu rend impossible la détermination des seuils d'anomalies à partir de la banque de données de roches fraîches choisies.

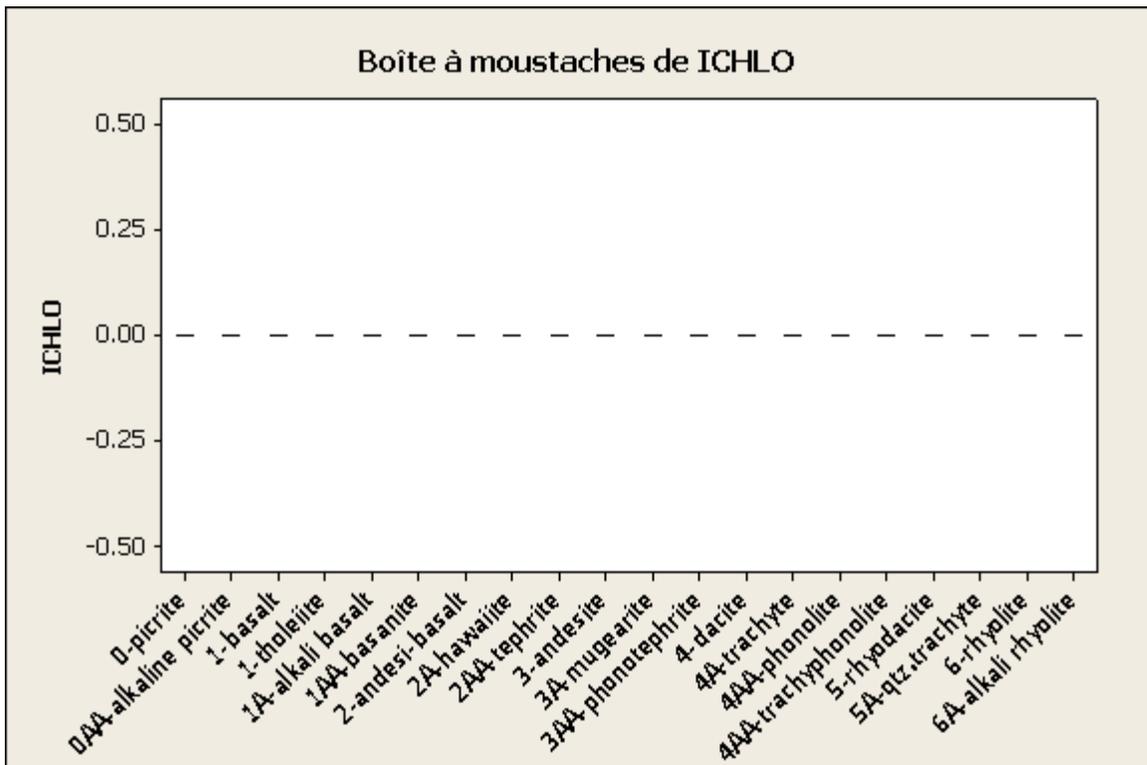
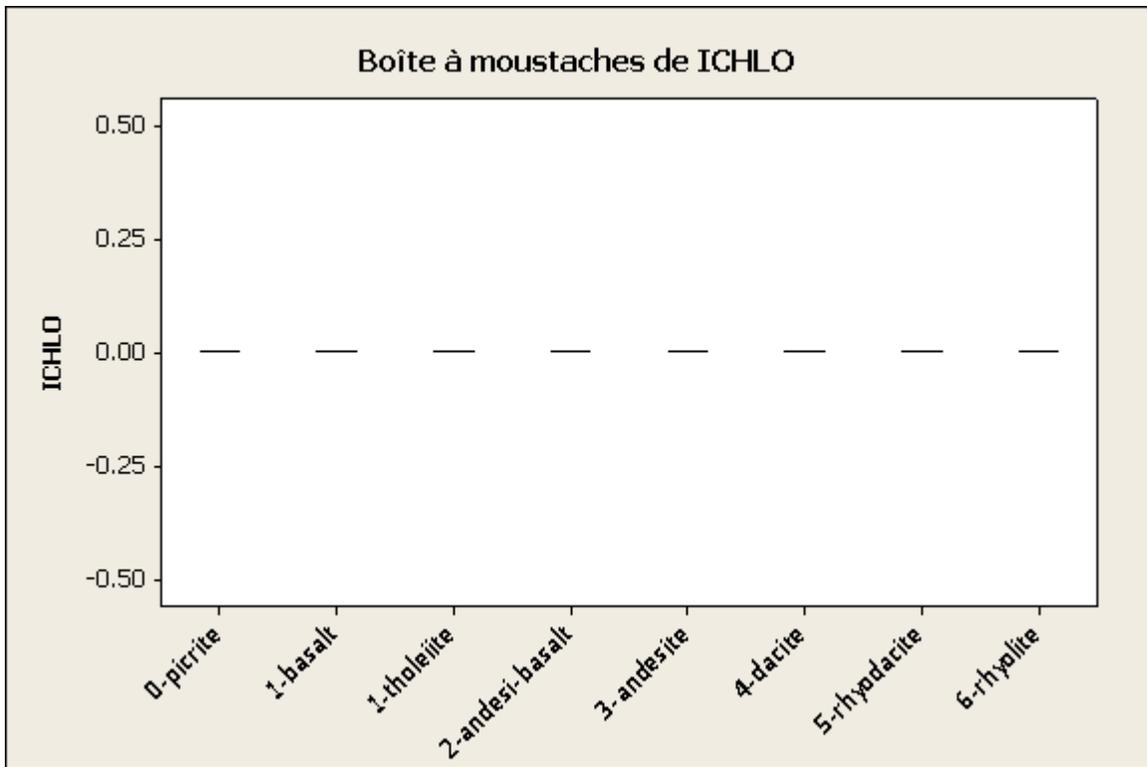


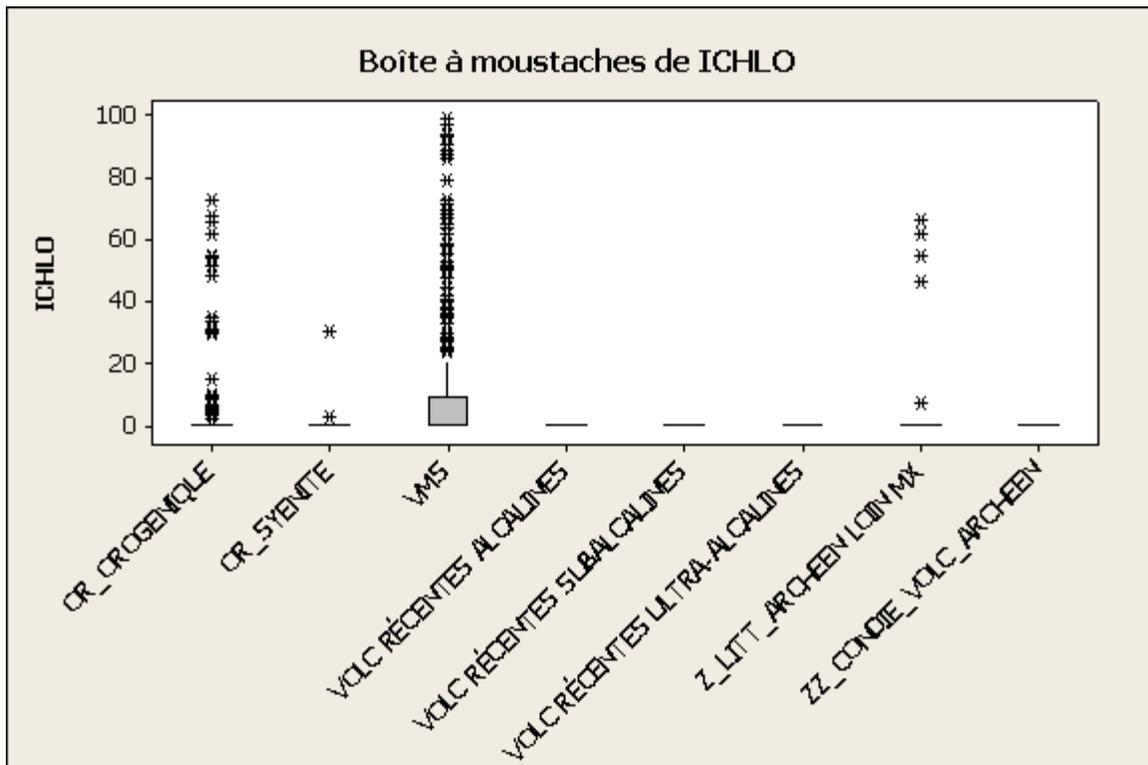
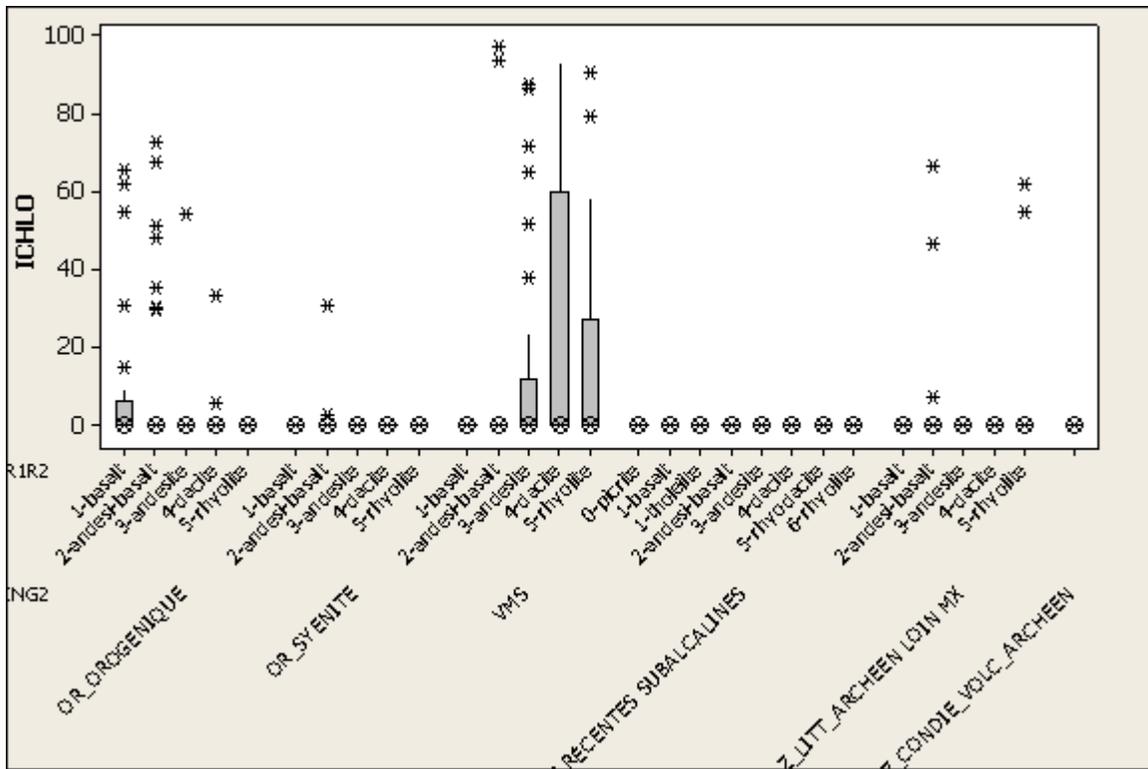




FICHE 4C – Normat Indice ICHLO

Méthode	Normat Indice ICHLO
Formule	$HChl / (HChl + HPara + HPyro + HSer + An + Cpx + Ab + Or)$ Cette formule utilise des minéraux normatifs (H signifie hydrothermal) qui ne sont pas fournis dans le résultat final de Normat. Le chlorite fourni dans le résultat final n'est PAS celle qui est utilisée pour ce calcul.
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Pour que les valeurs de l'indice ICHLO indique correctement la présence de chlorite hydrothermale, le protolithe non-altéré ne doit pas contenir de minéraux peralumineux (ex : corindon, minéraux du groupe des spinels contenant de l'aluminium). Il faut donc exclure les lithologies comme les shales pélitiques ou les roches volcaniques extrêmement peralumineuses. De même, certaines roches ultramafiques primitives contenant du spinel doivent être exclues.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice ICHLO est en principe <i>dépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de l'indice ICHLO sont de 0 pour toutes les roches volcaniques récentes et fraîches. Seuls les échantillons provenant de contextes VMS montrent des valeurs supérieures à zéro pour ICHLO. Même à l'intérieur des échantillons altérés pour les VMS, le nombre d'échantillons altérés empêche de vérifier la dépendance avec les lithologies.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Tous les échantillons de volcanites fraîches ont des valeurs de ICHLO de 0. Toute valeur supérieure à 0 est donc une anomalie.





FICHE 4D – Normat Indice IPARA

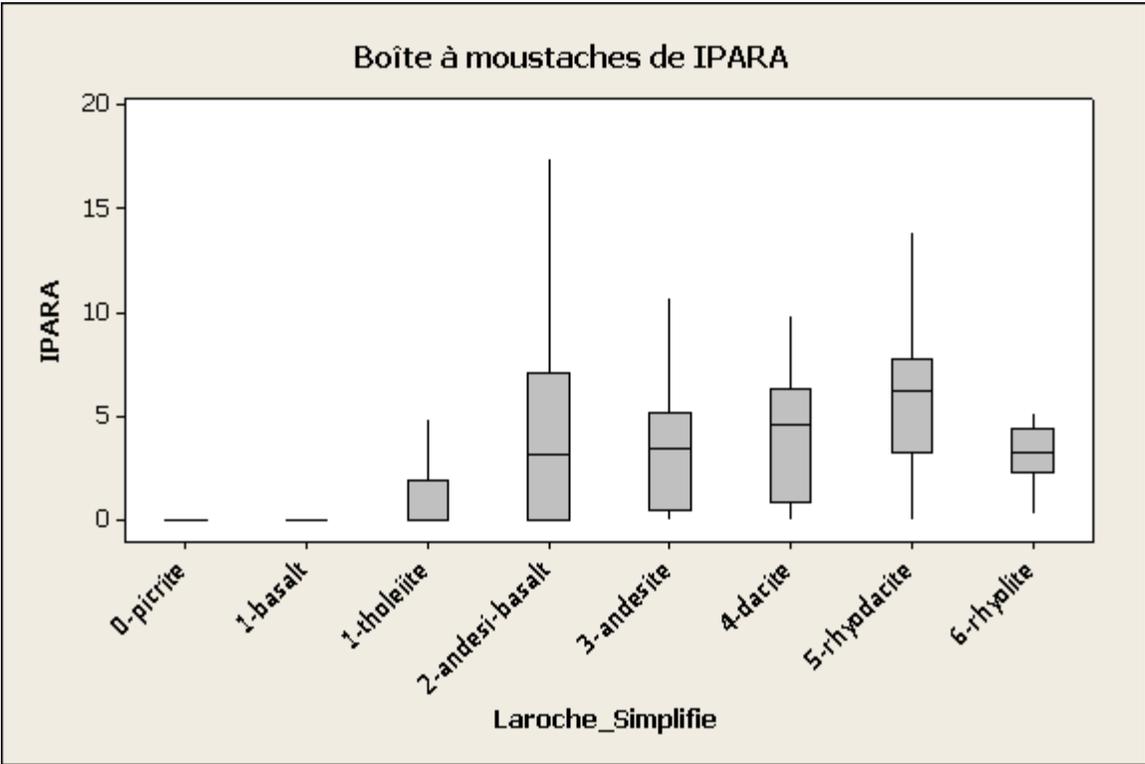
Méthode	Normat Indice IPARA
Formule	$\text{HPara} / (\text{HChl} + \text{HPara} + \text{HPyro} + \text{HSer} + \text{An} + \text{Cpx} + \text{Ab} + \text{Or})$ <p>Cette formule utilise des minéraux normatifs (H signifie hydrothermal) qui ne sont pas fournis dans le résultat final de Normat. La paragonite fournie dans le résultat final n'est PAS celle qui est utilisée pour ce calcul.</p>
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	
Transformation 100 %?	
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Pour que les valeurs de l'indice IPARA indique correctement la présence de paragonite hydrothermale, le protolithe non-altéré ne doit pas contenir de minéraux peralumineux (ex : corindon, minéraux du groupe des spinels contenant de l'aluminium). Il faut donc exclure les lithologies comme les shales pélitiques ou les roches volcaniques franchement peralumineuses. De même, certaines roches ultramafiques primitives contenant du spinel doivent être exclues.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice IPARA est en principe <i>dépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de IPARA pour les roches volcaniques récentes fraîches semblent dépendantes des lithologies. Les volcanites mafiques ont des valeurs faibles; les volcanites intermédiaires (andési-basalte à rhyodacite) ont les valeurs les plus élevées. Les variations dues à l'alcalinité des roches ne sont pas systématiques.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	La plupart des roches volcaniques fraîches intermédiaires à felsiques métalumineuses (ration A/CNK < 1) montrent des valeurs non-nulles de IPARA. En principe, IPARA représente la présence de paragonite hydrothermale. Or, ces roches fraîches métalumineuses ne devraient pas en contenir. La paragonite hydrothermale est, dans la séquence de calcul de Normat, le premier minéral formé par la présence d'un excès d'aluminium dans la roche après la formation des feldspaths normatifs et du clinopyroxène. Le fait d'obtenir des valeurs non-nulles en paragonite pour des roches non-

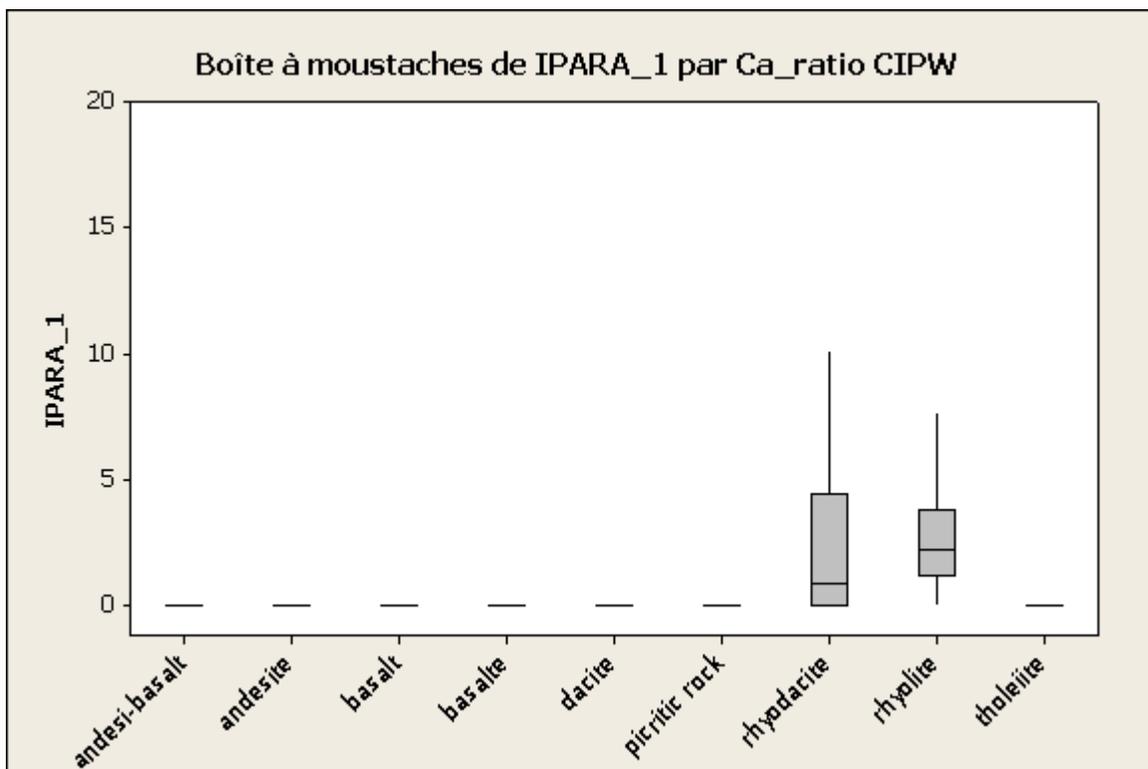
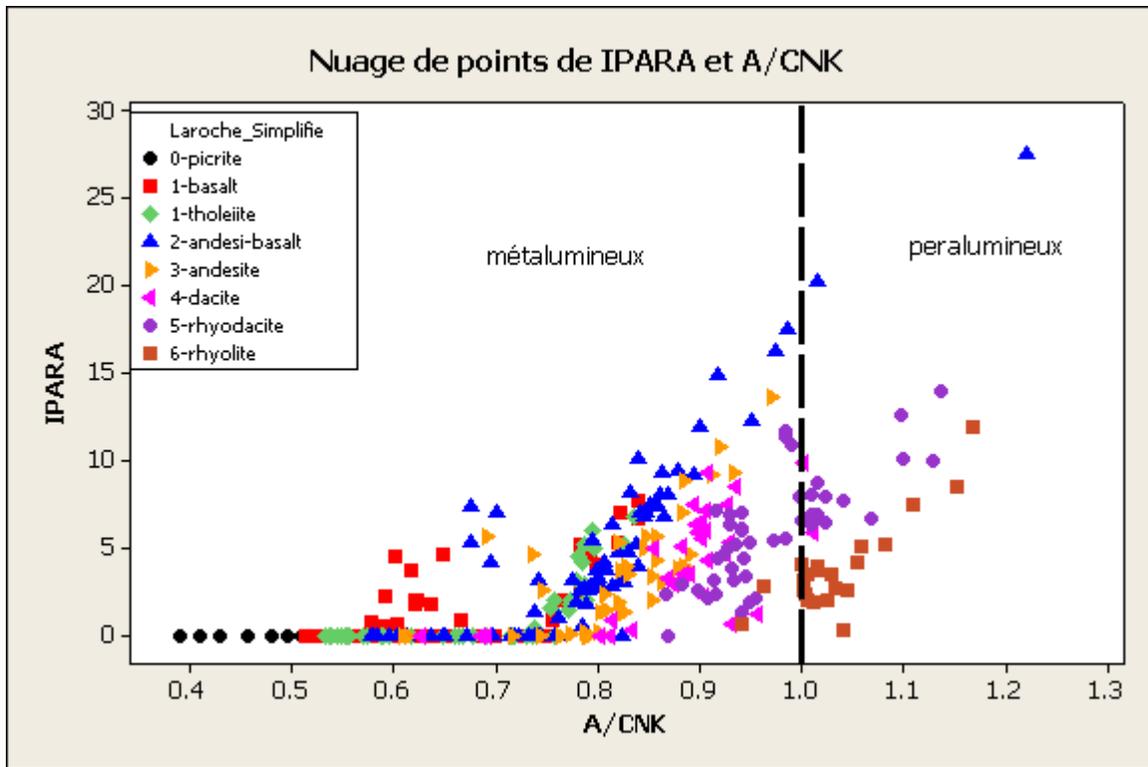
altérées métallumineuses indique que l'excès d'aluminium est surévalué.

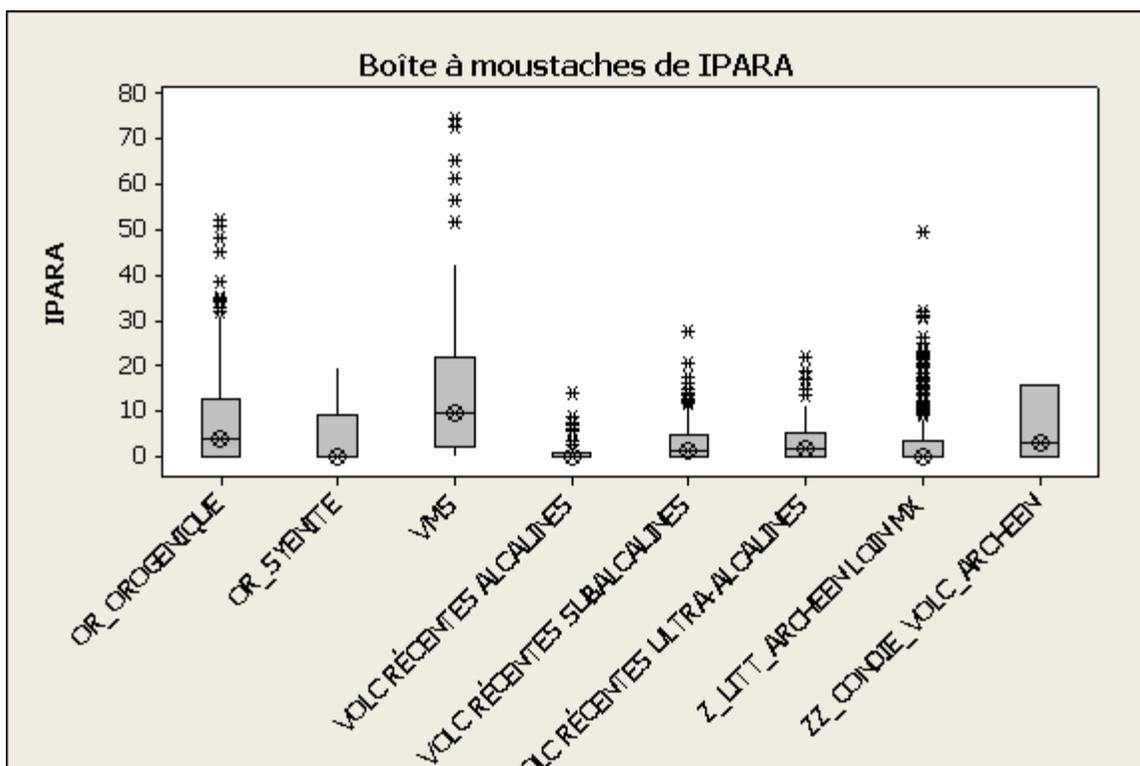
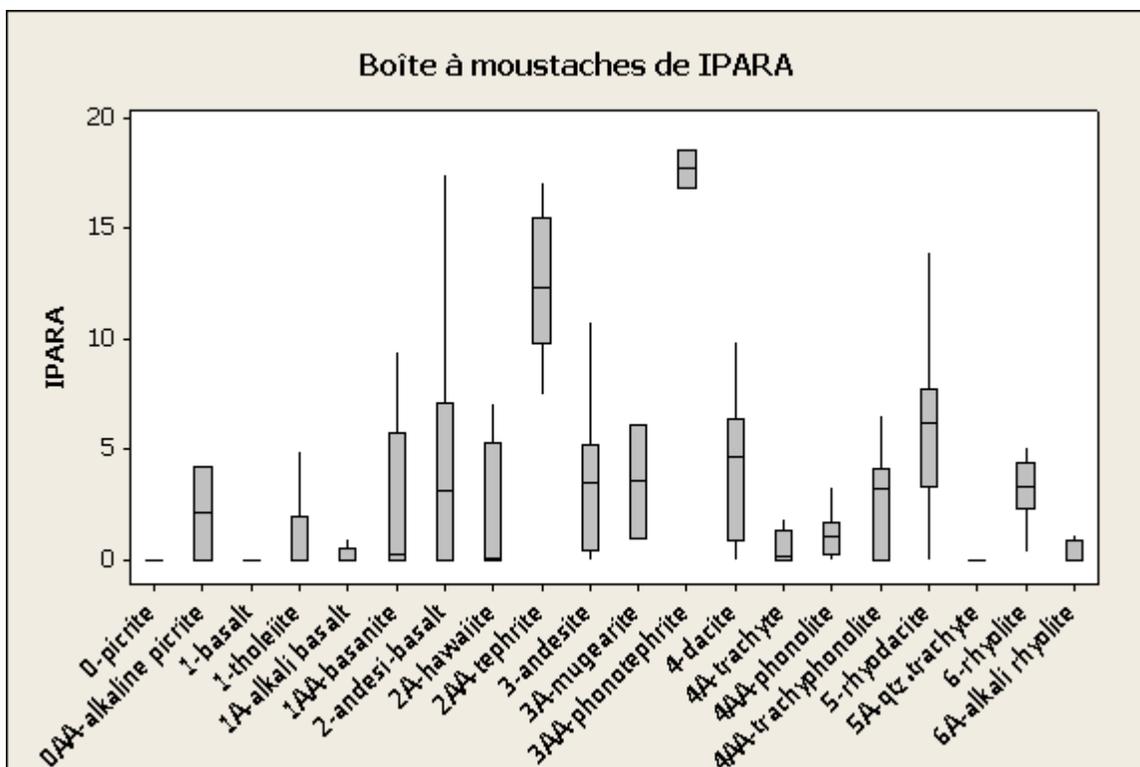
Il est probable que cette surévaluation se produit par la règle de subdivision simultanée de l'aluminium entre le clinopyroxène et l'anorthite. Cette règle de division existe pour détecter des altérations faibles. Le ratio de division du calcium entre l'anorthite et le clinopyroxène envoie probablement trop de calcium vers le clinopyroxène, ce qui ne crée pas assez d'anorthite et provoque un excès d'aluminium artificiel. Dans les roches volcaniques mafiques, les valeurs de calcium sont probablement suffisamment élevées pour que tout l'aluminium soit épuisé par la formation de l'anorthite.

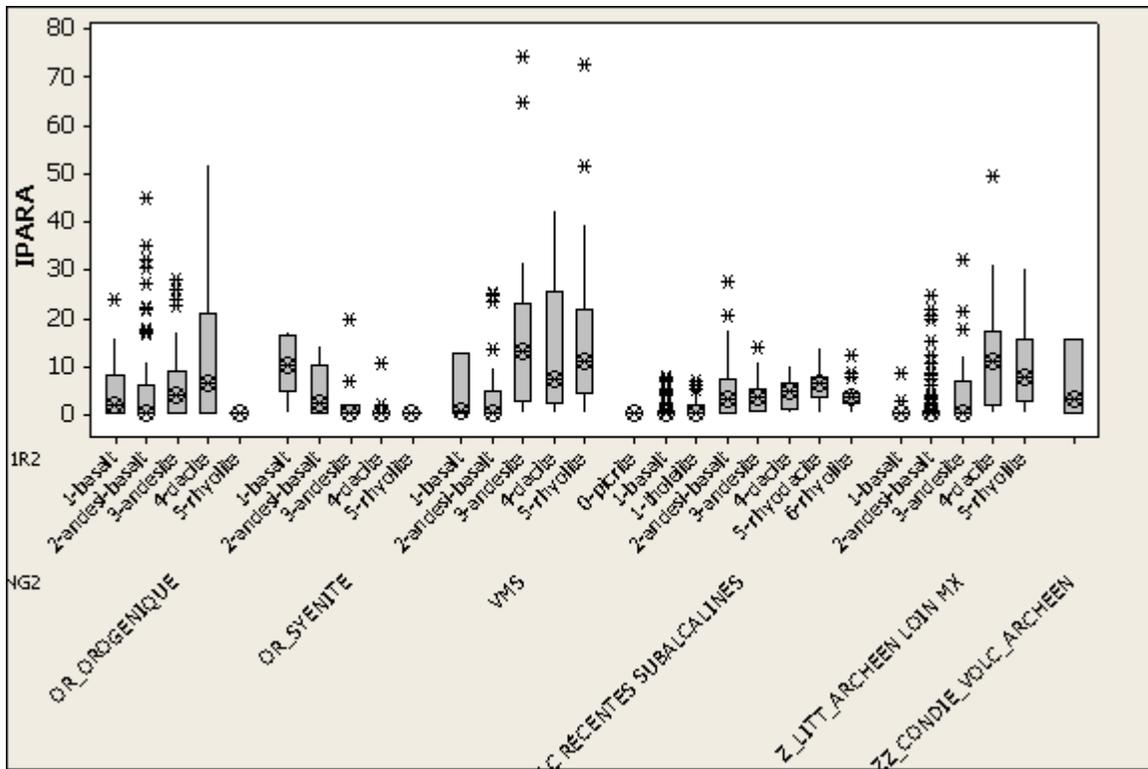
L'utilisation de la séparation du calcium entre l'anorthite et le clinopyroxène par la méthode CIPW permet d'obtenir des valeurs plus proches de 0 pour les roches volcaniques récentes.

Les seuils d'anomalies devront donc être dépendants des lithologies. Si on utilise la moyenne + 2 écart-types pour l'anomalie, on obtient, pour les volcanites mafiques, un seuil de 4 permet de séparer les lithologies fraîches de l'altération. Pour les volcaniques intermédiaires à felsiques, une valeur de 13 permet de séparer les roches fraîches des roches altérées.









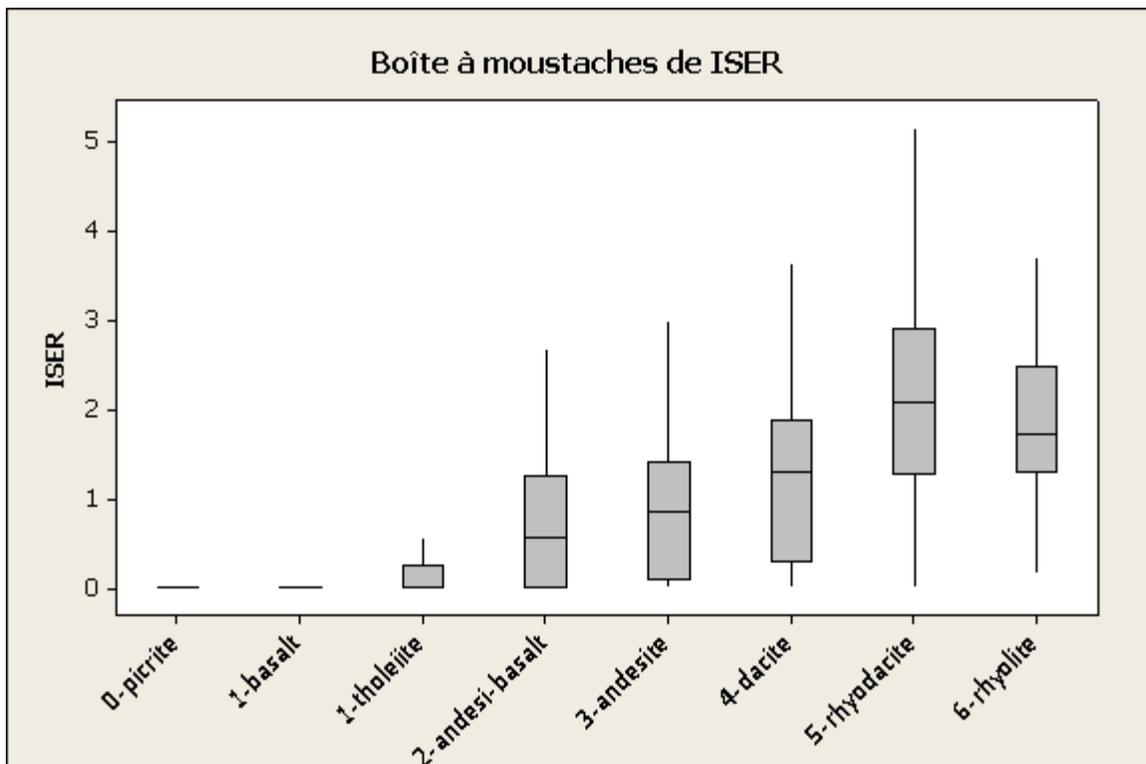
FICHE 4E – Normat Indice ISER

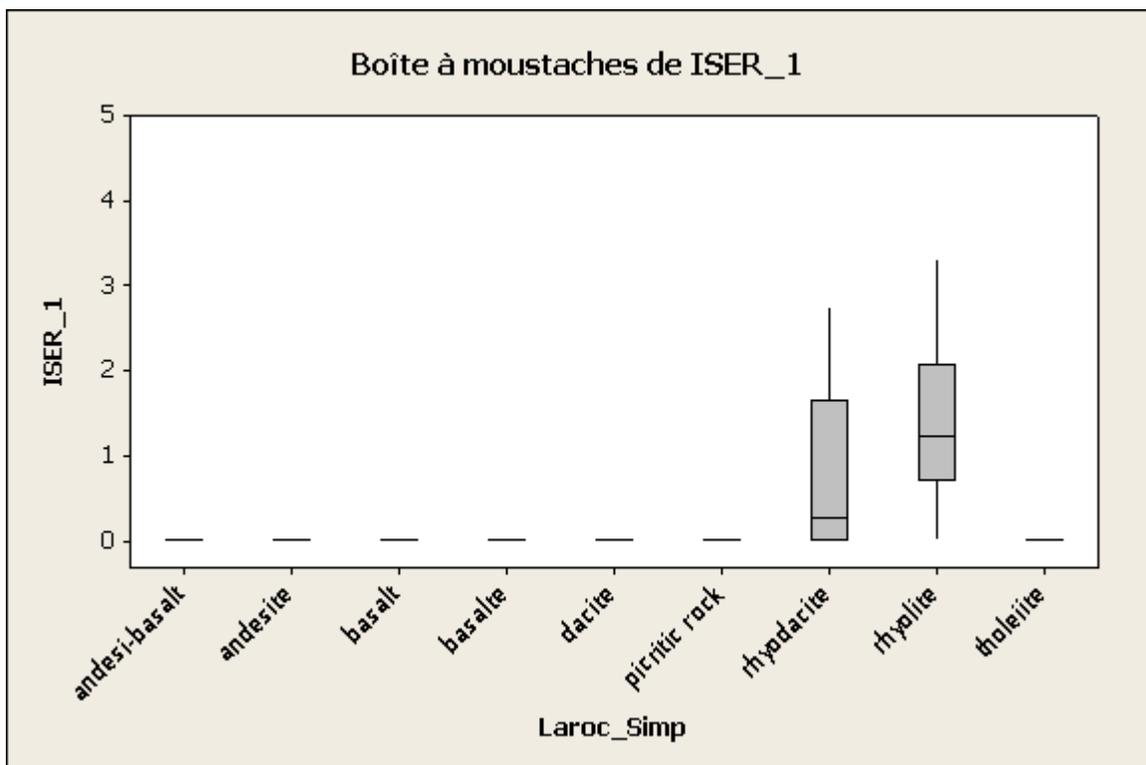
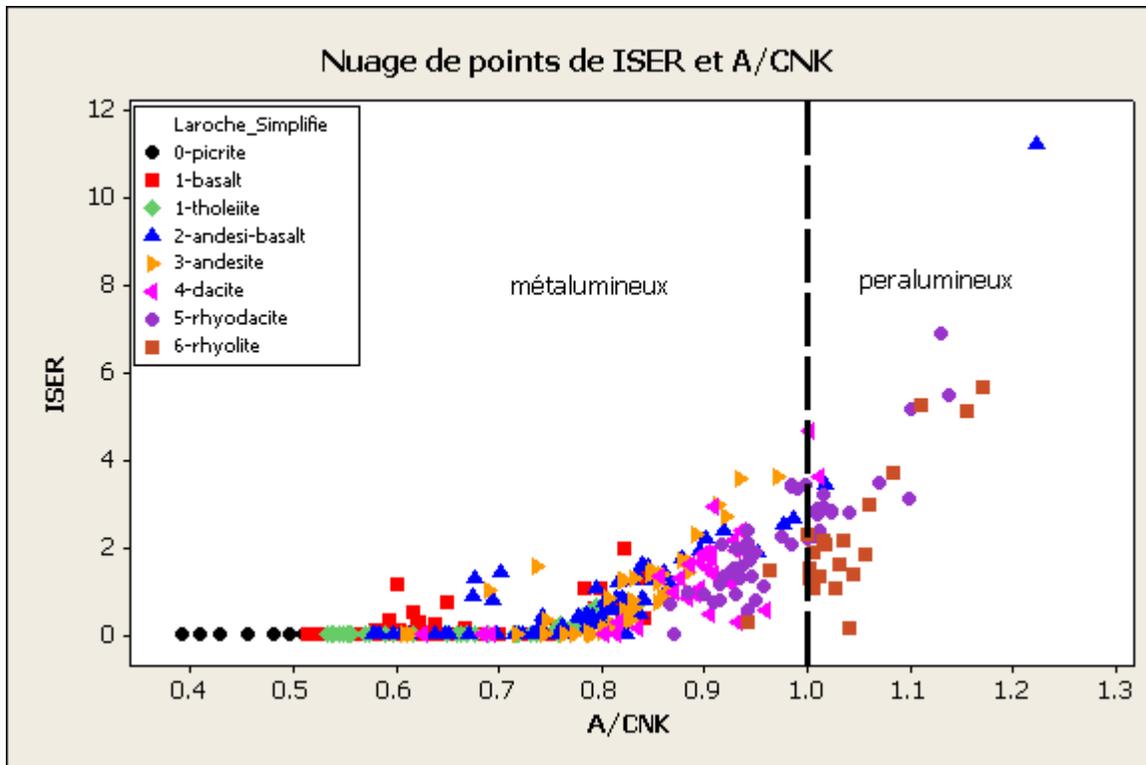
Méthode	Normat Indice ISER
Formule	$\text{HSer} / (\text{HChl} + \text{HPara} + \text{HPyro} + \text{HSer} + \text{An} + \text{Cpx} + \text{Ab} + \text{Or})$ <p>Cette formule utilise des minéraux normatifs (H signifie hydrothermal) qui ne sont pas fournis dans le résultat final de Normat. La séricite fournie dans le résultat final n'est PAS celle qui est utilisée pour ce calcul.</p>
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	Pour que les valeurs de l'indice ISER indique correctement la présence de paragonite hydrothermale, le protolithe non-altéré ne doit pas contenir de minéraux peralumineux (ex : corindon, minéraux du groupe des spinels contenant de l'aluminium). Il faut donc exclure les lithologies comme les shales pélitiques ou les roches volcaniques extrêmement peralumineuses. De même, certaines roches ultramafiques primitives contenant du spinel doivent être exclues.
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice ISER est en principe <i>dépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de ISER pour les roches volcaniques récentes fraîches semblent dépendantes des lithologies. Les volcanites mafiques ont des valeurs faibles, et les valeurs augmentent graduellement vers les lithologies felsiques.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	<p>La plupart des roches volcaniques fraîches intermédiaires à felsiques et métalumineuses (ratio A/CNK < 1) montrent des valeurs non-nulles de ISER. En principe, ISER représente la présence de séricite hydrothermale. Or, tout comme pour l'indice IPARA, ces roches fraîches ne devraient pas en contenir. Ceci laisse présager un problème dans la séquence de calcul de Normat.</p> <p>La séricite hydrothermale est, dans la séquence de calcul de Normat, le second minéral formé par la présence d'un excès d'aluminium dans la roche après la formation des feldspaths normatifs et du clinopyroxène. Le fait d'obtenir des valeurs</p>

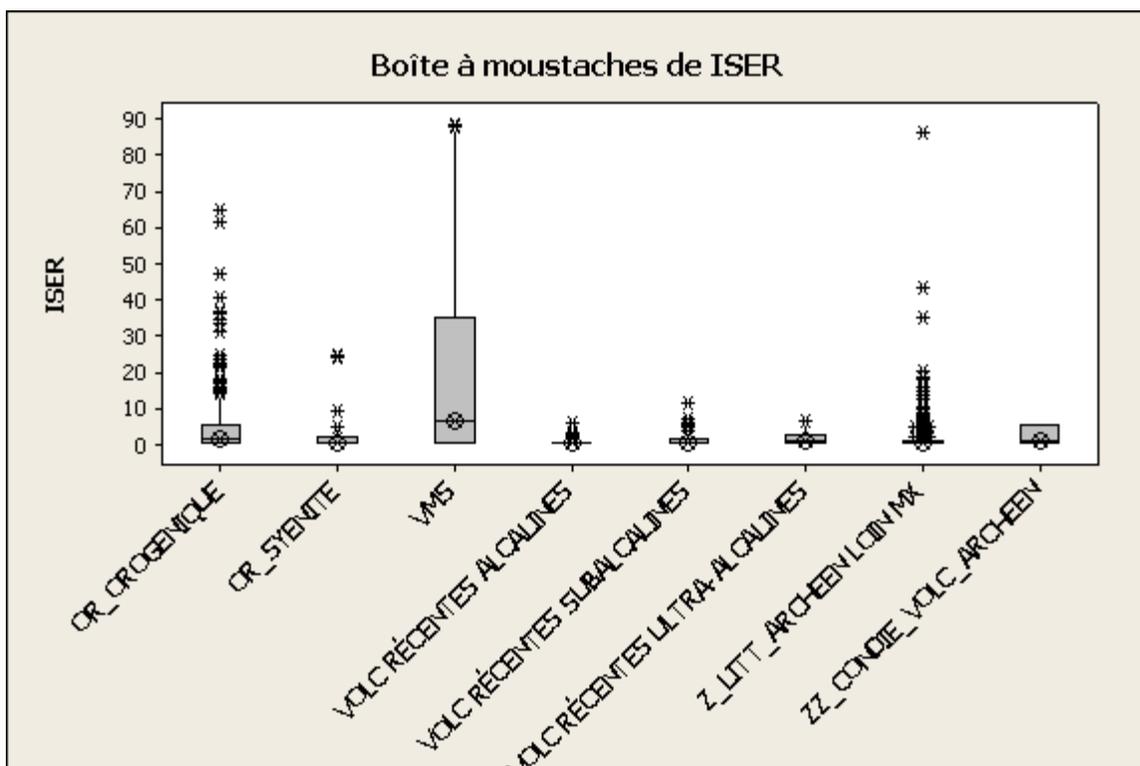
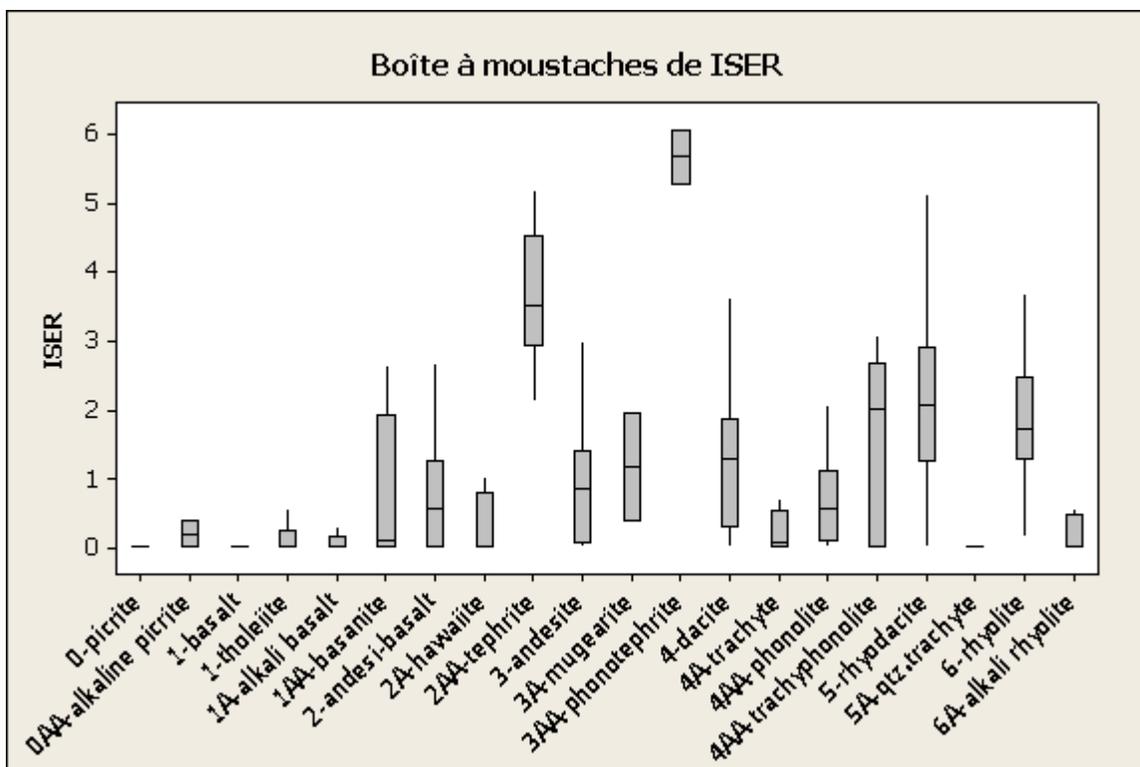
non-nulles en sérécité pour des roches non-altérées et qui sont métalumineuses indique que, tout comme IPARA, que l'excès d'aluminium est surévalué. Il est probable que cette surévaluation se produit par la règle de subdivision simultanée de l'aluminium entre le clinopyroxène et l'anorthite. Le ratio de division du calcium entre l'anorthite et le clinopyroxène envoie probablement trop de calcium vers le clinopyroxène, ce qui ne crée pas assez d'anorthite et provoque un excès d'aluminium artificiel. Dans les roches volcaniques mafiques, les valeurs de calcium sont probablement suffisamment élevées pour que tout l'aluminium soit épuisé par la formation de l'anorthite.

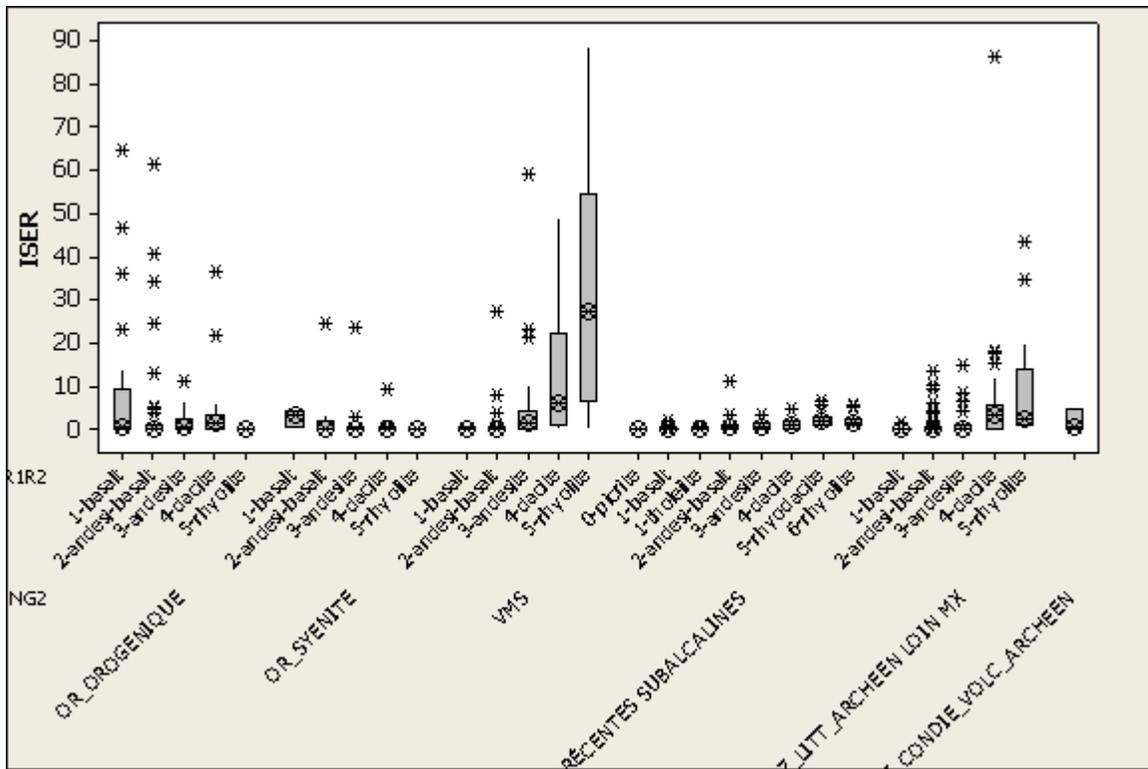
L'utilisation de l'option « CIPW » pour la séparation du calcium entre le clinopyroxène et l'anorthite permet d'obtenir des valeurs de ISER près de 0 pour les roches volcaniques fraîches.

Les seuils d'anomalies devront donc être dépendants des lithologies. Si on utilise la moyenne + 2 écart-types pour l'anomalie, on obtient, pour les volcanites mafiques, un seuil de 0,5 permet de séparer les lithologies fraîches de l'altération. Pour les volcaniques intermédiaires (andési-basalte, andésite, dacite), une valeur de 3 permet de séparer les roches fraîches des roches altérées. Pour les volcanites felsiques, on peut utiliser une valeur de 5 comme seuil. On peut constater que ces seuils sont nettement plus bas que l'ensemble des altérations pour les VMS.



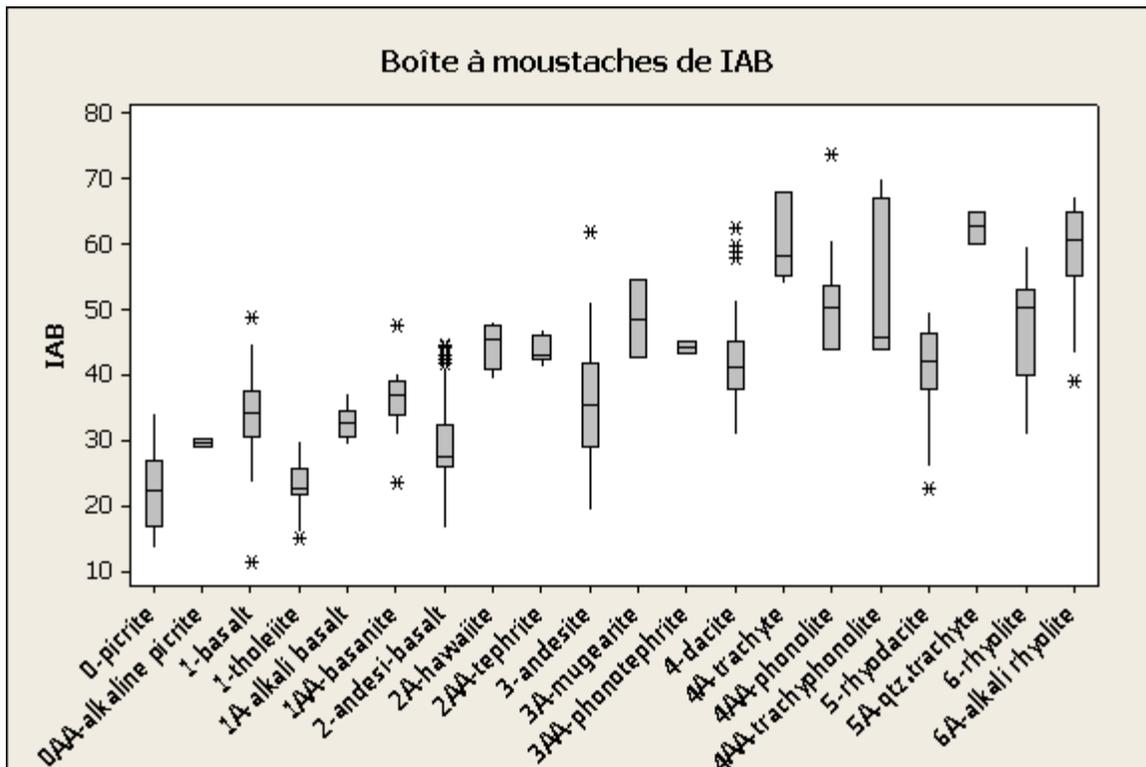
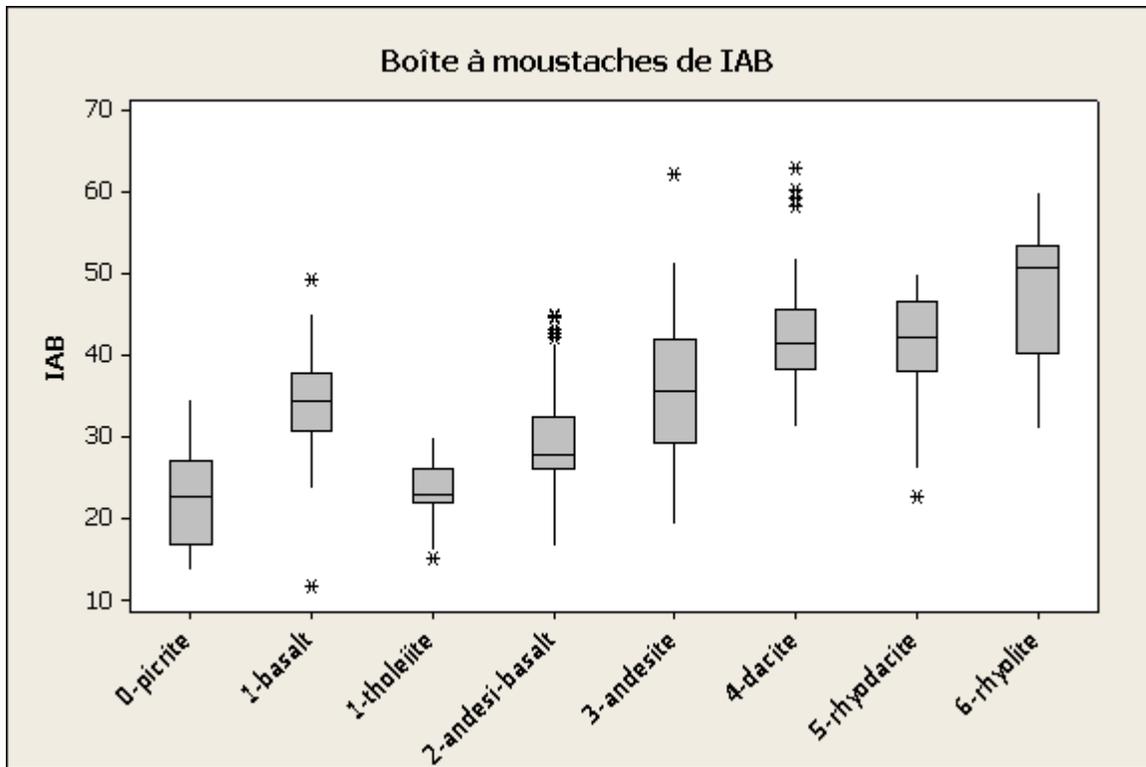


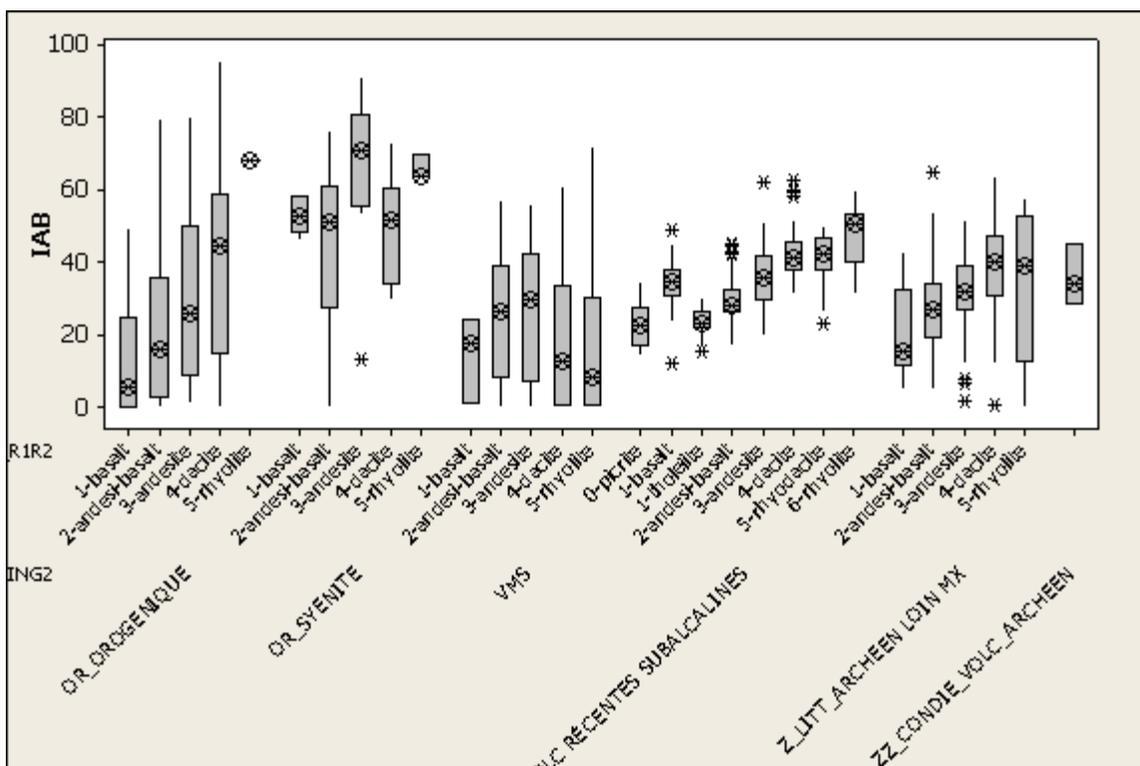
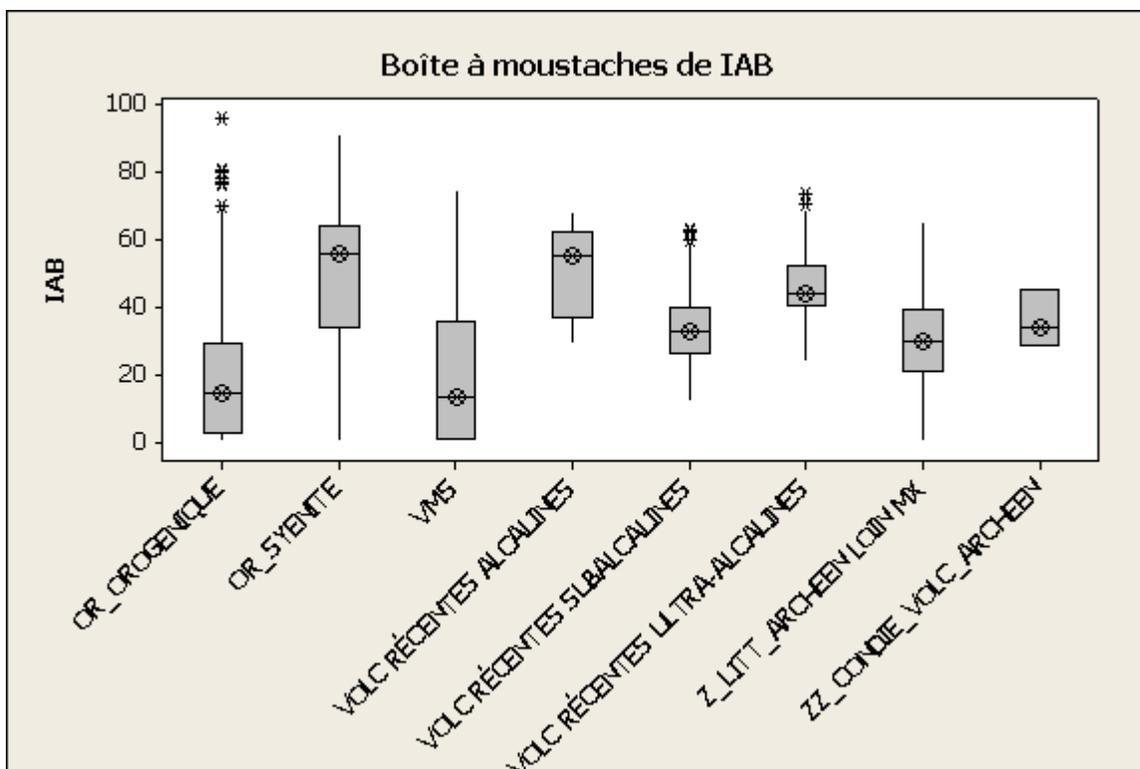


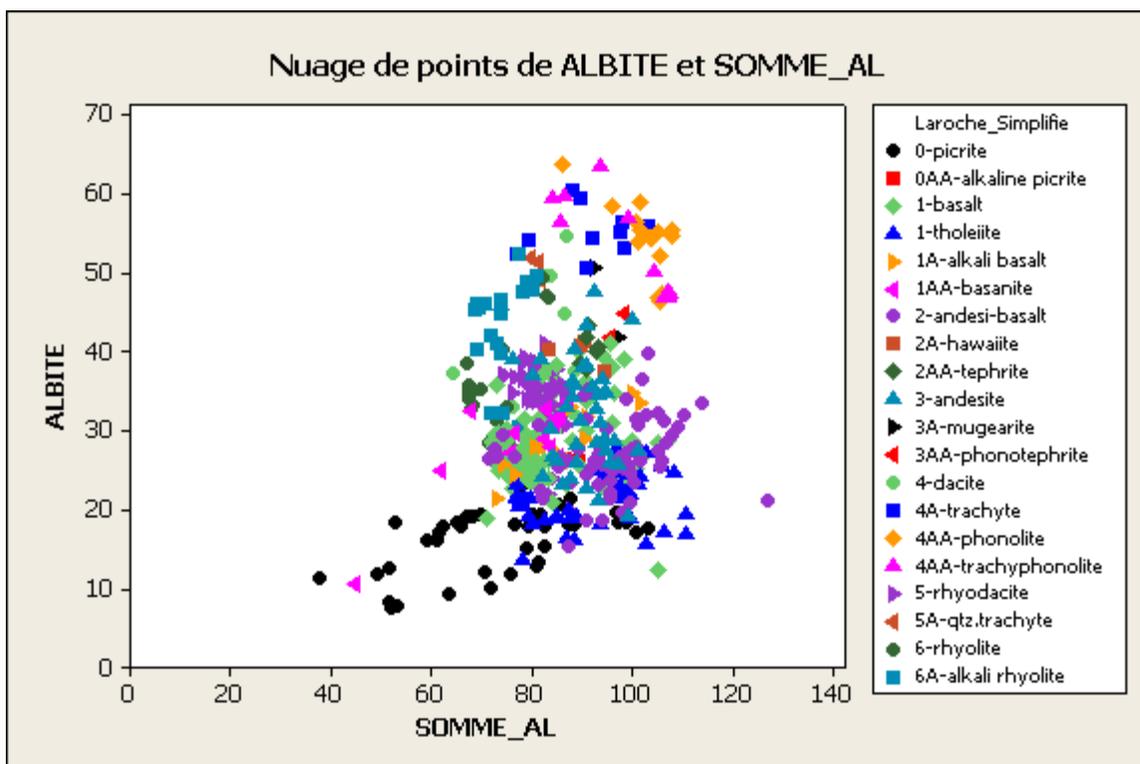
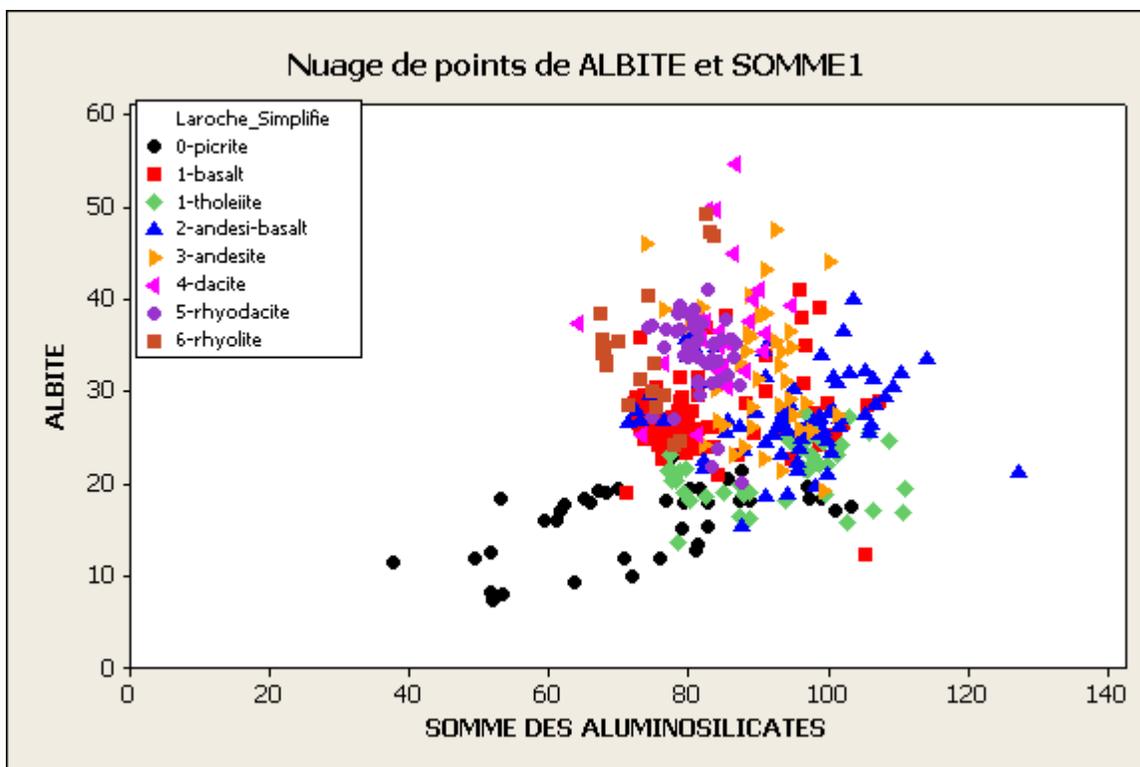


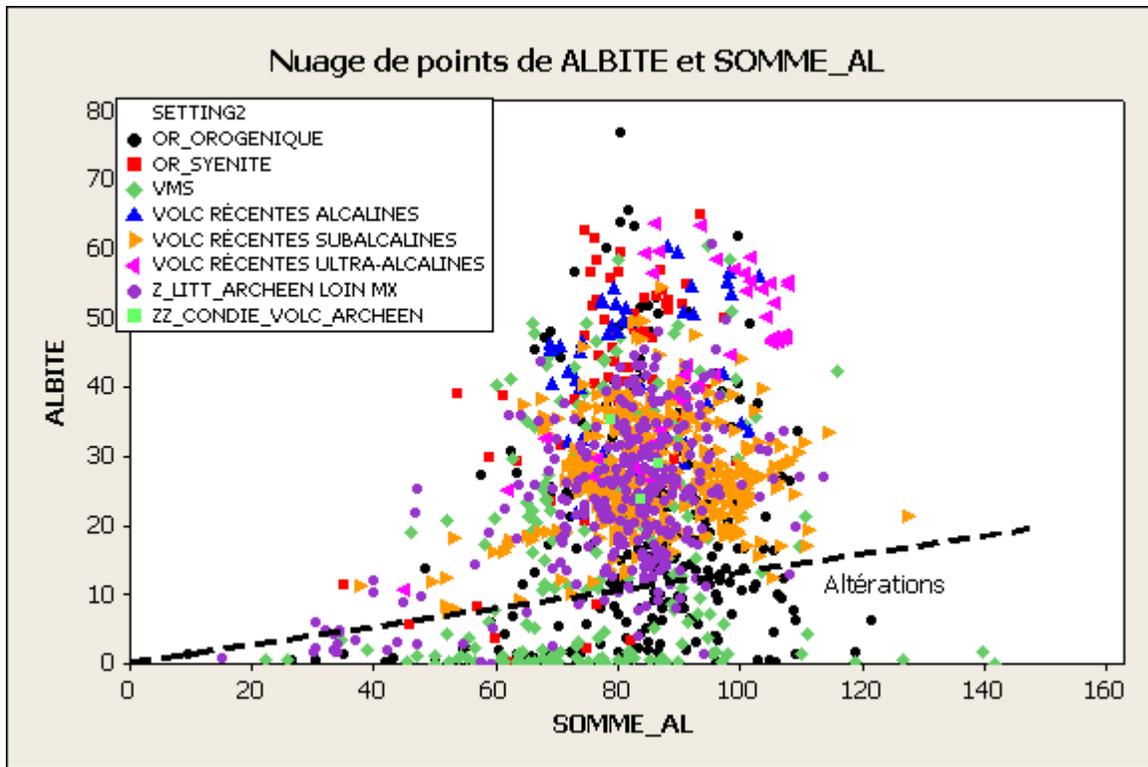
FICHE 4F – Normat Indice IAB

Méthode	Normat Indice IAB
Formule	$100 * \text{contenu d'aluminium de l'albite (=1)} / \text{contenu d'aluminium total de la roche}$ Les minéraux impliqués dans la somme de des aluminosilicates ne sont pas connus. Toutefois, cette somme peut être déduite par les résultats des calculs normatifs; elle est égale à $100 * \text{contenu d'aluminium de l'albite (1)} / \text{IAB}$.
Référence originale	Piché, M. 2006. Lithogéochimie d'exploration - de l'analyse chimique au faciès d'altération. Notes de cours. Québec Exploration 2006. 87p
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice IAB est en principe <i>dépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de IAB pour les roches volcaniques récentes fraîches semblent dépendantes des lithologies. Les volcanites mafiques ont des valeurs faibles, et les valeurs augmentent graduellement vers les lithologies felsiques. Les équivalents alcalins des lithologies subalcalines ont des valeurs de l'indice de 15 à 25 plus élevées.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	On peut constater que des valeurs de IAB inférieures à 12 ne se retrouvent que dans les VMS et dans l'or orogénique. Des valeurs inférieures à 12 indiquent probablement un lessivage du sodium accompagnant ces altérations. Il est difficile de fixer un seuil absolu pour les valeurs supérieures, puisque les roches alcalines et ultra-alcalines fraîches se superposent aux altérations.



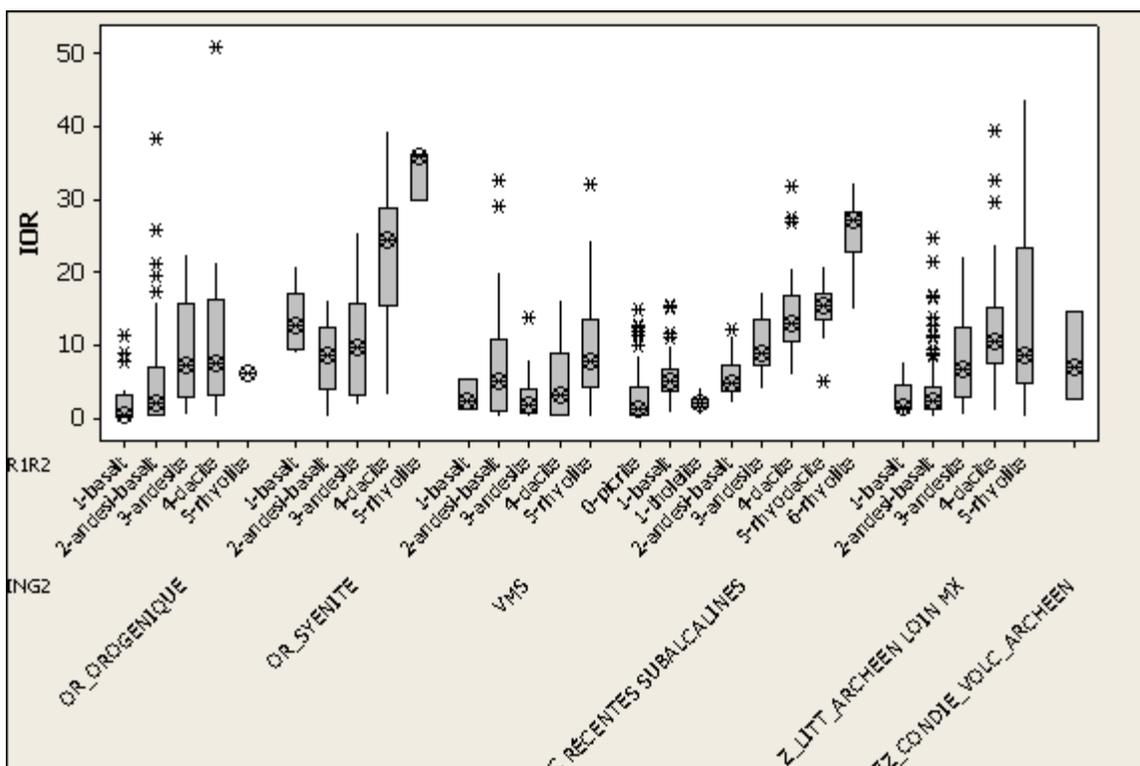
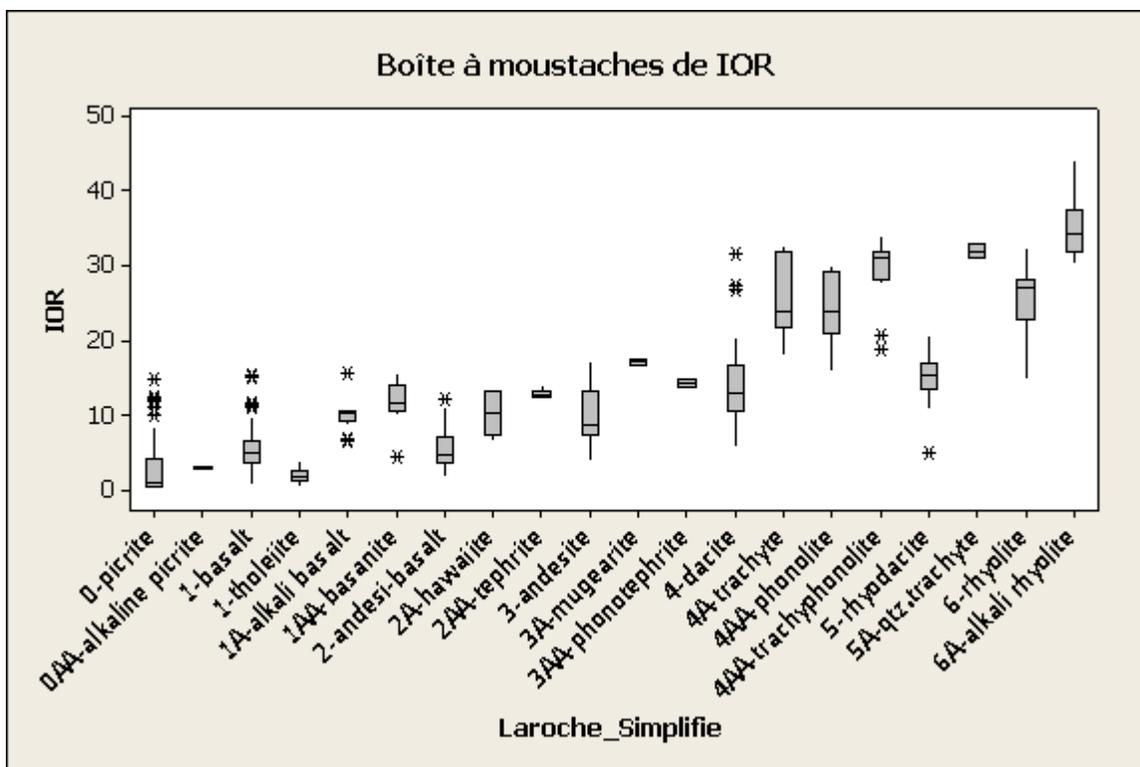


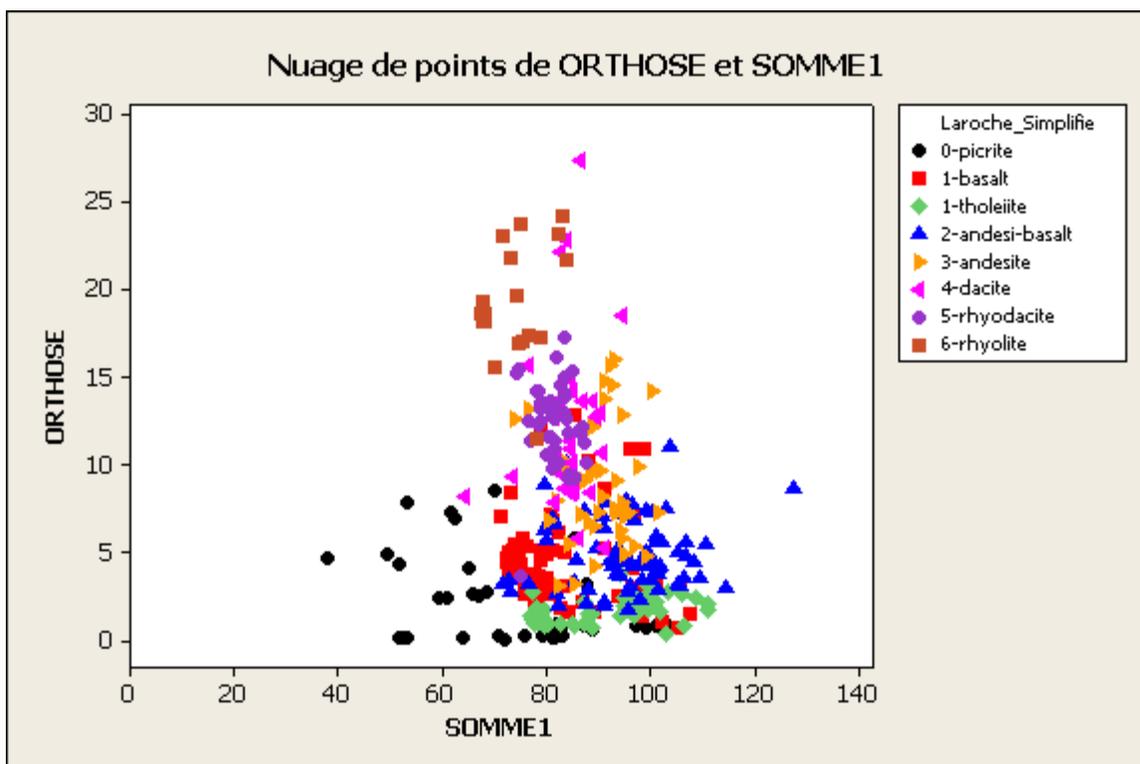
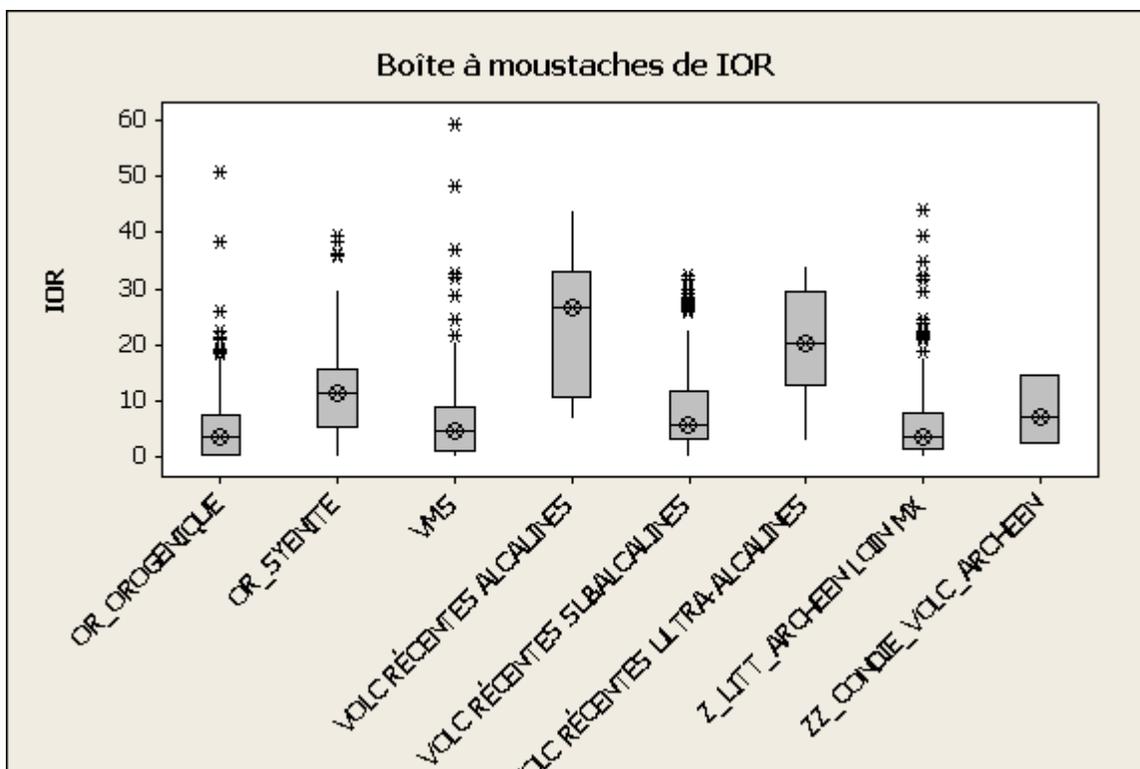


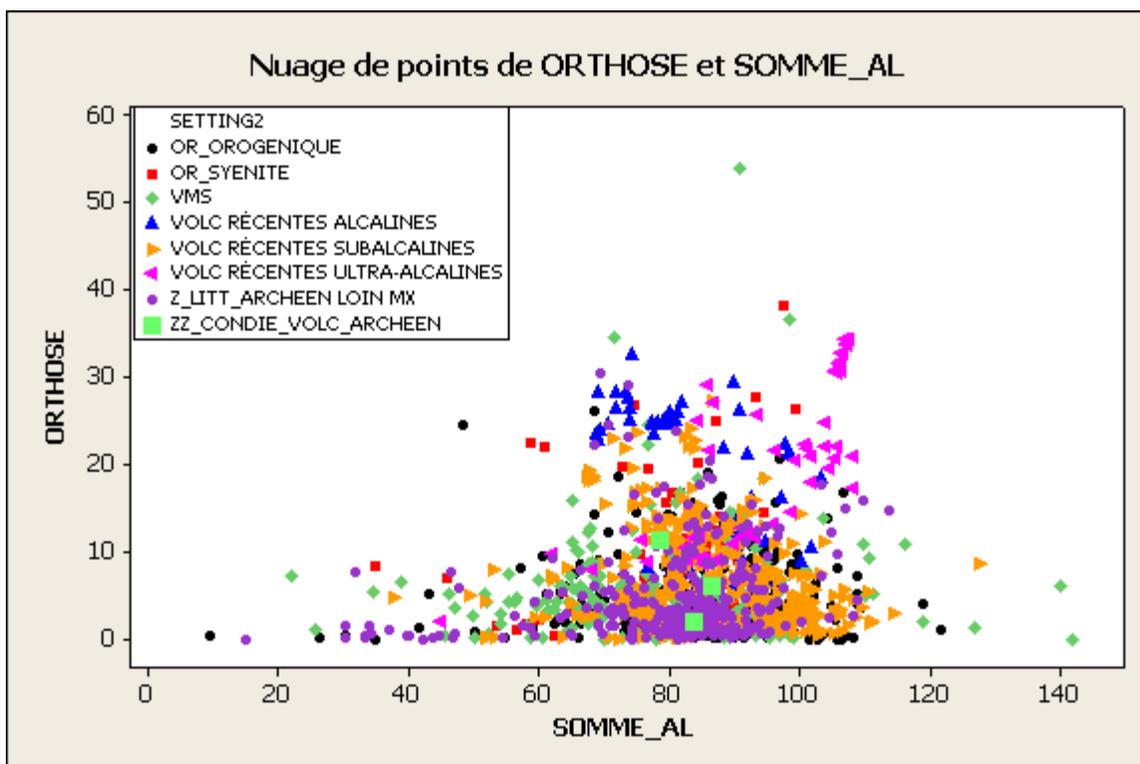
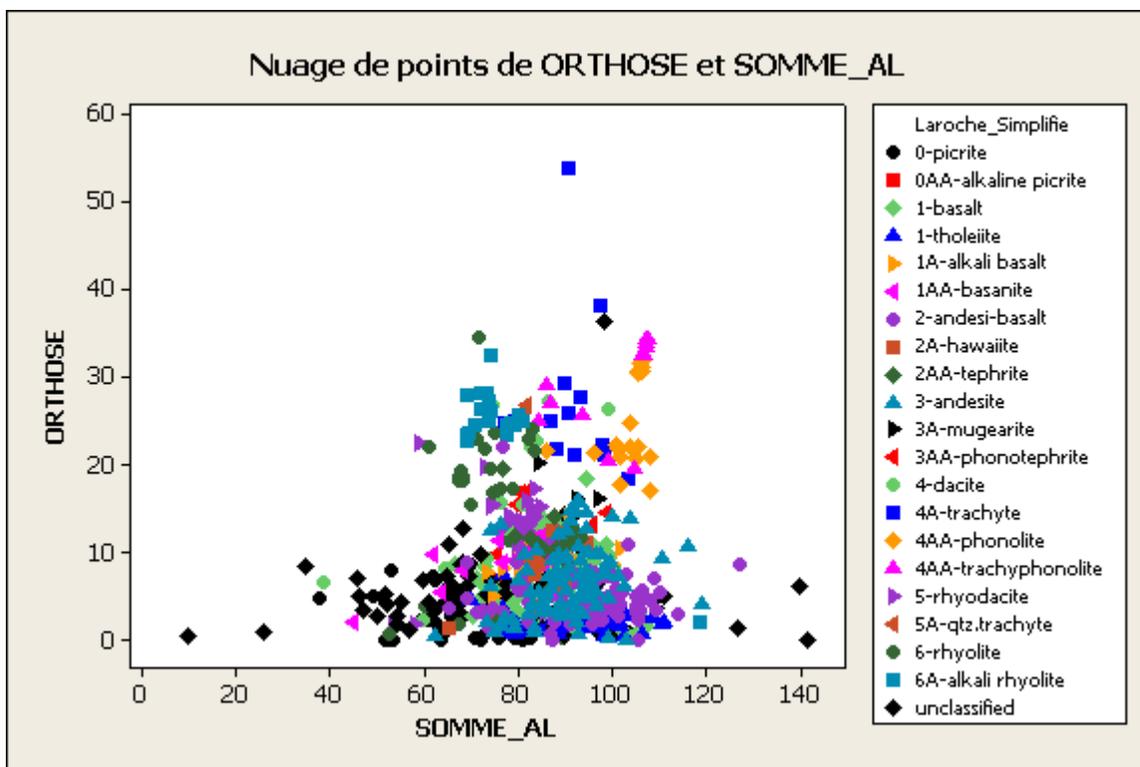


FICHE 4G – Normat Indice IOR

Méthode	Normat Indice IOR
Formule	$100 * \text{contenu d'aluminium de l'orthose (=1)} / \text{contenu d'aluminium total de la roche}$ Les minéraux impliqués dans la somme de des aluminosilicates ne sont pas connus. Toutefois, cette somme peut être déduite par les résultats des calculs normatifs; elle est égale à $100 * \text{contenu d'aluminium de l'orthose (1)}/\text{IOR}$.
Référence originale	Piché, M. 2006. Lithogéochimie d'exploration - de l'analyse chimique au faciès d'altération. Notes de cours. Québec Exploration 2006. 87p.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice IOR est en principe <i>dépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de IOR pour les roches volcaniques récentes fraîches semblent dépendantes des lithologies. Les volcanites mafiques ont des valeurs faibles, et les valeurs augmentent graduellement vers les lithologies felsiques. Les équivalents alcalins des lithologies subalcalines ont des valeurs de l'indice de 5 à 10 plus élevées.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Aucune valeur de l'indice ne permet clairement de séparer les roches fraîches des altérations pour les banques de données utilisées.







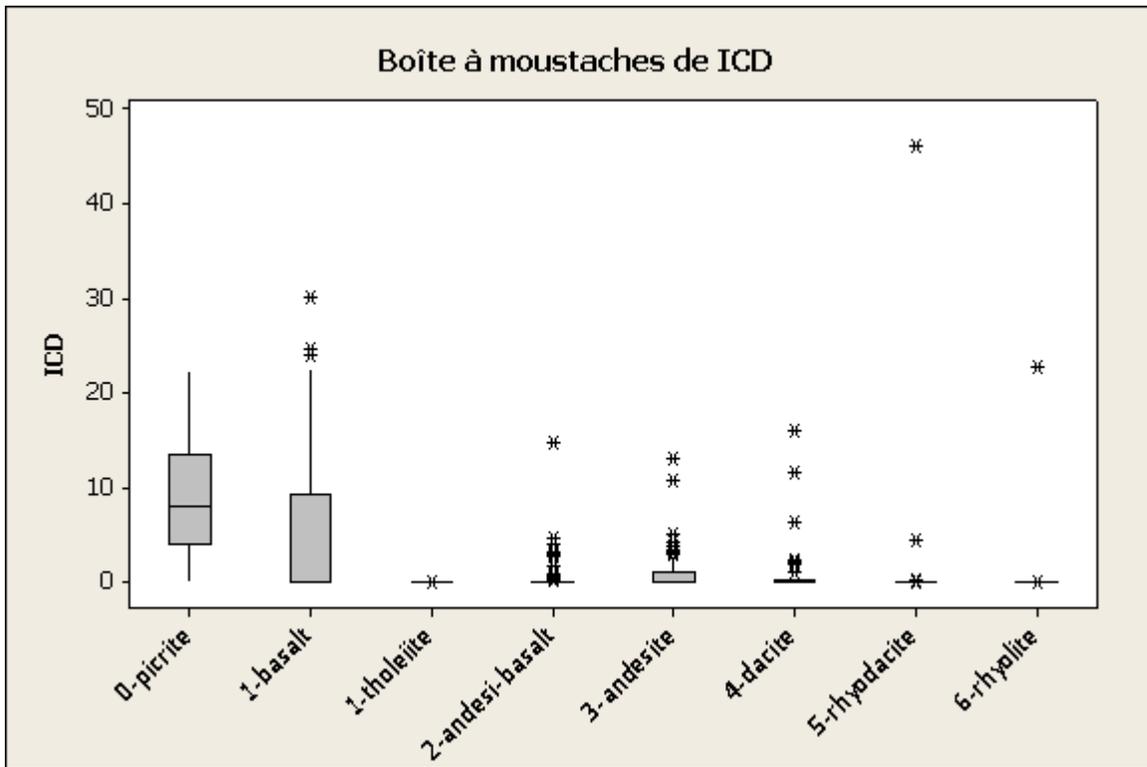
FICHE 4H – Normat Indice ICD

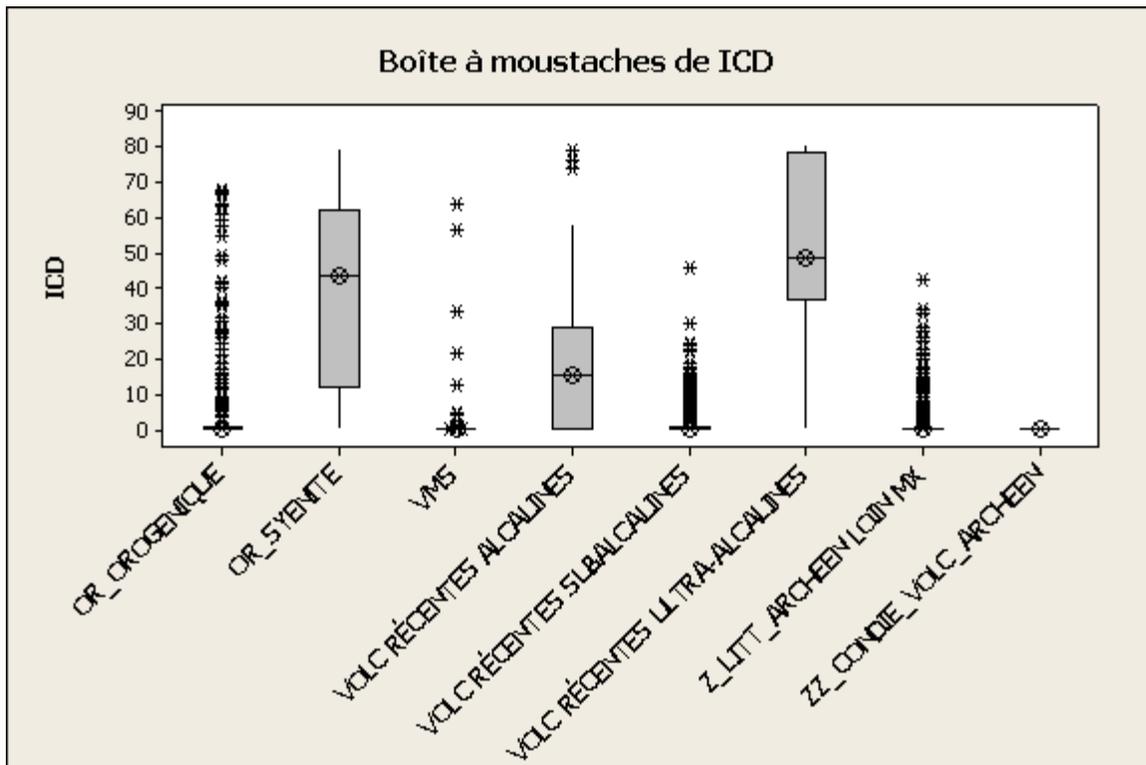
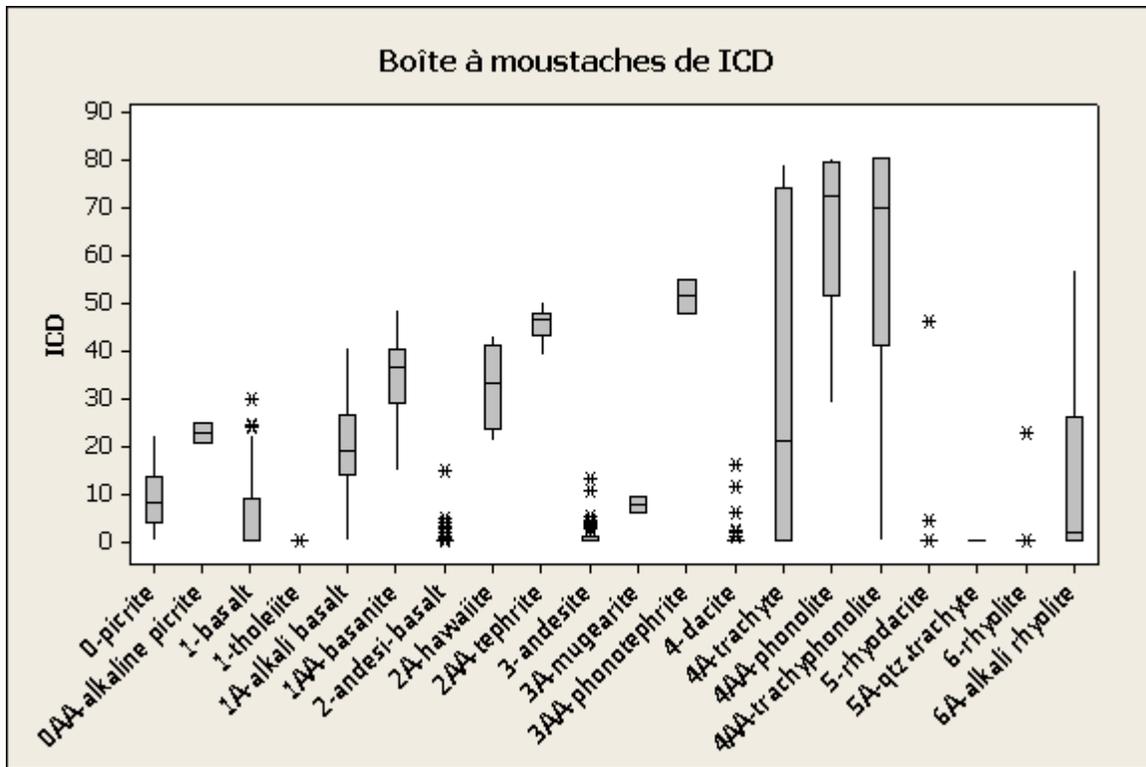
Méthode	Normat Indice ICD (indice de carbonatation dynamique)
Formule	Somme des excès de FeO, MgO et CaO restants après le calcul des minéraux silicatés normatifs, divisée par la somme initiale de ces éléments.
Référence originale	Piché, M. 2006. Lithogéochimie d'exploration - de l'analyse chimique au faciès d'altération. Notes de cours. Québec Exploration 2006. 87p
Note référence originale	La référence originale indique que cette somme pourrait représenter l'ajout de FeO, MgO, CaO due à la carbonatation, par opposition à une carbonatation dans laquelle seul le CO ₂ est ajouté. Cependant, l'ajout d'oxydes de fer (magnétite) peut aussi faire augmenter ce ratio si le fer ⁺³ n'est pas analysé.
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	L'indice ICD est en principe <i>indépendant</i> des lithologies.
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	Les valeurs de l'indice ICD dépendent en fait des lithologies. Les lithologies plus mafiques (picrites et basaltes) ont des valeurs plus élevées que les lithologies plus felsiques. Étrangement, les tholéiites ont des valeurs très basses de l'indice. Ces valeurs élevées pour certaines roches mafiques sont probablement dues à la présence de magnétite normative. L'alcalinité fait augmenter de façon dramatique les valeurs de l'indice. En effet, les équivalents alcalins des roches volcaniques subalcalines fraîches montrent des augmentations de 10 jusqu'à 50 selon les lithologies. Pour réaliser les diagrammes X-Y de cet indice, la somme cationique de Fe, Mg et Ca a été calculée. La valeur du numérateur (excès de Ca, Fe, Mg) a été calculée par ICD*somme initiale des cations Fe+Mg+Ca. Il faut noter que les analyses de roches fraîches utilisées contenaient les valeurs de Fe ₂ O ₃ analysées et l'option d'analyse dans Normat était « valeurs originales » pour le ratio du fer.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun

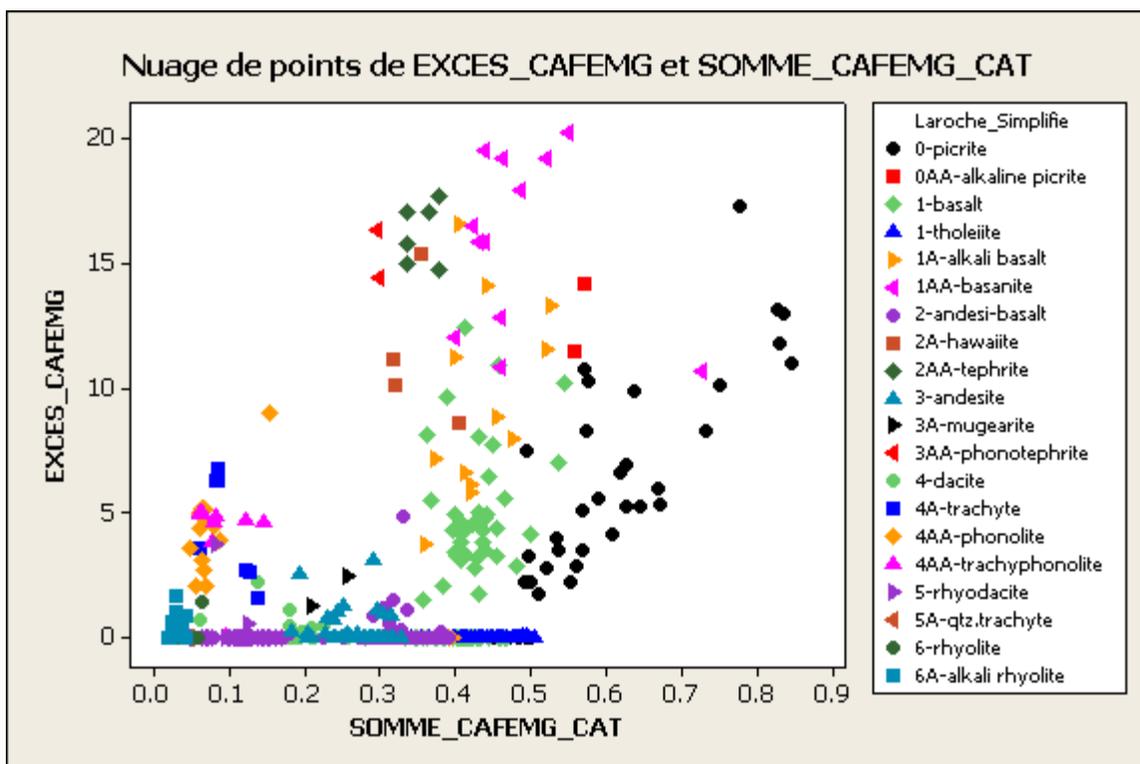
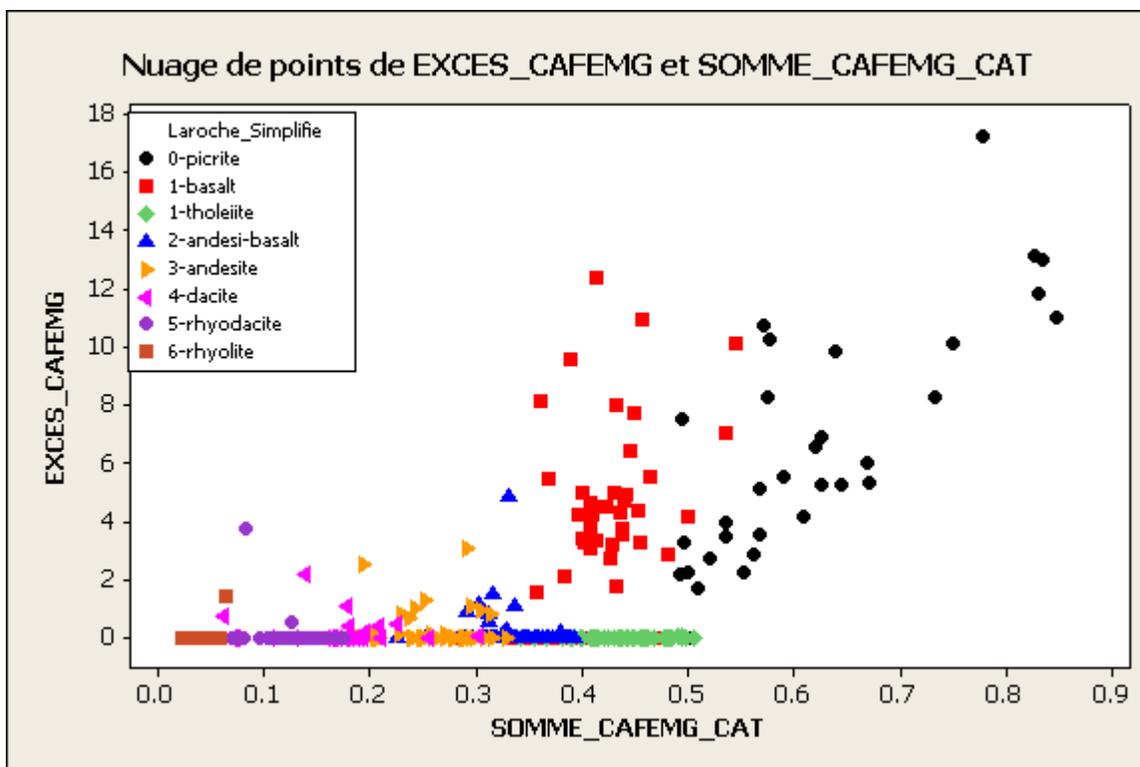
Seuil d'anomalie inféré selon les tests

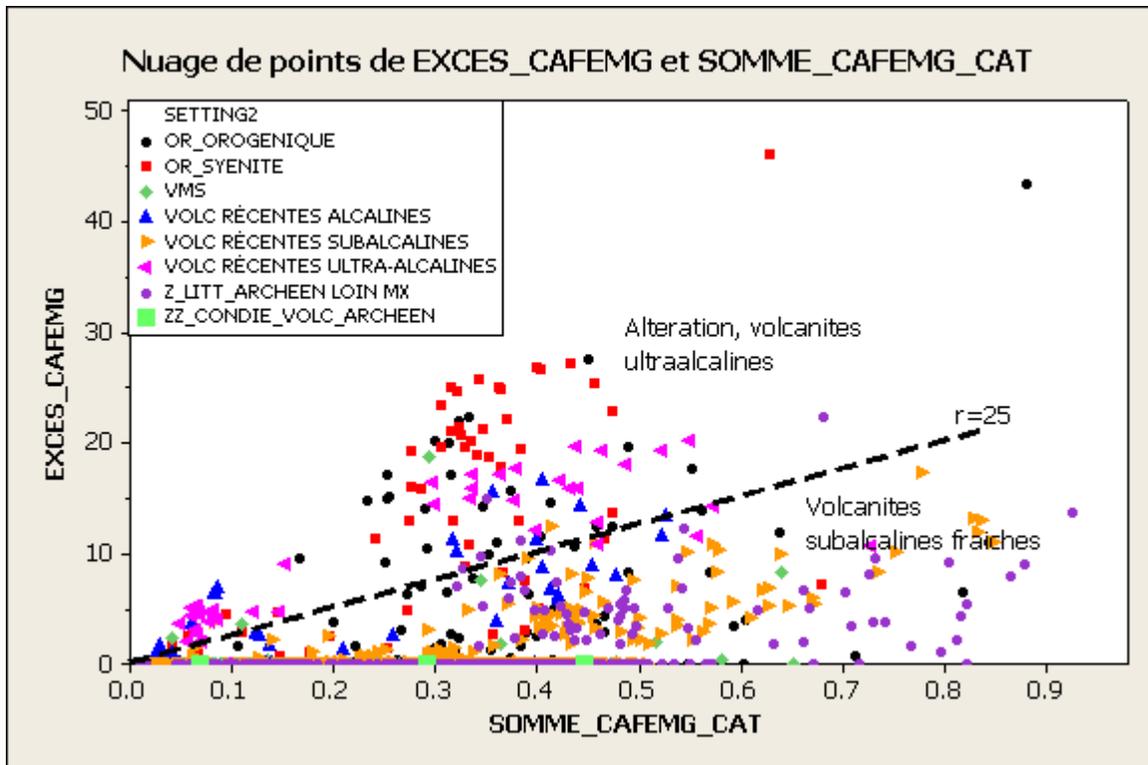
Les valeurs supérieures à 25 de l'indice sont limitées aux roches volcaniques alcalines et ultra-alcalines, ainsi qu'aux altérations associées à l'or dans les syénites. Quelques échantillons d'altération en contexte orogénique s'y retrouvent également.

Il faut noter que la plupart des échantillons de volcanites mafiques en contexte d'or dans les syénites ont les valeurs les plus élevées de l'indice. De façon intéressante, ces roches semblent montrer de forts excès en Fe, Mg et Ca dans des phases non-silicatées.



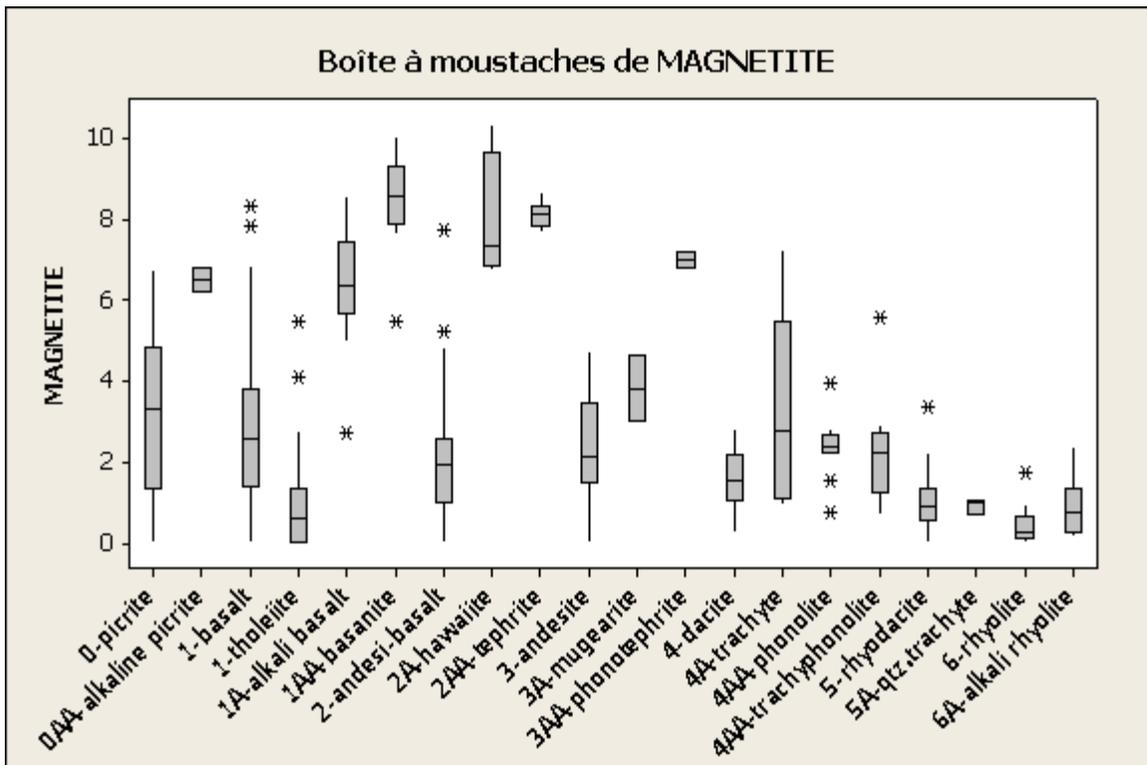
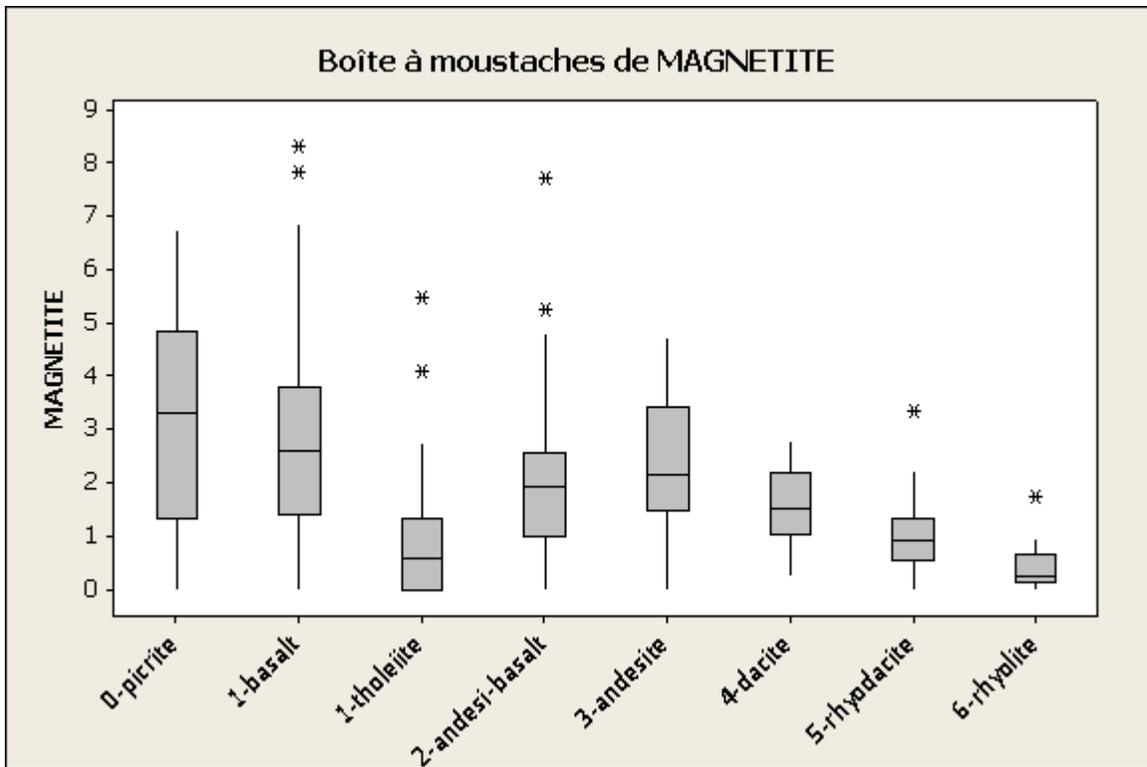


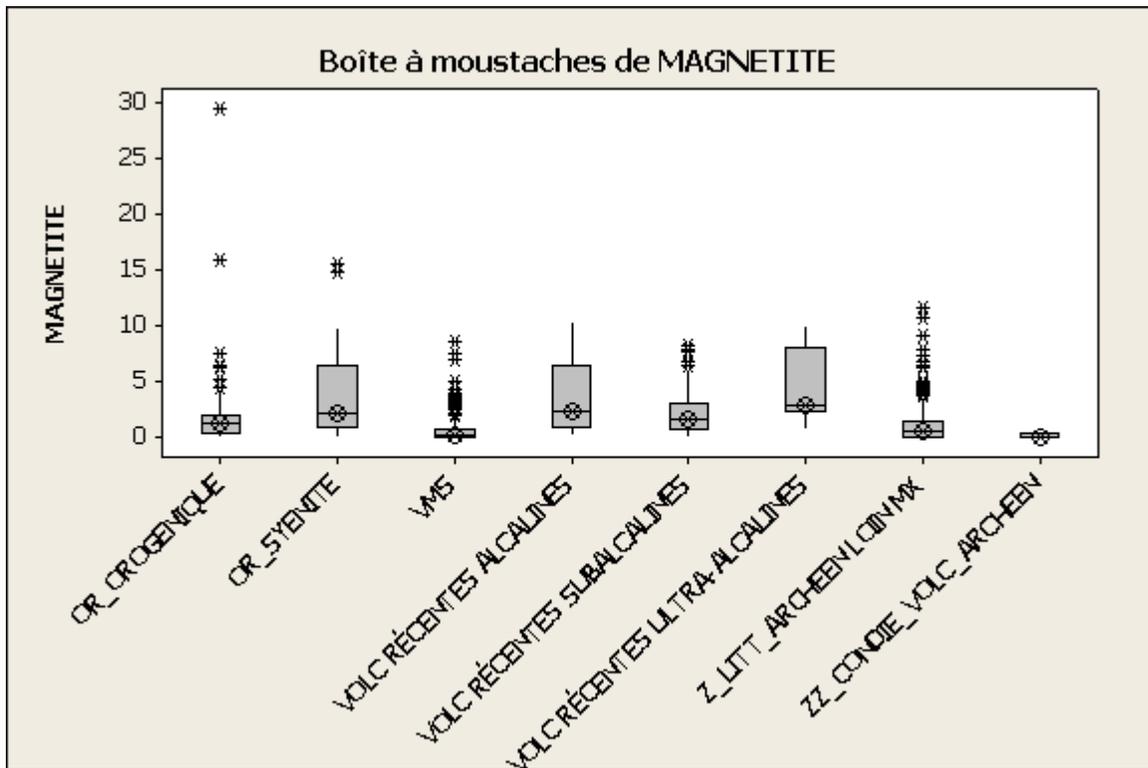
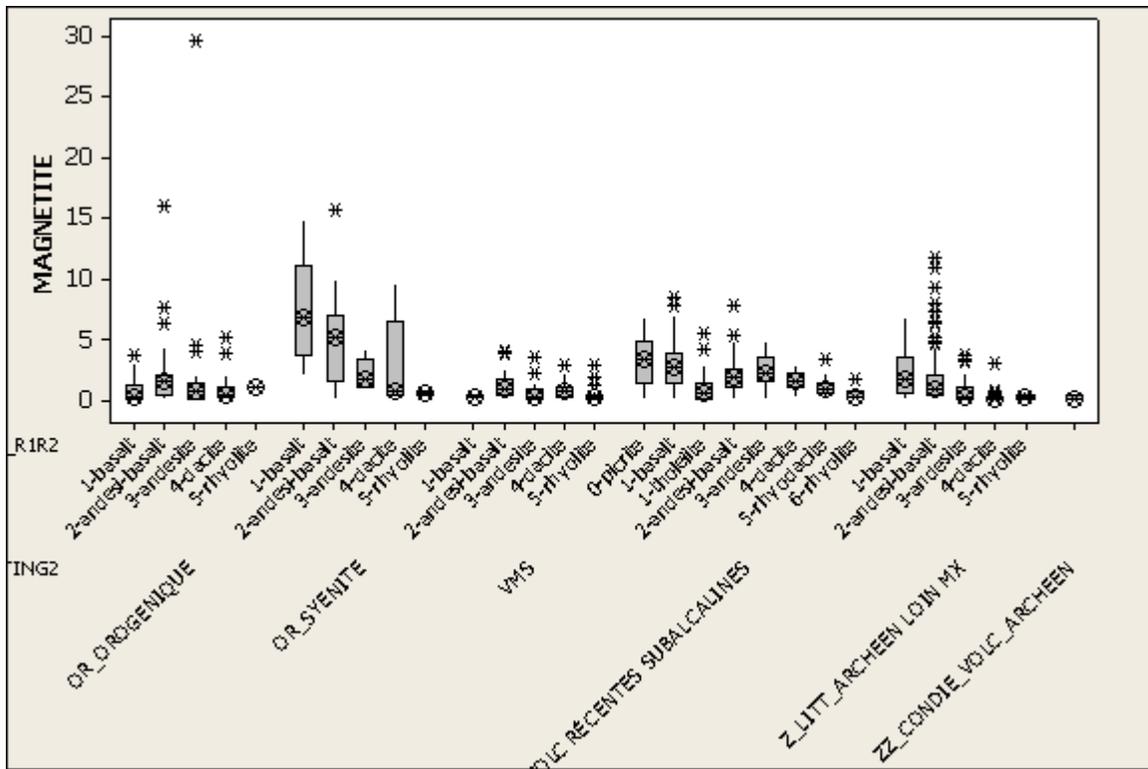




FICHE 4I – Normat magnétite Normative

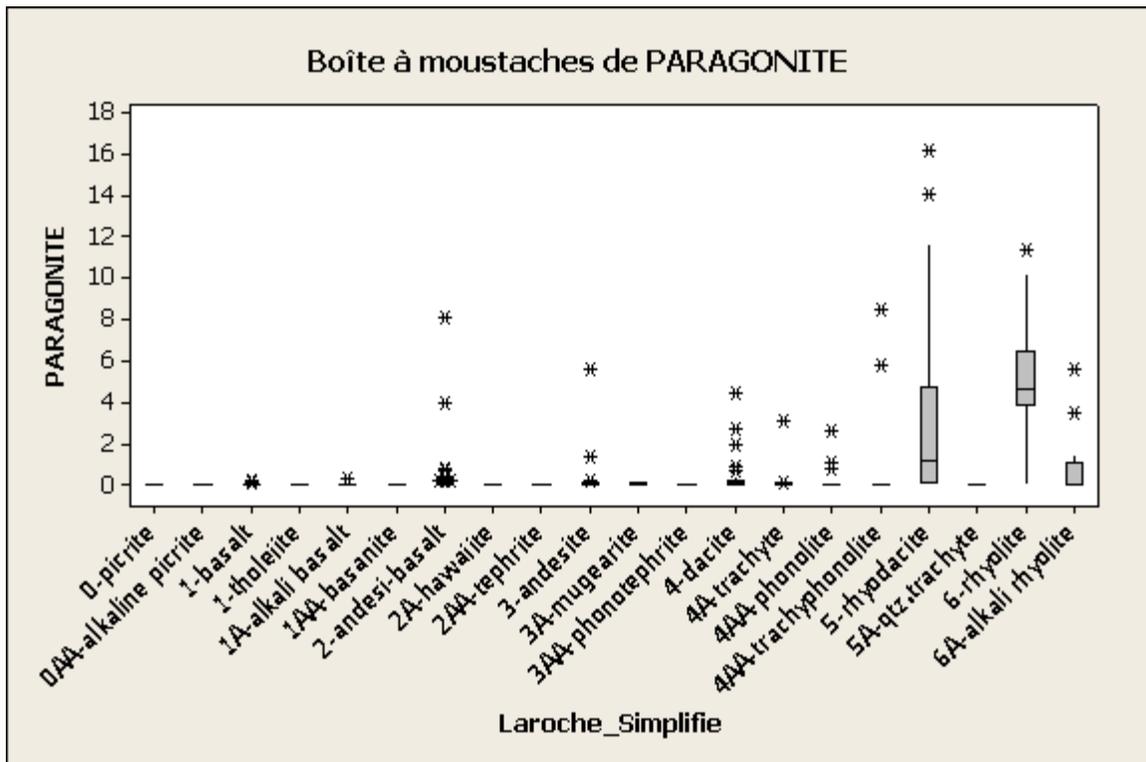
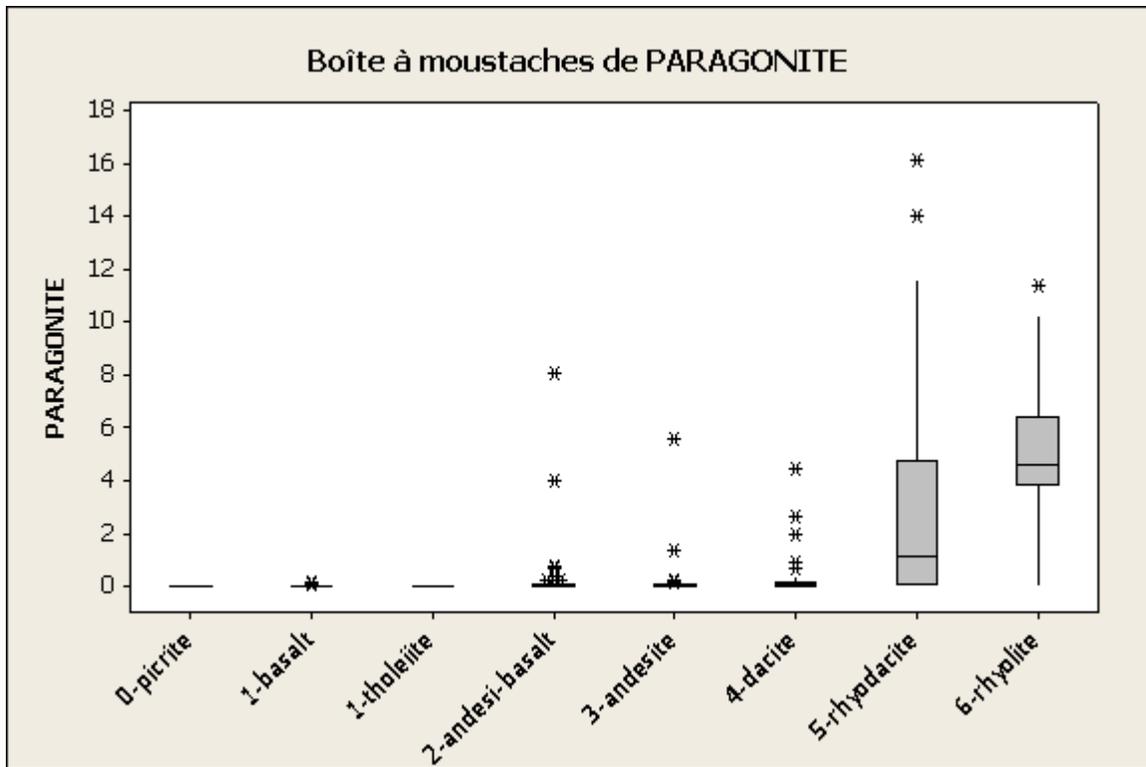
Méthode	Normat Magnétite normative
Formule	Magnétite normative telle que calculée par Normat. Dans la séquence de calcul de Normat, la magnétite normative est calculée à partir des excès de fer restants après la formation des silicates, des carbonates et des sulfures (lorsque S est analysé).
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Des tests effectués à partir d'analyses dans lesquelles les valeurs Fe_2O_3 ont été fixées à 0,01, en utilisant l'option « Valeurs Originales » pour Fe_2O_3 et FeO ont donné des quantités variables de magnétite. Or, 0,01 % de Fe_2O_3 analysé, il ne peut y avoir de magnétite dans la roche. Il semble donc qu'un problème avec la séquence de calcul fait en sorte de former de la magnétite même si Fe_2O_3 est en quantité insuffisante.
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	La magnétite normative est dépendante des lithologies. Les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les basaltes et les picrites. Les valeurs les plus faibles se retrouvent dans les rhyolites. Les tholéïtes montrent une anomalie négative, avec des valeurs sensiblement plus faibles que les andésites ou les basaltes. Les équivalents alcalins des lithologies mafiques à intermédiaires (picrite à dacites) de 1 à 5 plus élevées. Les équivalents alcalins des rhyodacites et les rhyolites ont toutefois des valeurs égales.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	En général, il semble que les roches altérées se distinguent peu des roches fraîches pour la magnétite normative.

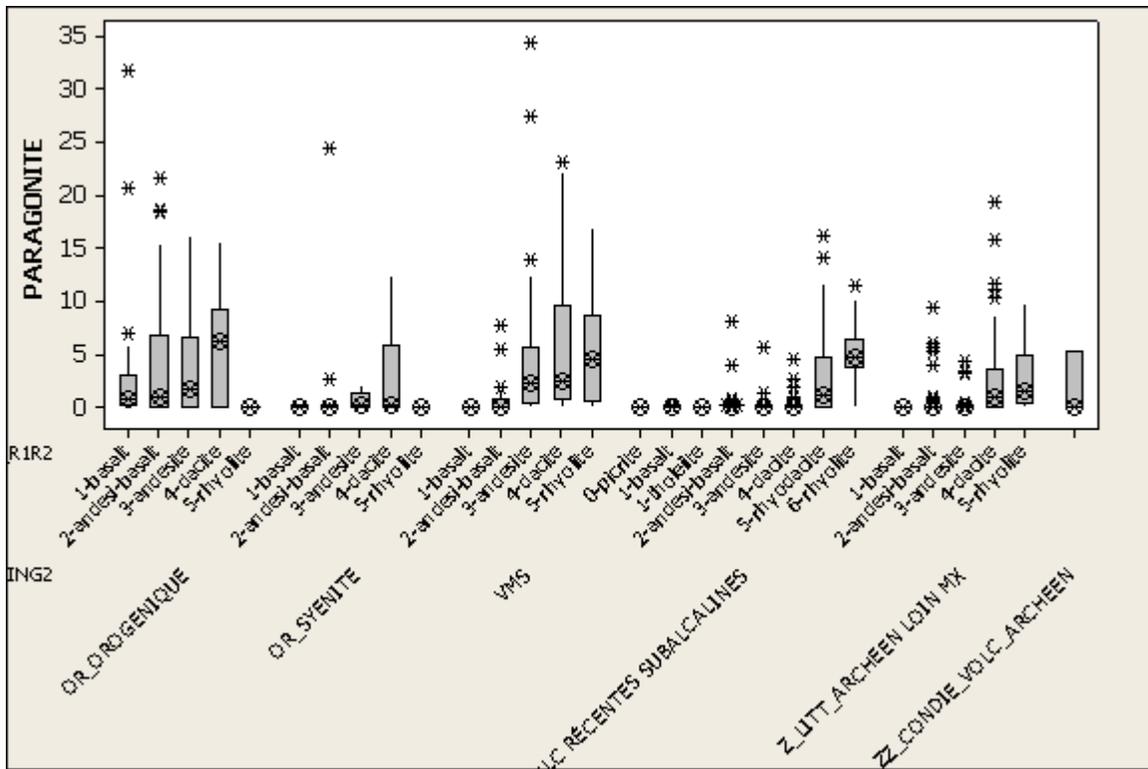




FICHE 4J - Normat Paragonite Normative

Méthode	Normat Paragonite normative
Formule	Paragonite normative telle que calculée par Normat. Dans la séquence de calcul de Normat, la paragonite normative est calculée comme un minéral métamorphique de la portion « séricite » du diagramme ACFM.
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	La paragonite normative dépend des lithologies. Les lithologies mafiques à intermédiaires sont la plupart du temps nulles pour ce minéral. Seules les rhyodacites et les rhyolites montrent en général des valeurs supérieures à 1. L'alcalinité des roches felsiques fait diminuer la valeur de la paragonite normative.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	Les altérations en contexte d'or orogénique montrent des valeurs nettement plus élevées que les roches fraîches. Les valeurs des VMS semblent élevées, mais comme beaucoup d'échantillons VMS sont des rhyolites, elles ne sont pas très anormales en réalité comparé aux rhyolites fraîches. La dépendance de l'indice aux lithologies fraîches ne permet pas de fixer un seuil unique pour toutes les lithologies. Pour les roches volcaniques felsiques (rhyolites et rhyodacites), un seuil de 12 peut être utilisé pour séparer les roches fraîches de l'altération. Pour les autres lithologies, un seuil de 2 peut déjà être considéré comme une anomalie.

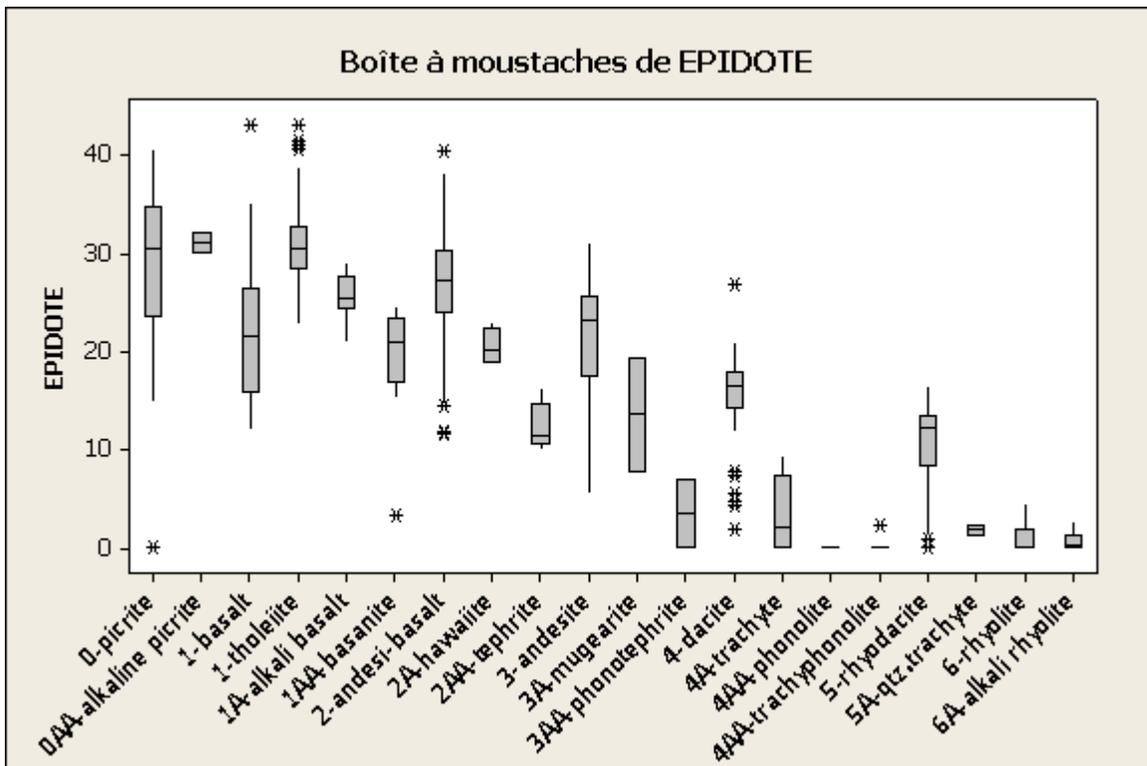
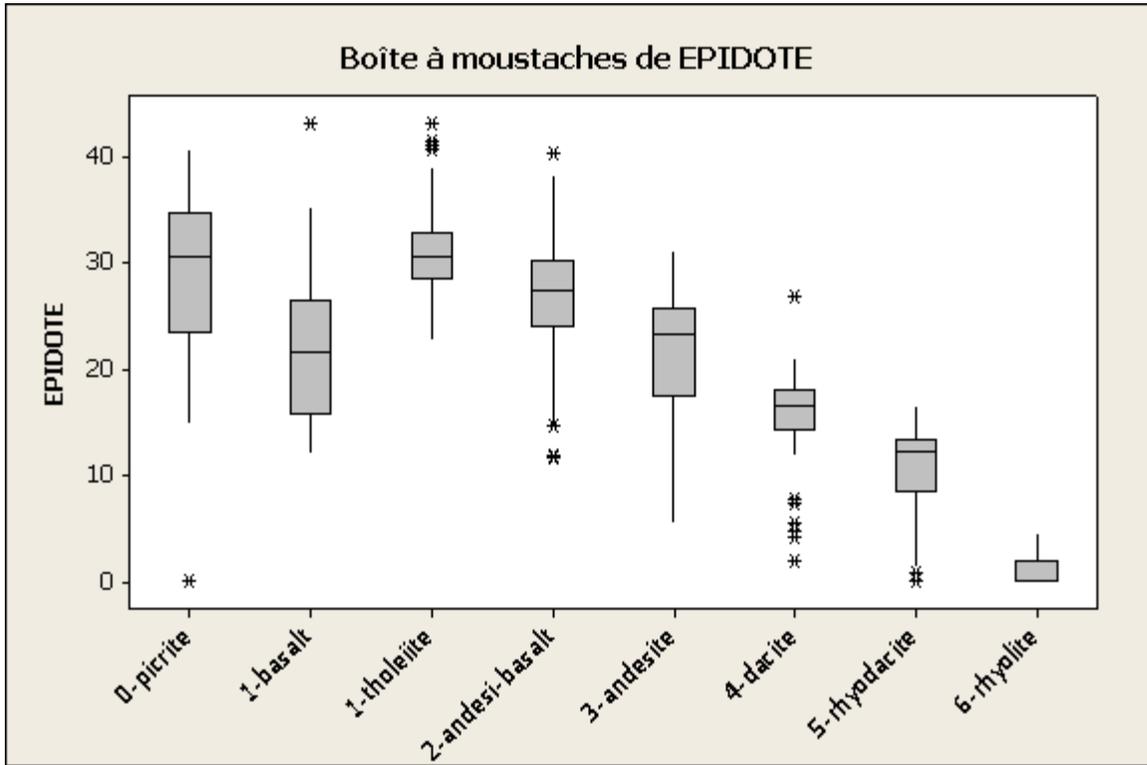


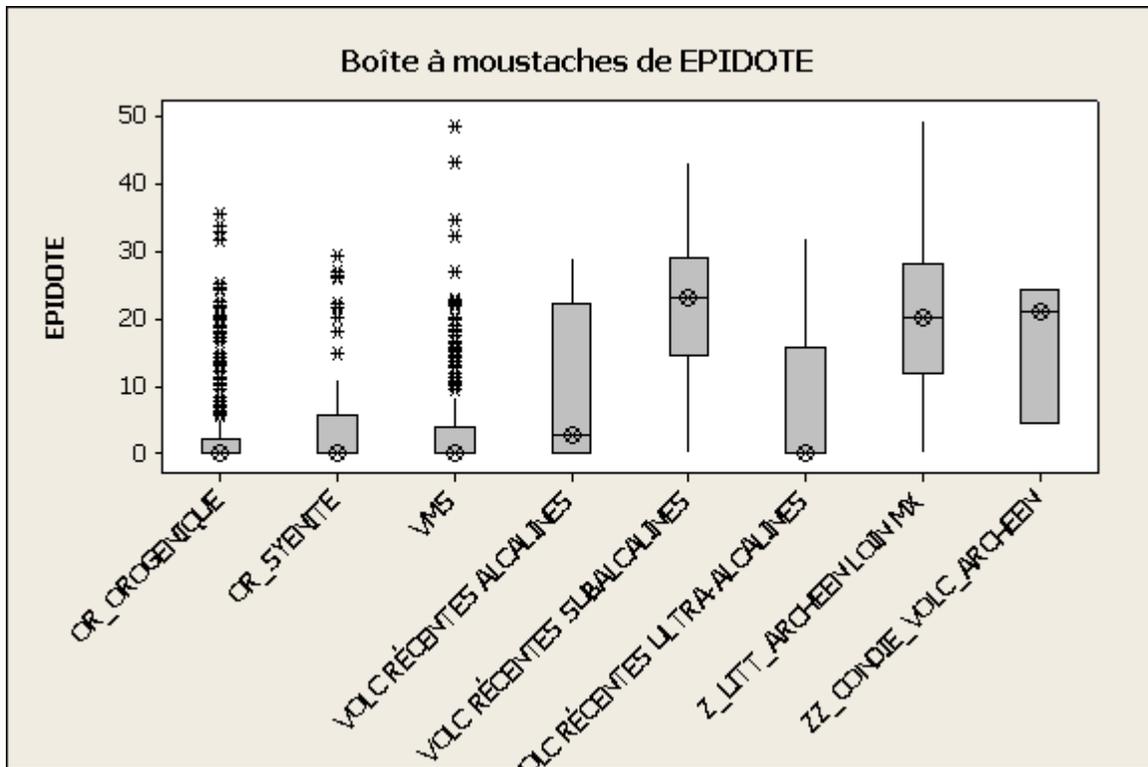
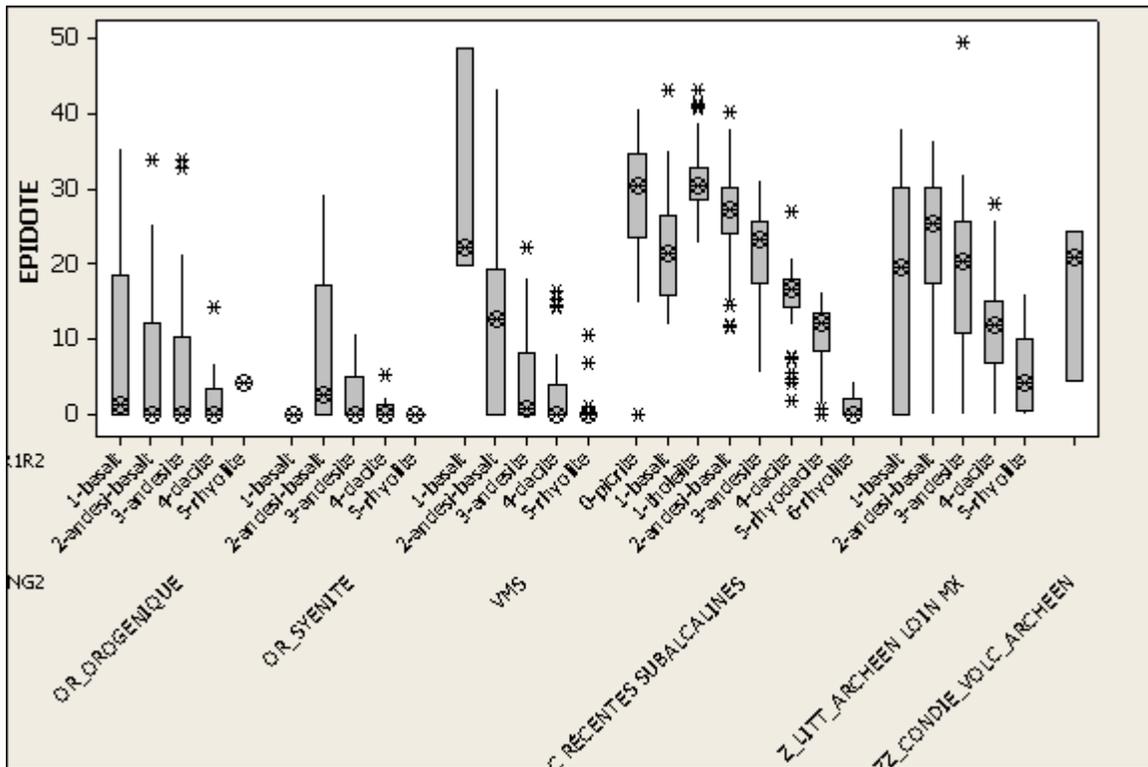


FICHE 4K – Normat Epidote Normative

Méthode	Normat Epidote normative
Formule	Epidote normative telle que calculée par Normat. Dans la séquence de calcul de Normat, l'épidote normative est calculée comme un minéral métamorphique du diagramme ACFM.
Référence originale	Piché, M., Jébrak, M. 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. Journal of Geochemical Exploration 82, p. 59-77.
Note référence originale	
Références additionnelles	
Éléments nécessaires	Éléments majeurs. Il n'est pas nécessaire d'avoir des données sur PAF pour le calcul de cet indice.
Transformation anhydre?	La transformation anhydre est faite par Normat de façon interne.
Transformation 100 %?	La transformation à 100 % est faite par Normat de façon interne.
Conditions géochimiques selon la référence originale	
Conditions géochimiques inférées selon tests effectués	Des tests effectués à partir d'analyses dans lesquelles les valeurs Fe_2O_3 ont été fixées à 0,01, en utilisant l'option « Valeurs Originales » pour Fe_2O_3 et FeO ont donné des quantités variables d'épidote. Or, avec 0,01 % de Fe_2O_3 analysé, il ne peut y avoir tellement d'épidote dans la roche. Il semble donc qu'un problème avec la séquence de calcul fait en sorte de former de l'épidote même si Fe_2O_3 est en quantité insuffisante.
Conditions lithologiques selon la référence originale	
Conditions lithologiques selon les tests effectués	
Dépendance des valeurs de l'indice aux lithologies, selon la référence originale	
Dépendance inférée des valeurs de l'indice aux lithologies	L'épidote normative dépend fortement des lithologies. Les valeurs les plus élevées apparaissent pour les lithologies mafiques, avec une diminution progressive vers les lithologies plus felsiques. Les rhyolites ont typiquement des valeurs inférieures à 2. L'alcalinité des roches tend à faire diminution l'épidote normative de 5 à 15 environ.
Seuil d'anomalie selon la référence originale	Aucun
Seuil d'anomalie inféré selon les tests	On constate que les roches volcaniques fraîches ont des valeurs d'épidote normative qui sont plus élevées que les contextes d'altérations. Les échantillons des altérations VMS ont des valeurs un peu plus faibles que les roches fraîches. Les échantillons en contexte d'or syénitique ont des valeurs encore plus basses. Finalement, tous les échantillons en contexte orogénique ont des valeurs d'épidote normative très faibles. Toutefois comme les valeurs de l'épidote sont fortement dépendantes des lithologies, on ne peut fixer de

seuil d'anomalies.





ANNEXE 5 – LISTE DES ECHANTILLONS EN CONTEXTES MINERALISES

Les échantillons suivants ont été choisis pour la banque de référence de sites minéralisés.

- VMS (N = 232).
 - Données de la littérature :
 - Delbridge (Barrett et al., 1993). N = 50. Andésites et rhyolites.
 - Aldermac (Barrett et al., 1991). N = 21. Andésites
 - Kidd Creek (Koopman et al., 1999). N = 13. Rhyolites.
 - Skellefte, Suède (Hannington et al., 2003). N = 6. Rhyolites.
 - South Bay Mine (Campbell et al., 1984). N = 10. Rhyolites.
 - Tortigny (Trepanier, 2000). N = 10. Basaltes.
 - Données des partenaires du CONSOREM, principalement
 - Lac Berrigan (Banque XStrata Abitibi). N = 10. Andésites.
 - Caber Nord (Banque XStrata Abitibi). N=24. Basaltes, andésites, dacites, rhyolites.
 - Caber (Banque XStrata Abitibi). N=24. Basaltes, andésites, dacites, rhyolites.
 - Phelps Dodge 2 (Banque XStrata Abitibi). N=3. Rhyolites, rhyodacites.
 - Landôme (Banque XStrata Abitibi). N=14. Basaltes, andésites, dacites.
 - Jay Copper (Banque XStrata Abitibi). N=6. Andésites, rhyolites.
 - Newconoex (Banque XStrata Abitibi). N=11. Tuffs.
 - Bouchard-Hébert (Banque Breakwater). N=20. Andésites, rhyolites.
- Or orogénique (N = 279).
 - Données de la littérature
 - Red Lake (Cadieux et al., 2006). N=24. Basaltes.
 - Kerr Addison (Ispolatov et al., 2005). N=3 Basaltes minéralisés en or.
 - Anoki (Ispolatov et al., 2005). N=4. Basaltes.
 - Données de partenaires du CONSOREM (principales minéralisations) :
 - Casa Berardi (Mines Aurizon). N=122. Volcanites minéralisées en or (Au > 100 ppb).
 - Pascalis-Sud (Banque XStrata Abitibi). N=19. Andésites et basaltes.
 - Beacon #1 (Banque XStrata Abitibi). N=9. Rhyolites, tuff à cristaux.
 - Arrowhead (Banque XStrata Abitibi). N=2. Basalte et tuff.
 - Lac Pelletier (Banque XStrata Abitibi). N= 8. Basaltes, andésites, roches ultramafiques.
 - Double-Strike (Banque XStrata Abitibi). N= 5. Basaltes, roches ultramafiques.
 - Golconda, Zone Shaft, Fox (Banque XStrata Abitibi). N= 12. Basaltes, andésites, roches ultramafiques.
 - Kerr Addison (Banque XStrata Abitibi). N=10. Basaltes, Dacites, Tuff, Trachyte.
 - Crescent Kirkland (Banque XStrata Abitibi). N=8. Komatiites, dacites, tuffs, trachytes.
- Or syénites (N total= 62)
 - Données de partenaires du CONSOREM
 - Douay (Vior). N=62. Volcanites mafiques minéralisées en or (> 50 ppb).