
Le PER-GH : un nouvel indice de classification des volcanites felsiques pour la reconnaissance des environnements fertiles

PROJET 2004-02

PAR : VITAL PEARSON, M.Sc.A. ing

MAI 2007



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 :

Pearson, V. 2007. Le PER-GH : un nouvel indice de classification des volcanites felsiques pour la reconnaissance des environnements fertiles. Rapport du projet CONSOREM 2004-02, 27 p.

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

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

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

RÉSUMÉ

Le présent projet de recherche propose un nouvel outil de classification des roches volcaniques felsiques. Il permet de discriminer efficacement les environnements felsiques associés aux minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) de ceux qui en sont dépourvues.

Les classifications géochimiques des rhyolites basées sur les éléments traces (e.g. Leshner et al. 1986) démontrent que le fractionnement de certains éléments (La-Yb, Zr-Y) est en association avec la probabilité d'y retrouver des minéralisations SMV. Les processus pétrogénétiques envisagés pour expliquer cette association invoquent le fractionnement de phases minérales tel le grenat et la hornblende. Cette empreinte, mise en relief par la sensibilité des éléments traces aux processus pétrogénétiques, est imperceptible par l'utilisation des contenus en éléments majeurs (bruts ou ratios inter-élémentaires). Toutefois ils deviennent manifestes lorsqu'on utilise des indices qui respectent la stœchiométrie des phases fractionnées.

Le nouvel outil développé, le PER-GH, tire son nom de la méthode des ratios élémentaires de Pearce (Pearce Element Ratio) qui fait intervenir une suite de 7 éléments majeurs (Fe, Mg, Ca, Na, Si, Al et Ti) se retrouvant dans des minéraux qui jouent un rôle prépondérant dans les processus pétrogénétiques, soit la hornblende et le grenat.

À partir de bases de données lithogéochimiques provenant de la littérature et de sources diverses, des tests par analyse discriminante ont permis de classier efficacement les rhyolites provenant d'environnements non-fertiles, fertiles et très fertiles.

Le nouvel outil peut donc être appliqué à de vastes banques de données constituées en majorité de la suite des éléments majeurs.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT.....	ii
Résumé.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	iv
1 Introduction.....	1
1.1 Objectifs.....	1
1.2 Méthodologie.....	1
2 Travaux antérieurs.....	2
2.1 Classification des rhyolites archéennes.....	2
2.2 Limites de la classification.....	5
2.3 Les roches clastiques.....	7
3 Utilisation des éléments majeurs.....	8
3.1 Validation de la classification sur la base des ETR.....	8
3.2 Approche des Ratios Élémentaires de Pearce (PER).....	8
3.2.1 Introduction.....	8
3.2.2 Conservation de l'empreinte des processus de différenciation dans les rhyolites.....	9
3.2.3 Détermination des axes du diagramme PER.....	10
3.2.4 Vérification de l'incidence des indices de fractionnement.....	12
3.2.5 Test de mise en œuvre.....	12
3.2.6 Vérification de l'incidence de l'altération.....	14
4 Classification des environnements fertiles.....	14
5 Sommaire et Conclusion.....	15
Références.....	16
Cahier des figures.....	19

Liste des figures

Figure 1. Définition des FI et FII selon Condie (1976).	19
Figure 2. Classification des rhyolites selon Lesher et al. (1986).	20
Figure 3. Fractionnement mécanique des ETR.	20
Figure 4. Définition des ratios inter-éléments définissant la géométrie de la courbe de fractionnement des ETR.	21
Figure 5. Diagramme d'équilibre de phases.	21
Figure 7. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier public.	23
Figure 8. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier Lesher (Lesher et al., 1986).	24
Figure 9. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier CONSOREM.	25
Figure 10. Caractéristiques Y-Zr des quatre classes de fertilité relative mises en relief par le PER-GH.	25
Figure 11. Test de sensibilité de l'indice PER-GH en fonction de l'altération.	26
Figure 12. Définition des principaux champs du diagramme PER-GH.	27

Liste des tableaux

Tableau 1: Compilation des principales caractéristiques géochimiques des rhyolites.	4
Tableau 2: Détail de localisation et d'association SMV pour les échantillons de Lesher et al. (1986).	6
Tableau 3: Comparaison de la classification PER-GH et Lesher pour les rhyolites du fichier Public.	13

1 INTRODUCTION

La composition géochimique des rhyolites est aujourd'hui considérée comme un outil d'exploration pour les contextes de sulfures volcanogènes, particulièrement depuis les travaux de Lesher et al. (1986) pour les rhyolites de la Province de Supérieur. La classification de Lesher utilise des éléments traces et les terres rares afin de discriminer la fertilité d'un environnement volcanique felsique. Bien que la méthode donne de bons résultats de classification, les échantillons utilisés comme références au sein de la Sous-province d'Abitibi provenaient surtout des camps miniers bien connus de Noranda et de Matagami. Or, plusieurs autres complexes felsiques sont maintenant connus au sein de l'Abitibi et mériteraient d'être comparés et intégrés dans une classification qui tient compte de la fertilité. De plus, certaines ambiguïtés se retrouvent dans la classification pour des camps miniers comme Selbaie et Bousquet-LaRonde, dont les felsites tombent dans le champ des F1, soit les rhyolites dites «non-favorables».

D'autre part, l'utilisation des éléments traces limite l'exploitation de vastes banques de données lithogéochimiques gouvernementales et industrielles qui ne contiennent que les éléments majeurs. Ces données ne peuvent être utilisées à partir des méthodes impliquant les éléments traces (par exemple la détermination des FI-FII-FIII). Il apparaît donc clair que la mise en relief d'une méthodologie pour utiliser ces bases de données permettrait de bonifier de façon substantielle l'utilisation de celles-ci.

La question qui est posée est de savoir si d'une part la classification de Lesher peut être précisée et améliorée et si d'autre part, les éléments majeurs peuvent être utilisés pour livrer le message ou une partie du message sur la fertilité des rhyolites.

1.1 Objectifs

- Préciser les caractéristiques lithogéochimiques des environnements volcaniques felsiques dits favorables.
- Valider l'approche par les terres rares et déterminer quels sont les éléments (analyses) essentiels à l'identification de ces environnements.
- Identifier de nouveaux secteurs favorables, négligés par les travaux d'exploration antérieurs.

1.2 Méthodologie

- Effectuer une revue de la littérature pour valider l'état d'avancement des méthodologies de classification.
- Documenter la signature géochimique pour les environnements minéralisés et non-minéralisés.
- Effectuer une compilation des centres felsiques de l'Abitibi.
- Échantillonner les différents centres felsiques (sur le terrain).
- Faire un test de validation (analyse multi-variable avec classification a priori) des environnements fertiles en utilisant les critères proposés dans la littérature et en utilisant la base de données provenant de la compilation (littérature).

- Faire un test de validation similaire au précédent mais en utilisant un cortège d'éléments plus communément disponibles (analyses factorielles).
- Définir l'application des résultats obtenus en employant la base de données géochimiques de NOREX-Falconbridge.
- Faire la mise en carte de la fertilité relative basée sur les critères sélectionnés.

2 TRAVAUX ANTÉRIEURS

L'utilisation des éléments traces et des éléments des terres rares pour caractériser la fertilité des séquences volcaniques n'est pas une approche nouvelle. Depuis maintenant plus d'un quart de siècle, plusieurs études ont tenté d'établir une relation entre les caractéristiques pétrogénétiques d'une séquence et son potentiel métallifère.

2.1 Classification des rhyolites archéennes

La classification des rhyolites archéennes à l'aide des ETR a été proposée par Condie (1976), lequel introduisit les termes DSV et USV (Depleted Siliceous Volcanics et Undepleted Siliceous Volcanics). Subséquemment, l'auteur a proposé la nomenclature de FI et FII (Condie, 1981b). Dans cette classification bipartite, les FI représentent des rhyolites ayant les caractéristiques suivantes :

- un spectre de fractionnement des ETR qui montre un affaissement des ETR-lourds (près de la valeur chondritique),
- une absence d'anomalie négative en Eu,
- un contenu plus élevé en métaux de transition,
- un contenu faible en Y, Zr et Ba et
- un contenu élevé en Al_2O_3 , Na_2O , Na/K, Ti/Zr et Zr/Y.

Les FII pour leur part, montrent les caractéristiques inverses ([figure 1](#)). Il est à noter que cette étude résultait d'une comparaison géochimique dont le matériel de référence était les rhyolites modernes. Ainsi, le groupe FII ou USV est similaire aux rhyolites modernes. Lors de ces premières ébauches de classification, Condie (1976) constate que les deux signatures sont généralement exclusives d'une ceinture à l'autre sauf pour quelques exceptions. L'auteur explique la genèse des FI (faible teneur en Y et ETR-lourds) par le fractionnement du grenat¹. Cette étape est toutefois suivie de processus complexes pour tenir compte de l'enrichissement en métaux de transition.

Parallèlement aux travaux de Condie (1976, 1981b), Thurston (1981) documente la distribution des ETR pour les rhyolites archéennes du bouclier canadien. La classification proposée par ce dernier est indépendante des rhyolites modernes et repose essentiellement sur la classification des profils ETR. Deux groupes sont définis dont l'un montre un profil enrichi, non-fractionné avec une anomalie négative en Eu, alors que le second montre un profil enrichi en ETR-légers, est fractionné et n'a que peu d'évidences d'anomalie en Eu. Thurston (1981) souligne le fait que le groupe ayant un profil plat est intimement associé aux séquences hôtes de minéralisations volcanogènes. L'interprétation proposée stipule que le profil normal de fractionnement ETR d'un magma felsique devrait être

¹ Mis à part les environnements où une source profonde est envisagée, il est maintenant généralement accepté que la contribution du grenat est marginale. Basé sur les coefficients de partition, le fractionnement de la hornblende apparaît le plus probable (Lentz, 1998).

fractionné et que l'absence de ce fractionnement (pour le groupe à profil plat) est causée par un enrichissement préférentiel des ETR-lourds lors des altérations hydrothermales (formations de complexes et fixation des ETR-lourds). En définitive, nous nous retrouvons avec trois types de rhyolites : les rhyolites modernes (FII), les rhyolites archéennes appauvries en ETR-lourds (FI) et les rhyolites archéennes enrichies en ETR-légers (associés aux minéralisations).

Les travaux de Thurston sont repris par Campbell et al. (1982), lesquels ont reformulé l'interprétation. De ce fait, il s'avère que les rhyolites à profil plat caractérisent des superficies transgressant largement les zones d'altérations hydrothermales et que ce processus ne peut expliquer l'homogénéité des profils. On en conclut que ces profils enrichis et plats sont une caractéristique pétrogénétique primaire. Campbell et al. (1982) suggèrent que ces profils indiquent un fort degré de fusion partielle, limitant le fractionnement des ETR. En route vers la surface, un temps de résidence dans une chambre magmatique peu profonde est invoqué pour permettre le fractionnement du plagioclase et créer l'anomalie négative en Eu. La conséquence directe de ce modèle, est que le temps de résidence dans une chambre magmatique sub-volcanique permet l'établissement de cellules de convections hydrothermales auxquelles sont associées les minéralisations de type SMV. Ce schéma met donc en relation un modèle d'évolution pétrogénétique et la probabilité d'y retrouver un système hydrothermal. Cette interprétation constitue une réelle percée.

Les éléments de classification empirique des rhyolites (sur la base des ETR) étant en place, nous avons une version formelle des critères de classification avec la publication de Leshner et al. (1986). Ces derniers proposent une classification tripartite en reprenant les classes FI et FII de Condie (1976) auxquelles on ajoute les rhyolites FIII représentant les rhyolites à profil plat associées aux minéralisations de Thurston (1981).

Avec ces trois publications, Condie (1976), Thurston (1981) et Leshner et al. (1986), il faut retenir qu'il est possible de définir trois groupes de profils ETR pour les rhyolites ([figure 2](#)):

- FI :** Rhyolites montrant un profil ETR fortement fractionné caractérisé par un appauvrissement en ETR-lourds et l'absence d'anomalie négative en Eu (Condie, 1976 ; Thurston, 1981 ; Leshner et al., 1986) ;
- FII :** Rhyolites montrant un profil ETR modérément fractionné similaire à la majorité des rhyolites modernes (Condie, 1976 ; Leshner et al., 1986) ;
- FIII :** Rhyolite montrant un profil ETR enrichi et plat caractérisé par une anomalie négative en Eu (Thurston, 1981 ; Leshner et al. 1986). Ce troisième groupe est subdivisé en FIIIa et FIIIb sur la base d'une anomalie en Eu accentuée pour le groupe FIIIb.

La représentation graphique des résultats analytiques des ETR se fait en considérant deux caractéristiques importantes des profils, c'est-à-dire le niveau d'enrichissement et le taux de fractionnement. La première caractéristique est évaluée par le contenu en Yb (ETR-lourds) et la seconde par le ratio La/Yb. De la sorte, on évalue sur un diagramme binaire la pente de la courbe arachnide et son niveau d'enrichissement par rapport aux chondrites. De façon alternative et pour des raisons similaires, nous pouvons utiliser le ratio Zr/Y en lieu et place du La/Yb, en fonction de l'Y. Nous avons de la sorte un diagramme ayant un comportement similaire, mais pour des éléments plus accessibles. Une troisième représentation proposée par Leshner et al. (1986) correspond à un diagramme ternaire ayant pour sommets : Ti/100, Zr/10 et Y.

À noter que Leshner et al. (1986) subdivisent les rhyolites en quatre sous-groupes, mais tel que montré à la [figure 2](#) et au [tableau 1](#), les classes FII et FIIIa montrent un très haut degré de superposition. Cette superposition s'observe également sur les diagrammes La/Yb vs Yb et Zr/Y vs Y. Pour cette raison, il est proposé de simplifier la nomenclature en regroupant les FII et FIIIa sous l'appellation de FII.

Il est à noter qu'une approche similaire utilisant les mêmes diagrammes a été utilisée par Barrie et al. (1993) pour l'évaluation des roches mafiques et felsiques. La classification de ces derniers diffère quelque peu (on y retrouve les groupes I à V), mais trois de ces groupes montrent une bonne corrélation avec la classification de Lesher et al. (1986), c'est-à-dire des profils de variation similaires, dont seul le contenu brut diffère.

Il importe également de souligner que l'échantillonnage des FI retenu par Lesher et al. (1986) est essentiellement représenté par des roches contenant moins de 70% de SiO₂ et un contenu moyen en TiO₂ de 0.4%, ce qui leur confère une composition plutôt dacitique à rhyodacitique.

Dans la suite de cette revue des travaux antérieurs (résumé au **tableau 1**), notons que Lentz (1998) aborde la fertilité relative des volcanites felsiques en tentant de préciser le contexte géotectonique. Pour ce dernier, les rhyolites archéennes ont une association géotectonique trop hypothétique pour être formellement identifiées. Afin de contourner ce problème, un ensemble de camps miniers d'âge phanérozoïque dont le contexte géotectonique est convenablement établi a été préféré. De la sorte, Lentz (1998) établit qu'au-delà de la signature pétrogénétique des rhyolites, les minéralisations sont intimement associées à une période d'extension. Ce faisant, il reconnaît une relation entre la pétrogenèse et la géodynamique. Enfin, dernier élément de cet historique, Hart et al. (2004) proposent une modification du modèle de la pétrogenèse des rhyolites. Jusqu'à présent, il était largement accepté que les rhyolites fertiles soient intimement associées à des intrusions sub-volcaniques. Le temps de résidence de ces masses plutoniques permettait à la fois la différenciation, le fractionnement du plagioclase (anomalie en Eu) et l'établissement d'un système de circulation hydrothermale. Leurs travaux indiquent qu'au-delà du fractionnement du plagioclase, le facteur prépondérant à la genèse des suites fertiles est la profondeur de la source et le taux de fusion partielle.

Tableau 1: Compilation des principales caractéristiques géochimiques des rhyolites.

Caractéristiques géochimiques des rhyolites				
Critère	FI	FII	FIIIa	FIIIb
Profil	Fort fractionnement	Fractionnement modéré	Plat	Plat
[La/Yb] _n	Élevé 31 (6 – 34)	Modéré (2 – 6)	Faible (1 – 4)	Faible (1 – 4)
[Gd/Yb] _n	Élevé	Faible		
Eu/Eu*	Faible (0.87 – 2)	Variable (0.35 – 1.4)	Modéré (0.37 – 0.94)	Prononcé (0.2 – 0.61)
Zr/Y	Élevé (9 – 31)	Modéré (6 – 11)	Faible (4 – 7)	Faible (2 – 6)
HFSE	faible	modéré	modéré	élevé
Sr	Élevé 303 ± 113	Faible 106 ± 52		
Sc			Elevé	faible
Th	Faible	Intermédiaire		
Yb	Faible	Intermédiaire		
Exemples stériles	Bowman Skead Kakagi Lake of the Woods Shoal lake	Confederation lake Misema Wabigoon	Lac Nora (Duprat). Cléricky	Garrison
Exemples minéralisés	Confederation lake Sturgeon lake Hunter mine Blondeau	Sturgeon lake Manitouwadge Golden Grove	Waite Amulet Don (Noranda)	Kamiskotia Kidd creek Matagami Noranda Confederation lake

Caractéristiques géochimiques des rhyolites				
Critère	FI	FII	FIIIa	FIIIb
Classes de Barrie et al. , 1993	Groupe IV (Skead)		Groupe II (Noranda)	Groupe I (Kamiskotia Kidd creek Matagami Chibougamau)

[Retour au texte](#)

2.2 Limites de la classification

Tel que noté par Leshner et al. (1986), l'application de la méthode de classification doit être faite avec circonspection, et ce, pour diverses raisons :

1. les champs définis par les trois classes de rhyolites montrent un degré important de superposition (voir [tableau 1](#)) ;
2. toutes les roches felsiques porteuses de minéralisation ne sont pas de type FIII ;
3. certains cycles felsiques contiennent à la fois des signatures de types FI, FII, FIII ;
4. les FII représentent une classe intermédiaire ou l'on retrouve à la fois des rhyolites stériles et fertiles. C'est par rapport à cette classe que réside le défi de la classification des rhyolites puisque les FII représentent plus de 50% des rhyolites du bouclier canadien.

D'autres éléments devant être considérés lors de l'évaluation du potentiel d'une séquence felsique sont de nature indirecte. En effet, une interprétation ne peut être portée sans la connaissance de l'environnement géologique. Par exemple, une séquence de type FIII peut avoir été générée par un fractionnement dans une chambre magmatique dont la profondeur d'enfouissement se situe à la limite de pénétration des fluides hydrothermaux. Dans un tel cas, même si les conditions pétrogénétiques ont été atteintes, celles de nature hydrothermale sont inopérantes. Un second exemple réfère au mécanisme d'éruption des rhyolites et plus particulièrement aux lithofaciès volcanoclastiques. De telles formations peuvent être de grandes étendues, excéder les limites d'un centre d'effusion et même contribuer à l'empilement stratigraphique d'un centre voisin. Une telle éventualité conduit à l'établissement d'une stratigraphie complexe où diverses signatures peuvent se superposer. Une volcanoclastite enrichie en cristaux, tels le quartz et le feldspath, a tendance à supprimer la présence d'une anomalie en Eu et augmente par un facteur de quatre le contenu en éléments incompatibles (Sage et al., 1996), ce qui peut efficacement donner à une rhyolite FIII le profil d'une rhyolite FII ou FI. Un troisième exemple réfère aux prémisses et hypothèses de base du modèle. Pour expliquer les observations, on invoque des processus tels un fort degré de fusion partielle, le fractionnement du plagioclase et l'émergence d'un système hydrothermal selon une ligne de pensée cohérente, certes, mais idéalisée. Dans les faits, il y a toujours une contribution (à différents degrés) de plusieurs variables tels le degré de fusion partielle, de fractionnement et d'assimilation. De la même manière, les systèmes hydrothermaux sont soumis à un ensemble de conditions telles la profondeur de la source de chaleur, la porosité et la fracturation des roches, la durée de vie du système, etc.

Notons qu'à propos de la méthode de Leshner et al. (1986), il a été démontré par Whitford et Cameron (1987) que l'analyse discriminante permet d'arriver à une classification tout aussi probante en utilisant des éléments mobiles (Mg, Ca, Na, K, Rb, Sr, Eu). Leur discussion met clairement en relief que si l'on prend des échantillons peu altérés, il est possible d'utiliser des groupes d'éléments plus facilement accessibles.

Il est clair qu'il n'existe pas de panacée dans les méthodologies pour reconnaître les environnements favorables. C'est une approche qui permet de mettre en relief une forte corrélation entre les environnements tectoniques en extension versus le magmatisme felsique tholéitique et les minéralisations exhalatives. Des exceptions notoires existent tels les SMV associés au volcanisme alcalin du Yukon-Tanana (Mortensen and Goodwin, 1981), les SEDEX associés au volcanisme potassique-alcalin du bassin de Selwyn (Goodfellow et al., 1995), sans oublier les minéralisations associées au rift intracontinental de la Mer Rouge. De plus, certains exemples de rifts intracontinentaux montrent une chimico-stratigraphie évoluant progressivement vers un caractère tholéitique (camp minier de Bathurst ; Lentz, 1998).

Finalement, puisque la classification de Lesher et al. (1986) représente un « jalon » de la recherche d'indicateurs régionaux de fertilité hydrothermale et que ces données serviront à caler la présente investigation, il est important de scruter la nature des informations ([Tableau 2](#)).

- **FI** (tableau 2 de Lesher et al. (1986), page 228) : les profils ETR pour cette série de 10 analyses sont très homogènes excepté pour l'analyse no. 4, laquelle montre une signature intermédiaire entre les FI et les FII (légèrement enrichie en ETR-lourds). Nous n'utiliserons pas cette dernière pour établir le profil type des FI.
- **FII** (tableau 3 de Lesher et al. (1986), page 229) : les profils ETR pour cette série de 8 analyses sont relativement homogènes excepté pour les analyses no. 1 et 2, lesquelles montrent un fractionnement moindre en ETR-légers. Pour cette raison, ils montrent une signature intermédiaire entre les FII et les FIII. Nous n'utiliserons pas ces dernières analyses pour établir le profil type des FII.
- **FIIIa** (tableau 4 de Lesher et al. (1986), page 230) : Les profils ETR pour cette série de 6 analyses sont très homogènes sauf pour l'analyse no. 2, laquelle montre un fractionnement accru en ETR-légers. Pour cette raison, elle montre une signature intermédiaire entre les FII et les FIII. Nous n'utiliserons pas cette dernière analyse pour établir le profil type des FIIIa.
- **FIIIb** (tableau 5 de Lesher et al. (1986), page 232) : Ce groupe est très homogène et ne présente aucune exception.

Tableau 2: Détail de localisation et d'association SMV pour les échantillons de Lesher et al. (1986).

No. Analyse	Mine	Lithofaciès	Unité
F1 ^S Lesher - 1	Non	Tuf + cristaux	Bowman
F1 ^S Lesher - 2	Non	Tuf lité	Boston
F1 ^S Lesher - 3	Non	Brèche aphanitique	Skead
F1*Lesher - 4	Non	Massive	Shoal Lake Wabigoon
F1 ^S Lesher - 5	Non	Tuf granoclassé	Shoal Lake Wabigoon
F1 ^S Lesher - 6	Non	Tuf lité	Rope Island, Lake of the Wood
F1 ^S Lesher - 7	Non	Tuf	Rope Island, Lake of the Wood
F1 ^S Lesher - 8	Non	Tuf	Kakagi Wabigoon
F1Lesher - 9	Non	Massive	Sturgeon Cycle 3 Confederation
F1Lesher - 10	Non	Massive	Sturgeon Cycle 3 Confederation
F2*Lesher - 1	Non	Massive + cristaux	Misema Clifford
F2*Lesher - 2	Non	Massive	Misema Dasserat
F2 ^S Lesher - 3	Non	Tuf	FrogHead Wabigoon
F2 ^S Lesher - 4	Non	Tuf ou massif ?	Manitou Wabigoon

No. Analyse	Mine	Lithofaciès	Unité
F2Leshher - 5	Oui	?	Mattabi Mine Rhyolite Sturgeon Lake
F2Leshher - 6	Oui	?	Mattabi Mine Rhyolite Sturgeon Lake
F2Leshher - 7	Oui	Massive	Sturgeon Lake
F2Leshher - 8	Non	Massive	Sturgeon Lake
F3aLeshher - 1	Non	Massive Ball lava	Nora Lake Noranda
F3a*Leshher - 2	Non	Massive, sphérulites	Duprat-Lac Nora
F3aLeshher - 3	Non	Massive+ cristaux	Rouyn
F3aLeshher - 4	Oui	Massive hétérogène	Amulet rhyolite
F3aLeshher - 5	Oui	Massive + quartz	Waite rhyolite
F3aLeshher - 6	Non	Massive + quartz	Don rhyolite
F3bLeshher - 1	Oui	Massive	Deloro Kamiskotia
F3b [§] Leshher - 2	Oui	Fragmentaire	Deloro Kamiskotia
F3bLeshher - 3	Oui	Massive	Kidd Creek Footwall
F3b [§] Leshher - 4	Oui	Tuf	Kidd Creek Footwall
F3b [§] Leshher - 5	Non	Tuf, brèche	Garrison Magusi
F3bLeshher - 6	Oui	?	Noranda Northwest rhyolite
F3bLeshher - 7	Oui	Massive	South Bay Confederation
F3bLeshher - 8	Oui	Massive, sphérulites	Fly Lake Confederation

§ Échantillon dont le lithofaciès est clastique (tuf)

* Échantillon dont le profil ETR diverge de celui du groupe

[Retour au texte](#)

2.3 Les roches clastiques

Parmi les limites de la classification des rhyolites en utilisant les ETR, le fractionnement mécanique des ETR est parfois négligé ou tout simplement ignoré. Le processus de fractionnement en cause est présenté à la [figure 3](#) et les grandes lignes résumées ci-après viennent de l'étude réalisée par Sage et al. (1996) pour les rhyolites de Michipicoten.

Si une rhyolite à phénocristaux mise en place par pyroclastisme montre un profil ETR de type FII, alors les fragments lithiques de cette coulée de débris devraient répliquer cette signature. Par contre, certaines portions de la coulée de débris enrichies en cristaux – tel le plagioclase – vont acquérir un certain degré d'enrichissement en ETR-légers et en Eu conférant au profil une signature de FI, alors que les tufs fins distaux – dépourvus de cristaux – auront un contenu plus faible en ETR-légers et en Eu, conférant au profil une signature de FIII. Puisqu'il est impossible de quantifier l'ampleur de ce fractionnement lors de la mise en place d'une rhyolite clastique, il est important d'éviter de faire l'échantillonnage des tufs. Tout au plus, il est recommandé – le cas échéant – de se limiter à l'échantillonnage de larges clastes lithiques en s'assurant d'éviter les auréoles d'altérations.

A cet égard, il est intéressant de noter que parmi les dix échantillons présentés comme étant des FI par Leshher et al. (1986) six sont des tufs, un est une brèche et seulement trois sont des rhyolites massives ([tableau 2](#)). Parmi ces trois dernières, l'échantillon no. 4 montre une signature intermédiaire entre les FI et FII.. Il ne reste donc que deux échantillons pour caractériser les FI. De façon similaire, l'observation de la figure 4b de Leshher et al. (1986) montre que les échantillons les plus enrichis en ETR-lourds et les moins fractionnés sont des tufs felsiques. Or, sur un total de 32 échantillons, 16 sont soit des tufs ou montrent un profil ETR qui diverge de celui du groupe.

3 UTILISATION DES ÉLÉMENTS MAJEURS

Dans ce chapitre, la classification des roches felsiques sera abordée en considérant un objectif pratique pouvant s'énoncer ainsi : considérant que les bases de données contiennent un nombre important d'analyses pour lesquelles les éléments traces et les terres rares ne sont pas disponibles, il serait souhaitable de définir un paramètre pouvant bonifier cette part importante de données en utilisant les éléments majeurs.

Pour parvenir à un tel résultat, certaines hypothèses doivent être énoncées :

1. la classification des roches volcaniques felsiques sur la base des ETR est valable et applicable pour l'ensemble des cratons archéens ;
2. les profils ETR sont causés par le fractionnement de phases minérales connues ;
3. l'empreinte du fractionnement, dès les premiers stades de l'évolution de la suite pétrogénétique, demeure identifiable dans les phases felsiques différenciées.

3.1 Validation de la classification sur la base des ETR

La validation de la première hypothèse énoncée ci-dessus a été faite en utilisant une compilation d'analyses de roches felsiques provenant de la littérature et couvrant divers territoires tels le Supérieur, le Yilgarn et le Kapvaal. Au total près de 200 analyses provenant de séquences fertiles et de séquences non fertiles (état de connaissance) ont été utilisées. De ce fichier, une analyse discriminante a été exécutée en utilisant comme critère de classification six paramètres qualifiant la géométrie de la courbe ETR. Tel que montré à la [figure 4](#), les six paramètres sont indépendants du contenu réel en ETR et représentent des ratios inter-éléments, ce qui permet d'évaluer plus spécifiquement les caractéristiques de la courbe et, indirectement, les caractéristiques du fractionnement. Sur cette base et considérant une classification a priori binaire (minéralisée et non-minéralisée), nous obtenons un taux de reconnaissance de la fertilité de plus de 85%. Ce test simple et indépendant permet d'affirmer que l'approche de la classification des roches felsiques en utilisant la signature ETR tel que proposé par Condie (1976, 1981b), Thurston (1981) et Lesher et al. (1986) est pertinente et applicable de façon générale.

Ce test est primordial pour l'acceptation de la seconde hypothèse, laquelle stipule que le profil ETR est causé par le fractionnement de phases minérales connues. Il permet entre autre de s'assurer que les processus pétrogénétiques en cause lors de la formation des rhyolites archéennes sont relativement similaires et constants.

3.2 Approche des Ratios Élémentaires de Pearce (PER)

3.2.1 Introduction

Depuis la publication du premier d'une série d'articles sur la méthode PER (Pearce Element Ratio, Pearce, 1968), de nombreux travaux ont été faits sur l'efficacité, la pertinence, la validité de la méthode (Russell et Nicholls, 1990), de même que sur l'invalidité et l'utilisation impropre de l'approche de Pearce (Rollinson, 1993).

L'explication de l'argumentaire et du contre argumentaire va au-delà des objectifs de cette étude et le choix de l'utilisation de la méthode PER est justifié comme suit :

Nous reconnaissons que la méthode de Pearce présente certains défauts d'ordre mathématique associés au problème de la fermeture à 100% d'une analyse. Toutefois, il s'avère que son utilisation – en utilisant trois bases de données indépendantes – a donné des résultats probants qui, en plus, corroborent les recherches faites à partir d'autres méthodologies (Leshner et al., 1986 ; Hart et al., 2004). Ce résultat suggère qu'une part importante de la classification est d'ordre pétrogénétique et que le biais induit par les fausses corrélations – bien que présent - ne masque pas les éléments fondamentaux de la pétrogenèse. C'est-à-dire que nous considérons peu probable qu'une fausse corrélation induite par la nature des données puisse être à l'origine de la reconnaissance des environnements propices aux minéralisations SMV.

Le fondement de la méthode PER repose sur la possibilité de retracer les variations géochimiques causées par le fractionnement d'une ou de plusieurs phases minérales par l'utilisation de variables intensives (Pearce, 1968). Par exemple, considérons une coulée komatiitique de vingt mètres d'épaisseur dont le refroidissement lent permet la cristallisation et le fractionnement de l'olivine vers la base de la coulée. Si on considère le prélèvement d'une suite d'échantillons de la base au sommet de cette coulée, on pourrait obtenir la composition de départ en échantillonnant la zone de trempe supérieure, la zone centrale et la zone de cumulat inférieure. Les variations géochimiques seraient essentiellement contrôlées par la mobilisation de l'olivine, donc contrôlées par les relations stoechiométriques entre le minéral et le liquide. La composition générale de l'olivine étant $(\text{Fe,Mg})\text{SiO}_4$, nous pouvons établir que sur un diagramme binaire, une relation doit exister entre la silice et les ferro-magnésiens, de sorte qu'à chaque ajout ou retrait de Si correspond un ajout ou retrait de $\frac{1}{2} (\text{Fe}+\text{Mg})$. Pour s'assurer que le diagramme n'est pas influencé par un autre processus tel le fractionnement du plagioclase (lequel mobilise également de la silice), nous divisons par une variable n'appartenant pas au système (par exemple le Ti) ce qui nous permet d'avoir des variables intensives. Une telle approche permet d'évaluer la validité de certaines hypothèses pétrogénétiques.

3.2.2 Conservation de l'empreinte des processus de différenciation dans les rhyolites

Deux limitations pourraient restreindre l'utilisation de l'approche PER dans cette étude. Premièrement, dans une application standard des PER, une suite d'échantillons provenant d'une unité spécifique est requise afin d'évaluer les variations géochimiques et de sonder diverses hypothèses de fractionnement. Dans cette étude, soit que l'échantillonnage est d'ordre régional ou que les échantillons sont indépendants les uns des autres et proviennent d'unités, de formations, de provinces géologiques et même de cratons différents. Il est donc impossible de suivre une ligne de différenciation particulière. Deuxièmement, la classification des rhyolites est, à ce jour, basée sur la variation des profils ETR et le contenu en certains éléments traces dits immobiles. Il est clairement établi que ces caractéristiques sont héritées des processus de fusion partielle, de fractionnement et de différenciation affectant les sources magmatiques, par exemple la stabilité du grenat pour les magmas d'origine profonde. Or, ces magmas sont de compositions mafiques à ultramafiques et précèdent substantiellement la genèse des rhyolites, lesquelles représentent le matériel étudié dans ce travail.

Ces deux limitations sont contournées en considérant non pas « de valider ou d'infirmer » une hypothèse sur la base des diagrammes PER, mais bien de sortir du cadre spécifique de la méthode et de tester si la composition des rhyolites conserve l'empreinte des processus précurseurs de leur formation. Dans cette ligne de pensée, il est possible d'anticiper – par exemple - que la genèse d'un magma en grande profondeur fractionne potentiellement (dépendamment du taux de fusion partielle) du grenat et/ou un orthopyroxène, alors qu'à moindre profondeur, pour un même taux de fusion partielle, la phase potentiellement fractionnée sera un clinopyroxène. Ainsi, le magma de source profonde montrera, entre autre, une relative déficience en Al (retenue par le grenat).

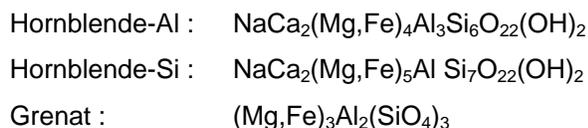
Les travaux de Hart et al. (2004) indiquent clairement que la genèse des FI, FII et FIII est intimement associée à la profondeur de la source ([figure 5](#)) et que le fractionnement du plagioclase constitue un élément marginal. Dans cette perspective, la signature ETR fortement fractionnée des FI est le

résultat du fractionnement du grenat et de la hornblende à la source. Les magmas de moindre profondeur sont moins affectés par le fractionnement de ces phases et présentent moins de fractionnement des ETR.

Un test PER a donc été élaboré sur l'hypothèse que si un tel fractionnement a eu lieu, les rhyolites de la fin de la suite de différenciation acquerront une chimie différente.

Avant de faire la mise en œuvre de ce test, il importe de spécifier une caractéristique particulière de la hornblende, laquelle sera utile à l'interprétation des résultats. Les travaux expérimentaux et empiriques sur ce minéral montrent que le contenu en Al varie proportionnellement à la pression, ce qui en fait un géobaromètre très utile défini par Hammarstrom et Zen (1986) et ultérieurement calibré par Johnson et Rutherford (1989) et Schmidt (1992). Cette propriété est très intéressante puisque, tel que montré à la [figure 5](#), la hornblende a un très grand champ de stabilité et englobe le champ de genèse des FI, FII, FIII. Ainsi ce minéral, qui sur la base des ETR présente une signature relativement constante, montre toute une fourchette de variation de son contenu en Al. En d'autres mots, le contenu en Al représente une plus grande sensibilité aux conditions de genèse du magma que le contenu en ETR². Cette caractéristique n'est pas sans intérêt puisqu'elle permettra d'apporter un peu plus de nuance à l'importante famille des FII.

Ainsi, trois phases sont considérées, soit le grenat, la hornblende-Al et la hornblende-Si. Ces deux derniers sont les représentants d'une solution solide dont la composition est fonction de la profondeur de fractionnement et correspond à une substitution entre Al :Si-(Fe-Mg). La stoechiométrie des phases s'établira comme suit :



3.2.3 Détermination des axes du diagramme PER

La méthodologie permettant d'élaborer un diagramme PER pertinent pour sonder une hypothèse est présentée de façon détaillée dans Russell et Nocholl (1990) et ne sera pas reprise ici. Cependant, un diagramme montrant la variation du contenu en silice en fonction d'un indice PER fondé sur la stoechiométrie des minéraux considérés sera élaboré. Pour ce faire, un système de trois équations à trois inconnus est à résoudre par la méthode matricielle.

Soit C la matrice « composition » des phases en présence :

Pour les besoins, la première colonne représente la somme des cations Ca+Na, la seconde colonne représente la somme Fe+Mg, la troisième colonne représente l'aluminium et enfin la quatrième colonne représente la silice. Alors,

$$C = \begin{matrix} \text{Hornblende-Al} & \text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2 \\ \text{Hornblende-Si} & \text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{AlSi}_7\text{O}_{22}(\text{OH})_2 \\ \text{Grenat} & (\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 \end{matrix} = \begin{pmatrix} 3 & 4 & 3 & 6 \\ 3 & 5 & 1 & 7 \\ 0 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Soit A la matrice des « axes » du graphique :

² À noter que le contenu en amphibole est également fonction du contenu en eau et, bien entendu, de la composition de la source. De plus, dans un environnement sous-saturé en eau, la stabilité de l'amphibole contrôle la position du solidus (Wallace et Green, 1991). La hornblende représente donc un minéral sensible de la suite pétrogénétique.

Dans cette matrice, la première colonne représente l'abscisse alors que la seconde représente l'ordonnée.

$$A = \begin{matrix} \text{Na+Ca} \\ \text{Fe+Mg} \\ \text{Al} \\ \text{Si} \end{matrix} = \begin{pmatrix} 0 & y_{\text{CN}} \\ 0 & y_{\text{FM}} \\ 0 & y_{\text{Al}} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{CN} = \text{Ca Na} ; \text{FM} = \text{Fe Mg}$$

Le produit matriciel C x A donne une matrice D représentant le « déplacement vectoriel » des points :

$$C \times A = D = \begin{pmatrix} 6 & 3y_{\text{CN}} + 4y_{\text{FM}} + 3y_{\text{Al}} \\ 7 & 3y_{\text{CN}} + 5y_{\text{FM}} + y_{\text{Al}} \\ 3 & 3y_{\text{FM}} + 2y_{\text{Al}} \end{pmatrix}$$

Cette dernière matrice D est partiellement indéterminée mais, puisque l'objectif est de mettre en relief la différence entre les magmas ayant fractionné des minéraux alumineux et les autres, il est possible de forcer le résultat et faire en sorte qu'un tel fractionnement sera visuellement accentué. Par exemple, il est possible de déterminer la matrice D en forçant un déplacement à pente positive pour les minéraux riches en Al et un déplacement à pente négative pour les autres. Ainsi, la matrice D devient :

$$D = \begin{pmatrix} 6 & 6 \\ 7 & -7 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

La seconde colonne est déterminée selon le principe énoncé ci-dessus, c'est-à-dire qu'un déplacement (6, 6) donne une pente de +1, un déplacement (7, -7) donne une pente de -1 et un déplacement (3, 1) donne une pente de +1/3. Ce qui donne un déplacement à pente positive pour les minéraux riches en Al et un déplacement à pente négative pour les autres.

À ce stade, il est possible d'extraire trois équations à trois inconnues :

$$3y_{\text{CN}} + 4y_{\text{FM}} + 3y_{\text{Al}} = 6 ;$$

$$3y_{\text{CN}} + 5y_{\text{FM}} + y_{\text{Al}} = -7 ;$$

$$3y_{\text{FM}} + 2y_{\text{Al}} = 1,$$

dont la résolution permet de définir les indices des axes du diagramme :

$$\text{abscisse : } (\text{CN} - 3\text{FM} + 5\text{Al})/\text{Ti}$$

$$\text{ordonnée : } \text{Si}/\text{Ti}$$

À noter que les deux axes sont divisés par le contenu en Ti qui est une variable n'appartenant pas au système de fractionnement afin de rendre les variables « intensives », c'est-à-dire indépendante du système [sic]. Les deux axes sont calculés en contenu cationique où CN représente la somme (Ca+Na) et FM représente la somme (Fe+Mg).

Considérant l'approche et les phases de fractionnements utilisées, le diagramme de référence est désigné par l'acronyme de PER-GH, signifiant « Pearce Element Ratio » – Grenat-Hornblende.

3.2.4 Vérification de l'incidence des indices de fractionnement

Afin de s'assurer que la méthodologie répond correctement aux hypothèses, la [figure 6](#) présente un exemple de calcul de fractionnement. Dans cet exemple, une analyse de rhyolite fraîche de Normétal a été utilisée (source : Lafrance et al., 2000). Par la suite, la hornblende a été ajoutée par incrément de 1% et le total a été recalculé à 100%. On y voit distinctement que le fractionnement de la hornblende-Al accuse un déplacement selon un vecteur de pente égale à un, alors que la hornblende-Si accuse un déplacement selon un vecteur de pente égale à moins un. Un test similaire considérant le fractionnement du grenat génère une ligne de pente égale à 1/3. On en conclut que les indices considérés génèrent les déplacements anticipés.

3.2.5 Test de mise en œuvre

Trois sources de données indépendantes ont été utilisées pour vérifier la validité des résultats et une base de données pour la production d'une nouvelle classification. Le premier fichier de données, dit « Public », est constitué de 225 analyses provenant de la littérature (35 articles) dont 115 proviennent de contextes porteurs de minéralisations SMV et 110 proviennent de contextes non-minéralisés (état de connaissances). Il représente donc une compilation multi-source, provenant de divers cratons et permet d'évaluer la performance de l'indice de classification en fonction de l'état des connaissances sur l'état de fertilité de l'unité. Le second fichier est constitué des 32 analyses publiées par Leshner et al. (1986). Ce fichier permet d'établir un parallèle entre la classification FI-FII-FIII et le nouvel indice basé sur l'utilisation des éléments majeurs. Le troisième fichier est constitué d'analyses entièrement nouvelles prélevées par CONSOREM (Gaboury, 2004). Ce fichier permettra de faire un premier test de mise en œuvre pour les felsites du secteur de l'Abitibi en considérant un ensemble d'échantillons homogènes ayant subi la même procédure analytique. Enfin, la base de données servant à la mise en œuvre de la classification est constituée de 24 525 échantillons de roches felsiques provenant de la base de données de NOREX – Falconbridge. Il est à noter que sur la base de la classification utilisant La-Yb, seulement 372 analyses seraient disponibles, et que sur la base de la classification utilisant Y-Zr, 10 505 analyses seraient disponibles.

La [figure 7](#) montre le résultat obtenu en utilisant le fichier « Public ». Sur cette figure les analyses sont classifiées a priori selon leur appartenance aux environnements minéralisés ou non-minéralisés. On y remarque distinctement trois champs, soit celui des felsites non-favorables dont la pente est supérieure à 0.95. Le champ favorable associé aux rhyolites minéralisées et dont la pente est inférieure à 0.95. Et enfin, un champ près de l'origine des axes ou les deux suites précédentes convergent et représentent un champ d'indétermination. Si l'on fait abstraction des analyses associées au champ « indéterminé », alors l'analyse discriminante basée sur ce diagramme indique un taux de reconnaissance de la fertilité de 85%.

Outre cette capacité à reconnaître les environnements fertiles, la correspondance de cette classification a été comparée avec celle de Leshner et al. (1986). Premièrement, 192 des 225 analyses présentent des résultats pour la La-Yb et 193 pour le Zr-Y. Dans la classification de Leshner et al. (1986), les FI sont considérées défavorables, les FIII favorables et les FII indéterminées (voir le chapitre 1). Il en ressort que l'absence de minéralisation est reconnue à 63/101 et que la présence de minéralisation est reconnue à 35/107. Le point important est que 64/107 rhyolites minéralisées sont indéterminées (FII). Lorsque l'on considère la classification PER-GH, la minéralisation est reconnue à 91/115, alors que les roches non-minéralisées sont reconnues à 52/110. Sur ce dernier point, notons que 16 des 43 analyses faussement identifiées comme étant favorable proviennent de Michipicoten. Ce « cluster » géographiquement bien circonscrit soulève un doute et met possiblement un relief un secteur négligé par l'exploration pour les SMV. De façon générale, il semble que le PER-GH montre une meilleure habileté à reconnaître les minéralisations en diminuant le nombre d'échantillons indéterminés. D'autre part le PER-GH diminue le nombre de FI, ce qui à prime abord semble une faiblesse de la méthode. Toutefois, il en sera question plus loin, les FI reconnues comme fertiles sont

celles de Selbaie, Val-d'Or et partiellement Bousquet-LaRonde, ce qui s'avère un avantage. Les résultats comparatifs sont donnés au **tableau 3**.

Tableau 3: Comparaison de la classification PER-GH et Lesher pour les rhyolites du fichier Public.

<i>Minéralisation</i>	PER-GH				Lesher et al. (1986)			<i>Minéralisation</i>
	<i>Défavo- rable</i>	<i>Indéter- miné</i>	<i>Favo- rable</i>	<i>Très favorable</i>	<i>F1 (Défavo- rable)</i>	<i>FII (Indéter- miné)</i>	<i>FIII (Favor- able)</i>	
Non (110)	52	15	39	4	63	23	15	Non (101)
Oui (115)	8	16	71	20	8	64	35	Oui (107)

Un second test de classification, élaboré à partir des données sources de la publication de Lesher et al. (1986), est présenté à la [figure 8](#). L'indice PER-GH semble reconnaître la plupart des FI, avec quelques ratés pour la reconnaissance des FII et FIII ([figure 8a](#)). Par contre, certaines FII sont minéralisées et d'autres ne le sont pas, ce qui est également le cas pour les FIII (voir le détail dans : Lesher et al., 1986). À la [figure 8b](#), la classification est beaucoup plus claire en ne considérant que l'état relatif de fertilité. D'après ce dernier diagramme, il est possible d'affirmer que l'indice PER-GH reconnaît positivement la majorité des séquences minéralisées.

Le troisième test de classification a été élaboré à partir de l'échantillonnage fait par CONSOREM à l'été 2003 (Gaboury, 2004). Il représente un ensemble de 108 rhyolites provenant des centres felsiques de l'Abitibi. Dans ce cas particulier, la qualité et l'homogénéité des échantillons sont bien contrôlées. Toutefois, l'Abitibi étant un secteur éminemment fertile, il devient difficile d'attribuer un qualificatif de fertilité relative, le tout étant associé à un état des connaissances. Pour contourner ce problème, la classification de Lesher et al. (1986) est utilisée, ce qui permet à tout le moins de comparer la classification du PER-GH à celle couramment utilisée dans l'industrie.

La [figure 9](#) montre clairement que les FI sont associées au champ des rhyolites peu fertiles où la pente est supérieure à 0.95. En fait, six échantillons de type FI ont une pente inférieure à 0.95, ce qui leur confère un attribut de fertilité. Ces six échantillons proviennent de Hunter mine, Gémini, Joutel et Géant Dormant ; des secteurs qui ne sont pas dépourvus de minéralisations SMV et méritent donc cette re-classification. Il est intéressant de noter que les FIII se situent à la base du diagramme et appuient ainsi le fait que la valeur de la pente sur le diagramme PER-GH est inversement proportionnelle à l'indice de fertilité.

Ces trois tests montrent que le diagramme PER-GH donne des résultats relativement homogènes et consistants. De plus, la variation de l'indice PER-GH suit relativement bien la variation du contenu en éléments traces. Pour étayer ce point, la [figure 10](#) présente le diagramme Y vs Zr/Y tel que proposé par Lesher et al. (1986) où les quatre groupes d'échantillons sont définis selon la méthode PER-GH. On y voit très clairement que les échantillons reconnus comme étant défavorables se retrouvent le long d'un segment sub-vertical à faible contenu en Y. Ces échantillons se superposent au champ des FI et transgressent de façon appréciable le champ des FII. Les échantillons favorables pour leur part se situent dans le champ des FIII et transgressent également de façon appréciable le champ des FII. À noter que certains échantillons à caractère très favorables se retrouvent dans le champ des FI et sont caractérisés par un très faible contenu en Y.

En résumé, il est interprété que la suite de différenciation mise en relief par le diagramme de Lesher et al. (1986) s'avère, sur la base des éléments majeurs, représentative de la superposition de deux suites de différenciation et non pas une seule. Tel que montré à la [figure 10](#), où les deux suites de différenciation sont représentées, la zone traditionnellement interprétée comme étant des FII est

constituée de la superposition des deux suites, ce qui explique l'ambivalence de cette approche. On y retrouve donc autant de roches de la suite favorable que défavorable.

Notons enfin, que les échantillons appartenant au groupe « Indéterminé » se superposent au champ des FII et qu'à ce titre les deux méthodes sont impuissantes à lever l'indétermination.

3.2.6 Vérification de l'incidence de l'altération

L'indice de fractionnement PER-GH est composé de sept éléments majeurs dont plusieurs sont éminemment mobiles lors des processus hydrothermaux (Ca, Na, Fe, Mg, Si). Il est donc à propos de vérifier l'incidence du métasomatisme sur la classification.

L'objectif ici est de quantifier l'effet du métasomatisme sur la classification. Pour ce faire, le fichier « Public » contenant 224 échantillons provenant de la littérature a été utilisé. Pour chacun de ces échantillons 100% du Ca et du Na ont été retirés, simulant ainsi un lessivage complet lors de l'hydrolyse des plagioclases; les analyses ont par la suite été recalculées au total original. Dans une seconde étape, en plus de retirer 100% du Ca et du Na, une addition de 50% du contenu en fer et de 25% du contenu en Mg a été appliquée, simulant les principaux effets de la séricitisation et de la chloritisation. Les résultats de cette simulation du métasomatisme hydrothermale sont présentés à la [figure 11](#), donnant les contenus originaux ([11a](#)), celui avec lessivage du Ca-Na ([11b](#)) et enfin celui avec ajout de Fe-Mg ([11c](#)). On y voit que le lessivage extrême du Ca-Na (100% ; [figure 11b](#)) cause une dérive vers le bas des échantillons, mais que seuls les échantillons près de la limite de démarcation des champs Favorables / Non-favorables changent de classe. L'effet du lessivage du Ca-Na est d'amoinrir la pente sur le diagramme et ainsi augmenter la valeur du critère de fertilité. Lorsque l'on ajoute du Fe et Mg, la dérive des points vers le bas est accentuée ([figure 11c](#)) et une grande majorité des échantillons non-minéralisés se retrouvent dans le champ de favorabilité positif.

En conclusion, il est proposé qu'un lessivage partiel des alcalis ait une incidence mineure sur la classification du PER-GH. Un lessivage extrême (100%) donne un caractère favorable aux échantillons près de la courbe de démarcation des champs. Un lessivage du Ca-Na combiné à un ajout substantiel du Fe-Mg rend favorable une large part des échantillons non-minéralisés. Toutefois, une roche ayant subi une telle altération est généralement considérée très intéressante du point de vue de l'exploration des SMV. Ainsi, l'incidence des altérations rehausse la favorabilité de l'indice PER-GH, ce qui ne peut être perçu avec l'utilisation des ETR ou des éléments traces. À cet égard, en présence d'altérations le PER-GH a la possibilité de rehausser le potentiel minéral de certains secteurs qui autrement pourraient être perçus comme non-favorables.

4 CLASSIFICATION DES ENVIRONNEMENTS FERTILES

Considérant que le PER-GH représente un indice associé à la pétrogenèse des volcanites felsiques, une nouvelle classification basée sur le contenu en éléments majeurs est proposée. L'intérêt de cette approche est qu'elle permet d'accéder à un nombre beaucoup plus considérable de données et de présenter des résultats nuancés sur les cartes géologiques. De façon globale pour l'ensemble de l'Abitibi, la base de données contient 355 analyses dont les résultats incluent le La et Yb, 10 400 analyses contiennent le Zr et Y et 24 500 analyses contiennent les éléments majeurs.

La classification de la fertilité relative à l'aide de l'indice PER-GH s'établit comme suit :

- Les deux principaux champs du diagramme ([figure 12](#)) sont générés par une ligne de pente égale à 0.95 passant par l'origine des axes (de façon formelle cette ligne ne

ne passe pas par l'origine, mais plutôt aux environs d'une ordonnée égale à 5). Le champ supérieur (pente 0.95 et plus) définit les environnements non-favorables, alors que le champ inférieur (pente 0.95 et moins) définit les environnements favorables. À noter que la limite « $m=0.95$ » a été définie de façon empirique. Les deux suites, favorable et non-favorable, convergent vers l'origine de sorte que les échantillons ayant un indice inférieur à 100 pour les deux axes se retrouvent dans une zone d'indétermination. Un arc de cercle de rayon égale à 140 a donc été défini (formellement, le rayon au point 100,100 \rightarrow 141.42...). Les échantillons à l'intérieur de ce champ sont dits indéterminés.

- Outre les trois principaux champs définis ci haut, il est bon de rappeler que la valeur de la pente représente une variable continue pouvant être utilisée pour générer des cartes d'isocontours. Sur le diagramme deux divisions pour les pentes égales à 0.66 et 0.33 sont également définies. Ces subdivisions permettent de mettre en relief des détails fort intéressants dont l'origine peut d'une part être de nature pétrogénétique (un fractionnement accru) ou attribué à la présence d'altérations majeures (lessivage du Ca-Na et/ou apport en Fe-Mg).

5 SOMMAIRE ET CONCLUSION

- Les études de Condie, 1976 ; Leshner et al., 1986 ; Hart et al., 2004 ont permis de mettre en relief la capacité des ETR et de certains éléments traces immobiles aux processus d'altération dans l'établissement des processus pétrogénétiques à l'origine des magmas rhyolitiques.
- Les profils ETR de même que les éléments Y et Zr permettent de proposer une association préférentielle des minéralisations SMV avec les rhyolites ayant un profil ETR-plat et un fort contenu en yttrium. L'hypothèse retenue pour expliquer ces différentes rhyolites est qu'il y a eu fractionnement du grenat et de la hornblende.
- Partant de cette hypothèse du fractionnement de phases majeures (grenat-hornblende), l'empreinte des conditions ayant prévalu lors de la genèse des magmas sources est perceptible non seulement par l'étude des ETR, mais également par celle des éléments majeurs.
- Il est possible de proposer une classification des environnements fertiles en utilisant une suite de sept éléments majeurs (Ca, Na, Fe, Mg, Al, Si, Ti) selon des proportions respectant la structure stoechiométrique des phases fractionnées.
- Un test par l'analyse factorielle discriminante indique que le critère de classification PER-GH reconnaît avec succès 85% des environnements favorables.
- La favorabilité relative mise en relief par l'indice PER-GH $((CN - 3FM + 5Al)/Ti)$ varie proportionnellement avec les effets du métasomatisme associé à l'hydrothermalisme. Il en résulte un rehaussement des secteurs affectés par ce double critère.
- Le PER-GH est donc un nouvel outil d'interprétation de la favorabilité des environnements felsiques qui utilisent les éléments majeurs et qui permet le traitement de vastes banques de données lithogéochimiques.

RÉFÉRENCES

N.B. Certaines références non citées dans le textes correspondent aux sources des données utilisées pour la documentation des rhyolites du fichier « Public »

- Bailes, A.H., Galley, A.G., Skirrow, R.G. and Young, J. 1996. Geology of the Chizel volcanic-hosted massive sulfide area. Snow Lake, Manitoba. Geol. Surv. Can., Open File Report 3262.
- Barker, F. 1979. Trondhjemite: Definition, environment and hypothesis of origin. In: Barker, F. ed., *Trondhjemites, dacites and related rocks*. Elsevier. New York, pp. 1-11.
- Barret, T.J. and McLean, W.H. 1999. Volcanic sequences, lithogeochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems. *Rev. Eco. Geol.*, vol. 8. pp. 101-303.
- Barrie, C.T., Ludden, J.N. and Green, T.H. 1993. Geochemistry of volcanic rocks associated with Cu-Zn and Ni-Cu deposits in the Abitibi subprovince. *Eco. Geol.*, vol. 88, pp. 1341-1358.
- Butler, J.C. 1981. Effect of various transformations on the analysis of percentage data. *Math. Geol.*, vol. 13, pp.53-68.
- Campbell, I.H., Coad, P., Franklin, J.M., Gorton, M.P., Scott, S.D., Sowa, J. and Thurston, P.C. 1982. Rare earth elements in volcanic rocks associated with Cu-Zn massive sulphide mineralization: a preliminary report. *Eco. Geol.*, vol. 19, pp.619-623.
- Condie, K.C. 1976. Trace element geochemistry of Archean greenstone belts. *Earth-Science Reviews*, Vol. 12, pp. 393-417.
- Condie, K.C. 1981a. Archean greenstone belts. *Developments in Precambrian geology*, volume 3. Elsevier ed. 434 p.
- Condie, K.C. 1981b. Geochemical and isotopic constraints on the origin and source of Archaean granites. In: Glover, J.E. and Groves, D.I. eds., *Archaean geology. Second International Symposium, Perth 1980*. Spec. Publ. 7, Australian Geological Survey., pp. 469-479.
- Condie, K.C. 2001. *Mantle plumes and their record in the earth history*. Cambridge Univ. Press. 306 p.
- Condie, K.C. 2004. Precambrian superplume events. In: Eriksson, P.G., Altermann, W., Nelson, D.R., Mueller, W.U. and Catuneanu, O. eds. *Series : Developments in precambrian geology. Vol. 12: The precambrian earth: Tempos and events*. pp. 163-173
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & sons, 646 p.
- Davis, D.W., Krogh, T.E., Hinzer, J and Nakamura, E. 1985. Zircon dating of polycyclic volcanism at Sturgeon lake and implications for base metal mineralization. *Eco. Geol.*, vol. 80, pp. 1942-1952.
- Gaboury, D. 2004. Développement d'outils lithogéochimiques pour l'exploration : volet rhyolites. Rapport interne non publié. *Projet CONSOREM 2003-5A*.
- Galley, A.G. 2003. Composite synvolcanic intrusions associated with Precambrian VMS-related hydrothermal systems. *Mineral. Deposita*, vol. 38, pp. 443-473.

- Goodfellow, D.W., Cecile, M.P., Leybourne, M.I. 1995. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the lower Paleozoic alkalic and potassic volcanic rocks, Northern Canadian Cordilleran miogeocline. *Can. J. Earth Sci.*, vol. 32, pp. 1236-1254.
- Graf, J.L.Jr. 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks. *Eco. Geol.*, vol. 72, pp.527-548.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E-an. 1986. Aluminum en hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Mineral.*, vol. 71, pp. 1297-1313.
- Harker, A. 1909. *The natural history of igneous rocks*. McMillan, New York.
- Hart, T.R., Gibson, H.L. et Leshner, C.M. 2004. Trace element geochemistry and petrogenesis of felsic volcanic rocks associated with volcanogenic massive Cu-Zn-Pb sulfide deposits. *Economic Geology*, vol. 99, pp. 1003-1013.
- Herzberg, C. 1995. Generation of plume magmas through time: an experimental approach. *Chem. Geol.*, vol. 126, pp. 1-16.
- Jébrak, M. and Harnois, L. 1991. Two-stage evolution in an Archean tonalite suite: the Tachereau stock, Abitibi (Quebec, Canada). *Can. Jour. Earth Sci.*, vol. 28, pp. 172-183.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J. 1989. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with implication to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geol.*, vol. 17, pp. 837-841.
- Lafrance, B., Mueller, W.U., Daigneault, R. and Dupras, N.2000. Evolution of a submerged composite arc volcano : volcanology and geochemistry of the Normétal volcanic complex, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada, *Prec. Res.*, vol. 101, pp. 299.
- Lentz, D.R. 1998. Petrogenetic evolution of felsic volcanic sequences associated with Phanerozoic volcanic-hosted massive sulphide systems: the role of extensional geodynamics. *Ore Geol. Rev.*, vol. 12, pp. 289-327.
- Leshner, C.M., Goodwin, A.M., Campbell, I.H., and Gorton, M.P., 1986. Trace element geochemistry of ore-associated and barren felsic metavolcanic rocks in Superior Province, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 23, pp. 222-237.
- Maier, W.D. 2003. The potential for magmatic Ni sulfide ores in South African komatiites: a review. *South Afri. Jour. Geol.*, vol. 106, pp. 35-40.
- Mortensen, J.K. and Goodwin, C.I. 1981. Volcanogenic massive sulphide deposits associated with highly alkaline rift volcanics in the southeastern Yukon territory. *Eco. Geol.*, vol. 77, pp. 1225-1230.
- Pearce, T.H. 1968. A contribution to the theory of variation diagrams. *Contr. Mineral. Petrol.*, vol. 19, pp. 142-157.
- Piercey, S.J., Mortensen, J.K. and Creaser, R.A. 2003. Neodymium isotope geochemistry of felsic volcanic and intrusive rocks from the Yukon-Tanana Terrane in the Finlayson Lake region, Yukon, Canada. *Can. Jour. Earth Sci.*, vol. 40, pp. 77-97.

- Reimann, C. and Filzmozer, P. 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, vol. 39, pp.1001-1014.
- Rollinson, R.H. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman group UK., 352 p.
- Rollinson, H.R. and Roberts, C.R. 1986. Ratio correlations and major element mobility an altered basalts and komatiites. *Contr. Mineral. Petrol.*, vol. 93, pp. 89-97.
- Russel, J.K. and Nicholls, J. 1990. Formulation and testing of scientific hypotheses. In: Theory and application of Pearce Element Ratios to geochemical data analysis. Eds: Russel, J.K. and Stanley, C.R., *Geol. Ass. Can., Short Course vol. 8*, pp. 1-10.
- Rutherford, M.J. and Devine, J.D. 2003. Magmatic conditions and magma ascent as indicated by Hornblende phase equilibria and reactions in the 1995-2002 soufrière hills magma. *Jour. Petrol.*, vol. 44, pp. 1433-1454.
- Sage, R.P., Lightfoot, P.C. and Doherty, W. 1996. Bimodal cyclical Archean basalts and rhyolites from the Michipicoten (Wawa) greenstone belt, Ontario: geochemical evidence for magma contributions from the asthenospheric mantle and ancient continental lithosphere near the southern margin of the Superior Province. *Precambrian Research*, vol.76, 119-153.
- Schmidt, M.W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contr. Mineral. Petrol.*, vol. 110, pp. 304-310.
- Thurston, P.C. 1981. Economic evaluation of Archaean felsic volcanic rocks using REE geochemistry. In: Glover, J.E. and Groves, D.I. eds., *Archaean geology. Second International Symposium, Perth 1980. Spec. Publ. 7, Australian Geological Survey.*, pp. 439-450.
- Whalen, J.B., McNicholl, V.J., Galley, A.G. and Longstaffe, F.J. 2004. Tectonic and metallogenic importance of an Archean composite high- and low-Al tonalite suite, Western Superior Province, Canada. *Prec. Res.*, in press.
- Whitford, D.J. and Cameron, M.A. 1987. Trace-element geochemistry of ore-associated and barren felsic metavolcanic rocks in the Superior Province, Canada: Discussion. *Can. Jour. Earth Sci.*, vol. 24, pp. 1498-1500.

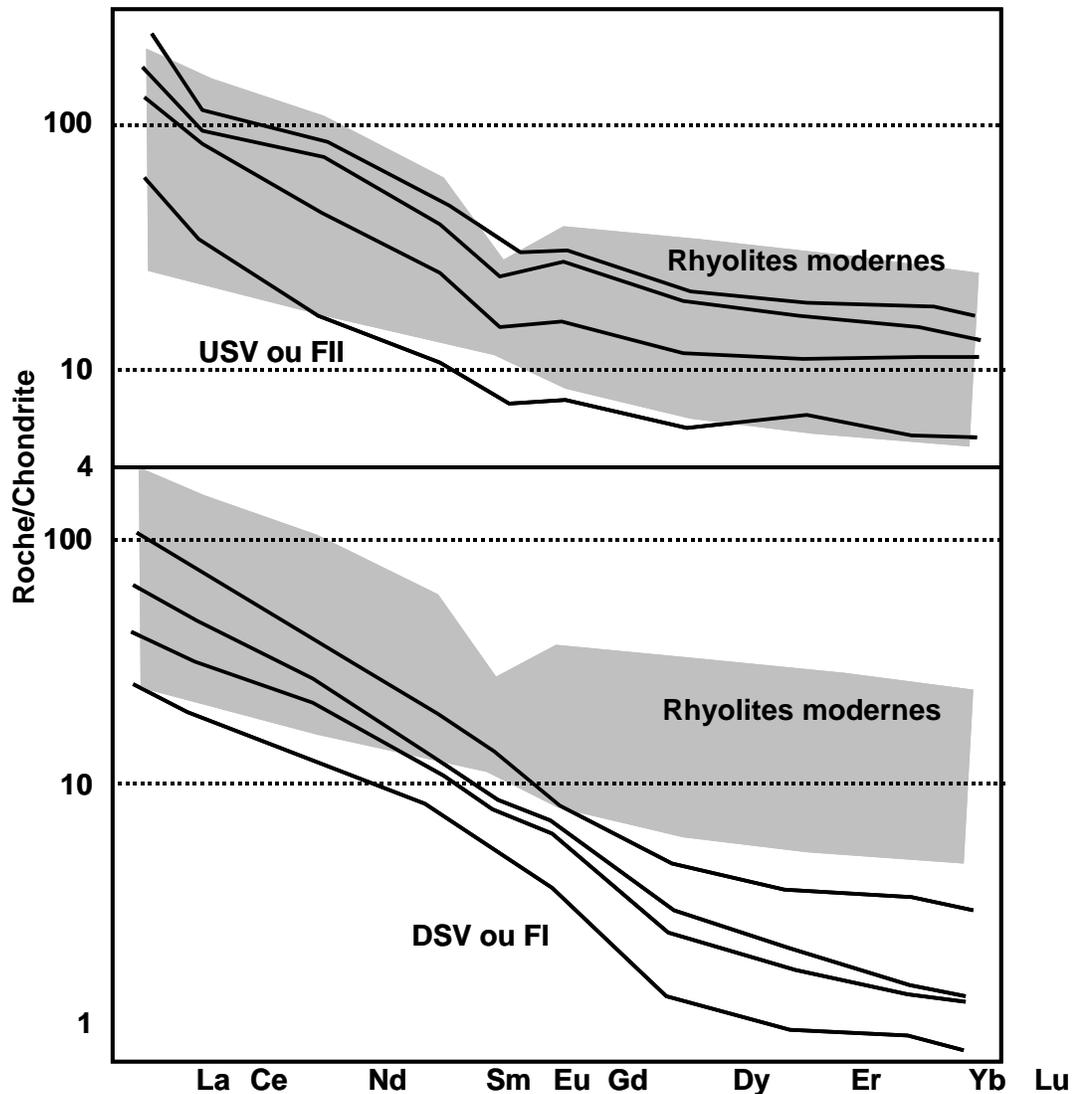


Figure 1. Définition des FI et FII selon Condie (1976). Cette classification est basée sur une comparaison entre les rhyolites modernes (enveloppe en gris) et les rhyolites archéennes. Les rhyolites archéennes définissent deux groupes, les « Depleted Siliceous Volcanics – DSV » et les « Undepleted Siliceous Volcanics – USV ». Par la suite, Condie (1981b) réfère à ces groupes sous l'appellation respective de FI et FII. [Retour au texte](#)

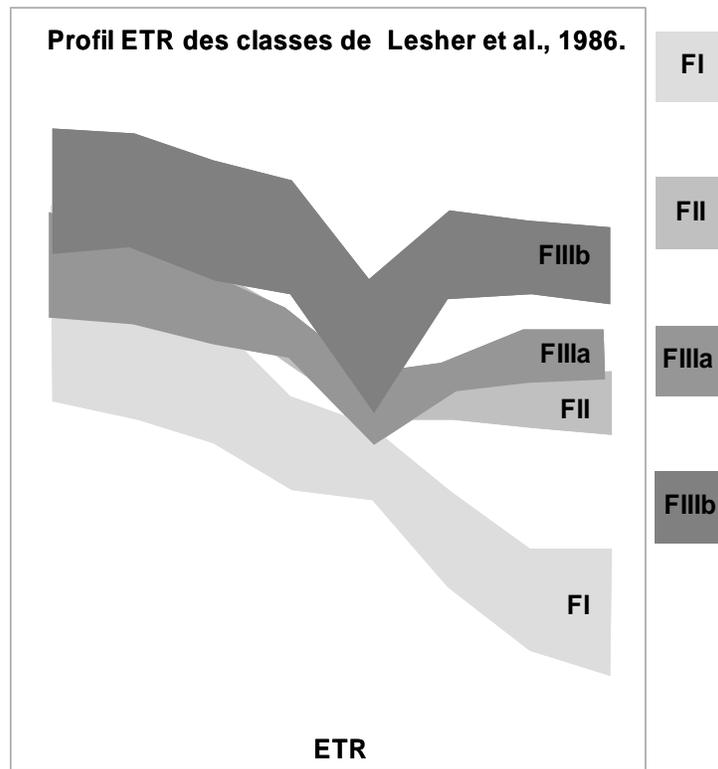


Figure 2. Classification des rhyolites selon Lesher et al. (1986). [Retour au texte](#)

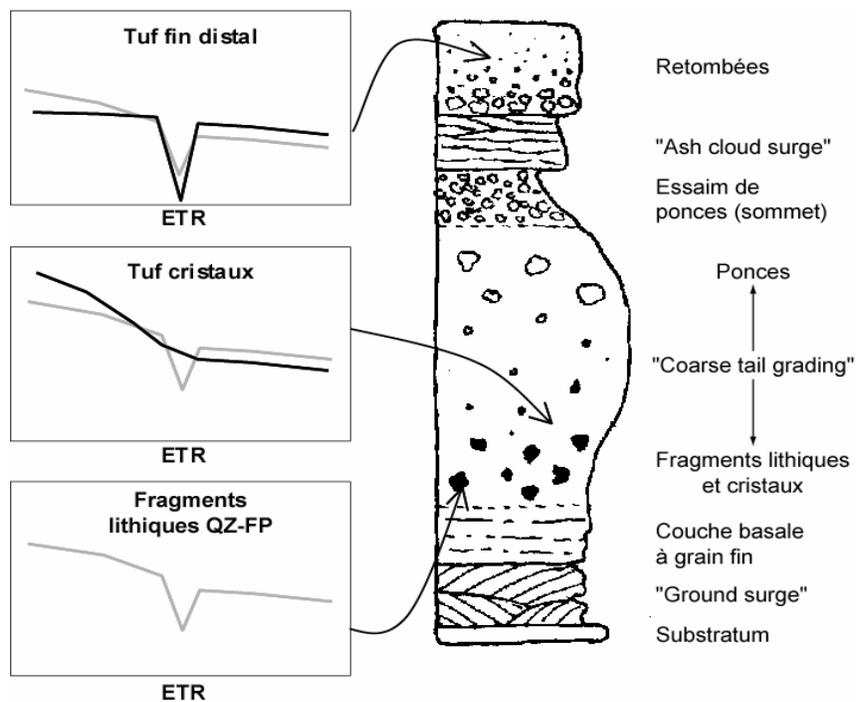


Figure 3. Fractionnement mécanique des ETR. Dans cet exemple, la signature ignée de la rhyolite peut être évaluée par les grands fragments lithiques. [Retour au texte](#)

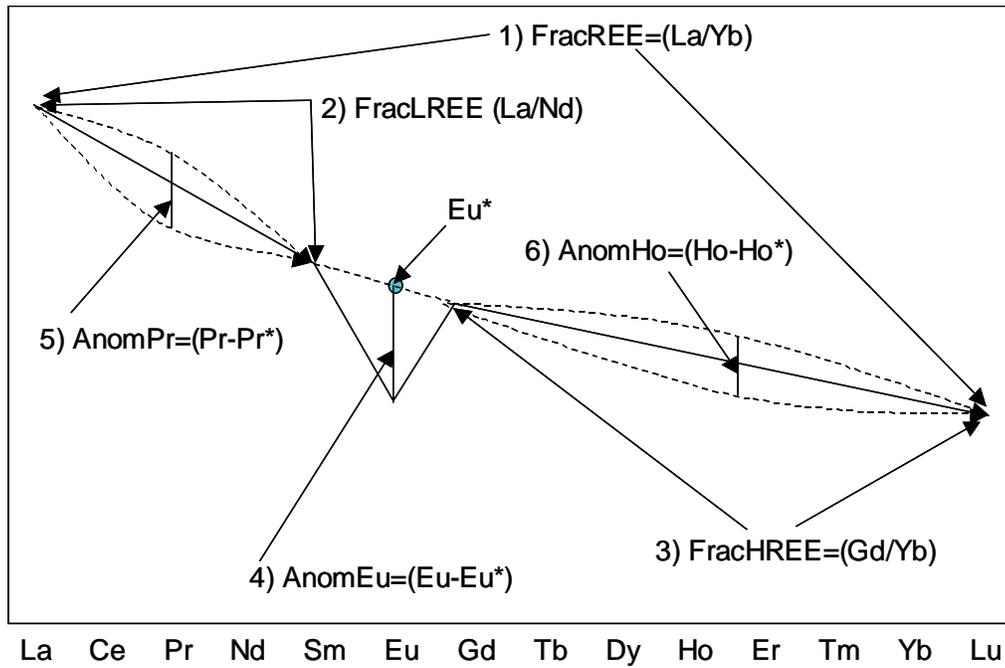


Figure 4. Définition des ratios inter-éléments définissant la géométrie de la courbe de fractionnement des ETR. [Retour au texte](#)

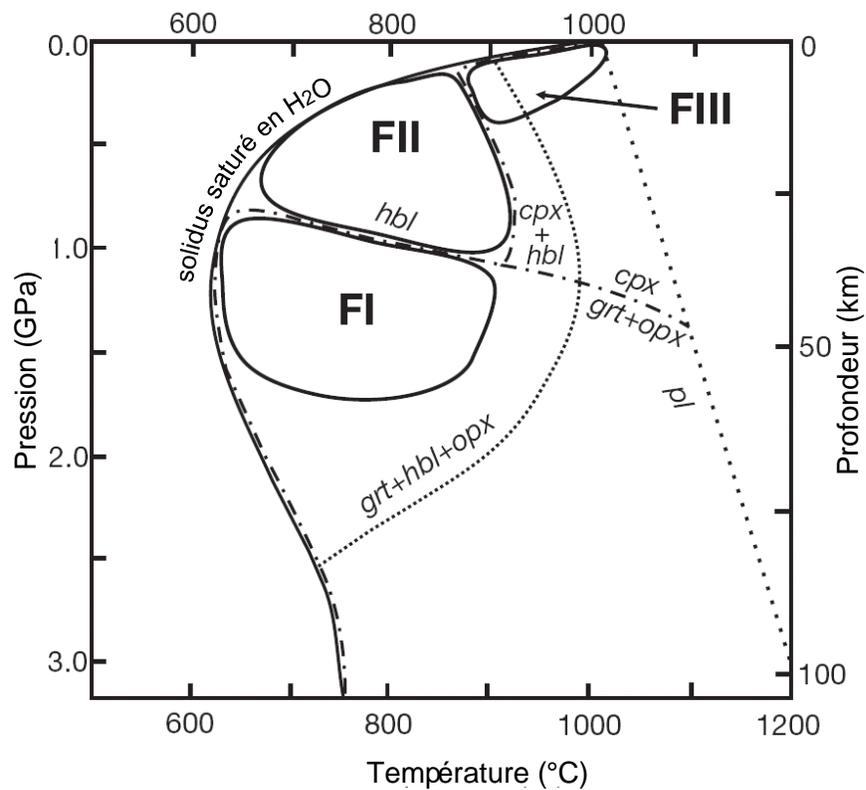


Figure 5. Diagramme d'équilibre de phases. Tiré de Hart et al. (2004). [Retour au texte](#)

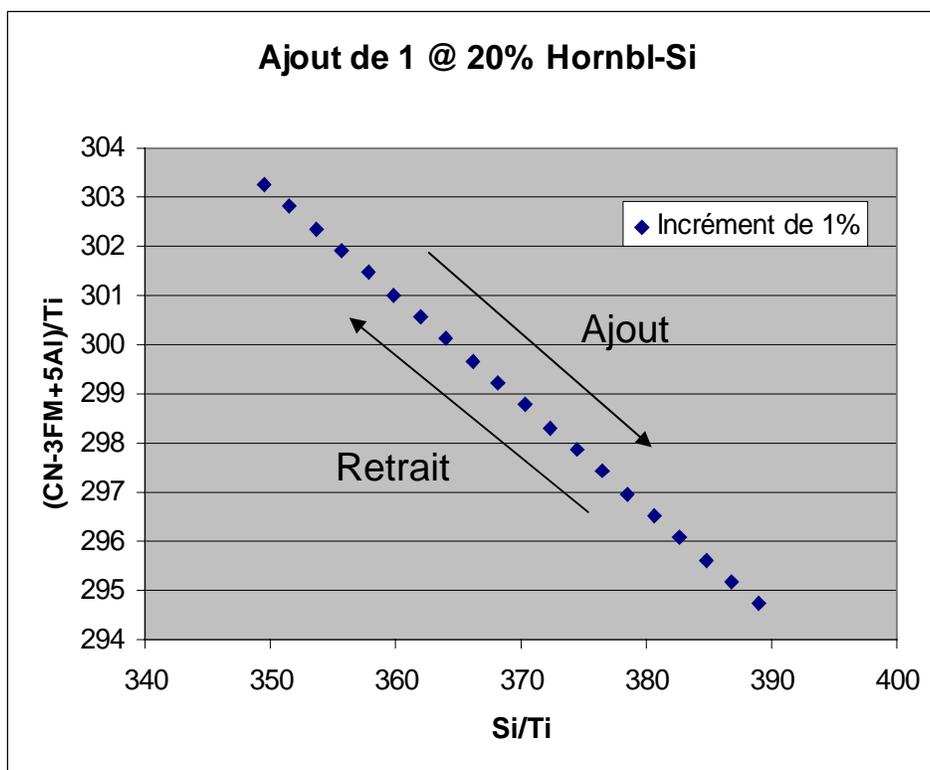
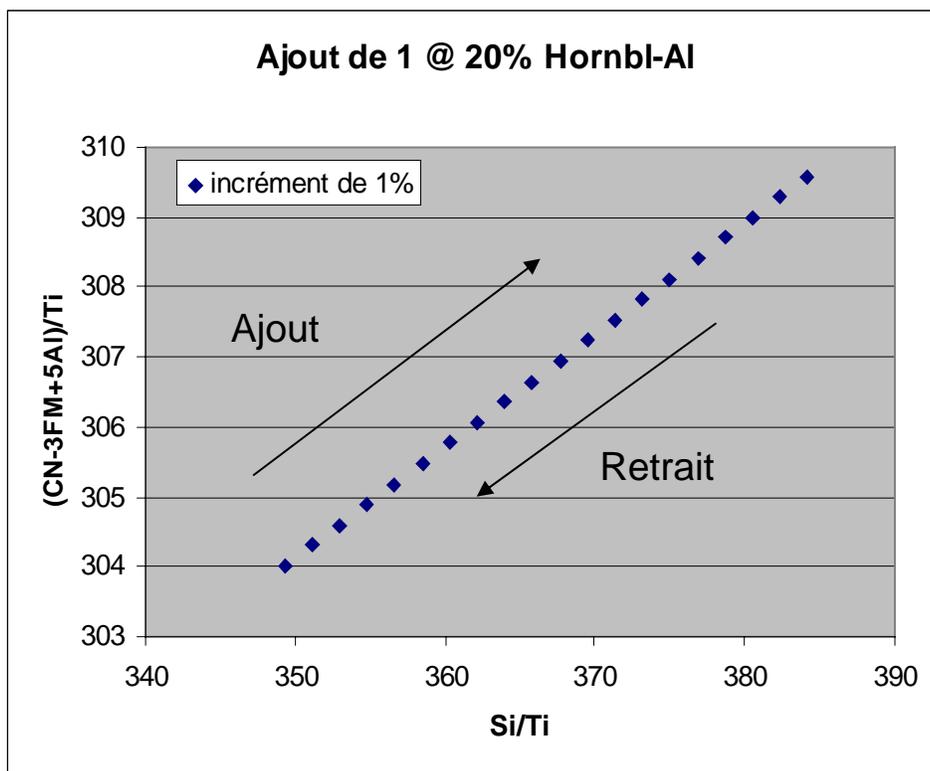


Figure 6. Vérification de l'incidence du fractionnement. [Retour au texte](#)

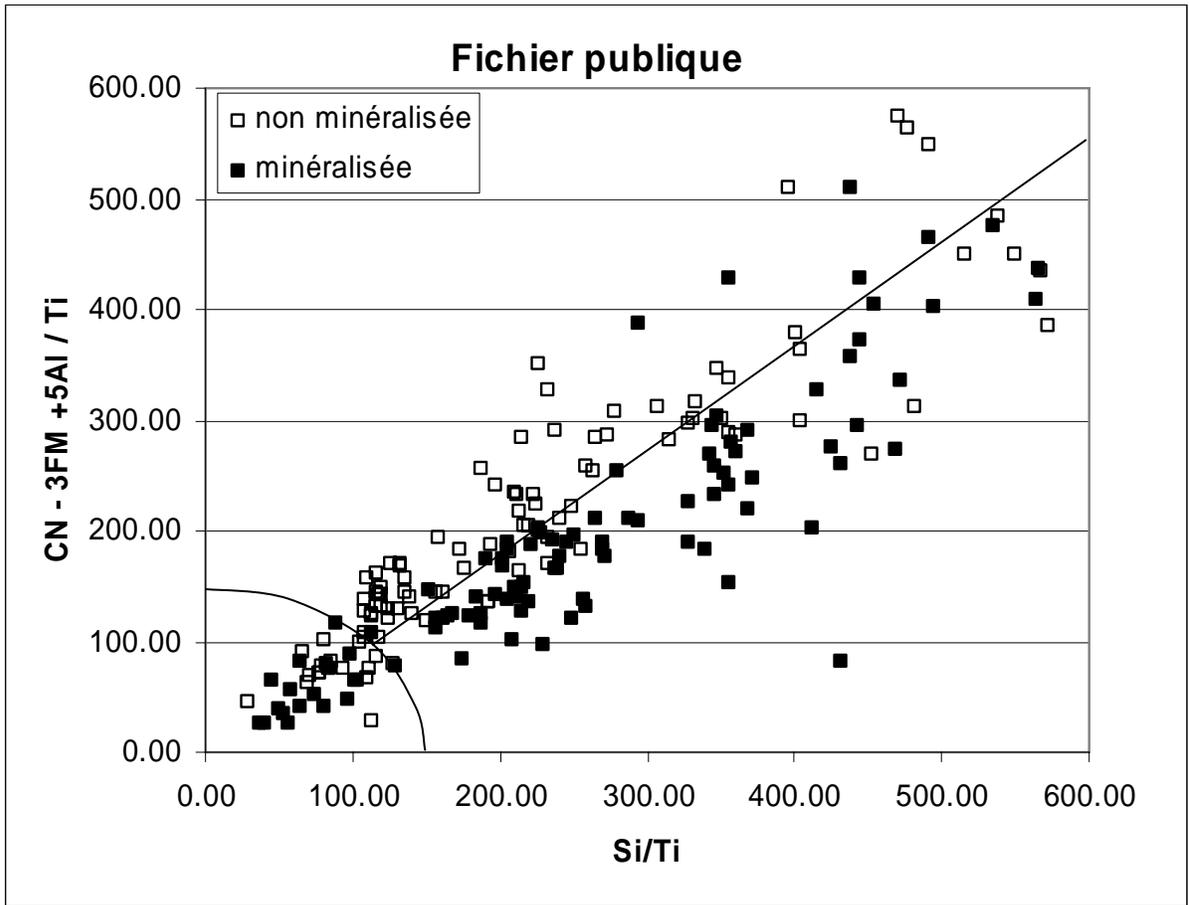


Figure 7. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier public. [Retour au texte](#)

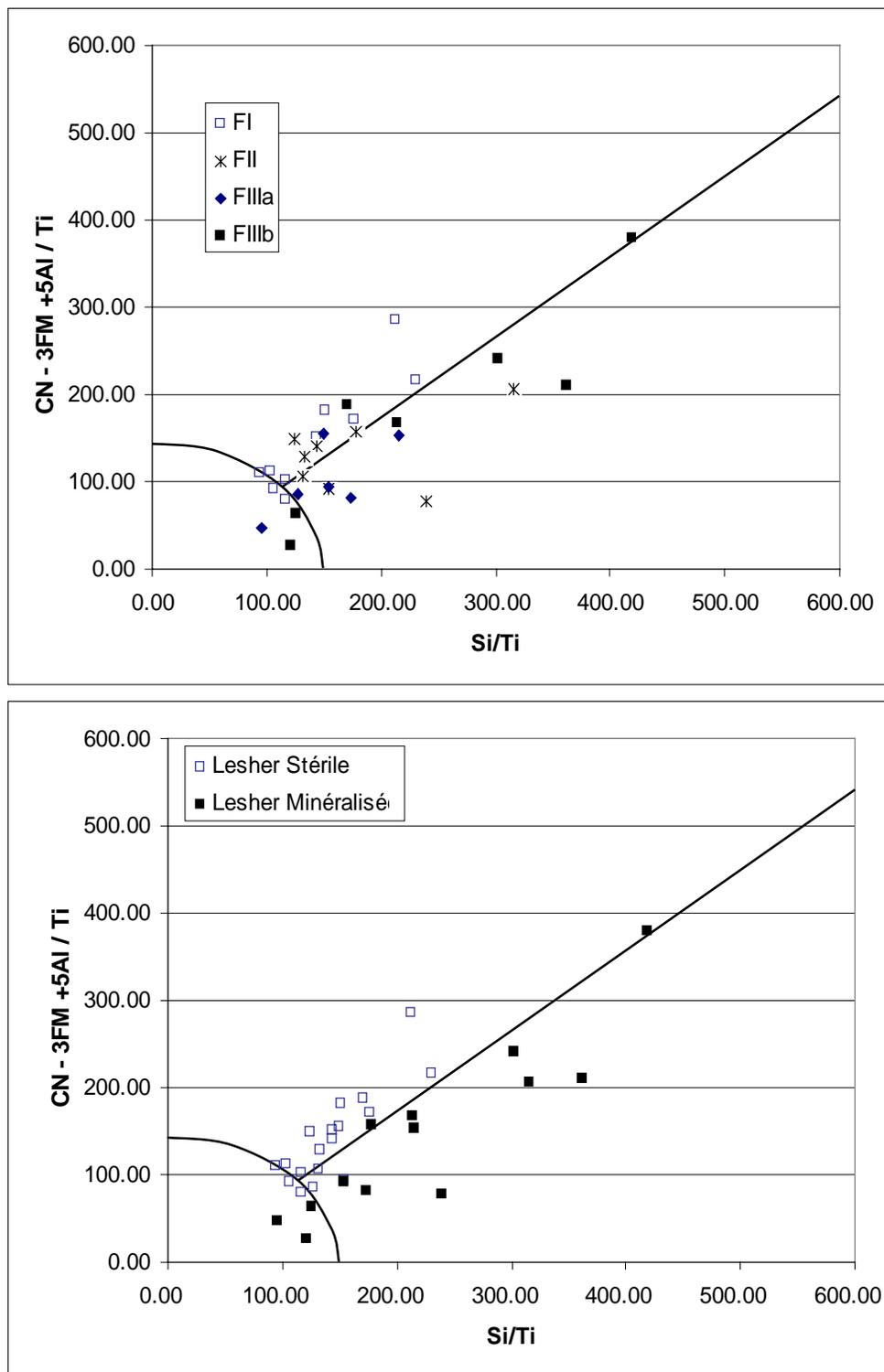


Figure 8. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier Lesher (Lesher et al., 1986).
[Retour au texte](#)

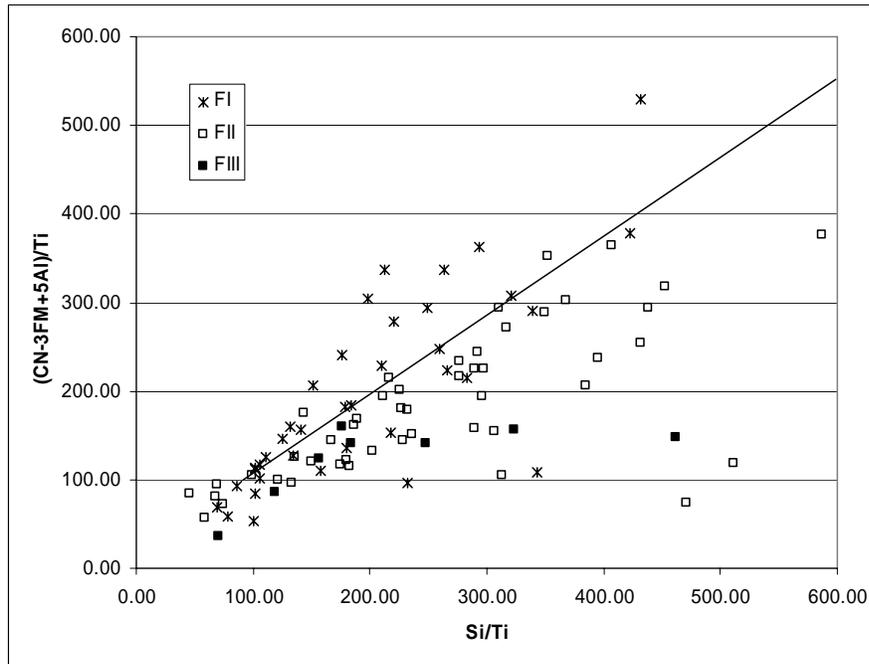


Figure 9. Résultat de la classification PER-GH en utilisant le fichier CONSOREM. [Retour au texte](#)

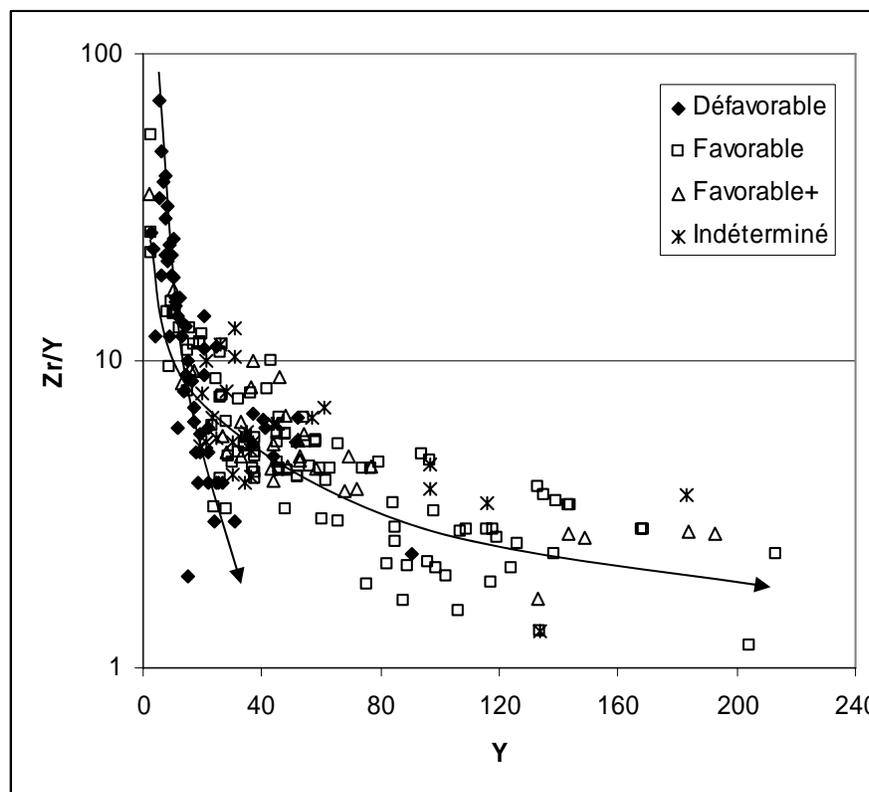


Figure 10. Caractéristiques Y-Zr des quatre classes de fertilité relative mises en relief par le PER-GH. [Retour au texte](#)

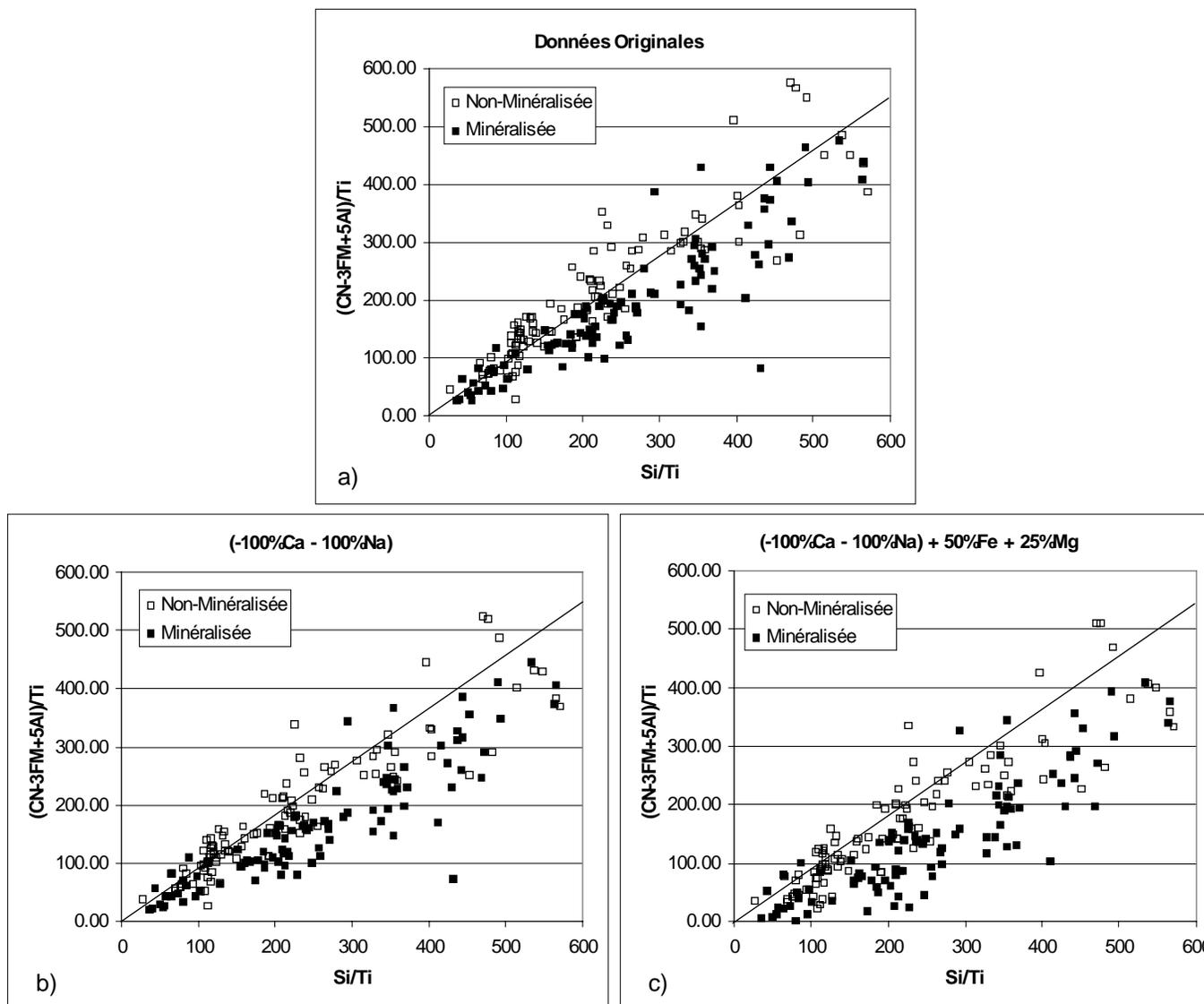


Figure 11. Test de sensibilité de l'indice PER-GH en fonction de l'altération. a) données brutes, b) lessivage du Ca-Na, c) lessivage du Ca-Na et ajout de 50% de Fe et 25% de Mg. [Retour au texte](#)

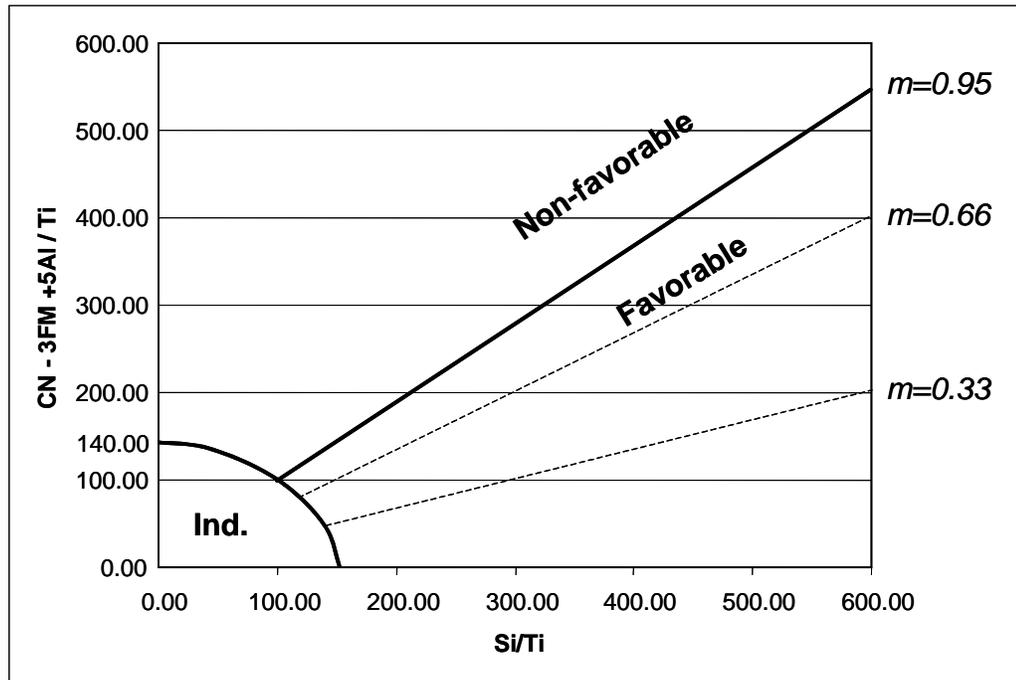


Figure 12. Définition des principaux champs du diagramme PER-GH. [Retour au texte](#)