

## CR 2007-06

Classification géochimique des environnements volcaniques mafiques favorables, projet  
2006-09

Documents complémentaires

*Additional Files*



**Licence**



*Licence*

Cette première page a été ajoutée  
au document et ne fait pas partie du  
rapport tel que soumis par les auteurs.

**Ressources naturelles  
et Forêts**

**Québec** 

---

# **Classification géochimique des environnements volcaniques mafiques favorables**

Un nouvel indice de classification des volcanites mafiques pour la reconnaissance des environnements fertiles : « L'indice de fertilité Mafique - IFM »

---

**PROJET 2006-09**

PAR : VITAL PEARSON

JUIN 2007



**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 :

*Pearson, V. 2007. Classification géochimique des environnements volcaniques mafiques favorables. Rapport du projet CONSOREM 2006-09, 33p.*

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

---

## AVANT-PROPOS

---

Cette étude représente à plus d'un égard la continuité du projet 2004-02, lequel concernait la caractérisation lithogéochimique des environnements volcaniques felsiques favorables. Ainsi, les objectifs du projet de caractérisation des environnements volcaniques mafiques favorables découlent directement des conclusions de son prédécesseur. Il est donc fortement recommandé de consulter le rapport 2004-02 (Pearson, 2007) afin de bien cerner la démarche et ainsi mieux comprendre les choix spécifiques de l'approche présentée dans la présente étude.

Les mots andésites et basaltes seront utilisés de façon générique pour désigner deux segments spécifiques de la suite de différenciation des roches volcaniques. La source de la nomenclature qui peut être celle d'un auteur (dénomination mésoscopique), modale (pétrographique), normative (CIPW) ou chimique (diagrammes de classification) sera spécifiée selon le cas. Le vocable mafique sera utilisé pour désigner collectivement les andésites et basaltes.

---

## RÉSUMÉ

---

L'utilisation de la géochimie des séquences de roches volcaniques comme indicateur de fertilité pour les minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) représente une problématique sur laquelle de nombreux chercheurs se sont attardés. Toutefois, l'essentiel de ces travaux est applicable à une portion spécifique de la suite de différenciation, c'est-à-dire les roches volcaniques felsiques (dacite et rhyolite). La présente contribution a pour objectif d'étendre le spectre d'application de cette procédure aux compositions intermédiaires à mafiques (andésite et basaltes).

Une base de données lithogéochimiques contenant des basaltes et des andésites a été compilée. L'étude a démontré l'importance d'utiliser une classification qui reflète les processus pétrogénétiques comme la classification de De la Roche et al. (1980). Outre la composition en éléments majeurs, traces et du groupe des terres rares, cette base de données contient des informations relatives à une classification « a priori » de la fertilité à l'égard des sulfures massifs volcanogènes. Cette dernière information, qui est qualitative, a pour objectif d'attribuer à chaque analyse une association factuelle à la présence ou à l'absence de minéralisation dans les unités environnantes. Les deux groupes ainsi formés (andésites avec minéralisation associée et andésites sans minéralisation associée) ont été comparés à l'aide de méthodes statistiques exploratoires afin de mettre en relief toutes caractéristiques distinctives. Une procédure similaire a été utilisée pour les basaltes.

Ce travail met en évidence que les deux groupes « avec » et « sans minéralisation » sont statistiquement distincts. Pour les andésites, l'analyse factorielle discriminante permet d'optimiser la reconnaissance des secteurs d'intérêt par l'introduction de l'indice de fertilité mafique (IFM), lequel représente la probabilité qu'une roche appartienne à une séquence hôte de minéralisations SMV. Pour les basaltes, la relation entre la composition géochimique et la minéralisation est non linéaire, ce qui rend inopérante l'approche de l'analyse factorielle discriminante. Dans ce dernier cas, la différence entre les deux groupes, mise en relief par l'analyse statistique exploratoire, a pu être répliquée avec succès par la méthode des réseaux neuronaux.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

AVERTISSEMENT .....	i
Avant-propos .....	ii
Résumé .....	iii
Table des matières .....	iv
Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux .....	v
1 Introduction .....	1
1.1 Objectifs .....	1
1.2 Travaux antérieurs .....	1
2 Méthodologie .....	2
2.1 Approche conceptuelle .....	2
2.2 Approche empirique .....	2
3 Caractérisation des roches hôtes .....	2
3.1 Données utilisées .....	2
3.2 Dénomination et classification des analyses .....	2
4 Caractéristiques de la base de données .....	3
5 Classification des environnements fertiles .....	4
5.1 Andésites .....	4
5.1.1 Statistiques exploratoires .....	5
5.1.2 Statistiques multivariées .....	9
5.1.3 Exemples d'application pour les andésites .....	12
5.2 Basaltes .....	16
5.2.1 Statistiques exploratoires .....	18
5.2.2 Statistiques multivariées .....	18
5.2.3 Exemple d'application pour les basaltes .....	24
6 Discussion - Conclusions .....	26
Références .....	27

---

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1. Distribution du résultat de classement des andésites par l'AFD utilisant les éléments majeurs. La valeur illustrée correspond à l'indice de fertilité mafique (IFM) .....	13
Figure 2. Résultat de l'AFD (éléments majeurs) appliquée à la Sous-province de l'Abitibi. Les points rouges correspondent aux andésites classifiées fertiles pour les minéralisations SMV (selon l'IFM), les points bleus seraient non favorables et les croix montrent un résultat considéré ambivalent. ....	14
Figure 3. Fertilité relative des andésites évaluée par la méthode de l'AFD. La maille est calculée selon la méthode de l'inverse de la distance. ....	15
Figure 4. Coefficient de partition des ETR en fonction de la composition du magma (figure modifiée de Rollinson, 1993). ....	16
Figure 5. Résultat de l'ARN pour les trois populations. Les histogrammes donnent la sensibilité relative des paramètres. Rcl=reclassement. ....	23
Figure 6. Classification de la fertilité relative des basaltes évaluée par la méthode des réseaux neuronaux. ....	25

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1.	Andésites répertoriées pour évaluer les relations entre la géochimie des environnements mafiques et les minéralisations SMV.....	5
Tableau 2 :	Composition moyenne des andésites – « Avec SMV ».....	7
Tableau 3 :	Composition moyenne des andésites – « Sans SMV » .....	8
Tableau 4 :	Matrice de confusion de l'AFD à 12 éléments .....	9
Tableau 5 :	Paramètres de l'équation de l'AFD à 12 variables explicatives .....	10
Tableau 6 :	Matrice de confusion de l'AFD à 5 éléments. ....	10
Tableau 7 :	Paramètres de l'équation de l'AFD à 5 variables explicatives. ....	11
Tableau 8 :	Matrice de confusion de l'AFD utilisant les éléments majeurs.....	11
Tableau 9 :	Paramètres de l'équation de l'AFD des éléments majeurs. ....	12
Tableau 10 :	Basaltes répertoriés pour évaluer les relations entre la géochimie des environnements mafiques et les minéralisations SMV.....	16
Tableau 11 :	Composition moyenne des basaltes – « Avec SMV ».....	19
Tableau 12 :	Composition moyenne des basaltes – « Sans SMV ». ....	20
Tableau 13 :	Matrice de confusion de l'AFD pour les basaltes. ....	21
Tableau 14 :	Paramètres de l'équation de l'AFD pour les basaltes.....	21

---

## 1 INTRODUCTION

---

L'établissement d'une relation spatiale et/ou génétique entre les minéralisations volcanogènes et la signature lithogéochimique des séquences hôtes est un champ d'étude qui couvre autant le traitement des altérations hydrothermales (p. ex. Gresens, 1967; Ishikawa et al., 1976; Graf, 1977; Barrett and McLean, 1999; Piché et Jébrak, 2004) que les processus pétrogénétiques (p. ex. Leshner et al., 1986; Barrie et al., 1993; Lentz, 1998; Hart et al., 2004; Pearson, 2007). Dans le premier cas, l'attention est portée sur le métasomatisme causé par l'hydrothermalisme et est donc en lien direct avec un événement potentiellement minéralisateur. Cette approche est utilisée pour l'ensemble du spectre de différenciation basalte – andésite – dacite – rhyolite. Dans le second cas toutefois, la relation est indirecte puisque la signature pétrogénétique est porteuse d'une information associée à la géodynamique et plus particulièrement à la bathymétrie des sources de fusion partielle. Cette seconde approche est beaucoup plus zonale que focale dans ce sens qu'elle permet d'évaluer la « favorabilité » d'unités géologiques de plus grandes étendues (critère régional). Cependant, celle-ci est essentiellement appliquée au spectre le plus felsique de la suite de différenciation (dacite – rhyolite). Puisque les roches mafiques (andésite<sup>1</sup> – basalte) représentent la plus grande part volumétrique des ceintures de roches vertes, un outil pouvant mettre en relief une association préférentielle de certaines suites mafiques avec les minéralisations de type SMV constituerait un outil tangible pour la sélection de territoires d'intérêt.

### Hypothèse de travail

Considérant les conclusions du projet 2004-02 (Pearson, 2007), à l'effet que les rhyolites conservent l'empreinte du fractionnement de phases mafiques tels le grenat et la hornblende, la question qui est posée est de savoir s'il est possible de reconnaître cette empreinte dans la portion mafique de la suite de fractionnement ?

## 1.1 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est donc de définir une méthodologie pour distinguer les environnements mafiques présentant des minéralisations de sulfures massifs volcanogènes de ceux qui en sont dépourvus.

## 1.2 Travaux antérieurs

Peu de travaux se sont attardés à l'étude des suites mafiques et de leurs associations avec les minéralisations hydrothermales volcanogènes. Les deux principales contributions sont celles de Barries et al. (1993) et de CAMIRO à travers le projet 93E06 (<http://www.camiro.org>). Selon Hart et al. (2004), les fondements scientifiques de cette étude reposent sur les relations entre éléments traces qui, grâce à une grande précision analytique, permettent de caractériser les contextes géodynamiques des roches volcaniques mafiques et ultramafiques. Considérant le précepte que certains contextes géodynamiques sont foncièrement favorables à la génération de gisements SMV, ces analyses permettent de discriminer les assemblages volcaniques fertiles de ceux non fertiles.

Toutefois, les résultats obtenus à ce jour sont mitigés et aucune méthode formelle de discrimination n'a été proposée.

---

<sup>1</sup> Le terme andésite est ici inclus dans la partie mafique du spectre compositionnel bien que plusieurs auteurs le considèrent de composition intermédiaire.



---

## **2 MÉTHODOLOGIE**

---

### **2.1 Approche conceptuelle**

Le trait commun des deux études citées dans la section précédente est d'utiliser les éléments traces afin de caractériser les environnements géodynamiques. Cette démarche est donc centrée sur les processus pétrogénétiques afin de vérifier l'association ou la non-association de ces environnements avec les minéralisations. Dans ces études, la comparaison se fait donc entre des environnements géodynamiques interprétés.

### **2.2 Approche empirique**

Dans la présente étude, la comparaison se fait entre la composition géochimique et les minéralisations sans égard à l'interprétation d'un environnement géodynamique. L'approche proposée est donc empirique, c.-à-d. que des signatures géochimiques de roches mafiques provenant d'environnements minéralisés et non minéralisés seront documentées et comparées à l'aide de statistiques.

---

## **3 CARACTÉRISATION DES ROCHES HÔTES**

---

Une association positive entre des roches andésitiques et basaltiques provenant de séquences qui contiennent des minéralisations est relativement simple à établir et se définit par la simple présence de corps minéralisés reconnus. La situation est toutefois fort différente pour établir une association négative, car l'absence de minéralisation au sein d'une séquence mafique peut ne représenter qu'un état de connaissance. Pour minimiser l'incidence de cette incertitude, les secteurs non minéralisés seront définis comme ceux pour lesquels une somme suffisante de connaissances est disponible sans que des minéralisations n'y aient été découvertes à ce jour.

### **3.1 Données utilisées**

Les données utilisées proviennent de la littérature. Près d'une centaine de publications ont servi à établir une base de données lithogéochimiques visant à caractériser différents environnements. Les données recueillies proviennent de ceintures archéennes dont l'âge se situe entre 2500 et 3000 Ma. Une attention particulière a été portée aux articles dont les résultats analytiques couvrent un spectre similaire d'éléments majeurs, traces et de terres rares.

### **3.2 Dénomination et classification des analyses**

La définition de ce que sont une andésite et/ou un basalte peut sembler une évidence, toutefois il s'avère que la méthode de classification utilisée pour la dénomination des roches a une incidence marquée sur les résultats. D'emblée, les auteurs proposent un nom de roche pour les analyses publiées, cette dénomination n'est toutefois soumise à aucune règle particulière. Ainsi, certains utilisent une appellation de terrain (p. ex. Streckeisen, 1976) et d'autres utilisent un schème de classification particulier tels les diagrammes TAS (Le Bas et al., 1992), AFM (Jensen, 1976), SiO<sub>2</sub> vs Ti/Zr (Winchester and Floyd, 1977), etc. Cette absence de procédure formelle pour la dénomination des roches est un problème d'homogénéité lors de l'utilisation de bases de données multi sources. Un

test rapide comparant des méthodes de classification couramment utilisées montre que le nom attribué diverge substantiellement d'un diagramme à l'autre.

Il est d'autant plus important d'utiliser une méthode de dénomination homogène lorsqu'on souhaite mettre en relief une relation (potentielle) entre des minéralisations et un type particulier de roche mafique. L'existence d'une telle relation devra idéalement reposer des dénominations qui reflètent davantage les processus pétrogénétiques. Par exemple, le processus classique de dénomination des roches plutoniques s'établit via les minéraux présents (c.-à-d. le diagramme QAFP de Streckeisen, 1976). Pour des roches aphyriques, la minéralogie normative est calculée à partir des éléments majeurs (CIPW), en suivant les règles de cristallisation de Bowen (1928). Cette procédure est valable pour les roches intermédiaires à felsiques (moins de 10 % de minéraux mafiques), mais est non appropriée pour les roches mafiques. Ainsi, l'approche qui a été privilégiée est l'utilisation du tétraèdre des basaltes (Yoder and Tilley, 1962) ayant comme pôles le quartz, l'olivine, la néphéline et le diopside et qui est beaucoup plus représentative des processus ayant cours lors de l'évolution des magmas mafiques.

L'importance d'utiliser des phases minérales pour la classification des roches tient du fait que les éléments majeurs, traces et terres rares montrent un comportement fondamentalement sensible à la stœchiométrie des phases en présence (ex. : Fe-Mg et olivine; Rb-Sr et plagioclase; ETR lourds et grenat). Dans le cas du grenat, ce n'est pas la présence du  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ni du CaO qui le rend sensible aux ETR lourds, mais les caractéristiques stœchiométriques de sa maille cristalline qui accommode favorablement ces éléments. Donc, pour mettre en relief une caractéristique inter-élémentaire dans une roche mafique, il faut que la dénomination de cette dernière ait été faite selon les mêmes critères ayant conduit à cette caractéristique, c'est-à-dire un processus pétrogénétique.

Un diagramme apparaît être tout à fait approprié pour ce type de classification. Il s'agit du diagramme binaire R1R2 proposé par De la Roche et al. (1980) et dont les axes représentent deux facteurs multi-élémentaires respectant la stœchiométrie des phases (c.-à-d. le tétraèdre des basaltes de Yoder and Tilley, 1962).

Afin d'homogénéiser la base de données, et en dépit du nom de roche proposé dans la littérature, la classification des roches mafiques sera établie selon la méthode de De la Roche (1980). Par exemple, lors de la compilation des données et en utilisant la dénomination des auteurs, 231 andésites ont été répertoriées. De ce nombre, seulement 50 correspondent à des andésites selon le diagramme R1R2. De plus, des 414 basaltes provenant de la classification des auteurs, 39 sont des andésites selon le diagramme R1R2. La base de données utilisée pour cette étude contient donc 89 andésites et 556 basaltes selon la classification de De la Roche et al. (1980).

Enfin, mentionnons que la méthode de classification des roches a une incidence marquée sur la population d'analyses répertoriées, sur l'ensemble des caractéristiques chimiques de cette population et sur la répartition géographique des sites d'échantillonnage.

---

## 4 CARACTÉRISTIQUES DE LA BASE DE DONNÉES

---

La base de données source contient plus de 1 350 échantillons compilés à partir de la littérature<sup>2</sup>. On y retrouve à la fois des dacites, des andésites et des basaltes (selon la dénomination du ou des auteurs), provenant de diverses ceintures de roches vertes à travers le monde.

---

<sup>2</sup> Wilson and Grant, 2006; Polat and Kerrich, 2001; Tomlinson et al., 1998; Hollings and Kerrich, 1999; Barley et al., 1998; Venneman and Smith, 1999; Coursen et al., 2006; Stern et al., 1995; Lentz, 1998; Roberts et al., 2003; Polat and Kerrich, 2000; Kerrich et al., 1998; Tomlinson et al., 1999; Wyman and Hollins, 1998; Maurice et al., 2003; Wyman et al., 2002; Kerrich et al., 1999; Fan and Kerrich, 1997; Wyman, 1999; Hollings et al., 1999; Hollings, 2002; Campbell et al., 1994; Polat et al., 1998; Vearncombe and Kerrich, 1999; Barrett et al.,

Tous ces échantillons ne peuvent toutefois pas être utilisés pour l'analyse des relations entre les roches mafiques et les minéralisations. Différents critères de sélection ont été appliqués afin de s'assurer de l'homogénéité des analyses. Le premier critère concerne l'âge de la séquence analysée. Il a été démontré que les séquences phanérozoïques montrent occasionnellement des particularités qui ne se retrouvent pas à l'Archéen (Hart et al., 2004; Lentz, 1998). Afin d'éviter l'interférence de processus particulier, l'échantillonnage a été limité aux séquences dont l'âge se situe entre 2,5 et 3,0 Ga. Deuxièmement, malgré le fait que les analyses provenant de la littérature soient dites « fraîches », un test basé sur la mobilité des alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ ; utilisation du diagramme de Hughes, 1973) montre que plus de la moitié des analyses répertoriées ont des signes significatifs de métasomatisme. Ces dernières ont donc été retirées du traitement. Troisièmement, les échantillons pour lesquels la relation avec les minéralisations est inconnue ou trop ambiguë ont également été retirés. Finalement, pour les raisons évoquées plus haut, les roches ont été reclassées en utilisant la classification de De la Roche (1980).

Suivant cette procédure, un fichier contenant 87 andésites, dont 45 associées à des séquences minéralisées et 44 associées à des séquences dépourvues de minéralisation, a été construit. Pour les basaltes, 221 analyses ont été traitées, dont 62 associées à des séquences minéralisées et 159 associées à des séquences dépourvues de minéralisation. On explique l'utilisation limitée à seulement un cinquième des échantillons de la base de données à la complexité des processus en cours, ce qui nécessite de restreindre le nombre de variables afin de pouvoir mettre en relief une composante particulière associée à la bathymétrie des sources magmatiques.

---

## 5 CLASSIFICATION DES ENVIRONNEMENTS FERTILES

---

### 5.1 Andésites

Le **Tableau 1** montre les unités andésitiques utilisées pour l'analyse des relations entre ce type de roches et les minéralisations de SMV. Rappelons que la sélection de ce groupe relativement restreint a demandé la compilation de près de 500 échantillons (classification à priori « andésitique » des auteurs). On y voit une proportion équivalente entre les séquences minéralisées et non minéralisées.

---

1994; Barrie and Pattison, 1999; Beakhouse et al., 1999; Bhaskar Rao et al., 1992; Boily and Dion, 2002; Brenner et al., 1990; Brown et al., 2002; Cattalani et al., 1995; Condie, and Harrison, 1976; Cousens et al., 2002; Da Fonseca et al., 1997; De Souza et al., 2001; Dostal, and Mueller, 1992; Dubé, 1993; Lafrance et al., 2000; Ferrari, and Choudhuri, 2004; Ujike and Goodwin, 1987; Yuanming and Fleet, 1995; Morris and Witt, 1997; Halkoaho et al., 2000; Hollings et al., 2000; Hollings et al., 1999; Hunter and Verbeek, 1993; Ichang'l and MacLean, 1991; Kampunzu et al., 2003; Kroner et al., 2000; Laflèche et al., 1992a; Laflèche et al., 1992b; Lafrance et al., 2003; Liaghat and MacLean, 1995; MacLean and Hoy, 1991; Manikyamba et al., 2004; Marquis et al., 1992; Barrett et al., 1992; Barrett et al., 1991a; Barrett et al., 1991b; Messenger, 2000; Barrie and Shirey, 1991; Ootes, and Lentz, 2002; Scott et al., 2002; Polat, 1999; Polat et al., 1999; Puchetl et al., 1999; Renaud et al., 2002; Rollinson, 1999; Sage et al., 1996; Schandl et al., 1999; Schandl et al., 1995; Schulz, 1980; Shegelski, 1982; Skulski and Percival, 1996; Srivastava et al., 2004; Stone et al., 1995; Fowler et al., 2002; Svetov et al., 2001; Thurston and Fryer, 1983; Ashley et al., 1998; Larson and Hutchinson, 1993; Tomlinson et al., 2002; Barrett et al., 1993; Wang et al., 2004; Wyman et al., 1999; Xie et al., 1993; Yamashita et al., 2000

**Tableau 1.** Andésites répertoriées pour évaluer les relations entre la géochimie des environnements mafiques et les minéralisations SMV.

	Unité	Nombre
Avec SMV, n=45	Confederation lake, Cycle 3	2
	Delbridge	6
	Kamiskotia	1
	Kidd Creek	4
	Kidd creek (LOTI)	3
	Manitouwadge	14
	Normétal	1
	Ruostesuo	3
	Rusty Ridge	4
	Schreiber	3
	Selbaie	1
	Watson Lake	1
Sans SMV, n=44	Munro, Abitibi	5
	Bastar	3
	Black Flag, Kalgoorlie	5
	Confederation lake, Cycle 2	4
	Dayohessarah	2
	Dharwar	3
	Hanikahimajuk lake	1
	Heron bay	3
	Nzuse, Kaapvaal	1
	Shreiber	8
	Upper Heva	1
	White river	5
	Wutai	1
	Banting, Yellowknife	1
	Duck Fm., Yellowknife	1

### 5.1.1 Statistiques exploratoires

Une première analyse du fichier des andésites permet de vérifier s'il existe des différences statistiquement significatives entre les séquences hôtes de minéralisations et celles qui en sont dépourvues. Les principaux paramètres de cette analyse sont donnés aux **Tableaux 2 et 3** qui présentent respectivement les caractéristiques des andésites « Avec SMV » et « Sans SMV ». Dans chacun de ces tableaux, six paramètres sont présentés : 1) le nombre d'individus de l'échantillonnage ; 2) la moyenne pour chacun des éléments chimiques considérés<sup>3</sup>; 3) l'erreur sur la moyenne ( $\sigma/\sqrt{n}$ )<sup>4</sup>; 4) l'écart-type; 5) la valeur minimale et 6) la valeur maximale. Ces trois derniers paramètres permettent de qualifier la dispersion des valeurs.

<sup>3</sup> Afin d'éviter tout biais causé par la présence de valeurs extrêmes, les valeurs excédant la moyenne de plus ou moins trois écarts-types ont été retirés des calculs.

<sup>4</sup> Cette valeur est une appréciation de la précision et de la représentativité de la moyenne. Elle permet entre autres d'évaluer si l'écart de la moyenne entre les deux groupes d'andésites est statistiquement valable.

Seulement avec la composition en éléments majeurs, des différences apparaissent entre les groupes « Avec SMV » et « Sans SMV ». Tout d'abord, les contenus en  $\text{TiO}_2$  et en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tot diffèrent de manière significative à plus de deux écarts-types (c'est-à-dire qu'il y a plus de 95,44 % de chances que les deux populations soient différentes). Ces deux éléments ont un contenu accru dans les séquences minéralisées, suggérant potentiellement que ces andésites appartiennent à une suite d'affinité tholéiitique. D'autres parts, le  $\text{SiO}_2$  et le  $\text{MnO}$  diffèrent à plus d'un écart-type (il y a plus de 68,28 % de chances que les deux populations soient différentes). Finalement, d'autres distinctions sont observables tel le contenu en  $\text{K}_2\text{O}$ . Toutefois, l'étendue de la population (grand écart-type) indique que la validité de cette différence doit être validée en utilisant un meilleur échantillonnage.

Une suite d'éléments lithophiles et de transitions est également répertoriée. Le choix de ces éléments est dicté par la structure de la base de données et par la disponibilité des analyses. À cet effet, il est à noter que la population utilisée pour le Cs, Pb et Cu est très limitée et que de façon générale, une population de 30 échantillons représente un seuil sous lequel une statistique doit être traitée avec circonspection. Parmi ces éléments, quatre montrent un contenu statistiquement divergent : Sc, Sr, Ba et Ni. Très clairement, les éléments comme le V, Co, Pb et le Cu montrent un bon potentiel de discrimination, mais demandent à être documentés à l'aide de données supplémentaires.

Le contenu en éléments des terres rares et de quelques éléments lithophiles, que l'on sait être moins susceptible aux mobilisations métasomatiques, est également considéré. Encore ici, les groupes « Avec » et « Sans » minéralisations montrent des différences notoires. Le groupe d'éléments dont la différence est valide à plus de deux écarts-types (95,44 % de chances que les deux populations soient distinctes) est constitué du La, Ce, Yb, Lu, Nb, Th et Y. À plus d'un écart-type (68,28 % de chances que les deux populations soient distinctes), nous retrouvons le Pr, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Ta, U et Zr. Les variations de contenu en éléments des terres rares montrent que les andésites associées aux minéralisations ont un profil moins fractionné que celui des andésites associées aux séquences non minéralisées. Même si le fractionnement est moins accentué que celui observé pour les rhyolites (Leshner et al., 1986), il demeure que les variations sont toujours observables et statistiquement valables. Un second point d'intérêt émerge du fait que l'Eu ne présente aucune particularité et ne permet pas de discriminer les deux groupes.

Finalement, un ensemble de ratios inter-élémentaires sont présentés dans les **Tableaux 2 et 3**. Parmi ceux-ci, nous avons les rapports La/Yb, La/Sm, Ta/Th, Nb/La, V/Ni et Sr/Sc dont la différence est valide à plus de deux écarts-types (95,44 %) et les rapports Gd/Yb et Y/Th dont la différence est valide à un écart-type (68,28 %). L'anomalie en Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ ) n'est cependant pas significative. Deux autres paramètres de la courbe de fractionnement des ETR sont présentés et notés « A-LREE » et « A-HREE ». Ces acronymes sont utilisés pour « anomalie en terres rares légères » et « anomalie en terres rares lourdes » respectivement. Ces deux paramètres sont calculés de façon similaire à l'anomalie en Eu, mais plus spécifiquement pour le Pr et l'Ho. Ils permettent de vérifier si chacun des segments de la courbe de fractionnement montre une tendance convexe, rectiligne ou concave. De ces deux paramètres, seule l'anomalie en terres rares lourdes (A-HREE) est statistiquement significative et suggère que les séquences associées aux minéralisations aient un profil de forme concave plus accentuée.

**Tableau 2.** Composition moyenne des andésites – « Avec SMV »

Andésites - Avec SMV																			
	SiO <sub>2</sub>	TiO2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg#	Sc	Cs	Rb	Sr	Ba	Cr	V	Co
N	45	45	45	45	43	44	45	45	44	43	45	36	12	36	38	23	34	33	31
Moyenne	56,41	1,32	14,72	11,16	0,18	4,55	6,69	3,13	0,57	0,20	0,27	32,52	2,45	21,22	177,21	167,09	173,72	225,34	37,93
Err. Moy	0,43	0,10	0,34	0,55	0,01	0,22	0,26	0,12	0,05	0,02	0,01	2,05	0,84	4,52	15,83	18,15	42,61	20,67	2,29
Éc.Type	2,89	0,66	2,26	3,71	0,08	1,43	1,72	0,80	0,35	0,13	0,09	12,32	2,92	27,09	97,58	87,06	248,48	118,71	12,77
Min	45,70	0,29	9,34	6,01	0,02	2,41	2,14	1,48	0,05	0,02	0,12	17,00	0,20	1,10	43,00	23,00	3,00	26,00	16,00
Max	61,13	3,23	20,41	19,05	0,44	9,20	11,70	4,62	1,22	0,64	0,51	66,50	8,41	115,41	392,00	311,47	971,00	467,00	71,20
	Ni	Pb	Cu	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Nb
N	35	5	8	37	38	17	37	38	38	19	35	20	19	19	18	38	36	31	39
Moyenne	61,63	32,00	62,00	12,21	30,45	4,01	18,93	4,74	1,41	5,10	0,90	5,25	1,11	3,20	0,45	3,47	0,54	0,53	7,94
Err. Moy	13,23	24,31	13,00	0,85	2,30	0,59	1,43	0,39	0,11	0,83	0,09	0,88	0,18	0,57	0,08	0,34	0,06	0,05	0,61
Éc.Type	78,24	54,35	36,77	5,20	14,20	2,41	8,70	2,41	0,70	3,63	0,55	3,93	0,79	2,48	0,35	2,12	0,33	0,29	3,78
Min	2,50	5,00	32,00	1,37	3,50	0,50	2,48	0,83	0,32	1,17	0,24	1,83	0,40	1,18	0,19	0,79	0,18	0,05	0,86
Max	323,00	129,00	130,00	23,60	71,90	8,72	40,30	10,40	3,20	11,80	1,98	13,13	2,85	8,33	1,26	8,03	1,22	1,10	15,53
	U	Th	Y	Zr	La/Yb	La/Sm	Gd/Yb	A-Eu	A-LREE	A-HREE	Y/Th	Ta/Th	Nb/La	V/Ni	Cu/Co	Sr/Sc	V/Cs	V/Sr	
N	16	32	42	44	37	37	19	19	37	19	31	30	34	31	7	31	11	28	
Moyenne	0,41	1,38	33,38	143,52	3,05	1,73	1,44	-3,19	2,32	-9,85	30,44	0,38	0,65	14,23	1,47	7,13	196,12	1,67	
Err. Moy	0,06	0,13	3,10	10,55	0,34	0,10	0,13	0,88	0,45	1,62	4,18	0,03	0,04	3,29	0,31	1,00	101,61	0,25	
Éc.Type	0,25	0,71	20,10	69,99	2,05	0,59	0,56	3,82	2,76	7,08	23,25	0,18	0,23	18,31	0,82	5,57	337,00	1,34	
Min	0,03	0,12	10,30	20,40	0,52	0,84	0,50	12,57	-5,69	-28,32	1,30	0,04	0,21	0,71	0,09	1,79	8,76	0,12	
Max	1,10	2,51	72,82	328,00	8,63	2,96	2,91	0,42	9,25	-2,79	99,16	0,70	1,13	60,00	2,41	18,32	1	5,04	

**Tableau 3.** Composition moyenne des andésites – « Sans SMV »

		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg#	Sc	Cs	Rb	Sr	Ba	Cr	V	Co
Andésites – Sans SMV	N	44	43	44	44	44	44	44	44	44	44	44	36	19	40	42	43	41	41	31
	Moyenne	57,68	0,84	14,85	9,80	0,16	4,62	6,93	3,32	0,70	0,18	0,30	27,89	1,65	21,15	364,91	241,32	162,16	206,85	37,97
	Err. Moy	0,41	0,05	0,22	0,47	0,01	0,19	0,23	0,14	0,10	0,01	0,01	2,51	0,31	3,34	49,31	43,80	17,16	15,97	2,60
	Éc.Type	2,72	0,34	1,44	3,15	0,07	1,26	1,50	0,90	0,63	0,10	0,08	15,06	1,33	21,09	319,55	287,23	109,85	102,23	14,45
	Min	51,51	0,40	11,50	4,60	0,07	2,24	4,09	1,66	0,03	0,01	0,13	12,92	0,03	0,20	32,00	5,00	2,50	91,00	19,13
	Max	62,30	1,67	17,90	15,52	0,31	7,15	10,10	4,92	2,20	0,44	0,48	68,00	4,00	70,00	<sup>1</sup> 072,00	972,00	393,00	433,00	92,00
	Ni	Pb	Cu	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Nb	
N	42	10	13	42	42	34	40	42	42	42	40	37	40	34	40	36	38	38	32	40
Moyenne	78,14	19,00	45,62	20,18	44,03	5,50	19,69	4,66	4,66	1,33	4,16	0,61	3,76	0,79	2,35	0,33	2,36	0,36	0,52	5,34
Err. Moy	7,64	6,63	8,62	2,13	4,53	0,66	1,52	0,34	0,34	0,09	0,25	0,03	0,28	0,06	0,21	0,03	0,26	0,04	0,08	0,57
Éc.Type	49,50	20,96	31,08	13,79	29,36	3,86	9,61	2,20	2,20	0,56	1,58	0,21	1,78	0,37	1,33	0,19	1,59	0,24	0,44	3,58
Min	4,00	5,00	1,00	2,44	6,25	0,89	4,71	1,57	1,57	0,36	2,13	0,30	1,60	0,36	0,90	0,10	0,80	0,10	0,17	2,00
Max	213,00	72,00	102,00	53,40	130,20	16,90	39,20	10,80	10,80	2,70	9,21	1,28	9,55	1,64	6,40	0,93	7,10	1,07	2,00	16,23
	U	Th	Y	Zr	La/Yb	La/Sm	Gd/Yb	A-Eu	A-LREE	A-HREE	Y/Th	Ta/Th	Nb/La	V/Ni	Cu/Co	Sr/Sc	V/Cs	V/Sr		
N	34	34	43	44	38	42	37	41	42	37	35	30	40	36	8	36	18	39		
Moyenne	0,72	3,05	21,97	119,42	9,53	2,56	1,91	-2,86	-0,30	-7,90	22,30	0,23	0,41	3,34	1,08	20,73	1	1,28		
Err. Moy	0,12	0,40	1,70	8,62	1,39	0,18	0,16	0,53	1,81	0,52	5,08	0,03	0,05	0,59	0,27	3,61	854,40	0,23		
Éc.Type	0,67	2,35	11,16	57,16	8,54	1,19	0,99	3,41	11,70	3,14	30,04	0,17	0,33	3,52	0,75	21,68	3	1,44		
Min	0,05	0,23	7,50	24,00	0,35	0,44	0,46	<sup>-</sup> 10,78	-29,16	-18,58	1,32	0,05	0,04	0,63	0,05	0,47	29,00	0,09		
Max	3,24	7,80	61,88	238,58	30,93	4,94	4,07	2,39	33,29	-3,01	102,22	0,62	1,23	20,59	2,32	65,13	11	6,36		



### 5.1.2 Statistiques multivariées

Puisque l'analyse statistique exploratoire montre des différences notables entre les séquences minéralisées et non minéralisées, il est opportun de sonder la possibilité d'une classification des environnements en fonction de la géochimie. L'objectif est donc de vérifier si la classification « a priori » des analyses lithogéochimiques en tant qu'« associées » et « non-associées » aux minéralisations peut-être déduite à partir d'un groupe d'éléments. L'approche utilisée est l'analyse factorielle discriminante (AFD). Trois tests ont été élaborés et sont présentés. Le premier utilise une longue suite d'éléments et donne les meilleurs résultats, le second utilise une suite plus restreinte d'éléments et enfin le troisième utilise essentiellement les éléments majeurs. Le résultat de ce dernier test est moins performant, mais présente le grand avantage de pouvoir être appliqué à de nombreuses banques de données.

#### 5.1.2.1 AFD – 12 éléments

Un premier test d'AFD a été fait en utilisant une suite de 12 éléments parmi lesquels se retrouvent ceux mis en relief à la section précédente. Les éléments utilisés sont le  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{Yb}$ , et  $\text{Lu}$ . Ce test a permis de classer avec succès 77 % des andésites associées aux minéralisations et 74 % des andésites dépourvues de minéralisations (**Tableau 4**). Ce taux de succès est jugé excellent et surpasse même les résultats obtenus par Leshner et al. (1986) pour la classification des rhyolites (lequel atteignait 68 % de succès).

**Tableau 4.** Matrice de confusion de l'AFD à 12 éléments

	Total	Reclassement Avec SMV	Reclassement Sans SMV	% de succès
Avec SMV	30	23	7	77 %
Sans SMV	35	9	26	74 %
Total	65	32	33	

De ce test, nous pouvons extraire deux équations linéaires maximisant l'écart entre les centroïdes des deux populations (**Tableau 5**). La mise en œuvre de ce test s'établit en calculant la valeur des deux équations et le résultat le plus grand définit la probabilité d'appartenance à ce groupe. Même si ce résultat apparaît des plus intéressants, une application positive sur de vastes banques de données est peut probante. À titre d'exemple, l'application sur une banque de données privées d'un partenaire CONSOREM comprenant plus de 142 000 analyses lithogéochimiques n'a permis d'extraire que 22 échantillons respectant les critères de sélection définis (échantillon de roche volcanique non altérée, de composition andésitique selon la classification R1R2 et analysé pour les 12 éléments du **Tableau 5**).

En conclusion, même si le test par AFD utilisant 12 variables explicatives permet une reconnaissance des environnements fertiles de façon très performante, la mise en œuvre nécessite de développer de nouvelles informations géochimiques. En dépit de cette difficulté, un élément fort important émerge, c'est-à-dire qu'il est possible d'étendre le spectre de reconnaissance des environnements associés à la fertilité au-delà des rhyolites et des dacites, et d'y inclure les andésites.



**Tableau 5.** Paramètres de l'équation de l'AFD à 12 variables explicatives

Coefficient	Avec SMV	Sans SMV
Constante	-25,353	-22,491
TiO <sub>2</sub>	10,490	7,207
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot	3,719	3,617
MnO	5,120	3,233
Sr	0,009	0,007
Y	-1,200	-1,372
Zr	0,099	0,117
Rb	0,047	0,040
La	-0,556	-0,413
Ce	0,283	0,252
Th	0,152	0,103
Yb	1,582	4,755
Lu	9,953	-0,790

#### 5.1.2.2 AFD – 5 éléments

Ce test a été paramétré de façon identique au test précédent, à la différence près qu'il s'est fait avec une sélection de cinq éléments plus communément accessibles dans les bases de données lithogéochimiques. Les cinq éléments utilisés sont le TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot, MnO, Sr et le Y. Le résultat de cette AFD (**Tableau 6**) indique un niveau de succès similaire au test précédent. Les séquences associées aux minéralisations sont reconnues à 63 % et celles dépourvues de minéralisations à 78 %.

**Tableau 6.** Matrice de confusion de l'AFD à 5 éléments.

	Total	Reclassement Avec SMV	Reclassement Sans SMV	% de succès
<b>Avec SMV</b>	46	29	17	63 %
<b>Sans SMV</b>	49	15	34	78 %
<b>Total</b>	95	44	51	

Comme précédemment, nous pouvons extraire deux équations linéaires maximisant l'écart entre les centroïdes des deux populations (**Tableau 7**). La mise en œuvre de ce test s'établit en évaluant les deux équations ci-dessous. L'appartenance à l'un ou l'autre des groupes est donnée par le résultat le plus élevé.

$$\text{And. Avec SMV} = -13,186 + 2,91\text{TiO}_2 + 1,603\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3,762\text{MnO} + 0,017\text{Sr} - 0,032\text{Y}$$

$$\text{And. Sans SMV} = -13,003 + 0,376\text{TiO}_2 + 1,88\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,492\text{MnO} + 0,019\text{Sr} - 0,043\text{Y}$$

**Tableau 7.** Paramètres de l'équation de l'AFD à 5 variables explicatives.

Coefficient	Avec SMV	Sans SMV
Constante	-13,186	-13,003
TiO <sub>2</sub>	2,910	0,376
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot	1,603	1,880
MnO	3,762	2,492
Sr	0,017	0,019
Y	-0,032	-0,043

En conclusion, le test de l'AFD utilisant 5 variables explicatives permet une reconnaissance des environnements fertiles tout aussi efficace que le test précédent. L'avantage de ce dernier test est qu'il permet d'utiliser des données déjà disponibles dans les bases de données lithogéochimiques. Un exemple sera donné à la section « exemples d'application pour les andésites ».

#### 5.1.2.3 AFD – éléments majeurs

Un troisième test d'AFD a été fait en suivant une démarche plus exploratoire, dans l'objectif d'extraire un maximum d'information des bases de données disponibles et d'améliorer l'applicabilité pour l'exploration minérale des SMV. Avant l'avènement des déterminations géochimiques de précision, les analyses se limitaient généralement aux éléments majeurs. Il existe donc une somme importante d'analyses pour lesquelles seulement cette information est disponible. Cette avenue a donc été sondée en considérant les éléments majeurs (en poids d'oxydes) comme variables explicatives. Dix oxydes ont été utilisés : SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot, MgO, MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. De ce groupe d'éléments, tel qu'énoncé à la section des statistiques exploratoires, le TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tot, MnO et SiO<sub>2</sub> forment des populations distinctes pour les deux environnements (avec et sans SMV). Il existe donc un fondement réel et une possibilité que l'AFD parvienne à reconnaître des centroïdes statistiquement distincts pour ces deux environnements.

Le **Tableau 8** montre le résultat de cette analyse. Premièrement, on y voit un accroissement du nombre d'individus considérés, passant de 65 à 95 pour les deux tests précédents, à 122 pour le présent test. Le taux de succès du classement par AFD chute cependant pour la reconnaissance des environnements fertiles (55 %), mais demeure relativement élevé pour les environnements non minéralisés (74 %). En définitive, ce résultat indique que la géochimie des éléments majeurs permet de reconnaître 3 fois sur 4 les environnements non minéralisés et une fois sur deux les environnements fertiles. Une discussion de la pertinence de ce résultat sera présentée à la section suivante (exemples d'application pour les andésites).

**Tableau 8.** Matrice de confusion de l'AFD utilisant les éléments majeurs.

	Total	Reclassement Avec SMV	Reclassement Sans SMV	% de succès
<b>Avec SMV</b>	60	33	27	55 %
<b>Sans SMV</b>	62	16	46	74 %
<b>Total</b>	122	49	73	

De l'AFD utilisant les éléments majeurs, nous pouvons extraire deux équations linéaires exprimant la probabilité d'appartenance au groupe « Avec SMV » et celui « Sans SMV » (**Tableau 9**).

**Tableau 9.** Paramètres de l'équation de l'AFD des éléments majeurs.

Coefficient	Avec SMV	Sans SMV
Constante	-1091,07	-1092,214
SiO <sub>2</sub>	22,657	22,655
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,889	21,898
MgO	29,149	29,262
CaO	16,082	16,280
Na <sub>2</sub> O	23,449	23,579
K <sub>2</sub> O	11,678	11,706
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	14,211	15,816
TiO <sub>2</sub>	33,225	32,027
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot	17,312	17,315
MnO	80,519	79,501

### 5.1.3 Exemples d'application pour les andésites

L'application des tests de classification par AFD à une base de données comme celle de l'Abitibi (142 392 analyses de sources confidentielles provenant des partenaires du CONSOREM) permet de valider la proposition de la classification des andésites. Cette validation tient du fait que la sous-province de l'Abitibi est relativement bien connue, ce qui permet de confronter le résultat obtenu à la réalité factuelle de ses minéralisations. D'autre part, l'information contenue dans cette base de données est en grande partie indépendante du fichier ayant servi à la caractérisation des andésites (c.-à-d. les analyses provenant de la littérature).

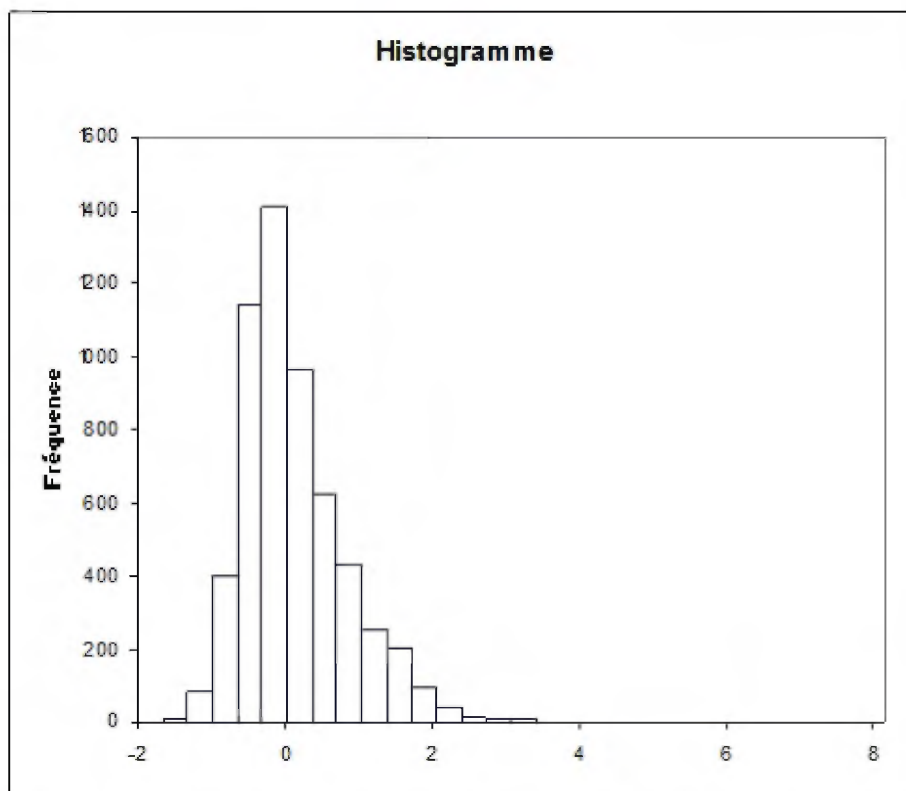
#### 5.1.3.1 Test : AFD – éléments majeurs

L'application de l'AFD avec éléments majeurs au secteur de l'Abitibi a été réalisée sur une population contenant 6 808 analyses d'andésites fraîches classifiées selon De la Roche et al. (1980) et selon le critère d'altération de Hughes (1973). Pour chacune de ces analyses, la valeur de la fonction de classement a été évaluée telle que présentée plus haut. Pour la mise en plan, la différence mathématique entre les deux valeurs, nommée « Indice de Fertilité Mafique » (IFM), a été utilisée. De la sorte, si la fonction « Avec SMV » donne un résultat plus grand que celui de la fonction « Sans SMV », alors la valeur IFM est positive. Dans le cas contraire, elle sera négative. Pour les résultats ambivalents, où les deux fonctions donnent un résultat similaire, alors la valeur IFM sera près de zéro.

La distribution de la valeur IFM suit une loi log-normale (**Figure 1**) qui s'étend de -1,55 à 8,6. Pour la mise en plan, nous avons subdivisé cette population en trois classes dont les limites ont été déterminées en utilisant les ruptures de pente de la distribution cumulée.

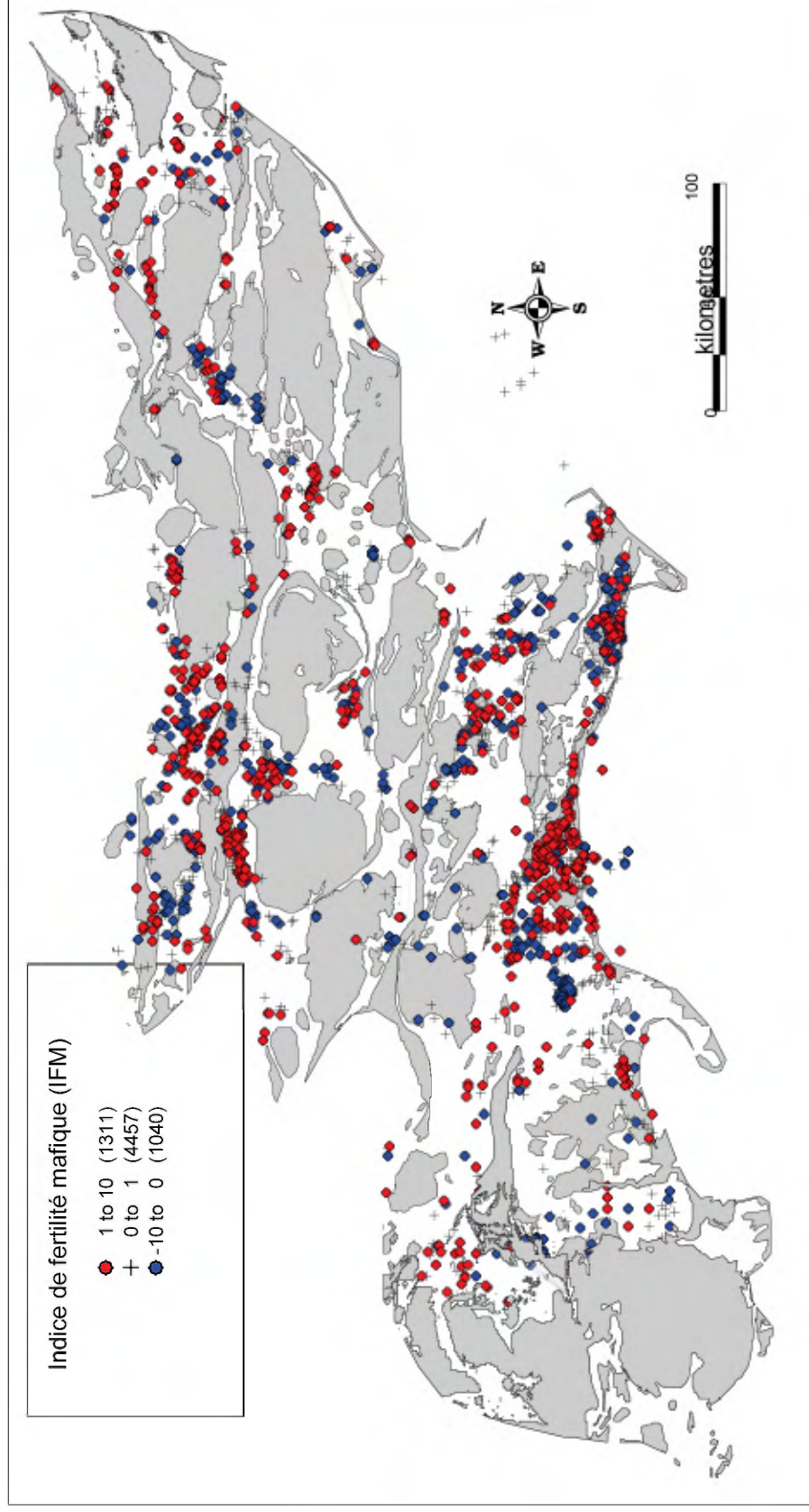
À la **Figure 2**, parmi les secteurs favorables, on reconnaît distinctement les camps miniers de Noranda, Val-d'Or, Kidd Creek, Matagami et Joutel, de même que les secteurs de Coniagas, Grevet (Gonzague-Langlois), Lemoine, Hunter, Caber et Bousquet. D'autres secteurs d'intérêts sont également mis en relief sur cette figure. À titre d'exemple, à l'ouest de Chibougamau, on retrouve un ensemble d'échantillons à caractère favorable associés au Complexe de Cummings; dans le secteur

Est du dépôt de Géant Dormant, on retrouve un contexte favorable et dans le secteur d'Amos plusieurs assemblages ressortent également comme favorables. Par contre, certaines régions minéralisées n'ont pas été reconnues, telles celles de Selbaie et de Normétal. Pour Selbaie, les formations andésitiques favorables se situent plus à l'est par rapport aux minéralisations connues. À Normétal, peu de roches mafiques sont classées comme étant des andésites selon De la Roche et al. (1980). L'analyse fait également ressortir plusieurs secteurs classés peu propices à la présence de minéralisations SMV ce qui est validé par l'absence à ce jour de minéralisations connues pour ces secteurs.



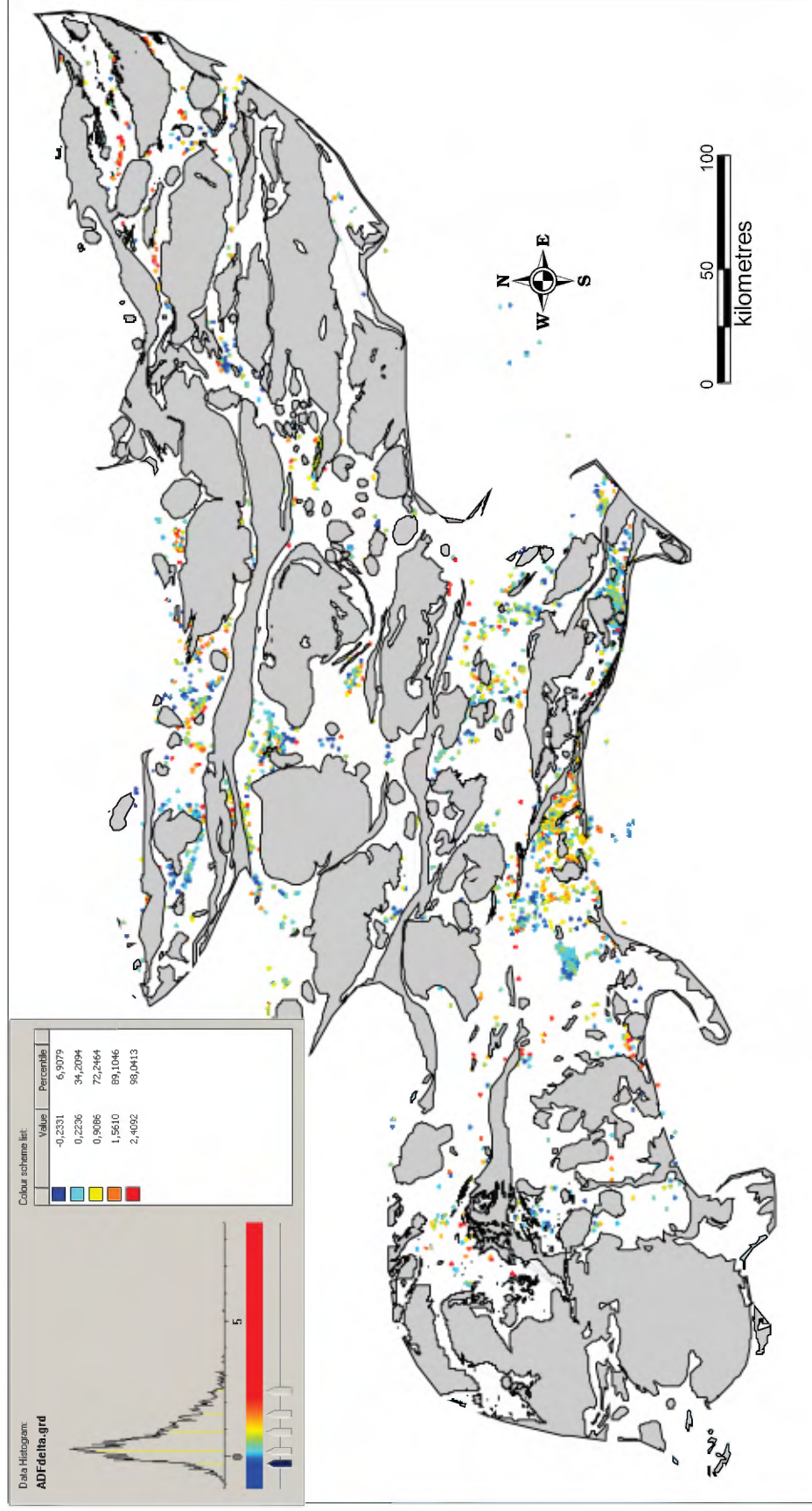
**Figure 1.** Distribution du résultat de classement des andésites par l'AFD utilisant les éléments majeurs. La valeur illustrée correspond à l'indice de fertilité mafique (IFM).

Il est à noter que la classification par AFD donne une probabilité d'appartenance qui représente une variable continue et non pas une variable binaire. Ainsi, représenter cette information de façon ponctuelle, en utilisant des limites de classes fixes (ex. **Figure 2**), ne constitue pas l'approche idéale pour interpréter la classification. En complément, l'information, le résultat de l'AFD est représenté par une pondération selon la méthode de l'inverse de la distance (**Figure 3**). Cette méthode permet de représenter un résultat moyen pour les secteurs ou il y a beaucoup d'analyses. Rappelons que la variable mise en relief – c'est-à-dire la relation entre la composition géochimique et le potentiel de minéralisation hydrothermale – est une variable en lien non pas avec une analyse ponctuelle, mais avec une formation géologique. Par exemple, si 75 % des analyses associées à une formation indiquent une géochimie favorable, alors il est normal de conclure à la fertilité. Le 25 % résiduel peut représenter la marge d'erreur associée à la méthode de classification. Ainsi, le fait d'utiliser un résultat moyen reflète beaucoup mieux la caractéristique particulière d'une unité géologique et amoindrit la subjectivité de l'interprétation.



**Figure 2.** Résultat de l'AFD (éléments majeurs) appliquée à la Sous-province de l'Abitibi. Les points rouges correspondent aux andésites classifiées fertiles pour les minéralisations SMV (selon l'IFM), les points bleus seraient non favorables et les croix montrent un résultat considéré ambivalent.





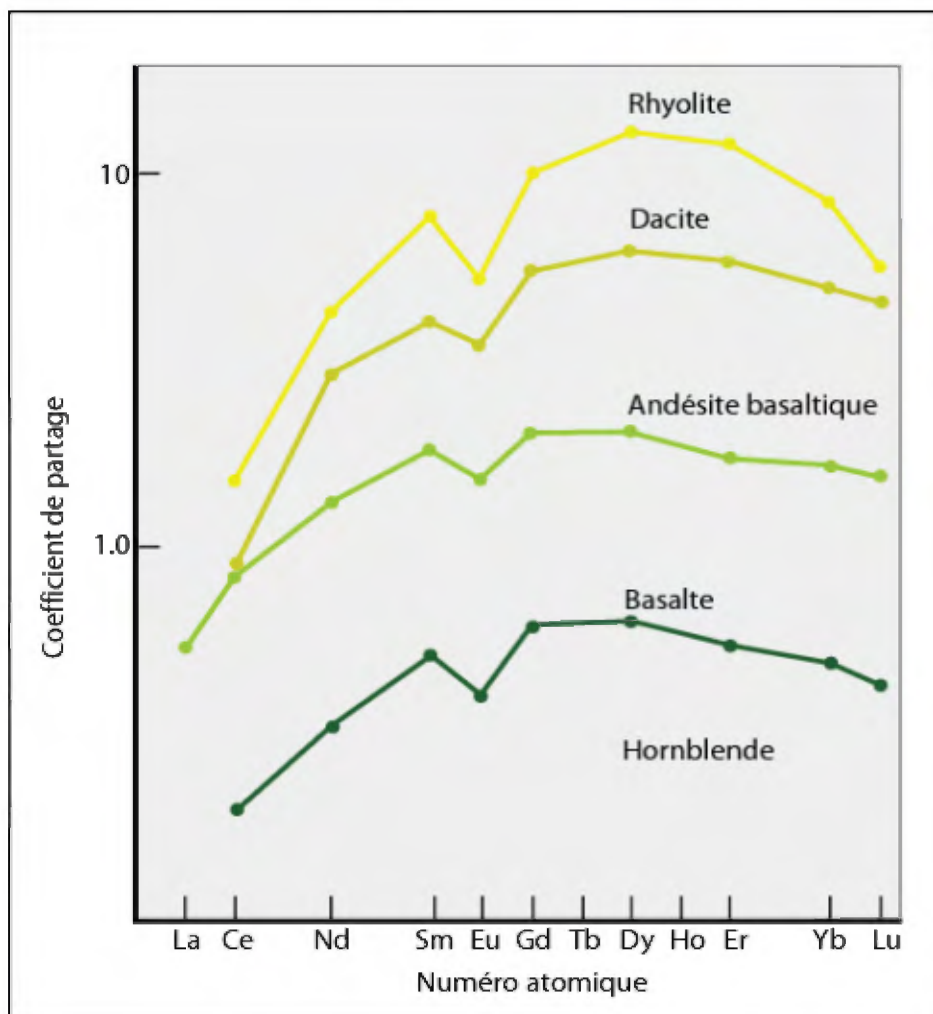
**Figure 3.** Fertilité relative des andésites évaluée par la méthode de l'AFD. La maille est calculée selon la méthode de l'inverse de la distance.

## 5.2 Basaltes

L'approche utilisée pour évaluer la possibilité de reconnaître des environnements favorables aux minéralisations de type SMV dans les séquences de composition basaltique est similaire à celle des andésites.

Le **Tableau 10** montre la répartition des unités basaltiques utilisées pour l'étude et la caractérisation de ces roches en fonction de leur association avec les minéralisations volcanogènes. La formation de ce fichier a nécessité la compilation de plus de 990 analyses dont seulement 449 proviennent de roches non altérées ayant une relation connue avec les minéralisations. De ce nombre, 221 se classent comme étant des basaltes selon la méthodologie de De la Roche et al. (1980).

Il est à propos de noter que plus un magma est mafique, plus les coefficients de partition des éléments traces entre le magma et les phases minérales sont près de l'unité. Ainsi, tel que montré à la **Figure 4** (Rollinson, 1993), le fractionnement des ETR varie de façon logarithmique entre un magma de composition rhyolitique et un de composition basaltique. Il en résulte que les caractéristiques géochimiques des andésites versus celles des basaltes risquent d'être substantiellement différentes.



**Figure 4.** Coefficient de partition des ETR en fonction de la composition du magma (figure modifiée de Rollinson, 1993).

**Tableau 10.** Basaltes répertoriés pour évaluer les relations entre la géochimie des environnements mafiques et les minéralisations SMV.

	Unité	Nombre
Avec SMV, n=62	Agnico-Eagle	2
	Valrenne	1
	Blake River, Abitibi	2
	Cycle 3 Confederation Lake	4
	Geco Manitouwadge Wawa	3
	Kamiskotia	1
	Kidd Creek	15
	Lower Val DOr	1
	Melila Yilgarn	1
	Ruostesuo, Finlande	3
	Schreiber	27
	Winston Lake	2
Sans SMV, n=159	Abitibi, Munro	7
	Almas	1
	Bastar	3
	Cycle 1 Confederation Lake	2
	Cycle 2 Confederation Lake	2
	Dayohessarah, Wawa	1
	Dharwar	1
	Hanikahimajuk Lake	1
	Hemlo	13
	Hemlo Black river	36
	Jacola	1
	Jeedamia Teutonic Bore	2
	Kaapvaal, Nzuse Group	8
	Kaminiskag	6
	Lumby Lake	3
	Melila Teutonic Bore	1
	Michipicoten	36
	Obonga Belt North, Wabigoon	4
	Pickle Lake	21
	Rice Lake, Garner Lake Assemblage	3
	Upper Heva	1
	Whitney, Suite 2	5
	Yellowknife, Townsite	1



### 5.2.1 Statistiques exploratoires

Le fait que l'étude des basaltes soit basée sur une plus grande population aide considérablement à préciser les paramètres de la distribution. Les **Tableaux 11 et 12** montrent un résumé des caractéristiques géochimiques des basaltes « Avec SMV » et « Sans SMV ». La principale observation est que les différences entre les deux groupes (minéralisés vs non minéralisés) sont plus ténues que celles observées pour les andésites. De plus, le groupe d'éléments les plus sensibles à la classification des basaltes diffère de celui des andésites. Ainsi, pour les éléments majeurs, le MgO devient sensible en lieu et place du MnO, ce qui témoigne de processus de différenciation impliquant des phases mafiques magnésiennes. Les éléments traces et métaux de transition les plus distinctifs sont le Ba et le Cr (différence sur la moyenne valable à  $\pm 1$  écart-type), le Rb et le Ni (différence sur la moyenne valable à  $\pm 2$  écarts-types) et enfin le Sr (différence sur la moyenne valable à  $\pm 3$  écarts-types). Des différences en Ni et en Sr étaient apparentes pour les andésites, mais elles sont beaucoup mieux définies pour les basaltes et se complètent par l'ajout du Cr et du Rb respectivement. Il est intéressant de constater que les ETR légers ne montrent aucune différence entre les séquences associées aux minéralisations versus celles qui en sont dépourvues. Seuls les ETR lourds montrent une faible différence sur la moyenne valable à  $\pm 1$  écart-type. À noter que pour les basaltes, l'Eu est potentiellement utilisable, mais que la différence est ténue.

Un autre point à souligner est la différence de comportement des « éléments traceurs de fertilité » entre les compositions andésitique et basaltique. Par exemple, les andésites associées aux minéralisations montrent un contenu en  $\text{TiO}_2$  plus grand que celui des andésites qui en sont dépourvues (1,32 % : « Avec SMV » versus 0,84 % : « Sans SMV »). Par contre, dans les unités basaltiques, on remarque que la variation est inverse (0,90 % : « Avec SMV » versus 1,05 % : « Sans SMV »). Une relation inverse est également observée pour le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , le MgO, le Ni et le U. Cela a une implication très importante sur les résultats obtenus, particulièrement pour les éléments majeurs comme le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO et le  $\text{TiO}_2$ . En fait, plusieurs diagrammes de classification utilisent de deux à quatre éléments pour définir une appellation, alors que le processus en cause implique la présence/absence de phases minérales. Des diagrammes comme le AFM (Jensen, 1976), TAS (Le Bas et al., 1992) et Ti-Zr (Winchester and Floyd, 1977) font abstraction de la stœchiométrie des phases minérales. Cela est pourtant très important du fait que le segment basalte-andésite de la suite de différenciation coïncide avec les modifications de coefficients de partage des éléments (Kd). Par exemple, dans une suite komatiite – basalte – andésite – dacite – rhyolite (K-B-A-D-R), le  $\text{TiO}_2$  passe d'un comportement incompatible pour devenir de plus en plus compatible et le segment B-A représente le point charnière de ce changement.

### 5.2.2 Statistiques multivariées

#### 5.2.2.1 AFD – 9 éléments

Un test d'analyse factorielle discriminante a été fait en utilisant 9 variables explicatives. Les variables sélectionnées sont celles ayant le meilleur potentiel de caractérisation tel que défini à la section précédente. Les éléments utilisés sont :  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$ ,  $\text{TiO}_2$ , MgO, Rb, Ni, Sr, Cr, et Ba. 133 analyses de la base de données des basaltes présentaient l'information minimale pour être utilisées. Le résultat de cette analyse montre une bonne efficacité à reconnaître les environnements non minéralisés, mais une déficience réelle à reconnaître les minéralisations (**Tableau 13**). L'équation linéaire extraite de cette AFD est donnée au **Tableau 14**.

La différence reconnue par l'analyse des statistiques exploratoires n'est pas perçue par l'AFD, ce qui peut s'expliquer par une variance intra-groupe trop élevée. En fait, l'étude des données sources montre que le groupe des basaltes a généralement (pour chacun des éléments) des écarts-types plus grands par rapport aux andésites (**Tableaux 2 et 3** versus **Tableaux 11 et 12**).

Tableau 11. Composition moyenne des basaltes – « Avec SMV ».

Basaltes - Avec SMV																			
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Mg#	Sc	Cs	Rb	Sr	Ba	Cr	V	Co	
N	42	41	42	42	41	42	42	42	42	40	36	14	24	23	23	36	33	37	
Moyenne	49,31	0,90	14,84	11,70	0,21	7,71	9,99	2,95	0,44	0,14	40,15	0,80	9,12	137,10	105,14	342,18	285,50	52,83	
Err. Moy	0,32	0,06	0,33	0,35	0,01	0,44	0,22	0,07	0,05	0,02	2,06	0,26	1,28	15,94	12,41	43,46	10,94	1,65	
Éc.Type	2,07	0,40	2,15	2,25	0,05	2,87	1,42	0,49	0,31	0,15	12,37	0,98	6,28	76,46	59,50	260,76	62,83	10,06	
Min	43,80	0,26	9,48	7,39	0,12	2,97	7,01	2,00	0,01	0,01	2,00	0,04	1,27	28,00	1,00	67,32	147,00	35,00	
Max	53,90	2,26	18,90	17,43	0,35	15,10	12,40	4,15	1,23	0,66	56,46	3,88	22,00	300,17	244,75	1 022,00	401,00	74,00	
	Ni	Pb	Cu	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Nb
N	37	9	9	35	35	26	34	35	36	28	36	30	28	28	26	37	35	26	33
Moyenne	161,45	31,33	82,33	7,35	18,28	2,57	12,20	3,30	1,13	4,01	0,66	4,01	0,90	2,61	0,40	2,36	0,36	0,25	4,38
Err. Moy	16,64	24,26	9,67	1,02	2,36	0,30	1,39	0,27	0,10	0,27	0,04	0,30	0,06	0,17	0,03	0,14	0,02	0,02	0,46
Éc.Type	101,24	72,77	29,00	6,02	13,94	1,51	8,10	1,62	0,57	1,42	0,26	1,65	0,31	0,90	0,13	0,86	0,14	0,12	2,63
Min	26,40	1,00	49,00	1,41	3,31	0,75	1,26	0,68	0,30	1,42	0,16	0,50	0,45	1,33	0,20	1,34	0,11	0,04	1,00
Max	477,00	225,00	140,00	29,86	66,60	5,72	37,89	7,53	2,94	6,70	1,17	7,55	1,64	4,77	0,73	4,76	0,70	0,53	10,12
	U	Th	Y	Zr	La/Yb	La/Sm	Gd/Yb	A-Eu	A-LREE	A-HREE	Y/Th	Ta/Th	Nb/La	V/Ni	Cu/Co	Sr/Sc	V/Cs	V/Sr	
N	11	27	36	39	35	35	27	28	34	28	25	24	31	30	9	20	10	19	
Moyenne	0,30	0,68	24,49	79,16	2,28	1,29	1,29	-1,99	1,45	-7,14	49,77	0,52	0,64	2,57	1,57	3,47	562,20	2,29	
Err. Moy	0,08	0,14	1,27	6,63	0,40	0,08	0,07	0,60	0,69	0,45	4,78	0,07	0,05	0,27	0,18	0,50	256,49	0,27	
Éc.Type	0,27	0,71	7,61	41,38	2,37	0,44	0,37	3,18	4,02	2,40	23,92	0,32	0,28	1,49	0,53	2,23	811,09	1,18	
Min	0,05	0,14	11,00	22,20	0,46	0,70	0,86	10,24	-2,81	-12,41	5,36	0,06	0,13	0,50	0,97	0,80	29,63	0,54	
Max	0,90	2,87	41,26	190,00	12,39	2,48	2,23	3,17	13,41	-2,64	107,14	1,33	1,09	5,38	2,50	8,43	2	4,65	

**Tableau 12.** Composition moyenne des basaltes – « Sans SMV ».

		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg#	Sc	Cs	Rb	Sr	Ba	Cr	V	Co
Basaltes - Sans SMV	N	92	91	92	92	90	92	92	91	90	90		82	44	62	58	58	89	85	64
	Moyenne	49,91	1,05	15,03	13,18	0,21	6,40	10,16	2,87	0,45	0,11		40,27	0,81	14,01	293,75	148,86	260,52	278,72	53,86
	Err. Moy	0,24	0,03	0,17	0,25	0,00	0,19	0,12	0,06	0,03	0,01		1,16	0,11	1,38	27,30	16,96	16,30	6,69	1,18
	Éc.Type	2,29	0,33	1,62	2,35	0,04	1,84	1,16	0,55	0,29	0,06		10,48	0,75	10,87	207,94	129,19	153,81	61,66	9,42
	Min	41,03	0,27	8,23	9,00	0,14	2,18	8,11	1,89	0,02	0,02		20,00	0,01	0,07	85,00	18,00	9,00	165,00	34,51
	Max	54,00	2,08	17,75	19,54	0,34	11,40	13,46	4,24	1,52	0,30		66,00	3,77	43,48	913,00	660,00	682,08	441,00	73,00
		Ni	Pb	Cu	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Nb
Basaltes - Sans SMV	N	88	7	12	86	88	86	88	87	89	89	89	89	89	88	88	88	88	80	88
	Moyenne	106,28	11,11	94,83	7,62	18,33	2,49	11,21	3,03	1,02	3,56	0,57	3,66	0,78	2,25	0,34	2,13	0,32	0,26	4,42
	Err. Moy	5,61	3,62	20,79	0,66	1,44	0,17	0,68	0,12	0,03	0,11	0,02	0,10	0,02	0,06	0,01	0,06	0,01	0,02	0,32
	Éc.Type	52,60	9,58	72,03	6,13	13,55	1,62	6,39	1,16	0,32	1,03	0,15	0,91	0,21	0,60	0,09	0,57	0,09	0,17	2,98
	Min	32,00	5,00	2,00	1,54	3,41	0,48	2,37	0,65	0,31	1,06	0,18	1,61	0,38	1,24	0,18	0,97	0,15	0,05	0,78
	Max	295,00	32,00	280,00	25,05	58,54	7,46	33,43	6,88	1,90	6,59	0,98	5,91	1,37	3,94	0,58	3,66	0,58	0,84	15,64
		U	Th	Y	Zr	La/Yb	La/Sm	Gd/Yb	A-Eu	A <sub>2</sub> -LREE	A-HREE	Y/Th	Ta/Th	Nb/La	V/Ni	Cu/Co	Sr/Sc	V/Cs	V/Sr	
Basaltes - Sans SMV	N	61	85	92	90	86	88	85	88	87	88	87	87	79	87	84	8	54	43	59
	Moyenne	0,22	0,90	21,45	74,07	2,80	1,47	1,35	-1,40	0,63	-6,35	39,63	0,40	0,72	3,26	2,17	9,65	732,70	1,34	
	Err. Moy	0,02	0,09	0,58	2,94	0,33	0,07	0,05	0,25	0,18	0,20	2,64	0,02	0,03	0,22	0,56	1,31	155,97	0,12	
	Éc.Type	0,19	0,81	5,57	27,93	3,03	0,70	0,46	2,38	1,68	1,83	24,64	0,18	0,30	2,03	1,59	9,65	1	0,90	
	Min	0,05	0,14	9,60	19,00	0,61	0,67	0,54	14,51	-2,40	-11,10	2,77	0,05	0,14	0,33	0,06	1,86	34,60	0,13	
	Max	0,85	3,78	35,00	150,48	13,96	3,36	2,64	1,35	5,83	-2,76	90,76	0,86	1,53	10,94	5,00	38,04	4	3,72	

**Tableau 13.** Matrice de confusion de l'AFD pour les basaltes.

	Total	Reclassement Avec SMV	Reclassement Sans SMV	% de succès
Avec SMV	35	17	18	49 %
Sans SMV	39	8	31	79 %
Total	74	25	49	

**Tableau 14.** Paramètres de l'équation de l'AFD pour les basaltes.

Coefficient	Avec SMV	Sans SMV
Constante	-36,425	-34,804
Fe2O3tot	-2,642	-2,954
TiO2	3,365	3,360
MgO	0,378	0,400
Rb	0,067	0,061
Ni	-0,002	-0,001
Sr	-0,097	-0,091
Cr	0,029	0,027
Ba	0,029	0,030

Puisque l'AFD est basée sur une mathématique qui tente de minimiser la variance intra-groupe et maximiser la variance inter-groupe, cette augmentation des écarts-types a pour effet d'augmenter l'incertitude. Afin de s'assurer que l'augmentation de l'écart-type n'est pas causée par des données déviantes, trois tests similaires ont été faits en considérant divers sous-groupes mieux circonscrits. Le résultat présenté au **Tableau 13** est le meilleur des trois (pour les deux autres, seulement 9 % des environnements minéralisés sont reconnus). Il semble donc que cette variance caractérise les basaltes. L'hypothèse considérée pour expliquer la modification du comportement des éléments chimiques dans les basaltes est que des modifications importantes des phases en présence sur le liquidus/solidus caractérisent la différenciation de ces roches. Ainsi, dépendamment du type de basalte (basalte picritique, basalte à olivine, basalte tholéitique, basalte trachytique, andésite basaltique), les changements peuvent être tels que certains éléments modifient leurs caractéristiques (coefficient de partition, compatibilité, etc.; thermodynamique du système). Cela conduirait à des variations non linéaires dont la fonction est dépendante de l'état global du système. En d'autres termes, les basaltes se situent dans la zone charnière entre les environnements ultramafiques et les environnements intermédiaires. De plus, à l'intérieur même de ce groupe que l'on nomme « basalte », certains éléments modifient leurs comportements selon le type de basalte.

#### 5.2.2.2 Analyse par Réseaux Neuronaux (ARN)

Une approche alternative, mais non explicative pour sonder la possibilité de relations non linéaires dans un système est l'analyse par réseaux neuronaux. Les réseaux neuronaux diffèrent diamétralement de l'approche multivariable. Il ne s'agit pas ici d'un concept mathématique, mais de la recherche d'une relation par essais et erreurs, où chacune des itérations induit une correction non linéaire. Par entraînement, le réseau synaptique tente de répliquer et de maximiser le succès. La force

d'une telle approche est qu'elle permet de reconnaître une relation même si cette dernière est non linéaire. En contrepartie, cet avantage masque la difficulté inhérente d'en extraire une fonction simple, de laquelle nous pourrions déduire un processus expliquant la relation. Cette difficulté a pour effet qu'il n'est pas possible de proposer une « formule mathématique simple » comme c'est le cas pour l'AFD. De plus, le résultat obtenu ne peut se répliquer que par l'utilisation du même groupe d'entraînement et de validation. Dans le cas présent, les résultats de l'ARN ont été appliqués à la base de données de l'Abitibi.

Une multitude de tests peuvent être paramétrés en utilisant différents critères, mais cette étude n'a pas la prétention d'avoir optimisé la procédure. Toutefois pour les besoins de ce travail, les résultats d'un test apparaissent pertinents.

Afin de maximiser le nombre d'analyses géochimiques du test, les éléments majeurs ont été utilisés (l'ARN requiert d'être validée en utilisant différents groupes d'analyses afin de s'assurer que le résultat soit d'application générale). La base de données contient 372 analyses de basaltes (selon la classification de De la Roche et al, 1980). Ce fichier a été subdivisé en trois groupes, dont 200 analyses pour l'entraînement du réseau neuronal, 50 analyses pour la validation et 127 analyses pour le test d'application. La procédure de calcul de l'ARN utilise le groupe d'entraînement pour déterminer la meilleure valeur de chacun des coefficients (calibration du réseau). En cours de développement, la procédure utilise également la population de validation afin de définir le meilleur moment pour arrêter le processus d'entraînement (sans que la population de validation ne participe à l'élaboration et à la modification du réseau). Enfin, le réseau est appliqué au groupe test pour sonder l'efficacité de ce dernier à reconnaître la classification par l'utilisation des variables explicatives (en l'occurrence les éléments majeurs).

La **Figure 5** montre le résultat de l'ARN pour chacune des trois populations utilisées. Ce test montre un taux de reconnaissance des environnements minéralisés très important qui se répercute de façon appréciable pour la population test. Tel que montré sur les histogrammes de la **Figure 5**, les principaux paramètres expliquant l'essentiel de la classification sont – par ordre d'importance – le  $\text{TiO}_2$ , le  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$ , l' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , le  $\text{MgO}$  et le  $\text{K}_2\text{O}$ . Le titane, le fer et le magnésium avaient déjà été reconnus lors de l'analyse statistique exploratoire comme ayant des contenus différents entre les séquences minéralisées et non minéralisées. L'AFD n'a pas reconnue cette différence. Par contre, l'ARN la met bien en relief et confirme que le processus en cause n'est pas associé à une mathématique linéaire. Il est donc probable que l'hypothèse soulevée précédemment constitue une avenue de premier intérêt dans la recherche d'une explication conceptuelle de la relation.

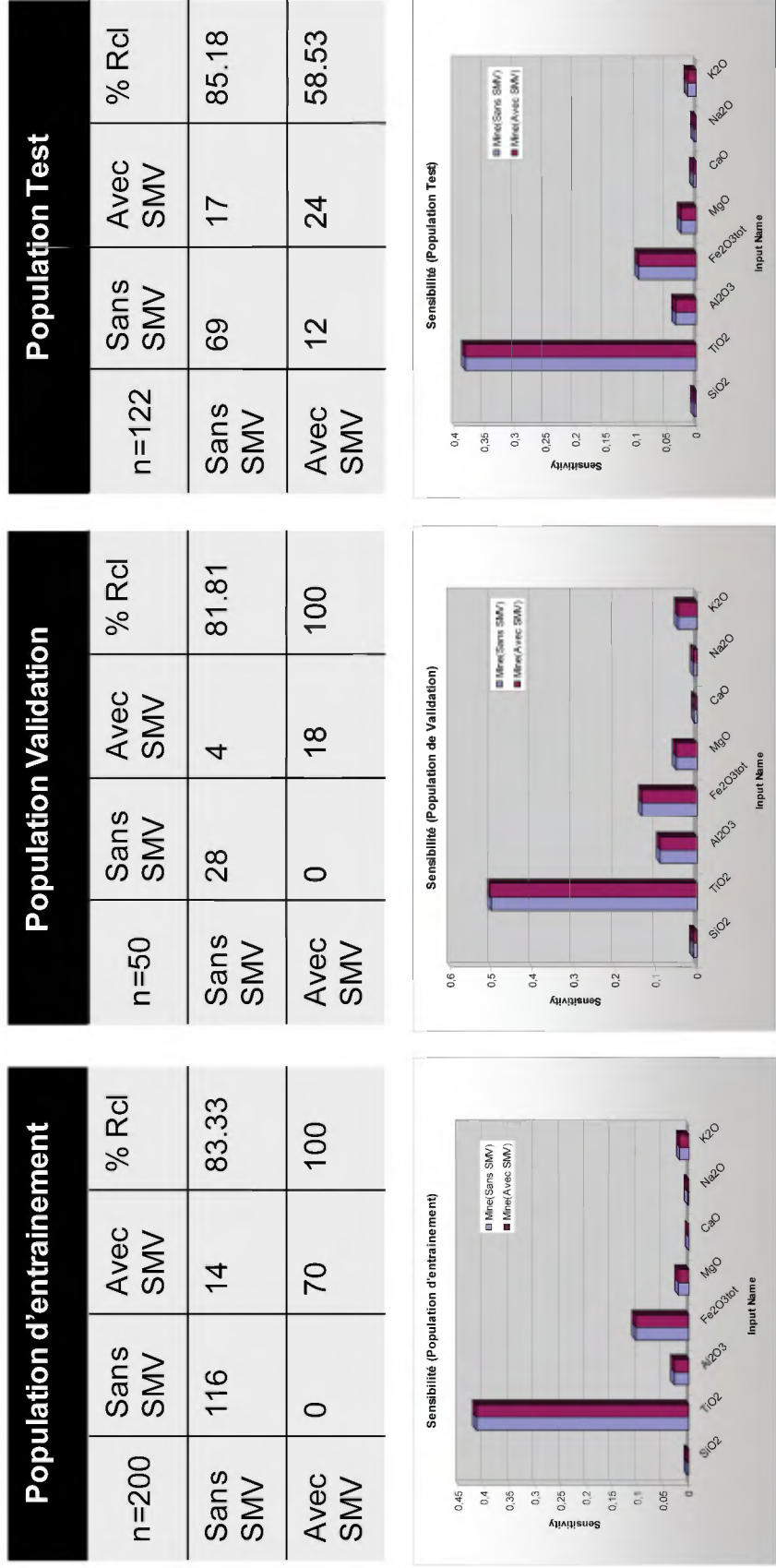


Figure 5. Résultat de l'ARN pour les trois populations. Les histogrammes donnent la sensibilité relative des paramètres. Rcl=reclassement

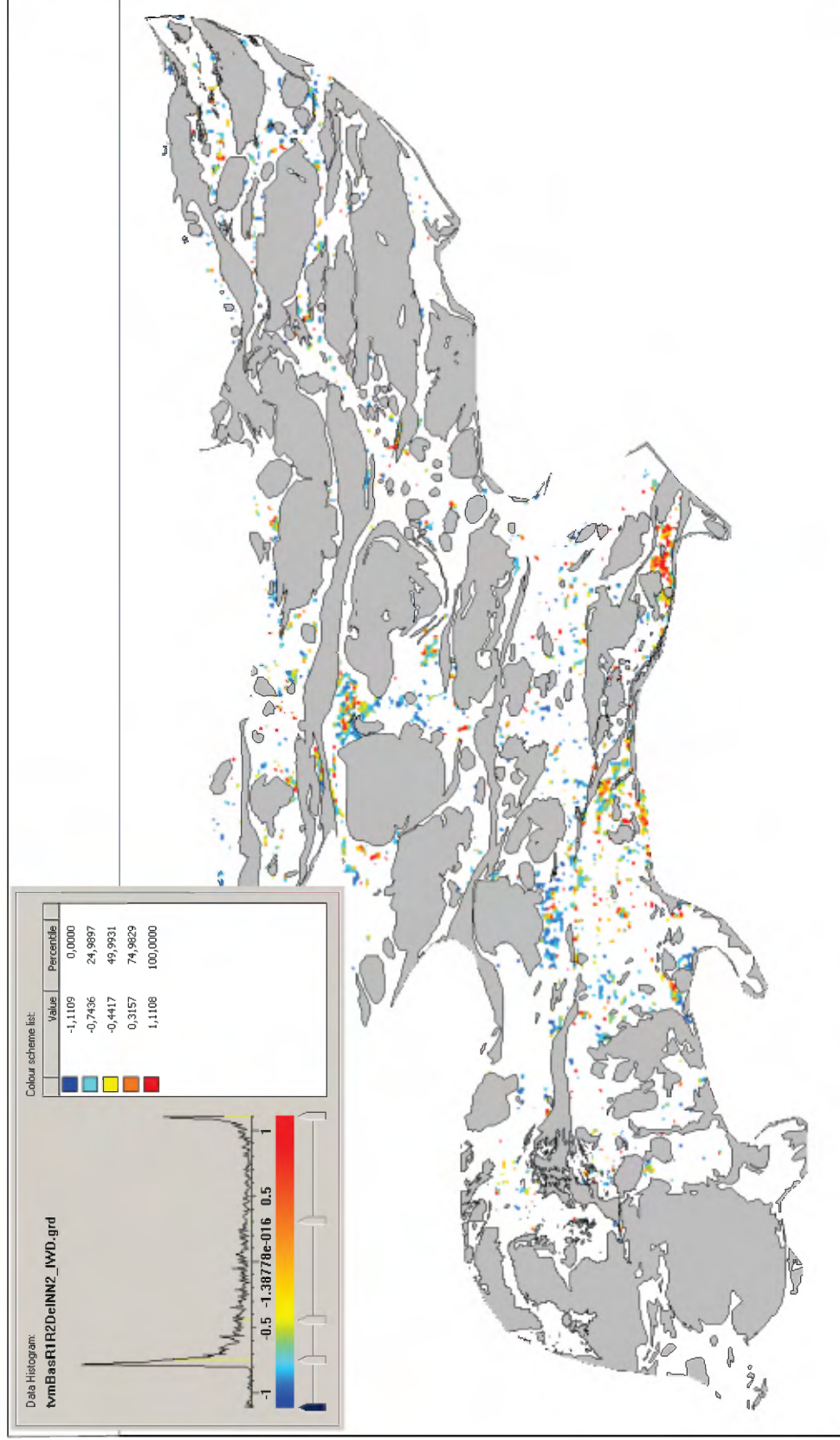
### 5.2.3 Exemple d'application pour les basaltes

Tout comme pour les andésites, un test d'application de la classification des basaltes par réseaux neuronaux a été fait en utilisant la base de données de l'Abitibi (142 392 analyses). De cette base de données, 6 376 analyses correspondent à des basaltes frais selon De la Roche et al. (1980) et Hughes (1973).

La **Figure 6** donne le résultat de cette classification par ARN. On y reconnaît distinctement les camps miniers de Noranda, Val-d'Or, Joutel, Matagami et de Selbaie. Également associés à la fertilité sont les secteurs de Coniagas, Grevet (Gonzague-Langlois) et de Gémini. Les quelques analyses basaltiques du secteur de Kidd Creek montrent également une association positive à la fertilité. De plus, cette figure propose quelques nouveaux secteurs potentiellement fertiles, comme la portion ontarienne de la bande de Hunter-Lindhurst et les secteurs au sud et à l'est de Géant Dormant. Le complexe d'Amos contient quelques bandes favorables, ce qui corrobore l'information obtenue à partir des andésites.

En définitive, l'application du résultat de la classification des environnements basaltique par l'ARN au secteur de l'Abitibi confirme relativement bien l'état des connaissances de la distribution des minéralisations.





**Figure 6.** Classification de la fertilité relative des basaltes évaluée par la méthode des réseaux neuronaux.



---

## 6 DISCUSSION - CONCLUSIONS

---

Cette étude a permis de mettre en relief une relation entre les suites mafiques et la probabilité d'y retrouver des minéralisations volcanogènes de type SMV. Tel que proposé par Hart et al. (2004), le précepte conceptuel de cette association est que les sources magmatiques proviennent de diverses profondeurs et que celles de faible profondeur ont la possibilité d'interagir avec la portion fragile de la croûte. Cette particularité rehausse le potentiel d'hydrothermalisme et la formation de dépôts de sulfures massifs.

Contrairement aux volcanites felsiques, qui représentent l'aboutissement d'une suite de différenciation et qui sont appauvries en minéraux mélanocrates, les roches mafiques possèdent une géochimie beaucoup plus complexe, ce qui augmente le degré de liberté et les possibilités du système. Cette caractéristique des roches volcaniques mafiques implique que leur étude nécessite de restreindre le champ de variation en utilisant une classification géochimique « contraignante ». Cette démarche a permis de circonscrire les basaltes et les andésites. Cette étude montre qu'il faut traiter de façon indépendante ces deux types de roches. Les andésites sont des roches de composition intermédiaire dont l'étude montre certaines similitudes avec l'approche utilisée pour les roches felsiques. La probabilité d'association des rhyolites avec les minéralisations SMV avait pu être modélisée par la simulation du fractionnement du grenat et de la hornblende, ce qui représente une relation suivant une fonction linéaire (Pearson, 2007). Pour les andésites, il a été démontré qu'une fonction linéaire relie également la géochimie à la probabilité de minéralisation. Même si elle n'a pas été formellement établie, cette relation linéaire est vraisemblablement le fait du fractionnement d'une combinaison de phases minérales. À cet égard, la question demeure ouverte sur les paramètres régissant cette relation.

Pour les basaltes, la relation proposée par l'approche des réseaux neuronaux met en relief une dynamique substantiellement différente de ces systèmes. Ici, les relations inter-élémentaires ne sont pas linéaires et ne peuvent être modélisées par le fractionnement de quelques combinaisons de phases minérales. Cette non-linéarité tient du fait que les basaltes représentent un segment charnière de la suite de différenciation, entre les roches ultramafiques et les roches intermédiaires / felsiques. Le comportement du  $\text{TiO}_2$ , qui est incompatible dans le segment UM et compatible dans les segments intermédiaire et felsique, vient illustrer la signification de cette position particulière des basaltes. Un tel élément aura donc une géochimie variable et non linéaire dans le segment charnière des basaltes, et ce, dépendamment si l'on considère des individus de basalte picritique, magnésien, tholéitique, etc. Pour sonder la possibilité de relations linéaires, il serait à propos de considérer le fractionnement de la population des basaltes en sous-groupes plus homogènes et présentant les mêmes caractéristiques pétrogénétiques.

Il est également intéressant de discuter des résultats obtenus sous l'angle des environnements géodynamiques. Cet aspect représente la pierre angulaire de l'approche utilisée par plusieurs auteurs. Pour ceux-ci, l'environnement joue un rôle de premier plan sur la relation avec les minéralisations. Les résultats ci-dessus apportent une certaine nuance à cette vision, puisque des séquences avec et sans minéralisations associées peuvent coexister dans un secteur relativement restreint, comme les sous-groupes de Misema et de Noranda dans le Blake River (Pearson et Daigneault, 2009). Il est donc permis de croire que même si l'environnement géodynamique est important, il ne représente pas l'élément discriminant des séquences fertiles. La signature géochimique traduit davantage la profondeur de la source ce qui n'est pas en soi une caractéristique particulière d'un environnement géodynamique donné. Ainsi, baser la classification « a priori » de la fertilité des séquences, sur un critère géodynamique représente probablement une simplification de la pétrogenèse de ces environnements.

---

## RÉFÉRENCES

---

- Ashley, P.M., Dudley, Lesh, R.H., Marr, J.M. and Ryal, A.W. 1998. The scuddles Cu-Zn prospect, an archean volcanogenic massive sulfide deposit, golden grove district, Western Australia, , *Eco. geol.*, vol. 83, pp. 928-929
- Barley, M.E., Loader, S.E. and McNaughton, N.J. 1998. 3430 to 3417 Ma calc-alkaline volcanism in the McPhee Dome and Kelly belt, and growth of the eastern Pilbara Craton. *Prec. Res.*, vol. 88, pp. 3-23.
- Barrett, T.J. and McLean, W.H. 1999. Volcanic sequences, lithogeochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems. In: Barrie, C.T. and Hannington, M.D. eds., *Volcanic associated massive sulphide deposits: Processes and examples in modern and ancient settings. Rev. Eco. Geol.*, vol. 8. pp. 101-303.
- Barrett, T.J., Cattalani, S., Hoy, L., Riopel, J. and Lafleur, P.-J. 1992. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. IV. The Mobrun mine, *Can.J.Earth Sci.*, vol. 29, pp.1357-1360
- Barrett, T.J., MacLean, W.H., Cattalani, S. and Hoy, L.D. 1994 *Géologie et géochimie du gisement de Corbet, région de Rouyn-Noranda, Québec.*
- Barrett, T.J., Cattalani, S. and MacLean, W.H. 1993. Volcanic lithogeochemistry and alteration at the Delbridge massive sulfide deposit, Noranda, Quebec, , *Jour. of geochem. explor.*, vol. 48, pp. 144-145-151
- Barrett, T.J., MacLean, W.H., Cattalani, S., Hoy, L. and Riverin, G. 1991a. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. III. The ansil mine, *Can.J.Earth Sci.*, vol. 28, pp. 1699-1730.
- Barrett, T.J., Cattalani, S., Chartrand, F. and Jones, P. 1991b. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. II. The aldermac mine, , *Can.J.Earth Sci.*, vol. 28, pp. 1309-1312
- Barrie, C.T. and Pattison, J. 1999. Fe-Ti basalts, high silica rhyolites, and the role of magmatic heat in the genesis of the Kam-Kotia volcanic-associated massive sulfide deposit, Western Abitibi subprovince, Canada. *Economic Geology*, pp. 577-592
- Barrie, C.T. and Shirey, S.B. 1991. Nd- and Sr-isotope systematics for the Kamiskotia-Montcalm area: implications for the formation of late archean crust in the western Abitibi Subprovince, Canada, , *Can. J. Earth Sci.*, vol. 28, pp. 58-63
- 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.
- Beakhouse, G.P., Heaman, L.M. and Creaser, R.A. 1999. Geochemical and U-Pb zircon geochronological constraints on the development of a Late Archean greenstone belt at Birch Lake, Superior Province, Canada. *Precambrian Research* Vol.97, pp. 77-97
- Bhaskar Rao, Y.J., Sivaraman, T.V., Pantulu, G.V.C., Gopalan, K. and Naqvi, S.M. 1992. Rb-Sr ages of late archean metavolcanics and granites, Dharwar craton, south India. *Prec. Res.*, Vol. 92, pp. 145-170
- Boily, M. and Dion, C. 2002. Geochemistry of boninite-type volcanic rocks in the Frotet-Evans greenstone belt, Opatica subprovince, Quebec: implications for the evolution of archaean greenstone belts. *Precambrian Research*, Vol. 115 (2002) 349-371
- Bowen, N.L. 1928. The evolution of igneous rocks. Princeton, N.J., Princeton Univ. Press.

- Brenner, T.L., Teixeira, N.A., Oliveira, J.A.L., Franke, N.D. and Thompson, J.F.H. 1990. The O'Toole nickel deposit, Morro do Ferro greenstone belt, Brazil. *Economic Geology*, Vol. 85 904-920
- Brown, S.J.A., Barley, M.E., Krapez, B. a Cas, R.A.F. 2002. The late archaean melita complex, eastern goldfields, western Australia: shallow submarine bimodal volcanism in a rifted arc environment. *Jour. or Volc. Geoth. Res.*, vol. 115, pp. 303-3
- Campbell, McCuaig, T., Kerrich, R. and Xie, Q. 1994. Proosphorus and high field strength element anomalies in Archean high-magnesian magmas as possible indicators of source mineralogy and depth. *EPSL*, vol. 124, pp. 221-239.
- Cattalani, S., Barrett, T.J. and Chartrand, F. 1995. Géologie et géochimie du gisement d'Aldermac (région de Rouyn-Noranda), ET 90-13, MRNQ, 85p.
- Condie, K.C. and Harrison, N.M. 1976. Geochemistry of the archaean Bulawayan group, Midlands greenstone belt, Rhodesia. *Precambrian Research*, vol 3., pp. 253-271
- Cousens, B., Falck, H., Ootes, L., Jackson, V., Mueller, W., Corcoran, P., Finnigan, C., van Hees, E., Facey, C., and Alcazar, A. 2006. Regional Correlations, Tectonic Settings, and Stratigraphic Solutions in the Yellowknife Greenstone Belt and Adjacent Areas from Geochemical and Sm-Nd Isotopic Analyses of Volcanic and Plutonic Rocks. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 3: 70-94.
- Cousens, B., Facey, K. and Falck, H. 2002. Geochemistry of the late archaean Banting Group, Yellowknife greenstone belt, Slave province, Canada: simultaneous melting of the upper mantle and juvenile mafic crust. *Can. J. of Earth Sci.*, Vol.39, pp.1635-1656
- Da Fonseca, E., Lobato, L.M. and Baars, F.J. 1997. The petrochemistry of the auriferous, volcanosedimentary Riacho dos Machados Group: geotectonic implications for shear-hosted gold. *J. of South Amer. Earth Sci.* vol. 10, pp.423-443
- De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. and Marchal, M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses – its relationship with current nomenclature. *Chem. Geol.*, vol. 29, pp. 183-210.
- De Souza, Z.S., Potrel, A., Lafon, J.-M., Althoff, F.J., Pimentel, M.M., Dall'Agnol, R. and De Oliveira, C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an archaean greenstone belt of the Rio Maria region ,vol. 109, pp. 293-315
- Dostal, J. and Mueller, W. 1992. Archean shoshonites from the Abitibi greenstone belt, Chibougamau (Québec, Canada): geochemistry and tectonic setting. *Jour. Volc. Geoth. Res.*, vol.53, pp.145-165
- Dubé, L.-M. 1993. Géologie de la région de Joutel (Abitibi). ET 90-12, MRNQ, 61p.
- Fan, J. and Kerrich, R. 1997. Geochemical characteristics of aluminum depletes and undepleted komatiites and HREE-enriched low-Ti tholeiites, western Abitibi greenstone belt. *Geochem. Cosmochem. Acta*, vol. 61, pp. 4723-4744.
- Ferrari, M.A.D. and Choudhuri, A. 2004. Structural controls on gold mineralisation and the nature of related fluids of the Paiol gold deposit, Almas greenstone belt, Brazil. *Ore Geology Reviews*, Vol.24, pp. 173-197
- Fowler, A.D., Berger, B., Shore, M., Jones, M.I. and Ropchan, J. 2002. Supercooled rocks: development and significance of varioles, spherulites, dendrites and spinifex in archaean volcanic rocks, Abitibi GB, Canada, , *Prec. res.*, vol. 115, pp. 311-328
- 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.

- Gresens, R. L., 1967, Composition - Volume - relationships of metasomatism: *Chem. Geol.*, vol. 2, pp. 47-65.
- Halkoaho, T., Liimatainen, J., Papunen, H. and Valimaa, J. 2000. Exceptionally Cr-rich basalts in the komatiitic volcanic association of the archaean Kuhmo greenstone belt, eastern Finland. *Mineralogy and Petrology*, Vol. 70 105-120
- 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.
- Hollings, P. 2002. Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior Province. *Lithos*, vol. 64, pp. 1-14.
- Hollings, P. and Kerrich, R. 1999. Trace element systematics of ultramafic and mafic volcanic rocks from the 3 Ga North Caribou greenstone belt, northwestern Superior Province. *Prec. Res.*, vol. 93. pp. 257-279.
- Hollings, P., Stott, G. and Wyman, D. 2000. Trace element geochemistry of the Meen-Dempster greenstone belt, Uchi subprovince, Superior prov, Can: back-arc development on the margins of an archaean protocontinent. *Can. J. Earth Sc.*, vol. 37, pp.1021-1038
- Hollings, P., Wyman, D. and Kerrich, R. 1999. Komatiite-basalt-rhyolite associations in northern Superior subprovince greenstone belts: significance of plume-arc interaction in the generation in the proto continental superior province. *Lithos*, vol. 46, pp
- Hughes, C. J., 1973, Spilites, keratophyres and the igneous spectrum. *Geol. Mag.*, vol. 109, pp. 513–527.
- Hunter, D.R. et Verbeek, J.A. 1993. Mafic to ultramafic sills of the early Archaean Zwartwater Suite, SE Transvaal. *Journal of African Earth Sciences*, Vol.17, No. 1, 51-64
- Ichang'I, D.W. and MacLean, W.H. 1991 The archaean volcanic facies in the Migori segment, Nyanza greenstone belt, Kenya: stratigraphy, geochemistry and mineralisation. *Journal of African Earth Sciences*. Vol.13, 277-290
- Ishikawa, Y., Sawagushi, T., Iwada, S. and Horiuchi, M., 1976, Delineation of prospecting targets for Kuroro deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration haloes: *Mining Geol.*, vol. 26, pp. 105-117.
- Jensen, L.S. 1976. A new cation plot for classifying subcalic volcanic rocks. *Ont. Geol. Surv., Misc. Paper* 66.
- Kampunzu, A.B., Tombale, A.R., Zhai, M., Bagai, Z., Majaule, T. and Modisi, M.P. 2003. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: evidence for a Neoarchaean continental active margin. *Lithos*. Vol. 71, pp.431-460
- Kerrich, R., Polat, A. and Hollings, P. 1999. Trace element systematics of Mg-, to Fe-tholeiitic basalt suites of the Superior Province implications for Archean mantle reservoirs and greenstone belt genesis. *Lithos*, vol. 46, pp.163-187.
- Kerrich, R., Wyman, D., Fan, J. and Bleeker, W. 1998. Boninite series: low Ti-tholeiite associations from the 2.7 Ga Abitibi greenstone belt. *Earth Planet. Sci. Let.*, vol. 164, pp. 303-316.
- Kroner, A., Jaeckel, P. and Brandl, G. 2000. Single zircon ages for felsic to intermediate rocks from the Pietersburg and Giyani greenstone belts and bordering granitoid orthogneisses, northern Kaapvaal craton. *J. of Afr. Earth Sc.*, vol. 30, pp. 773-793

- Laflèche, M.R. Dupuy, C. and Bougault, H. 1992a. Geochemistry and petrogenesis of archean mafic volcanic rocks of the southern Abitibi belt, Québec. *Prec. Res.*, vol.57, pp. 207-241
- Laflèche, M.R., Dupuy, C. and Dostal, J. 1992b. Tholeiitic volcanic rocks of the late archean Blake River Group, southern Abitibi greenstone belt: origin and geodynamic implications. *Can. Jour. of Earth Sci.*, Vol.29, 1448-1458
- Lafrance, B., Moorhead, J., Davis, D.W. 2003. Cadre géologique du camp minier de Doyon-Bousquet-Laronde. MRNFP, ET 2002-07, 43p.
- Lafrance, B., Mueller, W.U., Daigneault, R. and Dupras, N. 2000. Evolution of a submerged composite arc volcano : volcanology a geochemistry of the Normétal volcanic complex, Abitibi greenstone belt, Québec, Canaa, Precambrian research, vol. 101, pp. 299
- Larson, J.E. and Hutchinson, R.W. 1993. The Selbaie Zn-Cu-Ag deposits, Quebec, Canada: an example of evolution from subaqueous to subaerial volcanism a mineralization in an archean Caldera environment, , *Eco. geol.*,vol. 88, pp.1474
- Le Bas, M.J., Le Maître, R.W. and Woolley, A.R. 1992. The construction oft he Total Alkali-Silica chemical classification of volcanic rocks. *Mineral. Petrol.*, vol. 46, pp. 1-22.
- 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.
- Liaghat, S. and MacLean, W. H. 1995. Lithogeochemistry of altered rocks at the New Insco VMS deposit, Noranda, Quebec, *Journal of geochemical exploration*, 52, p:337-339-30-341
- MacLean, W.H. and Hoy, L.D. 1991. Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne mine, Noranda, Quebec. *Eco. Geol.*, pp. 506-528
- Manikyamba, C., Kerrich, R., Naqvi, S.M. and Mohan, M.R. 2004. Geochemical systematics of tholeiitic basalts from the 2.7 Ga Ramagiri-Hungund composite greenstone belt, Dharwar craton. *Prec. Res.*, Vol. 143, pp. 1-20
- Marquis, P., Hubert, C., Brown, A.C., Scherkus, E., Trudel, P. and Hoy, L.D. 1992. Géologie de la mine Donald J. LaRonde (Abitibi). ET 89-06, MRNQ, 106p.
- Maurice, C., Francis, D. and Madore, L. 2003. Constraints on early Archean crustal extraction and tholeiitic-komatiitic volcanism in greenstone belts of the Northern Superior Province. *C.J.E.S.*, vol 40, pp.431-445
- Messenger, P.R. 2000. Geochemistry of the Yandal belt metavolcanic rocks, Eastern Goldfields Province, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, Vol. 47, pp. 1015-1028
- Morris, P.A. and Witt, W.K. 1997. Geochemistry a tectonic setting of two contrasting archean felsic volcanic associations in the Eastern Goldfields, Western Australia, *Prec. Res.*, vol. 83, pp. 89-92.
- Ootes, L. and Lentz, D.R. 2002. Occurrence of bleached mafic flows and their association with stockwork sulphides and banded iron-formation in the Crestaurum Formation of the late Archean Yellowknife GB, NWT., *Geol. Surv. Can.*, *Cur. Res.* 2002-E5, 12 p.
- Pearson, V. 2007. Classification géochimique des environnements volcaniques felsiques favorables. Rapport, projet CONSOREM 2004-02, 37 p.



- Pearson, V. and Daigneault, R., 2009. An Archean megacaldera complex: the Blake River Group, Abitibi greenstone belt. *Precamb. Res.*, 168, 66–82.
- Piché, M. and Jébrak, M., 2004, Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration: *Jour. Geoch. Explor.*, vol. 82, pp. 59-77.
- Polat, A. 1999. Geochemistry of subduction-related mafic to felsic volcanic rocks of the late archean Wawa greenstone belts, Superior province, Canada. *ARI- Int. Jour. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 51, pp. 277-295
- Polat, A. and Kerrich, R. 2000. Archean greenstone belt magmatism and the continental growth–mantle evolution connection constraints from Th–U–Nb–LREE systematics of the 2.7 Ga Wawa subprovince, Superior province, Canada. *Earth Planet. Sci. Let.*, vol. 175
- Polat, A. and Kerrich, R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior province, Canada: Implication for late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 141: 36-52.
- Polat, A., Kerrich, R. and Wyman, D.A. 1998. The late Archean Schreiber-Hemlo and White river-Dayohessarah greenstone belts Collage of oceanic plateaus oceanic arc and subduction accretion complexes. *Tectonophysics*, vol. 289, pp. 295-236.
- Polat, A., Kerrich, R. and Wyman, D.A. 1999. Geochemical diversity in oceanic komatiites and basalts from the late Archean Wawa greenstone belts: trace element and Nd isotope evidence for a heterogeneous mantle. *Prec. Res.*, vol. 94, pp. 139-173
- Puchetl, I.S., Hofmann, A.W., Amelin, Y.V., Garbe-Schonberg, C.-D., Samsonov, A.V. and Shchipansky, A.A. 1999. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero GB. *Geochem. Cosmochem.*, vol. 63, pp.3579-3595
- Renaud, J. MacLachlan, K. and Cairns, S. 2002. Stratigraphy and structure of the Aylmer Lake volcanic belt and surrounding metasedimentary rocks, Northwest Territories. *Geological Survey of Canada, Current Research 2002-C2*, 11 p.
- Roberts, M.D., Oliver, N.H.S., Fairlough, M.C., Holtta, P.S. and Lahtinen, R. 2003. Geochemical and Oxygen Isotope Signature of Sea-Floor Alteration Ass-- Massive Sulfide Deposit, Ruostesuo, Central Finland. *Eco. Geol.*, vol. 98, pp. 535-556
- Rollinson, H. R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman, Edinburgh Gate, 352p.
- Rollinson, H. 1999. Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from the Sula Mountains greenstone belt, Sierra Leone. *Contrib Mineral Petrol*, Vol. 134, pp. 86-101
- 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*, 76: 119-153
- Schandl, E.S., Gorton, P.M. and Bleeker, W. 1999. A systematic study of rare earth and trace element geochemistry of host rocks to the Kidd Creek volcanogenic massive sulfide deposit. *Economic Geology, Monograph 10* (1999) 309-334
- Schandl, E.S., Gorton, M.P. and Wasteneys, H.A. 1995. Rare earth element geochemistry of the metamorphosed volcanogenic massive sulfide deposits of the Manitouwadge mining camp, Superior province, Canada: a potential exploration tool? *Economic Geology*, 91: 473-476

- Schulz, K.J. 1980. The magmatic evolution of the Vermilion greenstone belt, NE Minnesota. *Prec. Res.*, Vol. 11, 215-245
- Scott, C.R., Mueller, W.U. and Pilote, P. 2002. Physical volcanology, stratigraphy, a lithogeochemistry of an archean volcanic arc: evolution from plume-related volcanism to arc rifting of SE Abitibi GB, Val D'Or, Canada, *Prec.Res.*, vol. 115, pp.223-260
- Shegelski, R.J. 1982. Archean cratonization, emergence and red bed development, Lake Shebandowan area, Canada. *Prec. Res.*, Vol.12, 331-347
- Skulski, T., and Percival, J.A., 1996, Allochthonous 2.78 Ga oceanic plateau slivers in a 2.72 Ga continental arc sequence; Vizion greenstone belt, northeastern Superior Province, Canada. *Lithos*, 37: 163-179.
- Srivastava, R.K., Singh, R.K. and Verma, S.P. 2004. Neoarchaeon mafic volcanic rocks from the southern Bastar greenstone belt, Central India: petrological and tectonic significance. *Precambrian Research*, Vol. 131, 305-322
- Stern, R.A., Syme, E.C., Bailes, A.H. and Lucas, S.B. 1995. Paleoproterozoic (1.90-1.86 Ga) arc volcanism in the Flin Flon belt, Trans-Hudson Orogen, Canada. *Contr. Miner. Petrol.*, vol. 119, pp.117-141
- Stone, W.E., Crocket, J.H., Dickin, A.P. and Fleet, M.E. 1995. Origin of archean ferropicrites: geochemical constraints from the Boston Creek Flow, Abitibi greestone belt, Ontario, Canada. *Chem. Geol.*, Vol.121, 51-71
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Sci. Rev.*, vol. 12, pp. 1-33.
- Svetov, S.A., Svetova, A.I. and Huhma, H. 2001. Geochemistry of the Komatiite-Tholeiite rock association in the Vedlozero-Segozero archean greenstone belt, Central Karelia. *Geochem. Inter.*, Vol. 39, S24-S38
- Thurston, P.C. and Fryer, B.J. 1983. The geochemistry of repetitive cyclical volcanism from basalt through rhyolite in the Uchi-Confederation Greenstone Belt, Canada, , *Contr. Miner.Petrol.*, vol. 83, pp. 206.
- Tomlinson, K.Y., Davis, D.W., Percival, J.A., Hughes, D.J. and Thurston, P.C. 2002. Mafic to felsic magmatism a crustal recycling in the Obonga Lake greenstone belt : evidence from geochemistry, isotopes a U-Pb geochron. *Prec. Res.*, vol. 114, pp. 295-325
- Tomlinson, K.Y., Hughes, D.J., Thurston, P.C. and Hall, R.P. 1999. Plume magmatism and crustal growth at 2.9 to 3.0 Ga in the Steep Rock and Lumby Lake area, Western Superior Province. *Lithos*, vol. 46, pp. 103-136.
- Tomlinson, K.Y., Stevenson, R.K., Hughes, D.J., Hall, R.P., Thurston, P.C. and Henry, P. 1998. The Red Lake greenstone belt, Superior province: evidence of plume-related magmatism at 3 Ga and evidence of an older enriched source. *Prec. Res.*, vol. 89, pp.
- Ujike and Goodwin, A.M. 1987 Geochemistry a origin of Archean felsic metavolcanic rocks, central Noranda area, Quebec, Canada, Osamu, *Can. J. Earth Sci.*, vol. 24, pp. 2555-2557.
- Vearncombe, S. and Kerrich, R. 1999. Geochemistry and geodynamic setting of volcanic and plutonic rocks associated with Early Archaean volcanogenic massive sulphide mineralization, Pilbara Craton. *Prec. Res.*, vol. 98, pp. 243-270
- Venneman, T.W. and Smith, H.S. 1999. Geochemistry of mafic and ultramafic rock in the type section of the Kromberg Fm, Barberton Greenstone belt. In: Lowe et al., ed., *Geologic evolution of the Barberton greenstone belt*, GSA, Spec. Pap. 139, pp.133-150.

- Wang, Z., Wilde, S.A., Wang, K. and Yu, L. 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: late archean magmatism and crustal growth in the north China craton. *Prec. Res.*, Vol. 131, pp. 323-343
- Wilson, A.H. and Grant, C.E. 2006. Physical volcanology and compositions of the basaltic lavas in the Archean Nzuse Group, White Mfolozi inlier, South Africa. In: Reimold and Gibson eds., *Processes on the early earth*. GSA, Spec. Pap. 405, pp. 255-289.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, Vol. 20, pp. 352-343.
- Wyman, D. and Hollins, P. 1998. Long-lived mantle-plume influence on an Archean protocontinent: Geochemical evidence from the 3 Ga Lumby Lake greenstone belt, Ontario, Canada. *Geology*, vol. 26, pp. 719-722.
- Wyman, D.A. 1999. A 2.7 Ga depleted tholeiite suite: evidence of plume-arc interaction in the Abitibi greenstone belt, Canada. *Prec. Res.*, vol. 97, pp. 27-42.
- Wyman, D.A., Bleeker, W. a Kerrich, R. 1999. A 2.7 Ga komatiite, low Ti tholeiite, arc tholeiite transition, a inferred proto-arc geodynamic setting of the kidd creek deposit: Evidence from precise trace element data. *Eco. Geol.*, vol. , pp. 511-528
- Wyman, D.A., Kerrich, R. and Polat, A. 2002. Assembly of Archean cratonic mantle lithosphere and crust plume–arc interaction in the Abitibi–Wawa subduction–accretion complex. *Prec. Res.*, vol. 115, pp. 37-62.
- Xie, Q., Kerrich, R. and Fan, J. 1993. HFSE/REE fractionations recorded in three komatiite-basalt sequences, Archean Abitibi greenstone belt: Implications for multiple plume sources and depths. *Geochim. et Cosmo. Acta*, Vol. 57, 4111-4118
- Yamashita, K., Creaser, R.A., Jensen, J.E. and Heaman, L.M. 2000. Origin and evolution of mid- to late-Archean crust in the Hanikahimajuk Lake area, Slave Prov.; evidence from U-Pb geochron., geochem. and Nd-Pb data. *Prec. Res.*, vol. 99, pp. 197-224
- Yoder, H.S. and Tilley, C.E. 1962. Origin of basalt magmas: An experimental study of natural and synthetic systems. *Jour. Petrol.*, vol. 3, pp.342-532
- Yuanming, P. and Fleet, M.E. 1995. Geochemistry a origin of cordierite-orthoamphibole gneiss a associated rocks at an archaen volcanogenic massive sulphide camp : Manitouwadge, Ontario, Canada, , *Prec. Res.*, vol. 74, pp. 77-79.