
Développement d'un nouvel outil d'exploration pour les EGP : le Diagramme Ratio-Arachnide

PROJET 2003-09

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

Mai 2007



AVERTISSEMENT

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

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

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

Pearson V. 2007. Développement d'un nouvel outil d'exploration pour les EGP : le Diagramme Ratio-Arachnide, Rapport 2003-09, Projet CONSOREM, 35p.

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

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

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

RÉSUMÉ

L'évaluation du potentiel économique en EGP d'une séquence ignée repose en grande partie sur la compréhension des processus pétrogénétiques et sur l'usage de plusieurs diagrammes servant à interpréter la fertilité d'un territoire ou d'un contexte géologique donné. Toutefois, l'utilisation de ces diagrammes nécessite soit des analyses précises et coûteuses des EGP, soit la manipulation peu conviviale de plusieurs graphiques complémentaires.

Dans le cadre de sa programmation régulière, le CONSOREM a développé un nouvel outil d'exploration s'appliquant aux éléments du groupe de platine. Le diagramme de ratio-arachnide EGP (RA-EGP) permet de mettre en relief les différentes sources magmatiques et leur état de fertilité ou d'appauvrissement en EGP. Simple et efficace, il a pour objectif de maximiser l'utilisation de l'information contenue dans les diagrammes binaires traditionnels et d'éliminer la subjectivité associée à l'interprétation de la variation des ratios « interéléments ».

Les paramètres du diagramme RA-EGP correspondent au facteur $1000 \cdot \Sigma(\text{Pd} + \text{Pt})$ et aux ratios Pd/S, Ni/Pd, Ni/Cu, Cu/Pd, Cu/Pt, Pd/Pt, Pd/Ir et Cu/Ir normalisés par rapport au manteau primitifs.

Le mode d'utilisation et la caractérisation des profils de ratio-arachnide EGP ont été développés à partir de la littérature. Ainsi, les signatures du manteau, des résidus réfractaires de la fusion partielle du manteau, des magmas ultramafiques saturés en Cu-Ni, des magmas appauvris, des magmas enrichis en soufre et en oxydes et des pegmatoïdes ont été déterminées.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT	ii
Résumé.....	iii
Table des matières	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	v
1 Introduction	1
1.1 Historique du projet	1
1.2 Objectif	1
1.3 Méthodologie	1
2 Présentation du diagramme de Ratio-Arachnide EGP	2
2.1 Fondement.....	2
2.2 Diagramme de Ratio-Arachnide	3
3 Caractérisation des profils de Ratio-Arachnide	4
3.1 Manteau primitif	4
3.2 Xénolites mantelliques	4
3.3 Complexes ignés minéralisés	4
3.3.1 Bushveld	5
3.3.2 Stillwater.....	5
3.3.3 Great Dyke.....	5
3.3.4 Autres complexes ignés	6
3.4 Roches effusives océaniques et continentales.....	6
3.4.1 Ophiolite : Troodos	6
3.4.2 Chromitite : Kempirsai et autres.....	7
3.4.3 Rift d'Islande	7
3.4.4 MORB, OIB.....	8
3.5 Roches effusives komatiitiques	8
3.5.1 Komatiites de Vetreny	8
3.5.2 Komatiite de Munro	9
3.5.3 Dépôts de Cu-Ni associés aux komatiites	9
3.6 Mobilisations hydrothermales et météorisation.....	10
3.6.1 Météorisation du complexe de Musongati	10
3.6.2 Complexe gabbroïque de Montcalm	10
3.6.3 Lac des Îles.....	11
3.7 Résidu réfractaire – source appauvrie	11
3.7.1 Complexe de la Rivière Bell.....	11
4 Utilisation du RA-EGP	12
4.1 Résumé des signatures types	12
4.2 Outil d'exploration	13
5 Conclusions et avenues de recherche	13
Remerciements	14
Références	15
Cahier des figures	19

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Diagramme binaire Ni/Pd et Cu/Ir. Retour au texte	19
Figure 2: Structure du diagramme de Ratio-Arachnide. Retour au texte	19
Figure 3: Profil du Ratio-arachnide du manteau primitif. Retour au texte	20
Figure 4: Profils du Ratio-arachnide pour une suite de xénolites mantelliques. Données de Schmidt et al. (2003). Retour au texte	20
Figure 5: Profils de Ratio-arachnide du UG-2 (Bushveld). Données de Barnes et Maier (2002). Retour au texte	21
Figure 6: Profils de ratio-arachnide du Stillwater. Données de Barnes et Naldrett (1985). Retour au texte	21
Figure 7: Profils de RA-EGP du Great Dyke. Données de Oberthür (2002). Retour au texte	22
Figure 8: Profils de RA-EGP pour le complexe des Troodos. Données de Edwards, 1990. Retour au texte	22
Figure 9: Profils de RA-EGP pour le dépôt de Kempirsai. Données de Melcher et al. (1999). Retour au texte	23
Figure 10: Éventail de profils RA-EGP pour les roches effusives d'Islande. Données de Momme et al. (2003). Retour au texte	23
Figure 11: Éventail de profils RA-EGP pour la crête océanique de Kolbeinsey et de Cameron, ainsi que pour les îles de la Réunion. Données de Rehkamper et al. (1999). Retour au texte	24
Figure 12: Profils RA-EGP de la komatiite de Vetreny. Données de Pushtel et Humayun (2001). Retour au texte	24
Figure 13: Variation des profils de RA-EGP pour la coulée komatiitique de Fred. Données de Crocket et McRae (1986). Retour au texte	25
Figure 14: Profils RA-EGP caractérisant les sulfures d'un ensemble de dépôts de Cu-Ni associés aux komatiites (Thompson, Langmuir, Perseverance, Mt Keith, Dumont, Donaldson). Données de Leshner et Keays (2002). Retour au texte	26
Figure 15: Profil RA-EGP de la cuirasse et de la ferralite de Musongati. Données de Bandyayera (1997). Retour au texte	26
Figure 16: Profils RA-EGP pour le dépôt Cu-Ni de Montcalm. Données de Barrie et Naldrett (1990). Retour au texte	27
Figure 17: Profils RA-EGP de Lac des Iles. Données de Brüggmann et al. (1989). Retour au texte	28
Figure 18: Profils des ETR pour les roches hôtes de l'indice OP-92. Les trois courbes représentent (de haut en bas) un gabbro anorthositique, une pyroxénite contenant 10% de pyrrhotine et une pyroxénite non-minéralisée. Retour au texte	29
Figure 19: Profils RA-EGP pour les roches hôtes de l'indice OP-92. Retour au texte	29
Figure 20: Organigramme résumant les différentes signatures de RA-EGP en relation avec les contextes pétrogénétiques. Retour au texte	30

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste des neuf paramètres utilisés pour le développement du diagramme de ratio-arachnide.	3
Tableau 2: Valeurs mantelliques en ppm utilisées (tiré de Barnes et Maier, 1999)	4
Tableau 3: Variation du contenu Pd-Pt pour le dépôt de Musongati. Données en ppb tirées de Bandyayera (1997).	10

1 INTRODUCTION

Les travaux d'exploration ciblant les éléments du groupe du platine (EGP) sont relativement récents au Québec. Cette réalité est conséquente à la fois d'un marché prometteur et d'un besoin de diversification, considérant l'attrait des territoires dits non traditionnels.

D'autre part, ce groupe d'éléments est géologiquement associé à des processus pétrogénétiques dont l'état des connaissances est en constant développement. L'exploration de ces substances requiert la compréhension de ces processus et l'usage de plusieurs diagrammes de discrimination dans le but de porter un jugement sur la fertilité d'un territoire ou d'un contexte géologique donné.

C'est dans cet optique que le développement d'un outil simple et efficace pour mettre en relief les différentes sources magmatiques et leur état de fertilité ou d'appauvrissement (en EGP), a été développé.

Ce rapport permettra de caractériser l'éventail des signatures possibles, de définir les limites d'application du nouvel outil d'interprétation et de mettre en évidence les sources potentielles d'erreurs.

1.1 Historique du projet

Le projet 2003-09 constitue la suite du projet 2002-02 qui touchait trois aspects :

1. la documentation des minéralisations EGP, dont l'objectif était de compiler, classier et comparer les dépôts EGP, afin d'en dégager des critères facilitant l'élaboration d'un modèle d'exploration ;
2. l'acquisition de données par l'échantillonnage de gîtes et d'indices sélectionnés afin de documenter les variations géochimiques et évaluer le comportement d'un groupe d'éléments traces ;
3. l'évaluation du potentiel en minéralisation EGP pour la Province de Grenville.

Le principal résultat obtenu le projet 2002-02 fût l'élaboration d'une première version du diagramme arachnide qui permet, par l'étude de profils types, de classier les roches hôtes et encaissantes de minéralisation en termes de profils appauvri, enrichi, stérile et fertile. Les fondements de ce diagramme sont revus à la section suivante. Ce premier résultat a par la suite été utilisé afin de caractériser les échantillons prélevés dans le cadre du deuxième volet.

1.2 Objectif

Les objectifs du projet 2003-09 sont de :

- produire une version formelle du diagramme de Ratio-Arachnide EGP (RA-EGP)
- donner et expliquer les fondements qui ont permis l'élaboration du diagramme.
- fournir les éléments permettant l'interprétation des résultats.

1.3 Méthodologie

Afin d'atteindre cet objectif, deux aspects ont été abordés. Premièrement, une revue de la littérature a permis de compléter la documentation des signatures types, dans des contextes minéralisés variés

(Cu-Ni sans EGP, Cu-Ni avec EGP, Bushveld, Stillwater, etc.) et non-minéralisés (xénolite mantellique, MORB, OIB, diabase, ophiolite, komatiite, etc.). Deuxièmement, une application MS-Access a été développée afin de faciliter l'utilisation de ce type de diagramme.

2 PRÉSENTATION DU DIAGRAMME DE RATIO-ARACHNIDE EGP

2.1 Fondement

L'évaluation du potentiel économique en EGP d'une séquence ignée pose plusieurs défis. Pour l'essentiel, la problématique consiste à estimer le plus fidèlement possible les conditions physico-chimiques ayant prévalu et les variations de ces conditions dans le temps. Ces dernières variations (pression, température, état de saturation, contamination, etc.) représentent des moments clés de la métallogenèse et peuvent être responsables des concentrations économiques en EGP.

Pour établir la « favorabilité » d'une séquence ou tout simplement faire l'étude des minéralisations, certains diagrammes ont été utilisés. Le diagramme le plus communément utilisé, et ce depuis plus de 40 ans, est le diagramme arachnide-EGP. Tels qu'exposés par Rollinson (1993), deux modes de présentation des données sont utilisés. Un premier où les données sont normalisées par rapport aux chondrites et les éléments présentés en ordre de point de fusion décroissant et un second où les données sont normalisées par rapport au manteau primitif et les éléments présentés en ordre d'incompatibilité croissante. Ces diagrammes ont l'avantage d'amener des éléments de réponse sur les événements de saturation en soufre et le taux de fusion partielle du manteau. Ces informations sont considérées comme étant de première importance pour l'exploration minière. Par contre, ces graphiques nécessitent la détermination analytique précise des EGP, ce qui est rarement exécutée de façon routinière lors d'une campagne d'exploration.

Un second type de diagramme a été proposé par Barnes et al. (1988). Il s'agit d'un ensemble de cinq diagrammes binaires évaluant sur chacun des axes un ratio élémentaire dont la variation est influencée par les processus pétrogénétiques. Ces diagrammes permettent d'établir l'état d'enrichissement ou d'appauvrissement d'un échantillon par rapport au spectre des roches effusives mafiques. Les diagrammes communément utilisés sont : Ni/Pd vs Cu/Ir , Ni/Pd vs Cu/Pt, Cu/Pd vs Pd, Pd/Ir vs Ni/Cu et Pd/Pt vs Ni/Cu.

Un des avantages de ces diagrammes réside dans le fait que le nombre de déterminations analytiques des EGP est réduit à trois et elles correspondent à celles qui sont les plus aisément quantifiables. Un autre avantage des diagrammes est qu'ils permettent de qualifier, par l'interprétation du graphique, l'enrichissement et l'appauvrissement d'un échantillon. Toutefois, leur utilisation nécessite la manipulation des cinq graphiques qui présentent des informations complémentaires, ce qui rend la tâche peu conviviale.

Lorsque l'on considère le traitement d'une base de données dont les sources sont multiples et les descriptions hétérogènes, une seconde difficulté émerge. Telle que présentée à la [figure 1](#), l'utilisation des diagrammes binaires ne permet pas de qualifier la nature exacte d'une modification de ratio. Ainsi, dans l'exemple présenté, l'évaluation de l'état d'enrichissement ou d'appauvrissement ne permet pas de savoir lequel ou lesquels des quatre éléments causent la modification.

C'est sur la base de ces diagrammes binaires que l'idée de développer un nouvel outil permettant de visualiser simultanément les variations d'un ensemble de ratios a été élaborée.

2.2 Diagramme de Ratio-Arachnide

Le diagramme de Ratio-Arachnide EGP a pour objectif de maximiser l'utilisation de l'information contenue dans les diagrammes binaires et d'éliminer la subjectivité associée à l'interprétation de la variation des ratios « interéléments ».

Tel que montré à la [figure 2](#), chacun des ratios « interéléments » provenant des diagrammes binaires est extrait afin d'être intégré aux paramètres du diagramme de Ratio-Arachnide. Par la suite, chacun de ces ratios est normalisé par rapport au manteau primitif afin d'assurer une comparaison par rapport à un précurseur unique.

Ce diagramme est nommé « Ratio-Arachnide » du fait qu'il ne s'agit pas d'un diagramme arachnide traditionnel où l'abscisse est représentée par une suite d'éléments. Dans le cas présent, l'abscisse est représentée par des ratios eux-mêmes normalisés par rapport aux ratios mantelliques.

Le diagramme est constitué de neuf paramètres ([tableau 1](#)). Le premier paramètre ($1000 \cdot \Sigma(\text{Pd} + \text{Pt})$) représente la somme du contenu en platine et palladium, en ppb, multipliée par 1000. Ce paramètre permet de séparer les échantillons minéralisés sur le diagramme.

Les huit autres paramètres sont des ratios normalisés par rapport au manteau primitif (MP) et sont mathématiquement élevés au carré. La raison de cette modification mathématique est uniquement d'accentuer les variations de ratios « interéléments ». La mise au carré a pour effet de minimiser les faibles variations et d'amplifier les importantes. Notons enfin que les ratios Ni/Pd et Ni/Cu sont respectivement divisés et multipliés par 10. Cette dernière manipulation est surtout de nature esthétique et permet de rehausser les caractéristiques des différents profils selon un schéma mnémotechnique.

L'ordre de présentation des ratios sur le diagramme a été guidé par le désir de maximiser le contraste entre différents contextes. Quelques tentatives ont permis de justifier un ordre basé sur des considérations formelles, qui se sont toutefois avérées moins discriminantes.

Tableau 1: Liste des neuf paramètres utilisés pour le développement du diagramme de ratio-arachnide.

Paramètre	Ratios mantelliques	Méthode de normalisation
$1000 \cdot \Sigma(\text{Pd} + \text{Pt})$	$\text{Pd} + \text{Pt} = 11 \text{ ppb}$ <i>N.B. Ce paramètre ne représente pas un ratio</i>	$1000 \times (\Sigma \text{Pd} + \text{Pt})$ $1\text{g/t} = 1 \times 10^6$
Pd/S	$\text{Pd}/\text{S} = 0.000016$	$[(\text{Pd}/\text{S})_{\text{échant.}} / (\text{Pd}/\text{S})_{\text{MP}}]^2$
Ni/Pd	$\text{Ni}/\text{Pd} = 500\,000$	$[0,1 * (\text{Ni}/\text{Pd})_{\text{échant.}} / (\text{Ni}/\text{Pd})_{\text{MP}}]^2$
Ni/Cu	$\text{Ni}/\text{Cu} = 71$	$[10 * (\text{Ni}/\text{Cu})_{\text{échant.}} / (\text{Ni}/\text{Cu})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Pd	$\text{Cu}/\text{Pd} = 7000$	$[(\text{Cu}/\text{Pd})_{\text{échant.}} / (\text{Cu}/\text{Pd})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Pt	$\text{Cu}/\text{Pt} = 4000$	$[(\text{Cu}/\text{Pt})_{\text{échant.}} / (\text{Cu}/\text{Pt})_{\text{MP}}]^2$
Pd/Pt	$\text{Pd}/\text{Pt} = 0.57$	$[(\text{Pd}/\text{Pt})_{\text{échant.}} / (\text{Pd}/\text{Pt})_{\text{MP}}]^2$
Pd/Ir	$\text{Pd}/\text{Ir} = 1.18$	$[(\text{Pd}/\text{Ir})_{\text{échant.}} / (\text{Pd}/\text{Ir})_{\text{MP}}]^2$
Cu/Ir	$\text{Cu}/\text{Ir} = 8235$	$[(\text{Cu}/\text{Ir})_{\text{échant.}} / (\text{Cu}/\text{Ir})_{\text{MP}}]^2$

3 CARACTÉRISATION DES PROFILS DE RATIO-ARACHNIDE

Le mode d'utilisation et la caractérisation des profils de ratio-arachnide EGP (RA-EGP) ont été développés par l'utilisation d'un cortège d'informations provenant de la littérature. Cette partie décrit différents contextes avec leurs signatures particulières.

3.1 Manteau primitif

Les ratios étant normalisés par rapport au manteau primitif (cette normalisation s'applique aux huit ratios et non à la somme Pd+Pt), cette première courbe ([figure 3](#)) permet de voir l'aspect d'un profil non modifié. On y remarque que la somme Pd+Pt se situe à 10^4 (c.-à-d. $1000 \cdot \Sigma(\text{Pd}+\text{Pt})=10^4 \rightarrow \text{Pd}+\text{Pt}=10$), ce qui représente le contenu de 11 ppb (on se rappelle que $10^6 = 1000$ ppb) et que la position relative des troisième et quatrième ratios (Ni/Pd et Ni/Cu) diverge de la valeur unitaire due aux facteurs de normalisation utilisés. Les valeurs mantelliques utilisées ([tableau 2](#)) pour chacun des éléments proviennent des travaux de Barnes et Maier (1999).

Cette courbe peut être qualifiée de « fertile, non-minéralisée », c'est-à-dire qu'elle indique une roche ayant le potentiel pour générer un enrichissement, mais qu'aucun événement n'a permis d'actualiser ce potentiel lors de la pétrogenèse.

Tableau 2 : Valeurs mantelliques en ppm utilisées (tiré de Barnes et Maier, 1999)

Cu	Ir	Ni	Pt	Pd	S ¹
28	0,0034	2000	0,007	0,004	250

3.2 Xénolites mantelliques

Les profils présentés à la [figure 4](#) montrent la variation des signatures associées à des xénolites péridotitiques (Iherzolites fertiles, harzburgites métasomatiques) et pyroxénitiques provenant des centres volcaniques de Eifel et de Vogelsberg en Allemagne. Même si le contenu brut en EGP est supérieur au contenu prévu pour un équilibre cœur-manteau (Schmidt et al., 2003), l'éventail des profils de RA-EGP montre une enveloppe ayant les caractéristiques de la signature mantellique.

Il est à noter que les ratios Pd/S et Ni/Pd varient de façon inversement proportionnelle. Cette variation est continue et marque les différents ratios observés entre les Iherzolites et les harzburgites.

3.3 Complexes ignés minéralisés

Quelques complexes ignés sont reconnus pour leurs minéralisations en platinoïdes et constituent des archétypes importants pour documenter les profils de RA-EGP. Trois exemples sont présentés afin de démontrer le fonctionnement du nouveau diagramme et les règles pétrogénétiques qui peuvent être interprétés selon les différents paramètres. Il s'agit du complexe de Bushveld, le Stillwater et le Great Dyke.

¹ Cette valeur provient de McDonough et Sun, 1995.

3.3.1 Bushveld

Les minéralisations du complexe du Bushveld ([figure 5](#)) montrent une signature de ratio-arachnide qui diverge substantiellement du profil mantellique (données de Barnes et Maier 2002).. De façon générale, le profil montre une structure en crochet dont la partie inférieure est centrée sur le ratio Ni/Pd, alors que la portion droite du crochet montre l'ébauche d'un « M ». Outre la teneur élevée en Pt+Pd, quelques caractéristiques importantes émergent de ce diagramme.

- Le ratio Pd/S est très élevé. Ceci indique que la phase sulfurée de cette roche est fortement enrichie en Pd et que le soufre a efficacement emmagasiné les EGP du magma.
- Le ratio Ni/Pd est très faible. Cet indicateur est le corollaire du précédent, une variation inversement proportionnelle au ratio Pd/S est observée.
- Le ratio Ni/Cu varie en fonction du degré de fusion partielle. Le Ni étant plus réfractaire, il aura tendance à accuser une perte par rapport au Cu.
- Les ratios Cu/Pd et Cu/Pt varient de façon co-linéaire et ont tendance à développer un segment horizontal. Dans certain cas, la nature légèrement plus réfractaire du Pt aura pour effet de générer une pente positive (voir l'exemple du Stillwater). Dans une séquence minéralisée, comme dans le présent cas, ces deux ratios sont fortement inférieurs aux ratios mantelliques dus à l'enrichissement en Pt-Pd.
- Le ratio Pd/Pt est généralement près de la valeur unitaire et est conséquent avec les deux ratios précédents joints par un segment horizontal. En fait, le ratio Pd/Pt exprime la valeur de la pente entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt. L'information peut sembler redondante mais, comme mentionné plus loin, elle permettra de mettre en relief des informations complémentaires.
- Le ratio Pd/Ir est supérieur à la valeur mantellique et reflète la grande différence de compatibilité entre le Pd et l'Ir.

3.3.2 Stillwater

Le Stillwater contient les minéralisations les plus fortement enrichies en Pd de la planète. La [figure 6](#) montre le profil d'un ensemble de 40 échantillons provenant de Barnes et Naldrett (1985).

Tout comme pour le UG-2 du Bushveld, la signature des profils montre un motif similaire à ceux des profils du UG-2 (Bushveld). L'enrichissement particulier en Pd a pour effet de générer un segment à pente positive entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt. Les échantillons ayant cette caractéristique ont également un ratio Pd/Pt supérieur à un.

3.3.3 Great Dyke

L'exemple du Great Dyke suscite un intérêt particulier étant donné que la section d'échantillonnage proposée provient d'une section de forage recoupant le toit, la minéralisation et le mur. Cette particularité fait ressortir un second type de signature de ratio-arachnide.

La [figure 7](#) montre un ensemble de 23 profils de RA-EGP provenant du forage CD-02 de la mine Hartley (Oberthür, 2002). Ce forage recoupe la Main Sulfide Zone (MSZ) qui est l'hôte de la minéralisation. Cette figure présente deux types de signature. La première est associée aux minéralisations et montre un motif similaire à celui du Bushveld tandis que la seconde montre des caractéristiques très différentes :

- le ratio Pd/S est inférieur à la valeur unitaire, ce qui suggère que la phase sulfurée est appauvrie en Pd ;
- le ratio Ni/Pd augmente ce qui est une conséquence directe de l'appauvrissement en Pd ;
- les ratios Cu/Pd et Cu/Pt varient encore de façon co-linéaire mais ces derniers ont une valeur supérieure à l'unité.

Il est intéressant de noter que le groupe d'échantillons provenant du forage CD-02 appartient à une section de forage d'environ trois mètres à travers la MSZ. Du mur vers le toit de la minéralisation, le diagramme de RA-EGP met en relief un éventail de signatures passant de fertiles (crochet suivi d'un "M") à appauvries (crochet suivi d'un "W"). La zone de transition entre les deux signatures n'a que quelques centimètres. Un phénomène similaire est observé pour la section de forage SD-04. Dans ce dernier cas, le maximum des teneurs en Pt et Pd correspond au point d'inversion des signatures fertiles et appauvries.

3.3.4 *Autres complexes ignés*

Un certain nombre de complexes ont fait l'objet d'une évaluation afin de conforter la validité des interprétations. En voici quelques-uns :

- le Complexe de East Bull Lake (Peck et al. 2001) ;
- le Complexe de Duluth – Partridge River (Thériault et al., 2000) ;
- le Complexe de Monchegorsk (Dedeev et al., 2002) ;
- les Complexes de Penikat et de Portino (Alapieti et Lahtinen., 2002) ;
- le Complexe de Lac des Îles (Sutcliffe et al., 1989).

De ces exemples, il ressort que le profil présentant un spectre en crochet suivi d'un « M » est une caractéristique constante des minéralisations EGP, les seules différences étant associées à l'amplitude relative de la structure en crochet et du « M ».

3.4 Roches effusives océaniques et continentales

Les exemples qui suivent ne sont pas associés à des minéralisations EGP économiques. L'intérêt de présenter le profil de RA-EGP de ces contextes est restreint à la caractérisation des signatures afin de mettre en évidence le potentiel du diagramme dans l'interprétation des différents environnements. Les exemples suivants mettent en relief que même en présence d'un contenu en EGP de l'ordre de quelques ppb, une grande cohérence de l'évolution des ratios est préservée.

3.4.1 *Ophiolite : Troodos*

La séquence du Crétacé supérieur des Troodos représente un complexe ophiolitique classique. Une section comprend des harzburgites tectonisées du manteau supérieur successivement recouvertes par des dunites litées, des wehrlites et des gabbros. Au sommet se situent les granophyres et les plagiogranites suivis des complexes de dykes et de la séquence extrusive.

Cette étude relative au contenu en EGP de la séquence ophiolitique des Troodos est particulièrement intéressante par la diversité des lithologies échantillonnées. Elle permet entre autres d'apprécier la variation du contenu en EGP en fonction de la séquence stratigraphique (données de Edwards, 1990).

Le diagramme de RA-EGP ([figure 8](#)) permet de faire ressortir trois signatures : 1) les gabbros montrent un profil en crochet peu accentué ou les cinq derniers ratios sont près de la valeur mantellique ; 2) la partie wehrilitique montre un profil similaire à la seule différence que la portion de droite du crochet montre une structure en "M" et 3) les parties harzburgitiques montrent un profil en "W". Les trois signatures permettent de mettre en relief la nature fertile du magma source et le fractionnement magmatique s'opérant entre les produits de fusion partielle et le résidu réfractaire. Ces informations corroborent celles des auteurs sur la base de l'analyse des diagrammes standards.

Cet exemple montre le potentiel du diagramme de RA-EGP pour cartographier efficacement les différentes portions d'un complexe igné.

3.4.2 Chromitite : Kempirsai et autres

La mine Kempirsai est le plus grand dépôt de chromite podiforme au monde. Ce dépôt est contenu dans les roches ophiolitiques (400-420 ma) de l'Oural.

Les auteurs de l'étude (Melcher et al., 1999) proposent que sa formation soit reliée à la fusion partielle d'un manteau appauvri (DM, appauvri en LREE). Dans un tel contexte, les P-EGP furent retirés du magma lors d'une première étape de fusion partielle. Le magma résiduel fut donc indirectement enrichi en I-EGP. Le mécanisme de captage des I-EGP lors de la deuxième étape de fusion partielle demeure sujet à débat.

Le diagramme de ratio-arachnide EGP met bien en relief la nature enrichie en I-EGP. Malgré l'absence de données pour le soufre, on reconnaît la signature en crochet suivi d'un profil en "M" caractéristique des magmas fertiles. De plus, le "M" est horizontal et donne à l'aspect général du profil une pente négative, ce qui est une caractéristique importante des minéralisations chromifères. L'abaissement de cette pente est directement associé à l'apport substantiel de l'iridium.

La [figure 9](#) montre un ensemble de 13 profils pour des lithologies diverses (serpentinites, troctolites, gabbros, harzburgites, dunites, hornblendites et chromitites) (Melcher et al., 1999). On y remarque un balayage de signatures allant d'un profil plat caractéristique du manteau, donc de roches fertiles, vers des signatures en « M » auxquelles sont associées les minéralisations.

Un certain nombre de dépôts de chromite podiforme a été considéré lors de la présente étude. Parmi ceux-ci se retrouvent les dépôts de l'Himalaya (Luobusa, Dadao, Yushi, Solun, Sartonay, Hegenshan, Donqiao), de la Grèce et la Yougoslavie (Othrys, Vourinos, Kissavos, Rodiani, Pindos, Vermio, Veria, Edessa, Gomati, Nigrita, Soufli, Dadia, Tsoutoura, Erochi, etc.). Le profil général de ces dépôts montre toujours une pente négative, la structure en crochet est moins accentuée et un « M » se profile sur la portion de droite du graphique.

3.4.3 Rift d'Islande

L'exemple du Rift de l'Islande est documenté à partir d'un ensemble de 30 analyses représentant des basaltes tholéitiques magnésiens (10-14% MgO), des picrites et basaltes à olivines (7-10% MgO) et des basaltes (4-7% MgO). Ces trois types de roches sont respectivement interprétés comme résultant de la fusion partielle d'un manteau appauvri (DM), de 25% de fusion partielle et de 12% de fusion partielle (Momme et al., 2003).

Sur le diagramme RA-EGP ([figure 10](#)), les roches les plus primitives (10-14% MgO) montrent un profil en crochet et l'ébauche d'un "W" qui dénote un aspect appauvri. Les picrites montrent une légère accentuation de cet appauvrissement. Enfin, les basaltes sont distinctement appauvris et montrent un profil en "W" très distinct.

Si cet échantillonnage est représentatif du système effusif de l'Islande, il est possible de conclure que les roches les plus susceptibles à la minéralisation en EGP sont légèrement appauvries et que cet appauvrissement s'accroît avec la différenciation. Il s'ensuit qu'il est vraisemblable que les EGP soient retenus dans les zones profondes ou que la source soit elle-même appauvrie (DM?).

3.4.4 MORB, OIB

L'étude de Rehkamper et al. (1999) aborde la problématique du fractionnement des EGP pour des ensembles de roches d'origine mantellique provenant de contextes tectoniques différents (MORB, OIB, Komatiites). Cette étude tente d'apporter un éclairage nouveau pour des roches non-minéralisées et de valider les hypothèses faites lors de modélisations (confronter les résultats aux courbes de modernisation théoriques). Les facteurs considérés et discutés sont la fusion partielle, le fractionnement continu, le fractionnement en « batch », le taux de fusion partielle (F), les coefficients de partition sulfure/silicate (D), le facteur (R) et la cause de la compatibilité des I-EGP (spinel).

Outre les processus pétrogénétiques abordés dans cet article, le contexte géotectonique des basaltes de rides mid-océaniques et des basaltes d'îles océaniques sont reconnus comme étant le résultat d'une fusion partielle où les éléments sidérophiles sont retenus à la source.

Le profil RA-EGP ([figure 11](#)) de ces contextes montre une signature en « W » dont le segment central entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt est généralement horizontal ou à pente positive. Encore ici, le profil en « W » semble intimement associé aux roches ayant subi un événement efficace de retrait des EGP.

3.5 Roches effusives komatiitiques

Plusieurs intervenants ont documenté la géochimie des komatiites à travers le monde et un consensus général veut que la grande majorité de ces effusions ait été mise en place sans qu'il y ait lessivage des EGP. Le magma n'a pas atteint l'état de saturation en soufre (S-undersaturated) lors de sa remontée et le taux de fusion partielle de la source a été suffisant pour assurer un retrait efficace des EGP à la source. On en conclut donc que les komatiites correspondent à un magma fertile.

Pour documenter la signature de RA-EGP des komatiites, deux exemples sont présentés : komatiites de Vetreny et komatiites de Munro.

3.5.1 Komatiites de Vetreny

Le lac de lave komatiitique de la ceinture volcano-sédimentaire paléo-protérozoïque (2450 Ma) de Vetreny présente une section de 60 mètres d'épaisseur. Cette unité différenciée comprend, de la base au sommet, quatre zones dont un cumulat à olivine, une zone à spinifex, une zone de trempe et une zone supérieure de scorie (Pushtel et Humayun, 2001). Cet exemple est d'autant plus intéressant que les auteurs montrent une suite de 12 analyses représentant une section complète de l'unité qui est elle-même non-altérée et très faiblement métamorphisée (prehnite-pumpelliite). Il est à noter que la teneur en soufre n'a pas été déterminée.

Sur le diagramme de la [figure 12](#), trois sous-groupes de profils se distinguent. Les profils du sous-groupe central sont associés aux échantillons de la zone de trempe et représentent possiblement la composition initiale du magma lors de l'effusion. Cette signature en crochet montre l'ébauche d'un profil en « M » sur la portion de droite, ce qui caractérise les roches fertiles non-minéralisées. La zone de cumulat à olivine montre un profil plat où les valeurs des six derniers ratios sont près de la valeur mantellique (accroissement des ratios Ni/Pd et Ni/Cu et abaissement des ratios Pd/Ir et Cu/Ir). Enfin, la zone à spinifex montre une variation inverse par rapport à la précédente (zone de cumulat). La

complémentarité des profils montre bien que les variations sont causées par le fractionnement du lac de lave. Ces trois zones montrent respectivement un contenu en EGP ($\Sigma PdPt$) de 11,7 ppb (zone de trempe), 12,4 ppb (spinfex) et 9,8 ppb (cumulat). Il est à noter que les trois sous-groupes ont tendance à développer un profil en « M », ce qui diffère nettement des signatures contrastées en « M » et en « W » (voir l'exemple du Great Dyke). Ce point s'explique par le fait qu'une signature en « W » représente un résidu lessivé lors d'un événement de saturation en soufre. Dans le présent cas, un tel événement est absent et le fractionnement des EGP est contrôlé essentiellement par les coefficients de partition cristal/liquide. Une lave fractionnée a tendance à accentuer le profil en « M » sans rehausser la signature en crochet.

3.5.2 Komatiite de Munro

Contrairement à l'exemple précédent (lac de lave de Vetreny), les coulées komatiitiques représentent un environnement plus dynamique. De ce fait, les possibilités de modifications des ratios interéléments sont accrues. Crocket et McRae (1986) présentent les résultats de sections d'échantillonnage pour trois coulées de la Formation de Munro (les coulées komatiitiques de Pyke et Fred et la coulée tholéiitique de Theo). Ces résultats permettent de constater que la coulée de Pyke montre un profil de roches fertiles (signature en crochet légèrement accentuée par rapport au manteau) très homogènes de la base au sommet de la coulée. La coulée tholéiitique de Theo montre un fractionnement similaire à celui du lac de lave de Vetreny. Enfin, la coulée de Fred montre de multiples variations vers le centre de la coulée.

La [figure 13](#) indique que les variations entre le sommet et la base de la coulée sont similaires aux variations déjà documentées pour les exemples précédents (Vetreny, Theo). Certaines analyses de la portion centrale montrent toutefois une divergence notable caractérisée par un lessivage extrême du Pt et du Pd et un profil de RA-EGP en « W ». Pour ces profils, le segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt possède une pente négative, ce qui est à l'inverse des processus magmatiques normaux. Pour le secteur gabbroïque centrale les auteurs notent la présence de plagioclase en phase cumulus et un contenu anormalement élevé en Na_2O . Ils suggèrent la contribution possible de fluides hydrothermaux. La variation anormale des ratios associés au Pd et au Pt semble appuyer cette hypothèse et elle s'explique par la plus grande mobilité du Pd en présence de fluides hydrothermaux. En conséquence, le Pd est lessivé plus efficacement que le Pt et conduit à des relations interéléments progressant à l'inverse des processus magmatiques.

En conclusion, cet exemple permet d'introduire une nouvelle signature de RA-EGP dont le profil met en évidence la présence possible de mobilisations hydrothermales. Deux autres exemples sont présentés à ce propos dans la section « Mobilisations hydrothermales ».

3.5.3 Dépôts de Cu-Ni associés aux komatiites

Quelle est la signature RA-EGP des sulfures associés aux dépôts de Cu-Ni dans les environnements komatiitiques ? La [figure 14](#) permet de voir le balayage des signatures associées à de tels dépôts. Le profil est généralement très similaire à celui des komatiites non-minéralisées.

Le point d'intérêt de la figure 14 est que le contenu en EGP des sulfures varie avec le ratio Pd/S sans égard au développement d'un profil en « M » sur la portion de droite du crochet. Ceci mène à la conclusion que le contenu en EGP de ces sulfures dépend de l'efficacité avec laquelle ils ont été extraits de la source et qu'il n'y a pas eu d'enrichissement secondaire près de la surface.

3.6 Mobilisations hydrothermales et météorisation

3.6.1 Météorisation du complexe de Musongati

Le dépôt de Musongati est situé à l'est du Burundi. Les travaux de Bandyayera (1997) montrent que les latérites nickélicifères ont subi un enrichissement en EGP résultant d'un processus d'altération de la roche mère ultramafique, sous des conditions subtropicales. Plus d'une centaine d'analyses de roche couvrant divers degrés de latéritisation permettent d'évaluer la mobilité des EGP et la modification des ratios interéléments dans ce contexte.

Entre la roche mère non-altérée et le résidu latéritique désagrégé, cinq faciès d'altération ont été documentés : la roche mère, la saprolite (sous la nappe phréatique), la ferralite (zone entre les niveaux saisonniers maximum et minimum de la nappe phréatique), la cuirasse (zone au-dessus de la nappe phréatique) et le sol latéritique (surface désagrégée). Un résumé de la variation du contenu en Pd-Pt est présenté au **tableau 3**. Lorsque reporté sur un diagramme RA-EGP, il s'avère que la roche mère présente une signature en crochet suivi d'un profil en « M » sur la partie droite ; signature caractéristique des magmas fertiles. Le contenu brut (Pt+Pd) est inférieur à 300 ppb. Certaines portions du complexe UM sont appauvries en EGP (gabbro norite et péridotite) et montrent un profil RA-EGP en « W ».

Tableau 3: Variation du contenu Pd-Pt pour le dépôt de Musongati. Données en ppb tirées de Bandyayera (1997).

Type de Roche	n	Pd	Pt	Pd/Pt
Roche Mère (Dunite)	8	202	73.2	2.7
Roche Mère (Gab. Norite)	3	1.03	5.1	0.2
Roche Mère (Harzb.)	18	163	67.6	2.4
Roche Mère (Norite)	2	0.9	0.15	6.0
Roche Mère (Péridotite)	6	34	16.2	2.1
Saprolite	20	446	193	2.3
Ferralite	23	1377	863	1.6
Cuirasse	11	684	740	0.9
Sol Latéritique	11	236	191	1.2

Quant aux quatre lithofaciès du sol latéritique, ils montrent une signature RA-EGP en tout point similaire à celle de la roche mère ([figure 15](#)). Ces signatures indiquent que les processus de latéritisation du sol ne modifient pas de façon substantielle les ratios EGP hérités de la pétrogenèse du magma. Tout particulièrement, il n'y a pas d'inversion de la pente entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt. Les minéralisations EGP de Musongati résultent donc d'un processus de lessivage de divers autres éléments conduisant à une concentration des éléments immobiles incluant les EGP.

Le diagramme de RA-EGP ne présente aucune sensibilité particulière et est impuissant à mettre en relief des concentrations secondaires causées par la latéritisation.

3.6.2 Complexe gabbroïque de Montcalm

Le complexe gabbroïque archéen de Montcalm (Ontario) est constitué de trois zones : un orthocumulat pyroxénitique, un gabbro anorthositique et un gabbro riche en fer. Il est hôte d'un dépôt Cu-Ni pauvre en EGP. Même si ce dépôt ne constitue pas une minéralisation en EGP, il demeure très intéressant à certains égards. Premièrement, la démarche de Barrie (1990) conduit à la conclusion que les minéralisations de Montcalm sont attribuables à des mobilisations hydrothermales de hautes températures. Deuxièmement, lors de ses travaux, Barrie (1990) a documenté tout un cortège

d'éléments traces incluant les EGP. Il est donc possible de vérifier si la présence de mobilisations hydrothermales a quelques effets sur la distribution des ratios EGP.

L'appauvrissement en EGP du dépôt de Montcalm est clairement mis en relief par les profils du RA-EGP ([figure 16](#)) qui montrent une signature en « W ». On y retrouve un éventail de signatures dont les profils sont de plus en plus accentués. Il est intéressant de noter que la pente du segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt évolue graduellement pour devenir de plus en plus négative. Comme il a été noté pour les komatiites de Munro, aucun processus pétrogénétique simple ne permet d'expliquer ce comportement. Toutefois, si l'on considère les conclusions de Barrie et Naldrett (1990), la présence de processus hydrothermaux de hautes températures pourrait modifier le ratio interéléments par la mobilisation préférentielle du Pd.

Cette particularité met l'accent sur l'importance du segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt. Un segment à pente nulle ou positive caractérise les processus pétrogénétiques, alors qu'un segment à pente négative témoigne d'une modification par un processus autre. Le processus le plus fréquemment invoqué est l'hydrothermalisme.

3.6.3 Lac des Îles

La minéralisation EGP de Lac des Îles représente probablement le cas le plus actuel où sont débattues les hypothèses de mobilisations hydrothermales. Brüggmann et al. (1989) avancent l'idée qu'un fluide (dont l'origine peut être magmatique ou provenir de l'encaissant) peut causer l'abaissement du point de fusion et induire une fusion partielle riche en fluide. Ce mobilisat captera de façon préférentielle le Pt, le Pd et l'Au au détriment des I-EGP et laissera derrière une restite réfractaire enrichie en éléments plus compatibles. Tant que la portion mobilisée n'atteint pas le seuil de saturation en soufre, elle sera enrichie en Pt, Pd et Au. De plus, puisque le Pt est légèrement plus compatible que le Pd, le résultat final produira un enrichissement de ce dernier et une élévation du ratio Pd/Pt. Ce processus aura pour effet de promouvoir le développement de textures pegmatoïdes. Il est à noter que la minéralisation économique ne sera pas nécessairement associée directement aux pegmatites. S'il n'y a pas de saturation en soufre, la roche pegmatoïde sera lessivée de ses EGP qui se retrouveront près du front de progression des fluides. Au contraire, s'il y a saturation, les gouttelettes de sulfures dans la pegmatite seront enrichies. Cette hypothèse trouve un appui par les récents travaux de cartographie (Watkinson et al., 2002) établissant trois types de minéralisation : 1) minéralisation associée à la matrice magmatique de la brèche ; 2) minéralisation à basse teneur associée au gabbro « varitextured » et 3) minéralisation à haute teneur associée à l'altération des silicates.

La [figure 17](#) montre la variation des signatures RA-EGP pour les roches appartenant au complexe de Lac des Îles. Le complexe gabbroïque nord et celui au sud de la zone Roby montrent une signature en crochet suivie d'un profil en « M » sur la portion de droite de la courbe. Tous les profils montrent un segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt à pente positive, ce qui suggère une modification des contenus EGP par des processus magmatiques. Il est à noter que deux profils du gabbro situé au sud de la zone Roby montrent un profil en « W » suggérant que certaines portions du complexe sont appauvries. Quant au gabbro pegmatoïde, il montre une signature particulière. Le profil en « W » de ce dernier est caractérisé par un segment Cu/Pd – Cu/Pt à pente négative. L'inversion de la pente de ce segment semble être une caractéristique particulière des minéralisations EGP ayant subi une modification des ratios par des processus hydrothermaux.

3.7 Résidu réfractaire – source appauvrie

3.7.1 Complexe de la Rivière Bell

L'indice OP-92 situé au centre du complexe igné de la rivière Bell (CRB) est contenu dans une sous-unité du complexe dont le profil des éléments des terres rares (ETR) est fortement appauvri en terres

rares légères ([figure 18](#)). La genèse d'un tel profil ne peut s'expliquer que par la fusion partielle d'une source qui représente elle-même un résidu réfractaire appauvri.

Cet exemple est utilisé pour documenter la signature de RA-EGP associée à un tel environnement.

La [figure 19](#) montre un profil de RA-EGP ayant certaines particularités. Premièrement, la somme Pt+Pd est inférieure au contenu moyen du manteau. Deuxièmement, le ratio Pd/S indique que les phases sulfurées sont extrêmement appauvries en Pd. Troisièmement, outre la signature générale en « W », le ratio Ni/Pd accentue le profil en générant un « W-V ». En fait, il est à remarquer qu'en comparant cette signature avec celle d'une minéralisation EGP (crochet-M), les pentes des courbes sont opposées l'une à l'autre. Quatrièmement, le segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt est à pente nulle ou positive, suggérant un contrôle du fractionnement par des processus magmatiques.

Outre la pente nulle du segment entre les ratios Cu/Pd et Cu/Pt, le profil RA-EGP de l'indice OP-92 est similaire à la signature du complexe gabbroïque de Montcalm. Ce dernier a été interprété comme étant le résultat de la fusion partielle d'une source mantellique appauvrie. Il est à noter que les roches du complexe de Montcalm montrent un profil des ETR légèrement enrichi en ETR-Légers (Barrie et Naldrett, 1990). Cette différence montre la nature beaucoup plus sensible au fractionnement des EGP en comparaison des autres éléments traces (LILE et ETR).

4 UTILISATION DU RA-EGP

4.1 Résumé des signatures types

Le survol des signatures RA-EGP du chapitre précédent permet de proposer certaines généralités pouvant être utilisées pour l'interprétation des profils arachnides. La [figure 20](#) montre un organigramme résumant les résultats des cas types.

Considérons un magma généré par la fusion partielle du *manteau*² où cette fusion est suffisante pour extraire efficacement les P-EGP et, à degré moindre, les I-EGP. Alors, nous générerons un *magma fertile* dont la signature RA-EGP sera très similaire à celle du *manteau* à la différence que le fractionnement des I-EGP rehaussera légèrement la partie droite de la courbe. La signature sera celle des *magmas UM* et komatiitiques fertiles. Il est à noter que la fusion partielle du manteau laisse nécessairement derrière elle un *résidu réfractaire* solide caractérisé par un lessivage des P-EGP et, de façon moindre, des I-EGP. Advenant un second événement de fusion partielle de ce manteau appauvri, le magma généré aura une signature mettant en relief un appauvrissement. L'évolution de chacun des segments du profil RA-EGP aura une pente généralement opposée à celle d'un magma enrichi (profil général W-V).

En revenant à la portion de *magma fertile*, deux possibilités sont considérées pour l'état de saturation en soufre. S'il y a *saturation*, la phase sulfurée causera inévitablement un *fractionnement* important des EGP et conduira au développement de deux signatures complémentaires. Les roches *enrichies* (contenant des gouttelettes de sulfures) auront une signature RA-EGP en crochet beaucoup plus accentuée que les magmas fertiles et un « M » se profilera sur la portion droite de la courbe. Il est à noter que la pente générale du « M » sera positive dans les environnements sulfurés et sera négative pour les environnements oxydants (chromite). D'autre part, le fort coefficient de partition des EGP en faveur de la phase sulfurée appauvrira la portion silicatée du magma. Ces roches *appauvries* montrent une signature en « W » ou plus exactement en « V-V » puisqu'un segment relativement horizontal relie les deux « V ». Ce segment à pente nulle ou légèrement positive est de première importance puisqu'il fait ressortir le contrôle du fractionnement des P-EGP par des processus magmatiques. Une pente fortement positive indique un contenu anormalement élevé en Pd par rapport

² Les mots en italiques gras, réfèrent aux différents éléments de la figure 20

au Pt, alors qu'une pente négative indique une modification des ratios par une pétrogenèse complexe ou un apport externe. Ce dernier cas est représenté par l'**hydrothermalisme** qui a pour conséquence de développer des textures **pegmatoïdes**. La signature particulière en « W » de ce contexte (sans segment horizontal au centre) est associée à la mobilité préférentielle du Pd par rapport au Pt de telle sorte que les zones affectées par des fluides hydrothermaux mobiliseront le Pd pour générer un segment Cu/Pd-Cu/Pt à pente négative.

4.2 Outil d'exploration

Comme toutes autres méthodes d'exploration géochimique, l'interprétation d'un contexte géologique et l'évaluation de son potentiel reposent sur la comparaison d'un nombre minimal d'analyses. De plus, certaines signatures géochimiques qui semblent défavorables (tel un profil RA-EGP en « W » indiquant un lessivage) recèlent des informations de première importance. Un exemple convaincant est celui des minéralisations de sulfures massifs volcanogènes. Dans ce contexte, une roche volcanique lessivée en alcalis et en métaux est économiquement stérile et sans intérêt. Elle indique toutefois la présence d'un système hydrothermal ayant extrait efficacement les métaux pour former un dépôt économique potentiel. De la même façon, la reconnaissance d'un corps UM ayant des zones appauvries (c.-à-d. RA-EGP en « W ») indique qu'un processus a retiré efficacement les EGP du magma. En ce sens, il importe de cartographier les variations pour détecter d'éventuelles zones d'enrichissement. Les grands complexes ignés tels le Bushveld, le Stillwater et le Great Dyke montrent tous un spectre de variation allant de appauvri en passant par fertile jusqu'à enrichi (voir l'exemple de la section de forage CD-02 du Great Dyke).

Une approche similaire doit être considérée pour les contextes extrusifs (komatiites). Les travaux de Keays (1996) et de plusieurs autres mettent bien en relief l'importance de la saturation en soufre laquelle est généralement atteinte par l'assimilation des roches encaissantes. Dans cet environnement, le RA-EGP peut être un outil efficace pour localiser un site de précipitation en recherchant l'interface entre les signatures fertiles et celles appauvries.

5 CONCLUSIONS ET AVENUES DE RECHERCHE

Le diagramme RA-EGP constitue un outil d'interprétation des contextes de minéralisations magmatiques. En plus des états relatifs d'enrichissement et d'appauvrissement que permettaient de faire les diagrammes binaires de Barnes et al. (1988), le diagramme permet d'associer les modifications de ratios interéléments à des contextes de minéralisation.

Deux avenues de recherche directement associées à la présente thématique sont proposées :

1. Étude de l'applicabilité du diagramme RA-EGP qui aurait pour objectif général de développer le potentiel afin que le diagramme devienne un outil pouvant orienter les travaux subséquents. Les sous-objectifs pouvant être abordés dans un tel projet sont :
 - variations des signatures dans un dépôt ;
 - variations entre les épontes et la minéralisation ;
 - variations à l'intérieur d'un camp minier (ex. : Sudbury) ;
 - variations des signatures hydrothermales.
2. Développer le RA-EGP de sorte que la différenciation visuelle des signatures soit représentée par une variable numérique continue. Une telle approche permettrait de produire des cartes d'isocontours quantifiant l'écart d'une signature par rapport à celle

du manteau. Par exemple une variable d'un intervalle de -10 à +10 où les valeurs négatives quantifieraient l'ampleur du lessivage et les valeurs positives l'ampleur de l'enrichissement.

REMERCIEMENTS

Au cours du développement de ce projet, plusieurs rencontres intérimaires du comité de gestion scientifique ont permis de soulever des questions ayant grandement bénéficié à la formulation finale du diagramme de ratio-arachnide. Mes remerciements vont tout particulièrement à messieurs Paul Archer et Michel Jébrak. La procédure proposée a également fait l'objet d'une évaluation par Mme Sarah-Jane Barnes que je remercie.

RÉFÉRENCES

N.B. *Cette liste contient également les références non-citées dans le texte mais pour lesquelles une étude de validation des signatures RA-EGP a été faite.*

Alapieti, T. T. and Lahtinen, J. J. 2002. Platinum-Group element mineralization in the layered intrusions of Northern Finland and the Kola peninsula, Russia. , vol. , pp. 507-546. In: L. J. Cabri eds. The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements.. Sp.Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal.

Bandyayera, D. 1997. Formation des latérites nickélifères et mode de distribution des éléments du groupe du platine dans les profils latéritiques du complexe de Musongati, Burundi. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 440 p.

Barnes, S. J. and Naldrett, A. J. 1985. Geochemistry of the J-M (Howland) Reef of the Stillwater complex, Minneapolis adit area. 1. Sulfide chemistry and sulfide-olivine equilibrium. *Eco. Geol.*, vol. 80, pp. 627-645.

Barnes, S.-J., Boyd, R., Korneliussen, A., Nilsson, L.-P., Often, M., Pedersen, R.B. and Robins, B. 1988. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: Examples from Norway. In : Prichards H.M., Potts, P.J. and Cribb, S.J., eds., *Proceedings of the symposium Geo-Platinum 87*. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, UK, pp. 113-143.

Barnes, S.-J., Couture, J. -F., Poitras, A., et Tremblay, C. 1993. Les éléments du groupe du platine dans la partie Québécoise de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi. , vol. , pp. 108., ET91-04. *Min. Éner. Ress.*

Barnes, S.-J. et Maier, W. D. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids. pp. 69-106. In: R. R. Keays, C. M. Lesher, P. C. Lightfoot and Farrow, E. G. eds. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration.. Short Course Note, Vol. 13. Geol. Ass. Can.*

Barnes, S.-J., and Giovenazzo, D. 1990. Platinum-group elements in the Bravo intrusion, Cape Smith fold belt, Northern Quebec. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 431-449.

Barnes, S.-J., Couture, J.-F., Sawyer, E. W. and Bouchaib, C. 1993. Nickel-Copper occurrences in the Belleterre-Angliers Belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting Platinum-group elements distributions. *Eco. Geol.*, vol. 88, pp. 1402-1418.

Barnes, S.-J., et Maier, W. D. 2002. Platinum-group element distributions in the Rustenburg Layered Suite of the Bushveld Complex, South Africa. pp. 431-458. In: L. J. Cabri eds. The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements. Sp.Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal.

Barrie, C. T. and Naldrett, A. J. 1990. Geochemical constraints on the genesis of the Montcalm gabbroic complex and Ni-Cu deposit, Western Abitibi subprovince, Ontario. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 451-474.

Barrie, C.T., 1990. Petrogenesis and tectonic evolution of the Kamiskotia and Montcalm gabbroic complexes and adjacent granitoid – Greenstone belt terrane, Western Abitibi Subprovince, Ontario, Canada. Ph. D. Thesis, Univ. Toronto, Toronto, Ontario.

Brügmann, G. E., Naldrett, A. J. and Duke, J. M. 1990. The platinum-group element distribution in the Dumont sill, Quebec. Implications for the formation of Ni-sulfide mineralization. *Mineral. Petrol.*, vol. 42, pp. 97-119.

- Brügmann, G. E., Naldrett, A. J. and Macdonald, A. J. 1989. Magma mixing and constitutional zone-refining in the Lac des Îles complex, Ontario: Genesis of Platinum-group element mineralization. *Eco.Geol.*, vol. 84, pp. 1557-1573.
- Chai, G. and Naldrett, A. J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralisation and genesis of the Jinchuan deposit, Northern China. *Eco. Geol.*, vol. 87, pp. 1475-1495.
- Clark, T. 1989. Étude du Gîte de Cu-Ni-Pd-Pt du lac Bleu no. 1 - Fosse du Labrador. Résultats préliminaires. pp. 65. In: eds. . MB89-35. Min. Éner. Ress.
- Crocket, J. H. and McRae, W. E. 1986. Platinum-group element distribution in komatiitic and tholeiitic volcanic rocks from Munro township, Ontario. *Eco. Geol.*, vol. 81, pp. 1242-1251.
- Dedeev, A. V., Khashkovskaya, T. N. and Galkin, A. S. 2002. PGE mineralization in the Monchegorsk layered mafic-ultramafic intrusion of the Kola peninsula., pp. 569-577. In: L. J. Cabri eds. The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements.. Sp.Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal
- Economou-Eliopoulos. M. 1996. Platinum-group element distribution in chromite ores from ophiolite complexes: implications for their exploration. *Ore Geol. Rev.*, vol. 11, pp. 363-381.
- Edwards, S.J. 1990. Harzburgites and refractory melts in the Lewis hills massif, bay of islands ophiolite complex: The base-metals and precious metals story. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 537-552.
- Ely, J. C. and Neal, C. R. 2003. Using platinum-group elements to investigate the origin of the Ontong Java plateau, SW Pacific. *Chem. Geol.*, vol. 196, pp. 235-257.
- Farrow, C. E. G. and Watkinson, D. H. 1997. Diversity of precious metal mineralization in footwall Cu-Ni-PGE deposits, Sudbury, Ontario: Implications for hydrothermal models of formation. *Can. Miner.*, vol. 35, pp. 817-839.
- Good, D. J. and Crocket, J. H. 1994. Genesis of the Marathon Cu-Platinum-group element deposit, Port Coldwell alkalic complex, Ontario: A mid-continent rift-related magmatic sulfide deposit. *Eco. Geol.*, vol. 89, pp. 131-149.
- Gottfried, D., Froelich, A. J., Rait, N. and Aruscavage, P. J. 1990. Fractionation of palladium and platinum in a Mesozoic diabase sheet, Gettysburg basin, Pennsylvania: implications for mineral exploration. *Jour. Geochem. Explor.*, vol. 37, pp. 75-89.
- Halkoaho, T. A. A., Alapieti, T. T., Lahtinen, J. J. and Lerssi, J. M. 1990. The Ala-Penikka PGE reefs in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. *Mineral. Petrol.*, vol. 42, pp. 23-38.
- Helmy, H. M. and Mogessie, A. 2001. Gabbro Akarem, Eastern desert, Egypt: Cu-Ni-PGE mineralization in a concentrically zoned mafic-ultramafic complex. *Mineral. Dep.*, vol. 36, pp. 58-71
- Keays, R.R. 1996. Other significant Nickel sulphide deposits ? Geology and exploration guidelines. In: Nickel in a nutshell. PDAC, 64 th annual convention and trade show.
- Keays, R. R. and Davison, R. M. 1976. Palladium, Iridium and gold on the ores and host rocks of nickel sulfide deposits en Western Australia. *Eco. Geol.*, vol. 71, pp. 1214-1228.
- Lavigne , M.J. and Michaud, M.J. 2001. Geology of the North American Palladium Ltd.'s Roby zone, Lac des Îles. *Explor. Mining Geol.*, vol. 10, pp. 1-17.
- Leshner, C. M. and Keays, R. R. 2002. Komatiite-associated Ni-Cu-PGE deposits: Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis. , vol. , pp. 579-617. In: L. J. Cabri eds. The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements. Sp.Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal
- Li, C., Naldrett, A. J. Coats, C. J. A. and Johannessen, P. 1992. Platinum, palladium, gold, and copper-rich stringers at the Strathcona mine, Sudbury: Their enrichment by fractionation of a sulfide liquid. *Eco. Geol.*, vol. 87, pp. 1584-1598.

- McDounough, W. F. and Sun, S.-S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, vol. 120, pp. 223-253.
- Maier, W. D. 2000. Platinum-group elements in Cu-sulphide ores at Carolusberg and East Okiep, Namaqualand, South Africa. *Mineral. Dep.*, vol. 35, pp. 422-429.
- Maier, W. D. and Barnes, S. -J. 2003. Platinum-group elements in the Boulder Bed, western Bushveld Complex, South Africa. *Mineral. Dep.*, vol. 38, pp. 370-380
- Melcher, F., Grum, W., Thalhammer, T. V. and Thalhammer, O. A. R. 1999. The giant chromite deposits at Kempirsai, Urals: constraints from trace element (PGE, REE) and isotope data. *Mineral. Dep.*, vol. 34, pp. 250-272.
- Momme, P., Oskarsson, N. and Keays, R. R. 2003. Platinum-group elements in the Icelandic rift system: melting processes and mantle sources beneath Iceland. *Chem. Geol.*, vol. 196, pp. 209-234.
- Naldrett, A. J., Mohammed, A., Sasa Krstic and Chusi Li. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to Platinum-group elements. *Eco. Geol.*, vol. 95, pp. 845-865.
- Oberthür, T. 2002. Platinum-group element mineralization of the Great dyke, Zimbabwe. , vol. , pp. 483-505. In: L. J. Cabri eds. *The geology, geochemistry, Mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements.. Sp.Vol. 54. Can. Inst. Min. Metal.*
- Oberthür, T., Weiser, T. W., Gast, L. and Kojonen, K. 2003. Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley Platinum Mine, Zimbabwe: Part 1. Primary distribution patterns in pristine ores of the Main Sulfide Zone of the Great Dyke. *Miner. Dep.*, vol. 38, pp. 327-343.
- Pawava, J., Vavqín, I., Frýda, J., Janouwek, V. and Jelínek, E. 2003. Geochemistry and mineralogy of Platinum-group elements in the Ransko gabbro-peridotite massif, Bohemian Massif (Czech Republic) *Miner. Dep.*, vol. 38, pp. 298-311.
- Peck, D. C. and Keays, R. R. 1990. Insights into the behavior of precious metals in primitive, S-undersaturated magmas: Evidence from the Heazlewood river complex, Tasmania. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 553-577.
- Peck, D. C., Keays, R. R., James, R. S., Chubb, P. T. and Reeves, S. J. 2001. Controls on the formation of contact-type platinum-group element mineralization in the East Bull Lake intrusion. *Eco. Geol.*, vol. 96, pp. 559-581.
- Pricard, H. M. and Lord, R. A. 1990. Platinum and Palladium in the Troodos ophiolite complex, Cyprus. *Can. Miner.*, vol. 28, pp. 607-617.
- Pushtel, I. S. and Humayun, M. 2001. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake. *Geochim. Cosmo. Acta.*, vol. 65, pp. 2979-2293.
- Rehkamper, M., Halliday, A. N. Fitton, J. G., Lee, D.-C., Wieneke, M. and Arndt, N. T. 1999. Ir, Ru, Pt, and Pd in basalts and komatiites: New constraints for the geochemical behavior of the platinum-group elements in the mantle. *Geochim. Cosmo. Acta*, vol. 63, pp. 3915-3934.
- Rollinson, H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation.* Longman geochemistry series, 352 p.
- Rowell, W. F. and Edgar A. D. 1986. Platinum-Group element mineralization in a hydrothermal Cu-Ni sulfide occurrence, Rathburn lake, NorthEastern Ontario. *Eco. Geol.*, vol. 81, pp. 1272-1277.
- Sawlowicz. 1993. *Palaeo Geogr. Climat. Ecol.*, vol. 104, pp. 253.
- Schmidt, G., Witt-Eickschen, G., Palme, H., Seck, H., Spettel, B. and Kratz, K.-L. 2003. Highly siderophile elements (PGE, Re and Au) in the mantle xenoliths from the West Eifel volcanic field (Germany). *Chem. Geol.*, vol. 196, pp. 77-105.

Stone, W. E., Croket, J. H., Fleet, M. E. and Larson, M. S. 1996. PGE mineralization in Archean volcanic systems: geochemical evidence from thick, differentiated mafic-ultramafic flows, Abitibi greenstone belt, Ontario, and implications for exploration. # Jour. Geochem. Explor., vol. 56, pp. 237-263.

Sutcliffe, R. H., Sweeny, J. M. and Edgar, A. D. 1989. The Lac des Îles complex, Ontario: Petrology and platinum-group elements mineralization in an Archean mafic intrusion. Can. Jour. Earth Sci., vol. 26, pp. 1408-1427.

Tanguay, S., Hébert, R. and Bergeron, M. 1990. Distribution of PGE in pyroxene-bearing ultramafic cumulates in the Thetford mines ophiolitic complex, Quebec. Can. Miner., vol. 28, pp. 597-605.

Thériault, R. D., Barnes, S.-J. and Severson, M. J. 2000. Origin of the Cu-Ni-PGE sulfide mineralization in the Partridge river intrusion, Duluth complex, Minnesota. Eco. Geol., vol. 95, pp. 929-944.

Watkinson, D.H., Lavigne, M.J. and Fox, P.E. 2002. Magmatic-hydrothermal Cu- and Pd-rich deposits en gabbroic rocks from North America. In: Cabri, L.J. ed., The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of Platinum-group elements. Can. Inst. Min. Metal., Spec. Vol. 54, pp.299-319.

Zhong, H., Zhou, X.-H., Zhou, M.-F., Sun, M. and Liu, B.-G. 2002. Platinum-group element geochemistry of the Hogge Fe-V-Ti deposit en the Pan-Xi area, southwestern China. Mineral. Dep., vol. 37, pp. 226-239.

Zhou, M.-F., Sun, M., Keays, R. R. and Kerrich, R. W. 1998. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts. Geochim. Cosmo. Acta., vol. 62, pp. 677-688.

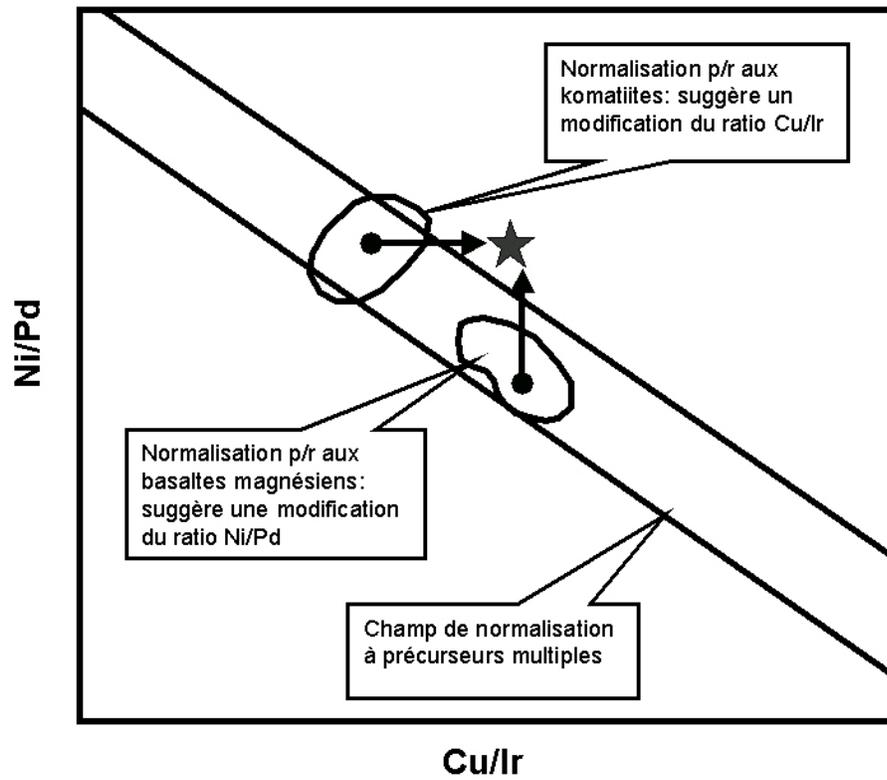


Figure 1: Diagramme binaire Ni/Pd et Cu/Ir. [Retour au texte](#)

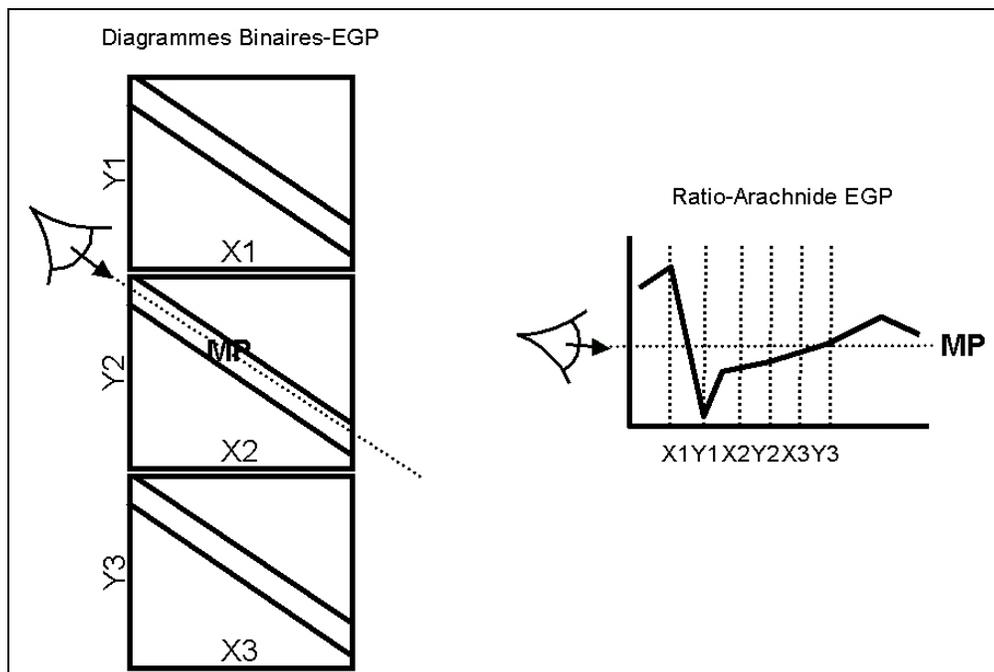


Figure 2: Structure du diagramme de Ratio-Arachnide. [Retour au texte](#)

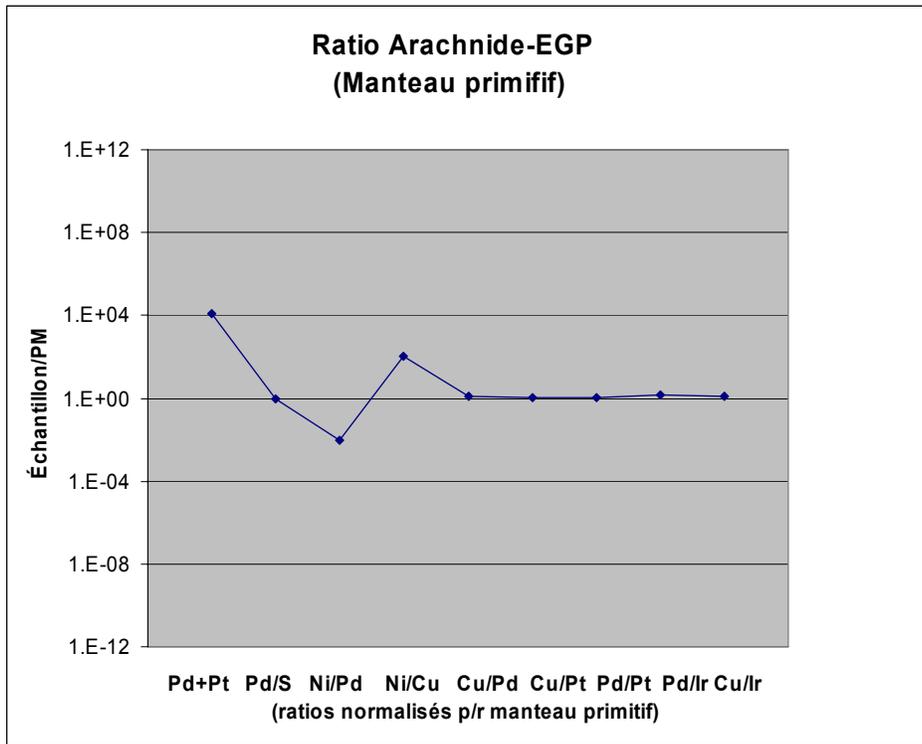


Figure 3: Profil du Ratio-arachnide du manteau primitif. [Retour au texte](#)

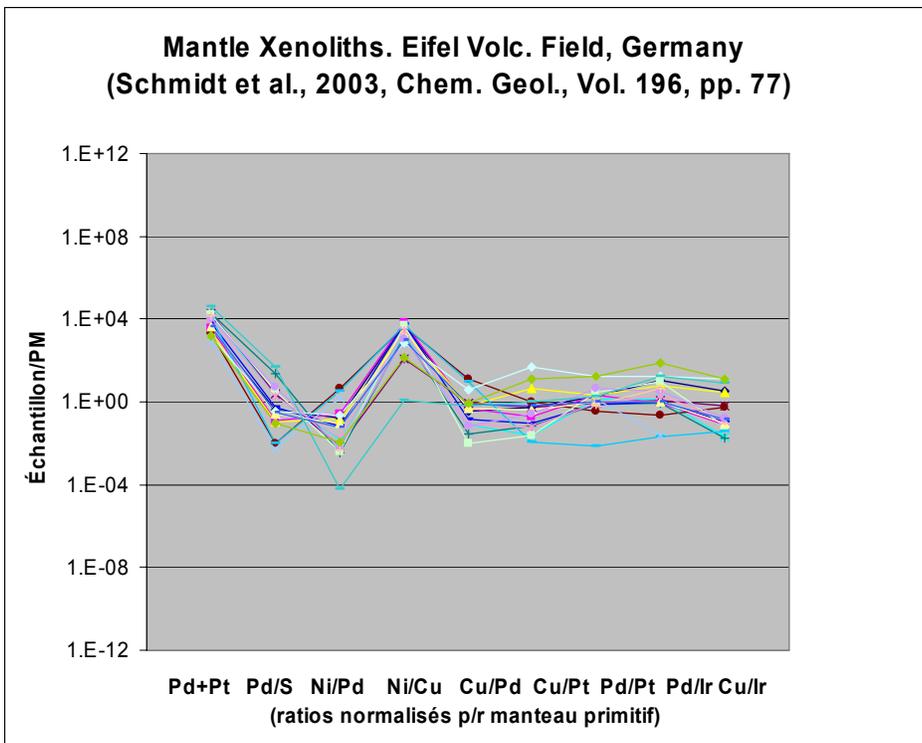


Figure 4: Profils du Ratio-arachnide pour une suite de xénolites mantelliques. Données de Schmidt et al. (2003). [Retour au texte](#)

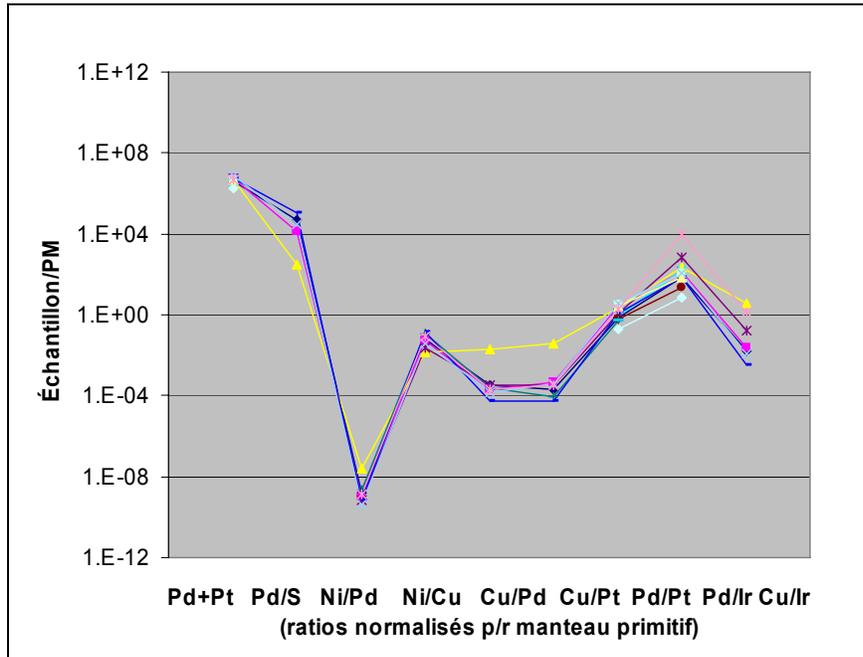


Figure 5: Profils de Ratio-arachnide du UG-2 (Bushveld). Données de Barnes et Maier (2002). [Retour au texte](#)

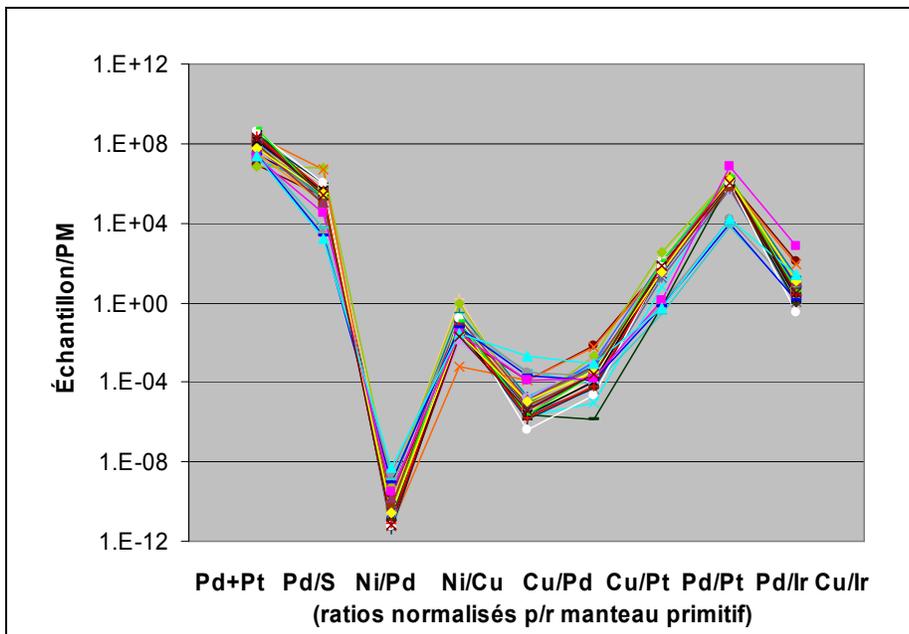


Figure 6: Profils de ratio-arachnide du Stillwater. Données de Barnes et Naldrett (1985). [Retour au texte](#)

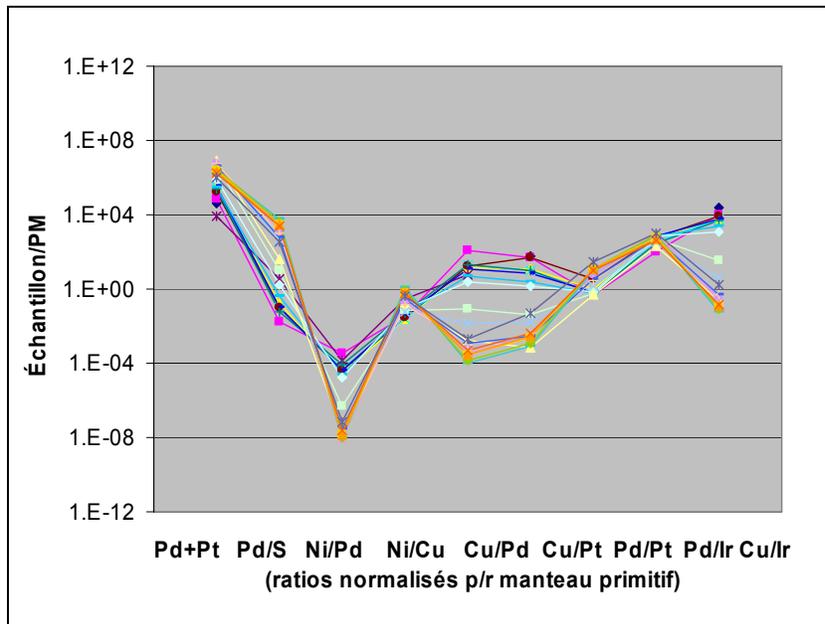


Figure 7: Profils de RA-EGP du Great Dyke. Données de Oberthür (2002). [Retour au texte](#)

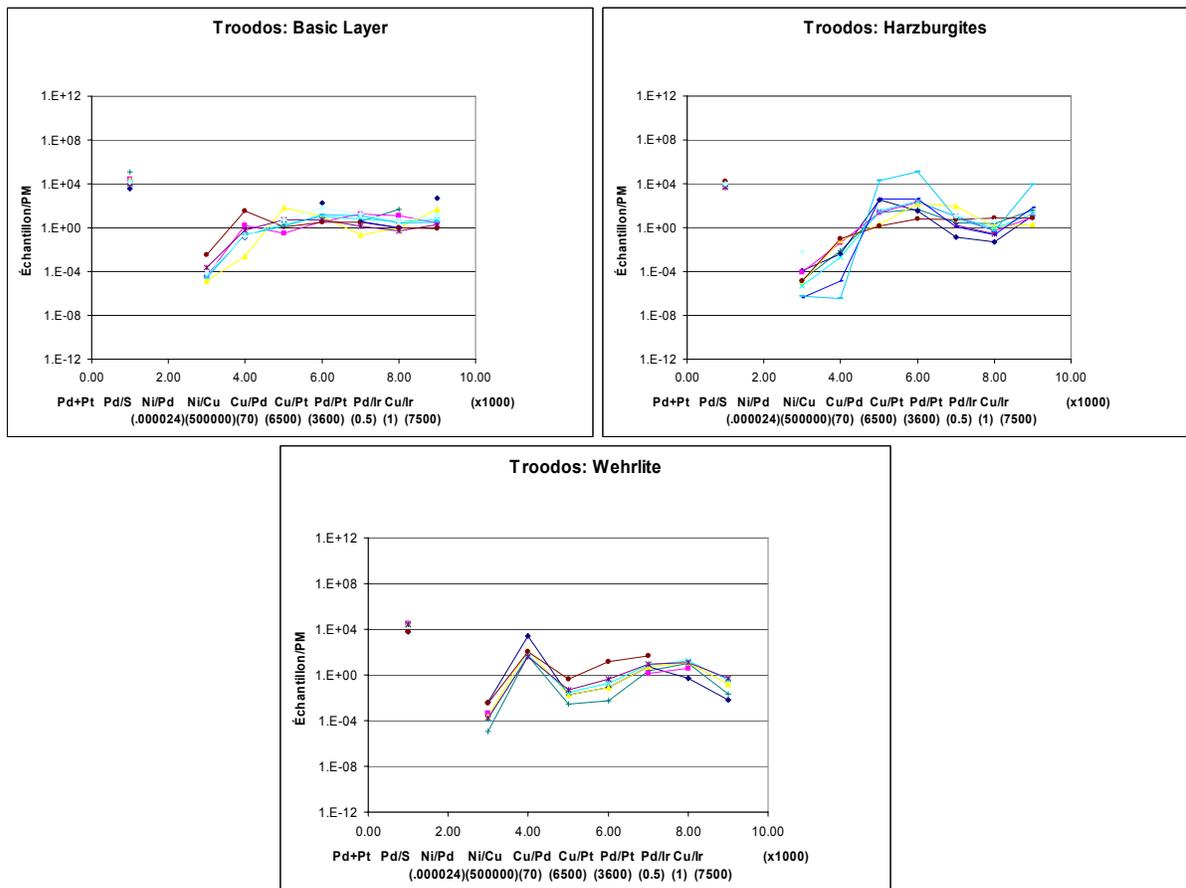


Figure 8: Profils de RA-EGP pour le complexe des Troodos. Données de Edwards, 1990. [Retour au texte](#)

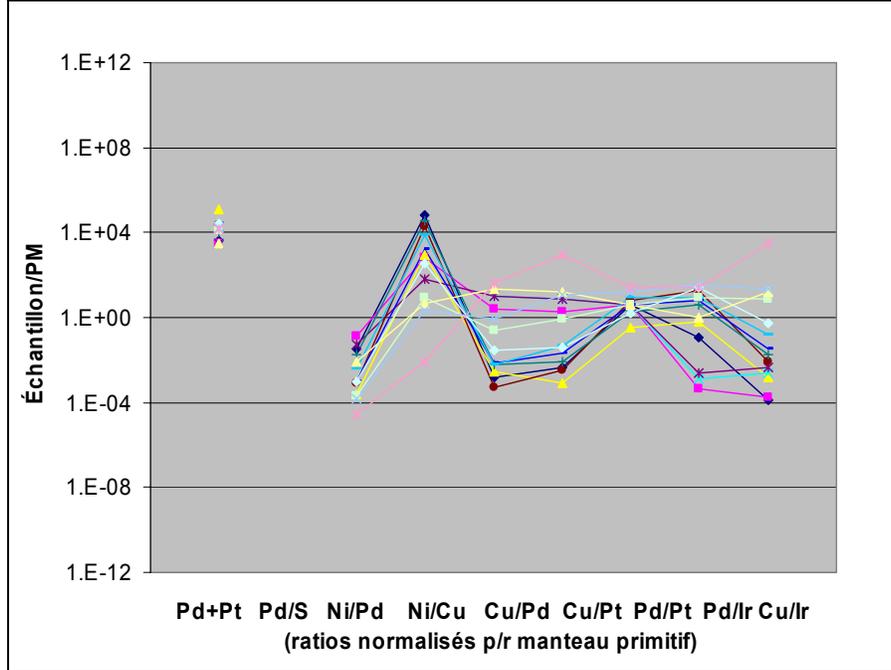


Figure 9: Profils de RA-EGP pour le dépôt de Kempirsai. Données de Melcher et al. (1999). [Retour au texte](#)

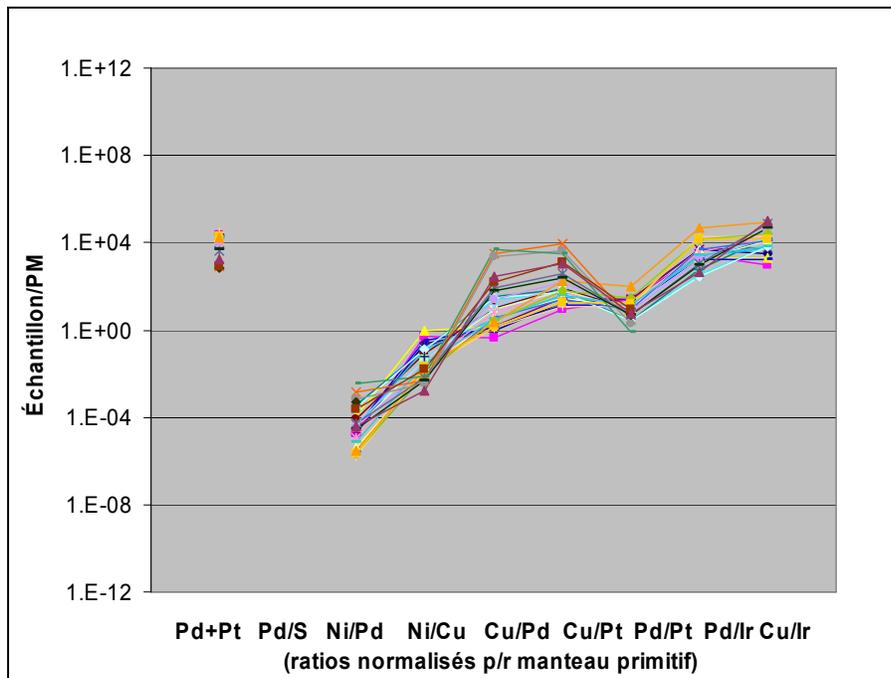


Figure 10: Éventail de profils RA-EGP pour les roches effusives d'Islande. Données de Momme et al. (2003). [Retour au texte](#)

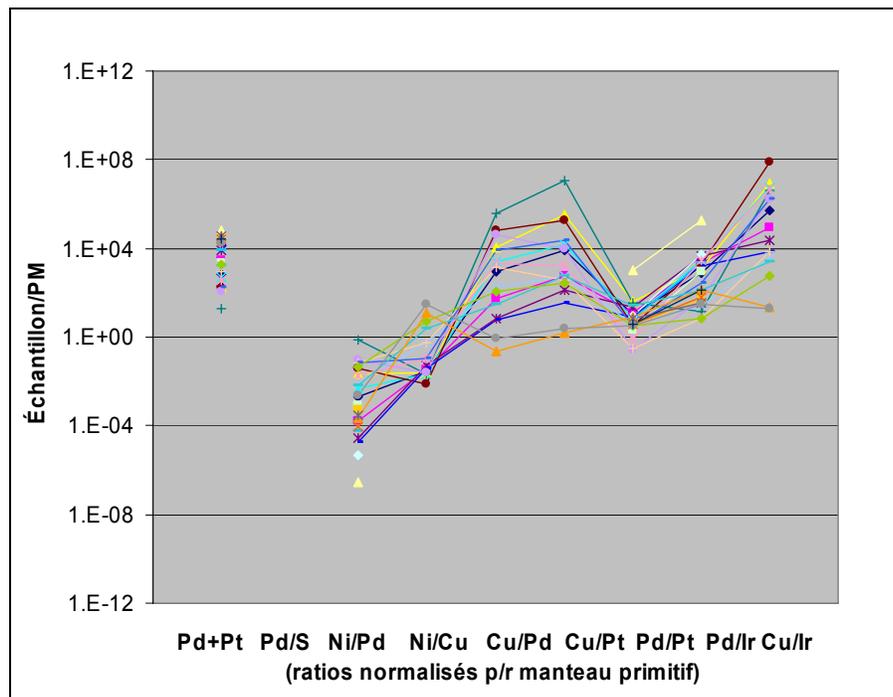


Figure 11: Éventail de profils RA-EGP pour la crête océanique de Kolbeinsey et de Cameron, ainsi que pour les îles de la Réunion. Données de Rehkamper et al. (1999). [Retour au texte](#)

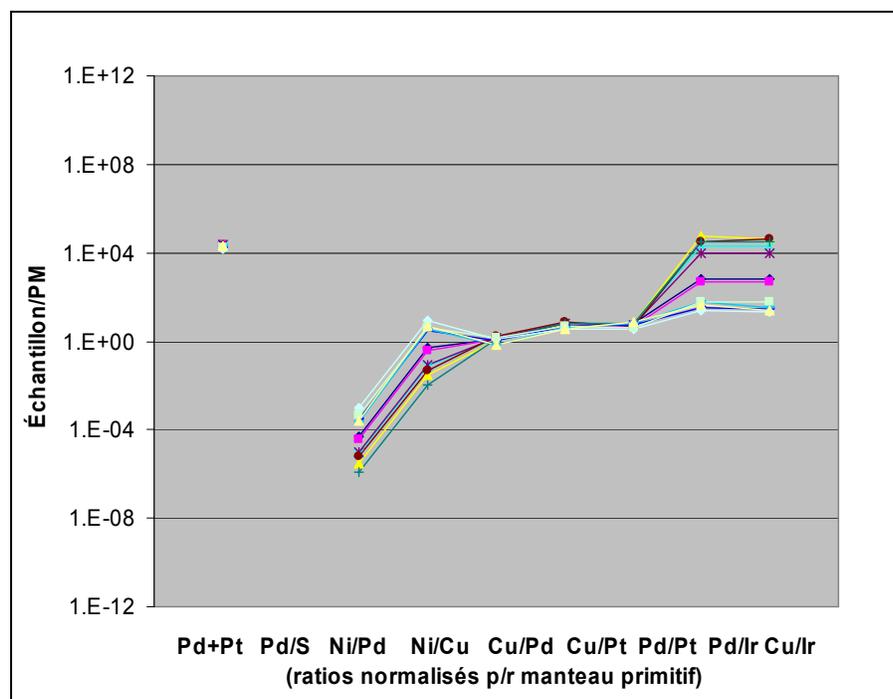


Figure 12: Profils RA-EGP de la komatiïte de Vetreny. Données de Pushtel et Humayun (2001). [Retour au texte](#)

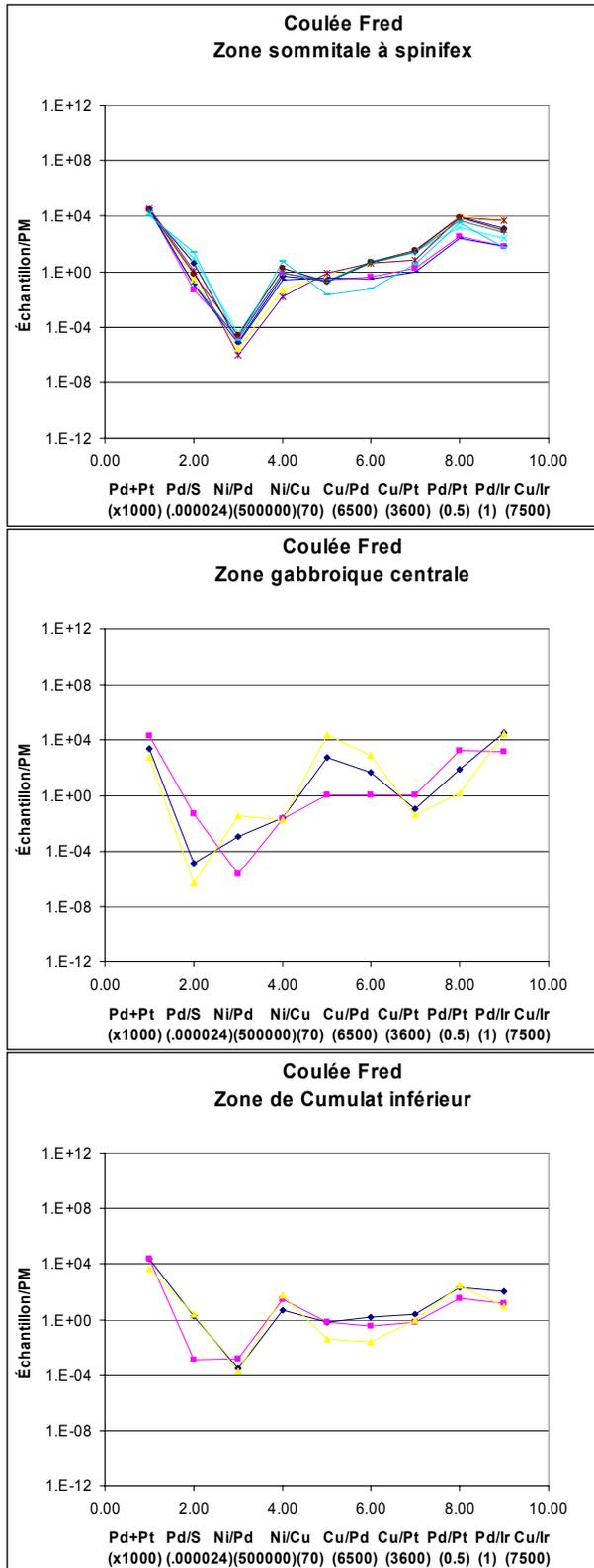


Figure 13: Variation des profils de RA-EGP pour la coulée komatiitique de Fred. Données de Crocket et McRae (1986). [Retour au texte](#)

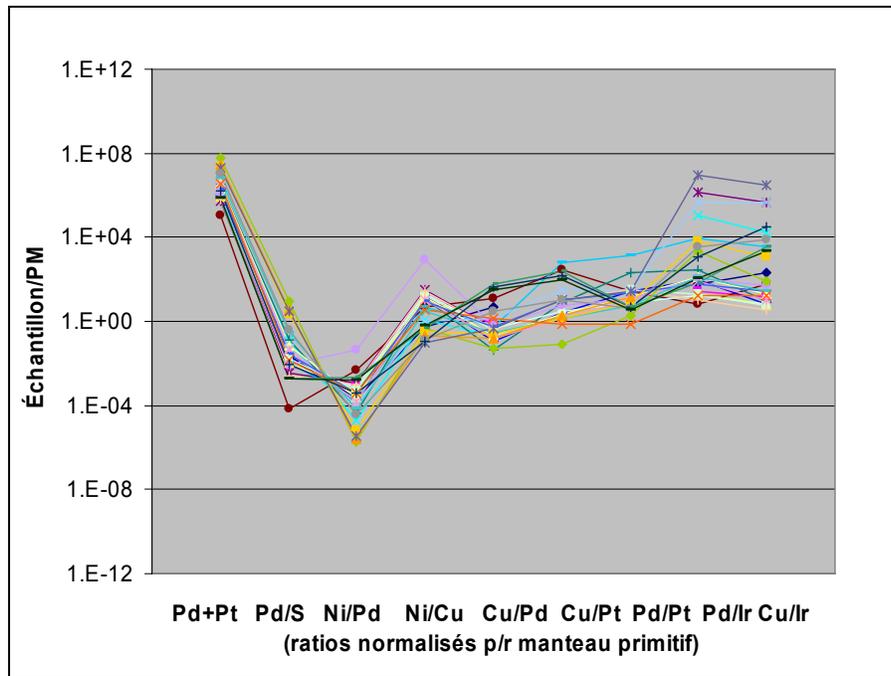


Figure 14: Profils RA-EGP caractérisant les sulfures d'un ensemble de dépôts de Cu-Ni associés aux komatiites (Thompson, Langmuir, Perseverance, Mt Keith, Dumont, Donaldson). Données de Lesher et Keays (2002). [Retour au texte](#)

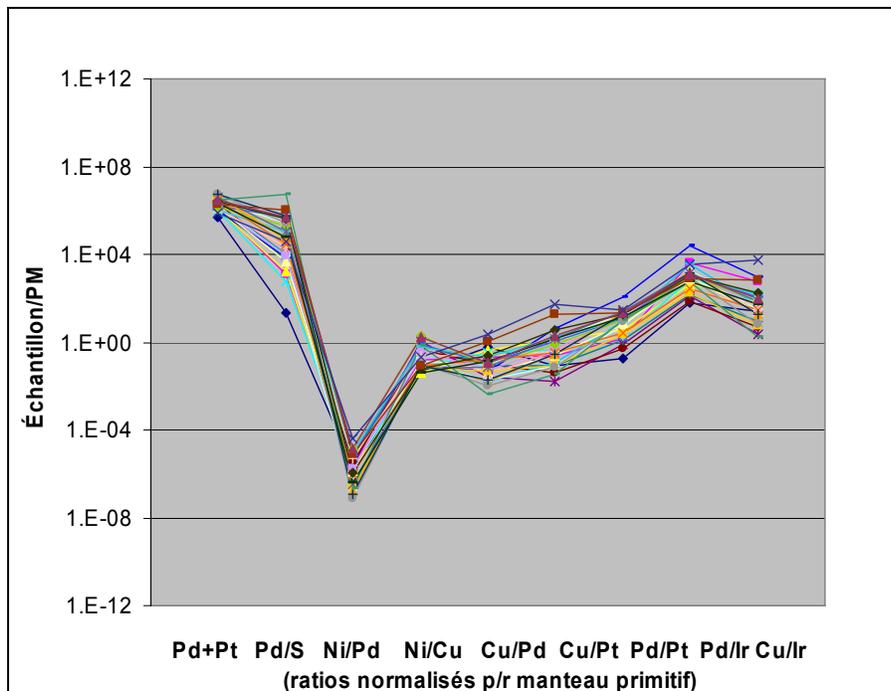


Figure 15: Profil RA-EGP de la cuirasse et de la ferralite de Musongati. Données de Bandyayera (1997). [Retour au texte](#)

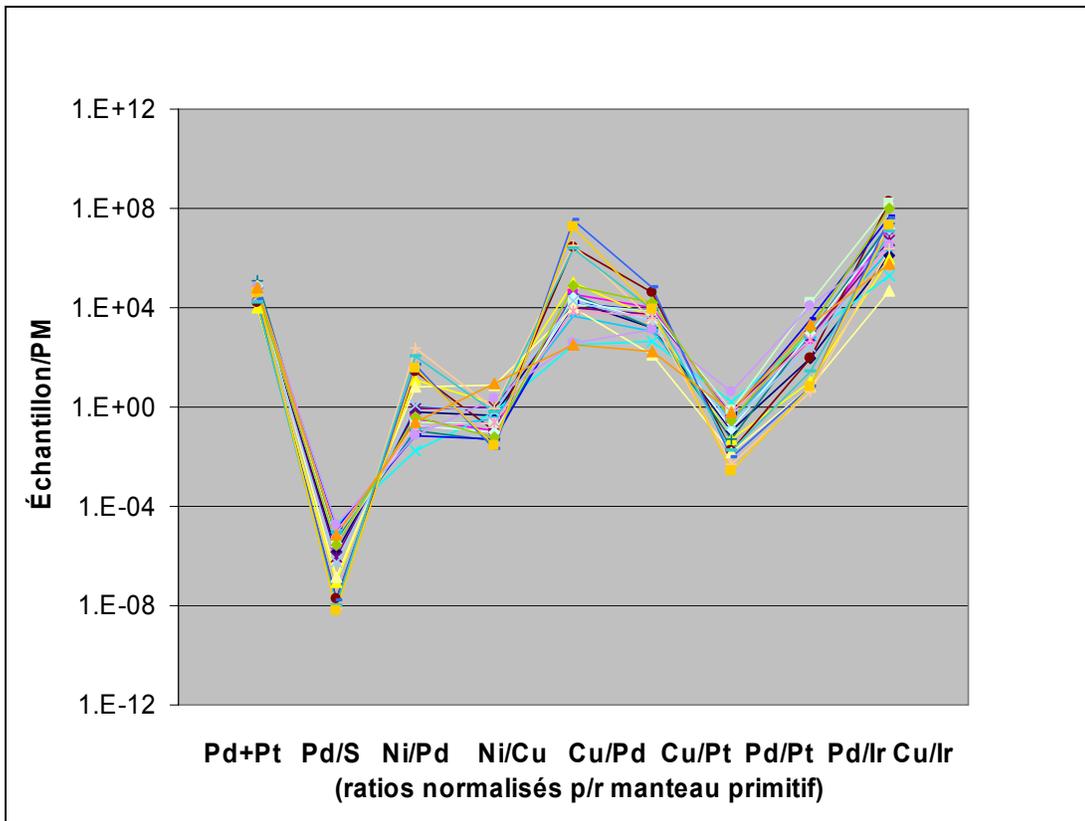


Figure 16: Profils RA-EGP pour le dépôt Cu-Ni de Montcalm. Données de Barrie et Naldrett (1990).
[Retour au texte](#)

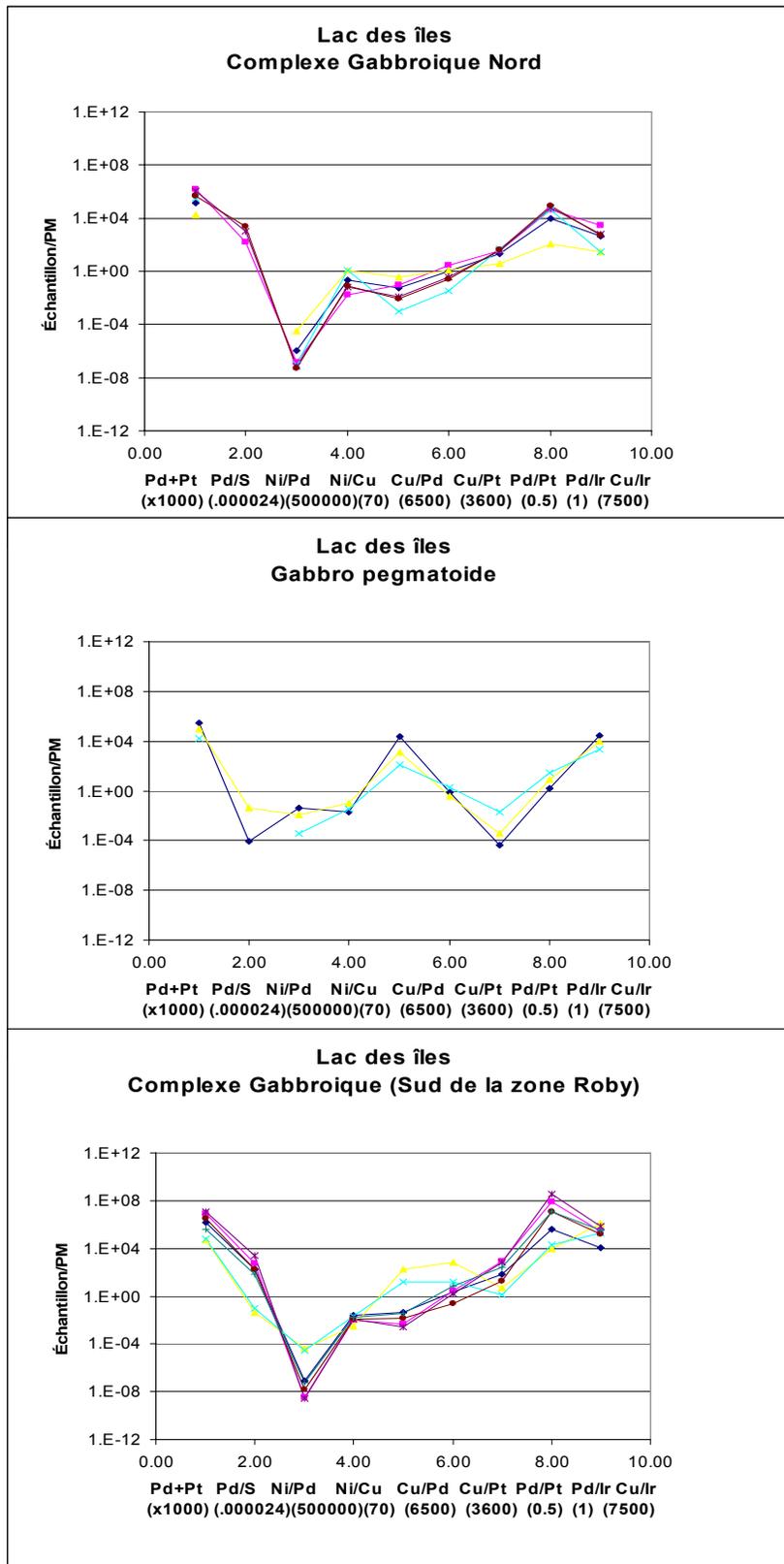


Figure 17: Profils RA-EGP de Lac des îles. Données de Brüggmann et al. (1989). [Retour au texte](#)

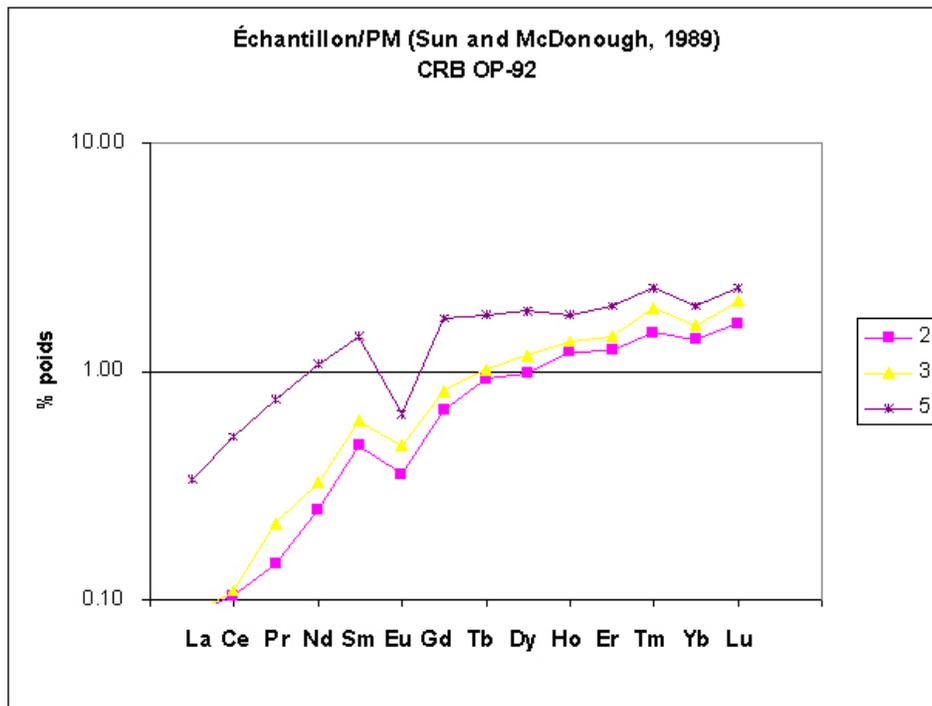


Figure 18: Profils des ETR pour les roches hôtes de l'indice OP-92. Les trois courbes représentent (de haut en bas) un gabbro anorthositique, une pyroxénite contenant 10% de pyrrhotine et une pyroxénite non-minéralisée. [Retour au texte](#)

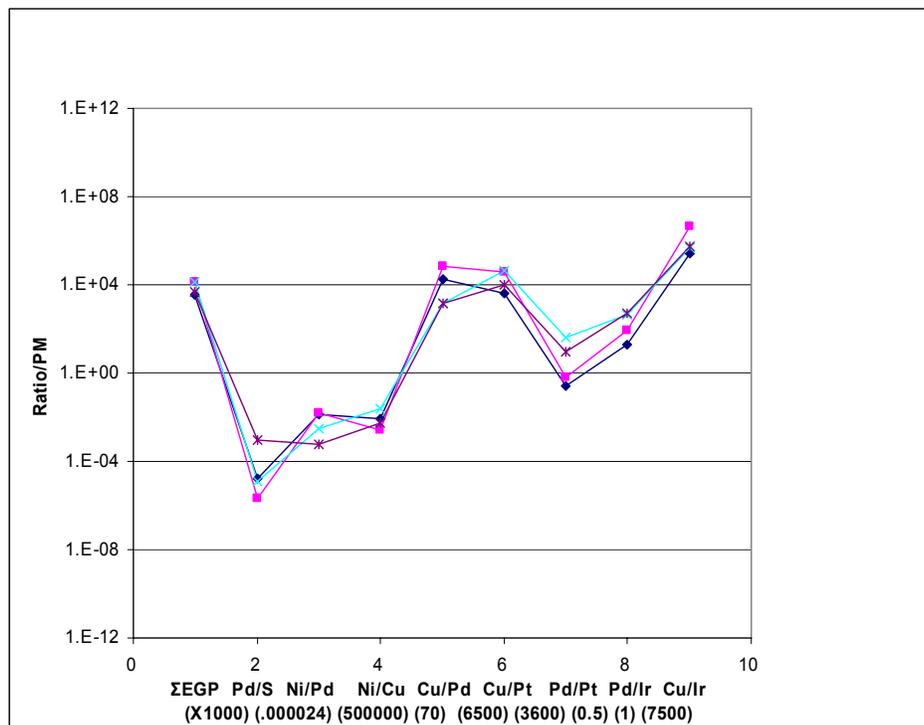


Figure 19: Profils RA-EGP pour les roches hôtes de l'indice OP-92. [Retour au texte](#)

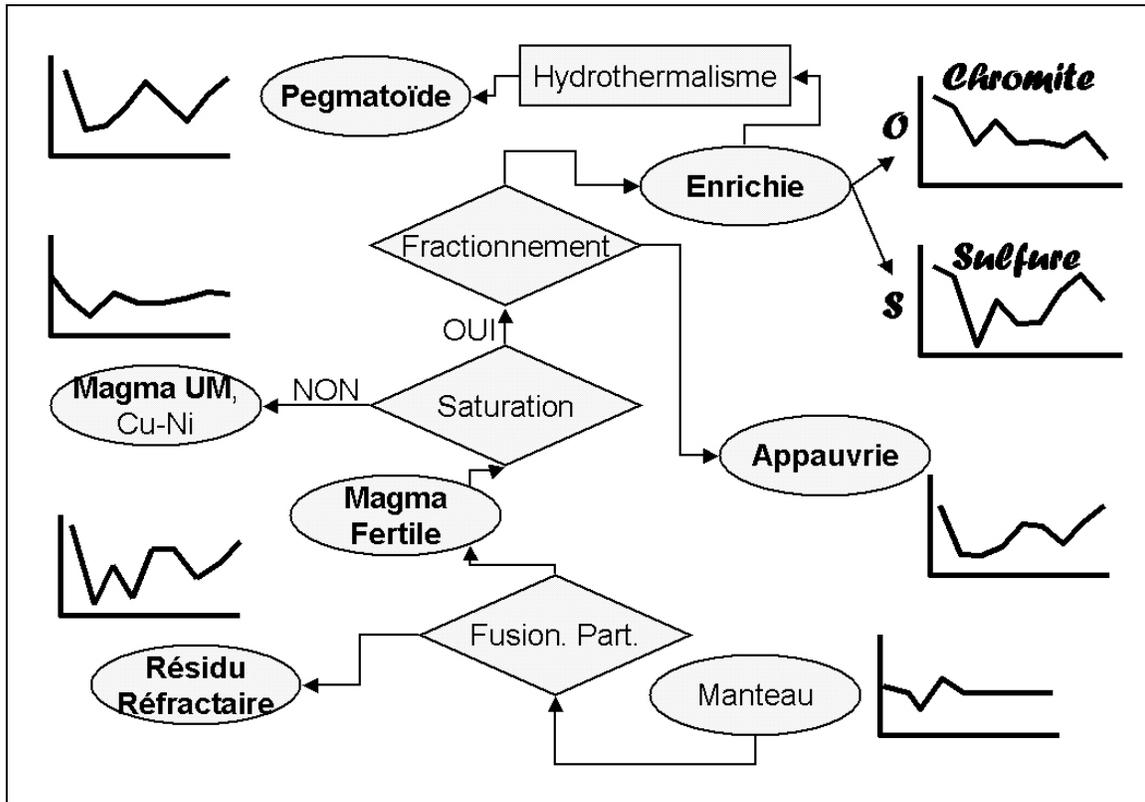


Figure 20: Organigramme résumant les différentes signatures de RA-EGP en relation avec les contextes pétrogénétiques. [Retour au texte](#)