

**LA FORMATION DU GISEMENT DE NICKEL-CUIVRE DE
PECHENGA EN RUSSIE**

par:
Nancy Verreault

Mémoire présenté dans le cadre du cours
de projet de fin d'études
6SCT604

Université du Québec à Chicoutimi

Mai 1996

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	3
RÉSUMÉ	4
INTRODUCTION	5
GÉOLOGIE GÉNÉRALE.....	9
ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE.....	12
ANALYSE GÉOCHIMIQUE.....	16
Préparation des échantillons	16
Réacteur nucléaire.....	17
Les échantillons.....	17
ANALYSE DES DONNÉES	21
Éléments majeurs qui diffèrent.....	21
Le soufre.....	21
Le cuivre.....	21
Le cobalt.....	21
Le fer	22
Le nickel.....	22
DIAGRAMME Fe-S-Ni-Cu.....	23
Éléments mineurs qui diffèrent.....	31
Éléments traces et terres rares	31
Éléments du groupe du platine (EGP).....	36
Diagramme Pd/Ir en fonction du Ni/Cu.....	42
Diagramme Ni/Pd en fonction du Cu/Ir.....	42
Rapport S/Se.....	45
DISCUSSION	47
CONCLUSION	50
REMERCIEMENTS	52
RÉFÉRENCES	53

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1. Localisation géographique.....	6
Figure 2a. Modèle schématique de la formation de Pechenga	7
Figure 2b. Emplacements des dépôts de nickel-cuivre	7
Figure 3. Géologie générale de la région de Pechenga.....	10
Figure 4. Profil des unités intrusives	13
Figure 5. Profil des unités volcaniques	14
Figure 6. Localisation des échantillons.....	19
Figure 7. Graphique du cuivre en fonction du soufre.....	25
Figure 8. Graphique du cobalt en fonction du soufre.....	26
Figure 9. Graphique du fer en fonction du soufre.....	27
Figure 10. Graphique du nickel en fonction du soufre.....	28
Figure 11. Diagramme Fe-S-Ni-Cu	29
Figure 12. Diagramme araignée des éléments mineurs	35
Figure 13. Distribution des EGP dans les intrusions.....	38
Figure 14. Distribution des EGP dans les coulées.....	40
Figure 15. Distribution des EGP dans les sédiments	41
Figure 16. Rapport Pd/Ir en fonction du Ni/Cu	43
Figure 17. Rapport Ni/Pd en fonction du Cu/Ir	44
Figure 18. Rapport Sélénium/soufre en fonction du cobalt.....	46
Tableau 1. Liste des échantillons.....	20
Tableau 2. Répartition des éléments majeurs (en ppm)	30
Tableau 3. Répartition des terres rares (en ppm)	32
Tableau 4a. Répartition des éléments traces (en ppm).....	33
Tableau 4b. Répartition des éléments traces (en ppm).....	34
Tableau 5. Répartition des éléments du groupe du platine (en ppb)	37

RÉSUMÉ

La zone de rift de Pechenga est localisée dans la Péninsule de Kola au nord-ouest de la Russie. Quatre principaux cycles volcaniques séparés par des séquences sédimentaires s'y sont déposés entre 2453 et 1970 Ma. Des dépôts de Ni-Cu sont retrouvés à la base des coulées de picrites ou, plus souvent, à l'intérieur d'intrusions ultramafiques différenciées.

La source probable pour le nickel et le cuivre, provient d'une plume mantellique qui a migré le long de l'ouverture intercontinentale. Les intrusions sont encaissées dans des sédiments. Les dépôts de Ni-Cu pourraient être le résultat de la contamination de ces intrusions et des coulées picritiques par les sédiments transférant ainsi une quantité appréciable de soufre à l'intérieur du magma.

Ces dépôts sont exploités depuis le début des années 1940. La production annuelle est d'environ 30 000 à 35 000 tonnes de nickel. Les réserves de Pechenga assurent une exploitation pour encore 40 à 50 ans à venir.

INTRODUCTION

Le gisement de Pechenga est situé dans la péninsule de Kola au nord-ouest de la Russie près de la frontière norvégienne (Melezhik et al, 1994). (Fig.1)

De nombreux dépôts de nickel-cuivre, d'âge protérozoïque, sont localisés à l'intérieur d'une zone de rift associée à des bassins sédimentaires et des zones d'activités volcaniques. La minéralisation se retrouve soit dans les intrusions ultramafiques différenciées soit dans les coulées de ferropicrite à la base de la formation volcanique de Pil'guyarvi (Melezhik et al, 1994).

Le modèle général actuel consiste en un début d'ouverture continentale (rifting) avec formation de bassins sédimentaires et début de volcanisme andésitique. L'ouverture se poursuit, il y a apparition d'un plancher océanique et de basaltes intercontinentaux (MORB). Une plume de source mantellique peut alors remonter en surface pour créer du volcanisme ultramafique ou se mettre en place à l'intérieur des sédiments. Des dépôts de nickel-cuivre seront ainsi trouvés à la base des coulées de ferropicrites ou, plus souvent, dans les intrusions différenciées encaissées par les sédiments (Melezhik et al, 1994) (Fig. 2a et 2b).

Le but de ce présent rapport est, en tout premier lieu, de déterminer s'il y a une différence de composition entre les sulfures associés aux intrusions et ceux associés aux coulées.

Situation géographique

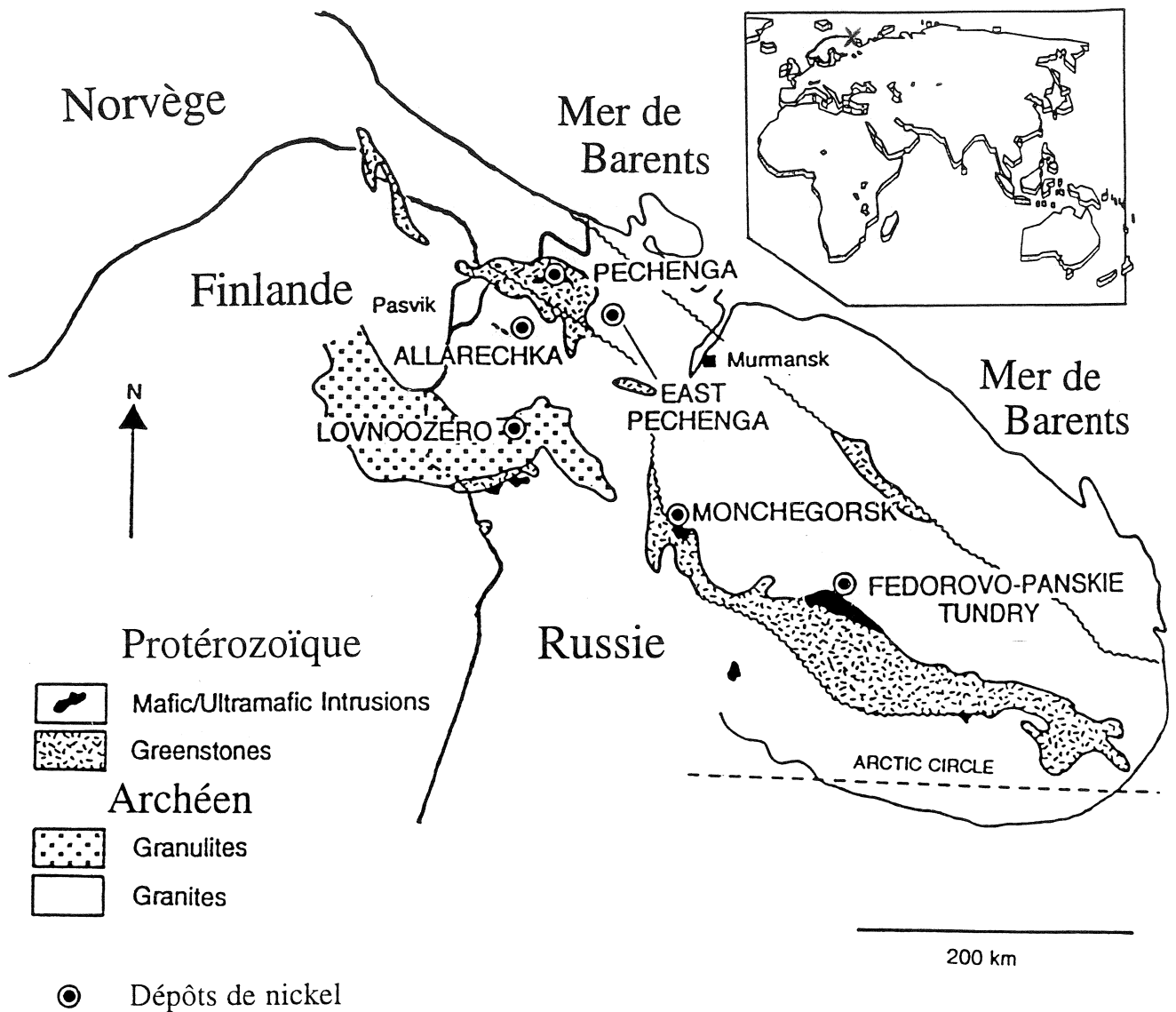


Figure 1. Dépôts de nickel dans la région de la Péninsule de Kola, Russie. (Tirée de Melezhik et al, 1994)

Modèle schématique de la formation de Pechenga

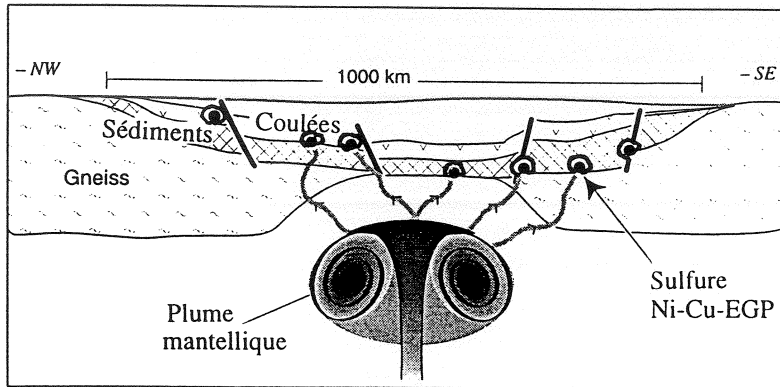


Figure 2a. Modèle général. Lors de l'ouverture, une plume mantellique peut remonter en surface et créer du volcanisme ultramafique. (Modifiée de Barnes et Francis, 1995)

Emplacements des dépôts de nickel-cuivre

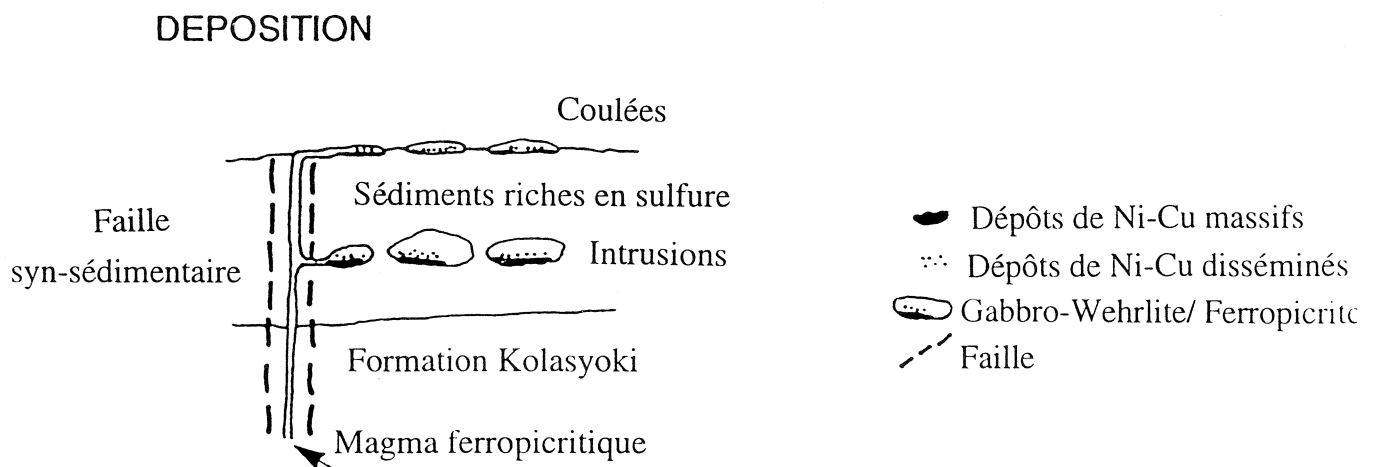


Figure 2b. Section transversale montrant les différents emplacements des dépôts de Ni-Cu. (Tirée de Melezhik et al, 1994.)

En seconde partie de l'étude, il sera question de la possibilité de contamination en soufre par les sédiments. En effet, lors de la mise en place des intrusions et des coulées, ce sont les sédiments, riches en soufre, qui peuvent avoir provoqué la saturation du magma, faisant ainsi précipiter les sulfures.

Les analyses seront faites sur des échantillons provenant des dépôts de nickel-cuivre dans les intrusions, les coulées et les sédiments.

GÉOLOGIE GÉNÉRALE

Les informations sur la géologie générale sont tirées de Melezhik et al, 1994.

Il y a eu début d'ouverture intracontinentale vers 2.4 Ga. Une combinaison de failles longitudinales et transversales contrôlent alors l'ouverture de la région de Pechenga et produisent une configuration de grabens. Il y a formation de bassins sédimentaires et des conglomérats fluviaux y sont retrouvés. Ces conglomérats recouverts par des calcaires, constituent la Formation Sédimentaire Akhmalhti (Fig. 3).

De plus, l'ouverture provoque du volcanisme subaérien. Ainsi, il y a remontée de basaltes amygdalaires, basaltes andésitiques et de dacites andésitiques, composant la Formation Volcanique Akhmalhti (Fig. 3).

Le second cycle sédimentaire et volcanique comprend des évaporites lacustres et des roches volcaniques alcalines. Ces dépôts représentent un environnement continental subaérien ou marin peu profond et produisent la Formation Kuetsyarvi (Fig. 3).

Vers 2.1 Ga, il y a un stade transitionnel entre l'ouverture intra et intercontinentale. Aussi, s'accumulent des MORB-N, des ferropicrites, des gabbros-wehrlites et de shales noirs. Ces roches constituent les Formations de Kolasyoki et de Pil'guyarvi (Fig. 3).

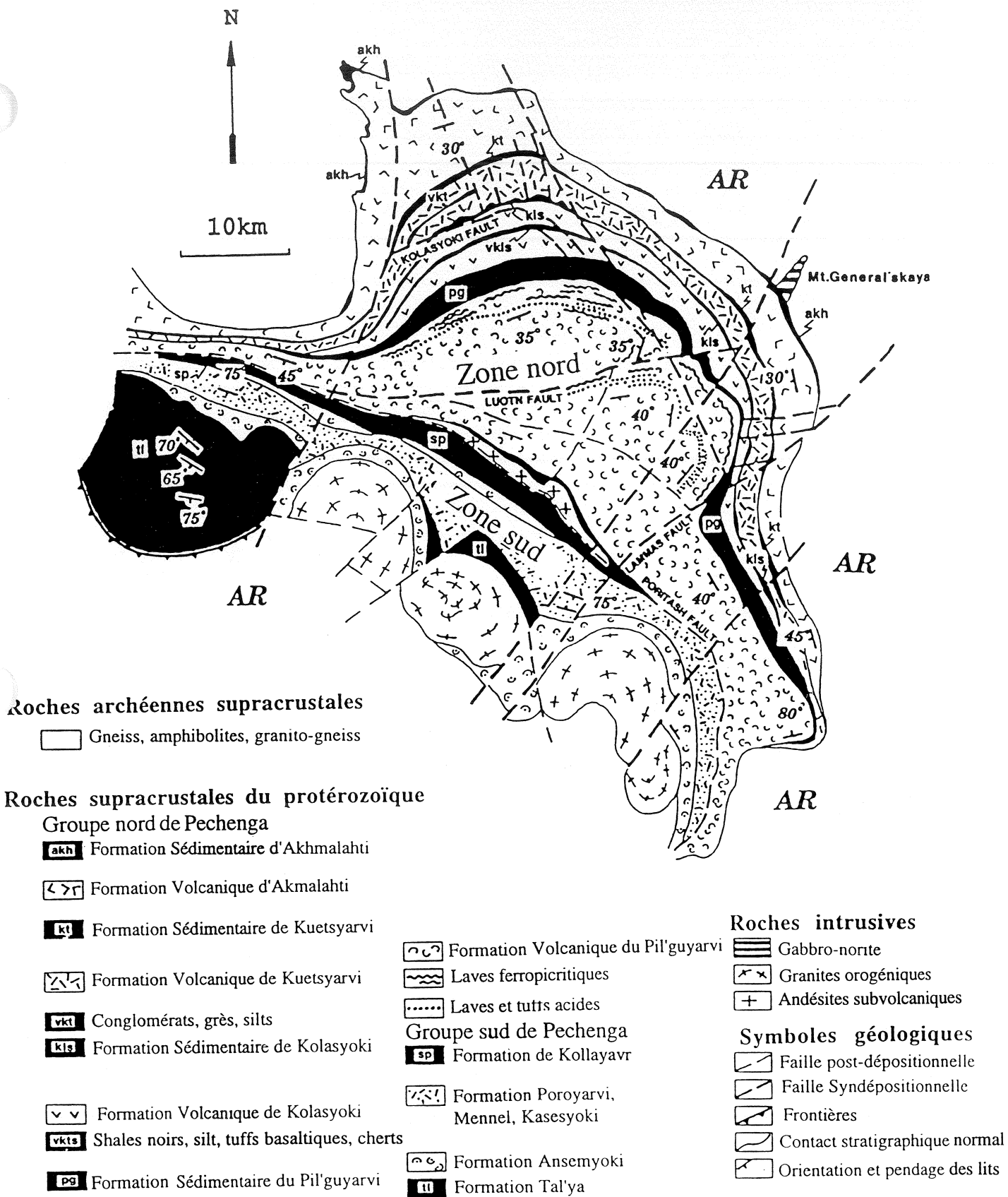


Figure 3. Géologie générale de la zone de Pechenga en Russie et en Norvège. (Tirée de Melezhik et al, 1994)

Les dépôts de nickel-cuivre sont retrouvés surtout dans la Formation de Pil'guyarvi. Ils sont localisés en majorité dans les parties ultramafiques des intrusions de gabbros-wehrlites encaissées dans des sédiments et quelquefois à la base des coulées de ferropicrites. Dans les deux cas, le soufre contenu dans ces dépôts de nickel-cuivre proviendrait des sédiments. En effet, lorsque le magma chaud arrive en contact avec les sédiments, le soufre qui est un élément très mobile, est diffusé vers le magma. Lors du refroidissement, le soufre est trappé à l'intérieur et fait précipiter les sulfures.

Le stade final de l'ouverture a été peu étudié. Deux événements orogéniques ont pris place entre 1.97 et 1.8 Ga. La durée totale de l'évolution active de Pechenga est estimée à 600 Ma.

ANALYSE PÉTROGRAPHIQUE

Les dépôts de Nickel-Cuivre sont localisés principalement à l'intérieur des portions ultramafiques des gabbros-wehrlites différenciés et moins souvent, à la base des coulées de ferropicrites. Les sulfures retrouvés sont en majorité pyrrhotite, pentlandite et chalcopyrite. Il y a quelques traces de pyrite, magnétite, violarite, sphalérite, bornite, cubanite, mackinawite, vallériite et des minéraux du groupe du platine. Dans les sédiments, le seul sulfure présent est la pyrite (Melezhik et al, 1994).

L'analyse des coupes stratigraphiques des intrusions et des coulées peut nous montrer certaines similarités et certaines différences entre ces deux dépôts.

Les intrusions montrent en général, à la base des cumulats d'olivines, surmontés de clinopyroxènes et en montant, un produit de différenciation qui évolue jusqu'à une composition gabbroïque (Hanski, 1992) (figure 4).

Les coulées de ferropicrites sont composées de la base au sommet de; sulfures massifs, sulfures disséminés, ferropicrites massives, ferropicrites globulaires et sont surmontées de shales noirs (Melezhik et al, 1994) (figure 5).

Profil des unités intrusives

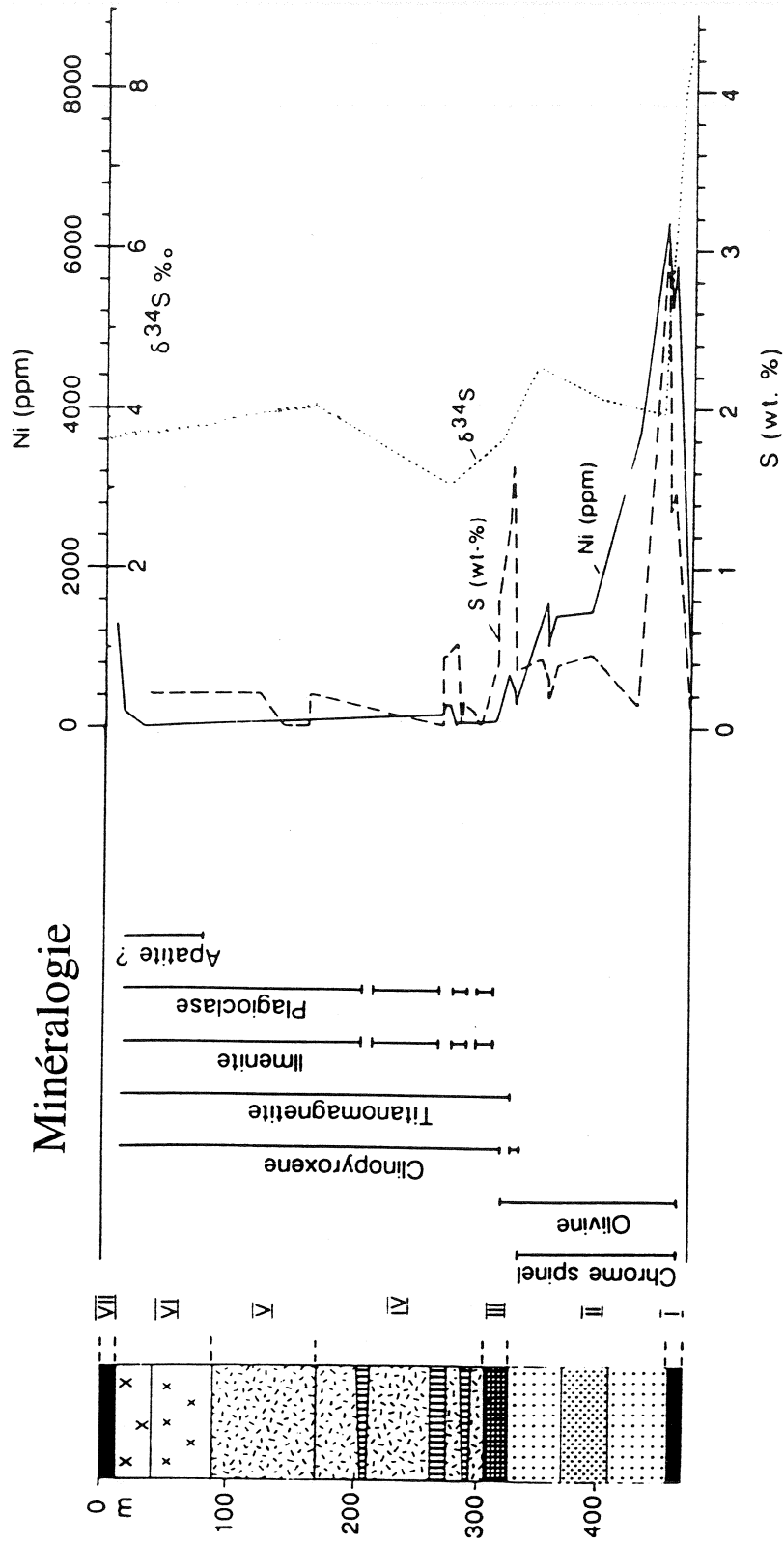


Figure 4. Profil stratigraphique des intrusions (Formation Pil'guyarvi)
(Tirée de Hanski, 1992)

Profil des unités volcaniques

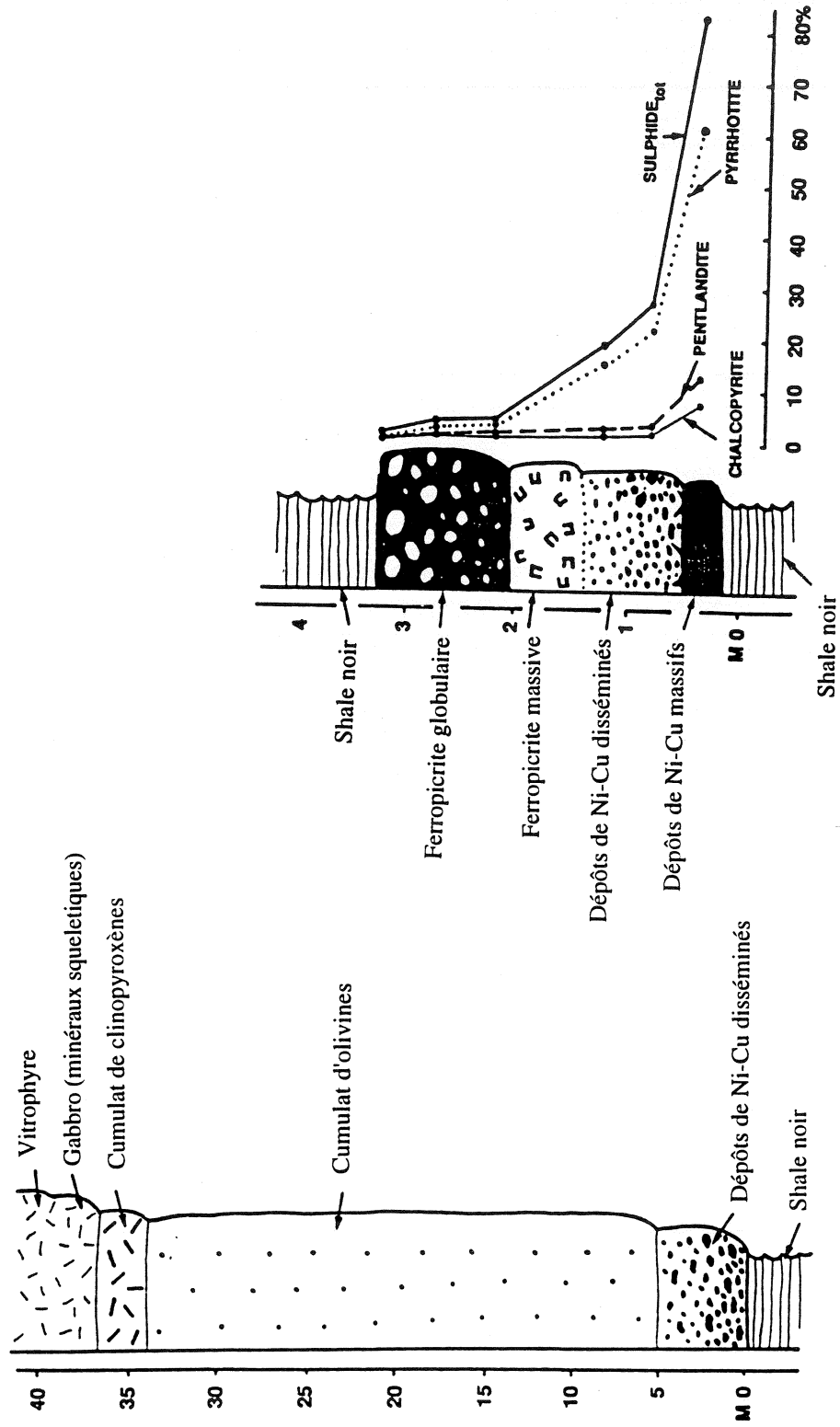


Figure 5. Profil stratigraphique des coulées
(Tirée de Melezhik et al, 1994)

La comparaison entre les deux profils montre que les intrusions qui peuvent avoir une épaisseur de 400 m, sont beaucoup plus imposantes que les coulées qui mesurent en moyenne 40 m (figures 4 et 5).

Une des caractéristiques similaires est que pour les deux coupes, les sulfures sont concentrés à la base des profils. Sur la coupe stratigraphique des intrusions, la courbe $\delta^{34}\text{S}$ est donnée et montre un ratio d'environ 4. Cette information appuie l'hypothèse que le soufre provient des sédiments (Hanski, 1992).

ANALYSE GÉOCHIMIQUE

Les données permettant l'analyse géochimique sont obtenues par activation neutronique. La préparation se fait de la manière suivante:

Préparation des échantillons

Pour les éléments traces:

- Il faut broyer les échantillons et peser 1 à 2 grammes de poudre de roche. Cette poudre sera ensuite incorporée dans une capsule en plastique et envoyée au réacteur nucléaire (Bédard et Barnes, 1990).

Pour les éléments du groupe du platine (EGP):

- Pour faire l'analyse de ces éléments, il est important d'avoir un mélange dont la proportion molaire de nickel et de soufre est la même. Aussi, il faut broyer les échantillons et y ajouter du soufre et du nickel afin d'obtenir la même proportion molaire. Dans le mélange, du carbonate de sodium (NaCO_3) ainsi que du borate de sodium (Na_2BO_4) sont incorporés pour la formation du bouton de sulfure.

- Lorsque le mélange est fait, mettre au four à 1000°C pendant une heure trente minutes. Le bouton de sulfure produit est ensuite rebroyé et dissout dans de l'acide chlorhydrique 36%. Il faut filtrer afin de récupérer

les EGP sur le papier-filtre (0.45 microns) et envoyer au réacteur nucléaire (Lavoie, 1992).

Réacteur nucléaire

Les échantillons irradiés à l'École Polytechnique de Montréal reviennent 5 jours après leur activation. Pour certains éléments dont la demi-vie est assez courte, une lecture aura été prise à l'École Polytechnique avant que l'élément ne soit complètement détérioré (s'applique surtout dans le cas des éléments du groupe du platine).

Un comptage de points est effectué dès la réception à l'Université du Québec à Chicoutimi. Cette opération permet à l'ordinateur de lire sous forme de spectres les rayons gammas émis par les différents éléments.

Le logiciel EPAA (Greg Kennedy, École Polytechnique) effectue les calculs des teneurs de chacun des éléments voulus.

Les échantillons

Pour les besoins de l'étude, 24 échantillons ont été traités selon les deux méthodes décrites plus haut; poudres de roches et papiers-filtres.

Pour les poudres de roches, une lecture a été prise à partir du septième jour suivant la date d'irradiation pour les éléments à courte demi-vie. Une autre lecture a été faite au trentième jour pour les éléments à longue demi-vie.

Pour les papiers-filtre, des lectures ont été prises après 2 minutes, une journée et cinq jours suivant la date d'irradiation.

Du nombre des 24 échantillons, cinq sont des sulfures provenant des sédiments riches en pyrite. Il y a sept échantillons représentant les dépôts de nickel-cuivre à l'intérieur des intrusions. Les autres sont des échantillons, provenant des coulées, retrouvés soit sous forme massive ou sous forme disséminée. (figure 6 et tableau 1)

Localisation des échantillons

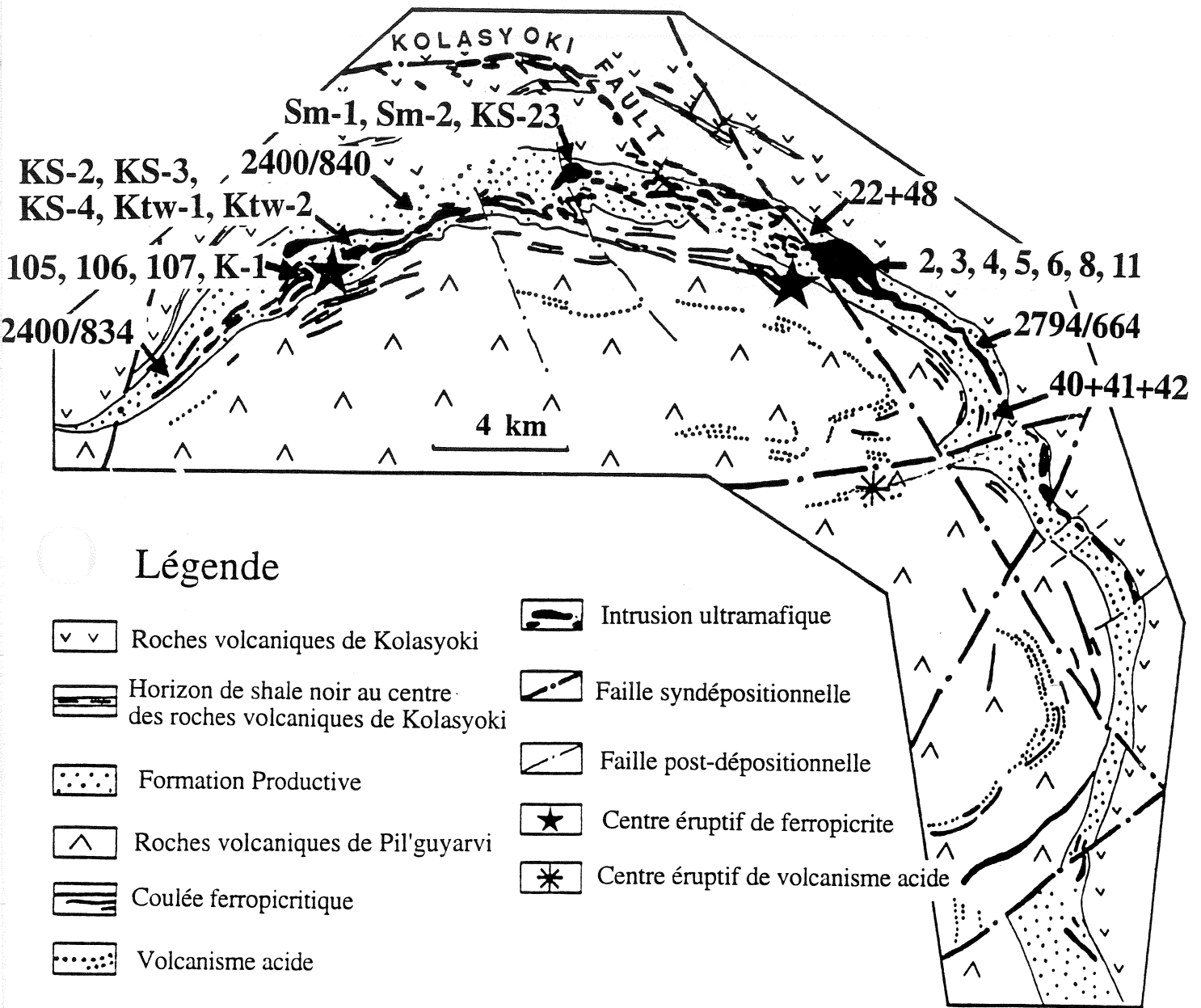


Figure 6. Localisation des échantillons
(Carte tirée de Melezhik et al, 1994)

Liste des échantillons:

Sulfures provenant des coulées:

Numéro	Description	Localisation
KS-2	Shale noir porteur de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
KS-3	Sulfure massif de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
KS-4	Sulfure disséminé de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
KS-23	Sulfure massif de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
105	Sulfure massif de Ni-Cu	Kaula, ouest
106	Sulfure massif de Ni-Cu dans shale	Kaula, ouest
107	Sulfure massif de Ni-Cu dans shale	Kaula, ouest
Sm-1	Sulfure massif de Ni-Cu	Semiletka, 4
Sm-2	Sulfure massif de Ni-Cu	Semiletka, 4
Ktw-1	Sulfure massif de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
Ktw-2	Sulfure massif de Ni-Cu	Kotselvaara, flanc ouest
K-1	Sulfure massif de Ni-Cu	Kaula, ouest

Sulfures provenant des intrusions:

Numéro	Description	Localisation
2	Sulfure massif de Ni-Cu	Mine nord-est, flanc est
3	Sulfure massif de Ni-Cu	Mine nord-est, flanc est
4	Sulfure brèchique de Ni-Cu	Mine nord-est, flanc est
5	Shale noir porteur de Cpy	Mine nord-est, flanc est
6	Sulfure brèchique de Ni-Cu	Mine nord-est, partie centrale
8	Sulfure massif de Ni-Cu	Mine nord-est, flanc ouest
11	Shale noir porteur de Ni-Cu	Mine nord-est, partie centrale

Sulfures provenant des sédiments:

Numéro	Description	Localisation
22+48	Concretion de pyrite	Formation productive, membre C
40+41+42	Concretion de pyrite	Formation productive, membre C
2400/840	Pyrite massive	Formation productive, membre B
2400/834	Pyrite massive	Formation productive, membre B
2794/664	Concretion de pyrite	Formation productive, membre B

Tableau 1. Echantillons collectés par Victor A. Melezhik, 19/10/1995

ANALYSE DES DONNÉES

Éléments majeurs qui diffèrent

Le soufre

Les sulfures compris dans les sédiments sont très riches en soufre. En moyenne, la proportion de soufre est de 46%. Cette abondance marquée dans les sédiments soutient l'hypothèse que ces derniers seraient vraisemblablement la source du soufre pour les intrusions et les coulées.

Les sulfures dans les intrusions contiennent environ 35% de soufre. Ils sont légèrement plus riches que ceux des coulées qui, eux, ont une proportion de 29% de cet élément (tableau 2).

Le cuivre

Le cuivre est très peu présent dans les sulfures des sédiments (moins de 1%). Les sulfures dans les intrusions, en général, ont tendance à être plus riches en cuivre (7%) que ceux dans les coulées (2%) (figure 7 et tableau 2).

Le cobalt

Pour ce qui est du cobalt, la distribution est environ la même que celle du cuivre. Les sédiments sont appauvris en cobalt (moins de 200 ppm). Les sulfures des intrusions ont, encore une fois, tendance à être plus riches en

cobalt (environ 2000 ppm) que ceux des coulées (en moyenne 1500 ppm). (figure 8 et tableau 2).

Le fer

La proportion de fer pour les sulfures compris dans les sédiments est en moyenne de 43%. Cette concentration est environ la même pour les sulfures des intrusions, soit de 44%. Les sulfures des coulées, par contre, contiennent plus de fer (48%) (figure 9 et tableau 2).

En fait, il semble que l'excédent de fer pour les sulfures chez les coulées soit compensé par une plus grande concentration de cuivre et de cobalt chez les intrusions.

Le nickel

Dans les sulfures des sédiments, le taux de nickel est très faible (moins de 1%). Tandis que pour les sulfures des intrusions et des coulées, la proportion est sensiblement la même (figure 10 et tableau 2). Le nickel peut montrer des variations de concentration allant jusqu'à 10%, d'un échantillon par rapport à un autre (de 2% à 13%).

DIAGRAMME Fe-S-Ni-Cu

Le double diagramme triangulaire (figure 11) permet de bien visualiser la distribution de chacun des éléments vus précédemment dans les différents types de roches. C'est un diagramme qui représente d'une part la proportion de Fe-S-Ni et d'autre part la proportion de Fe-S-Cu.

Sur cette figure, il est bien démontré que les sulfures des sédiments ne contiennent pratiquement que du fer et du soufre. Aussi, tous les points représentant les sédiments sont situés dans le champ de la pyrite.

De plus, sur ce graphique, il y est clairement montré que les sulfures des coulées sont plus riches en fer que les sulfures des intrusions. Par contre, ces derniers sont plus riches en soufre et en cuivre. Pour le nickel, encore une fois, il n'y a pas de différence entre les coulées et les intrusions. Le taux de nickel semble le même pour les deux types de roche.

Il est également représenté sur ce graphique, le champ des solutions solides monosulfurées (SSM) à 1100°C. Évidemment, les sédiments sont tout à fait hors de ces limites car ce ne sont pas des produits de différenciation de magma sulfuré.

En général, la plupart des sulfures compris dans les coulées et certains dans les intrusions sont dans ce champ. Cette information indique que ces

roches se sont formées au tout début du refroidissement du magma sulfuré avant qu'il ne soit différencié.

Il y a quelques intrusions qui sont légèrement hors des limites des SSM. Cette observation pourrait suggérer que les coulées sont moins différenciées que les intrusions.

Une dernière intrusion est très loin du champ des SSM, représentant ainsi un produit de différenciation plus marquée.

Cuivre versus soufre

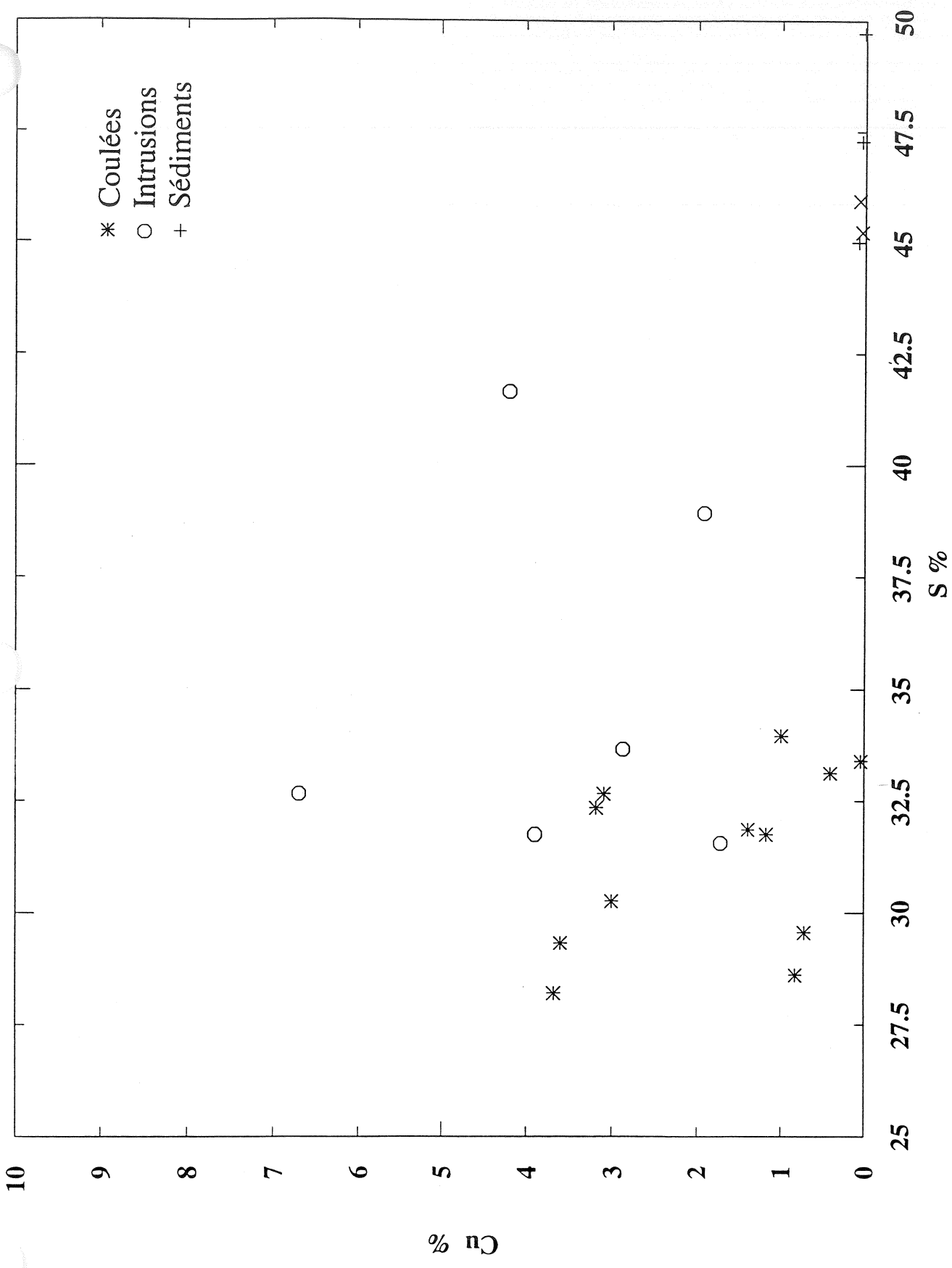


Figure 7. Graphique du cuivre en fonction du soufre

Cobalt versus soufre

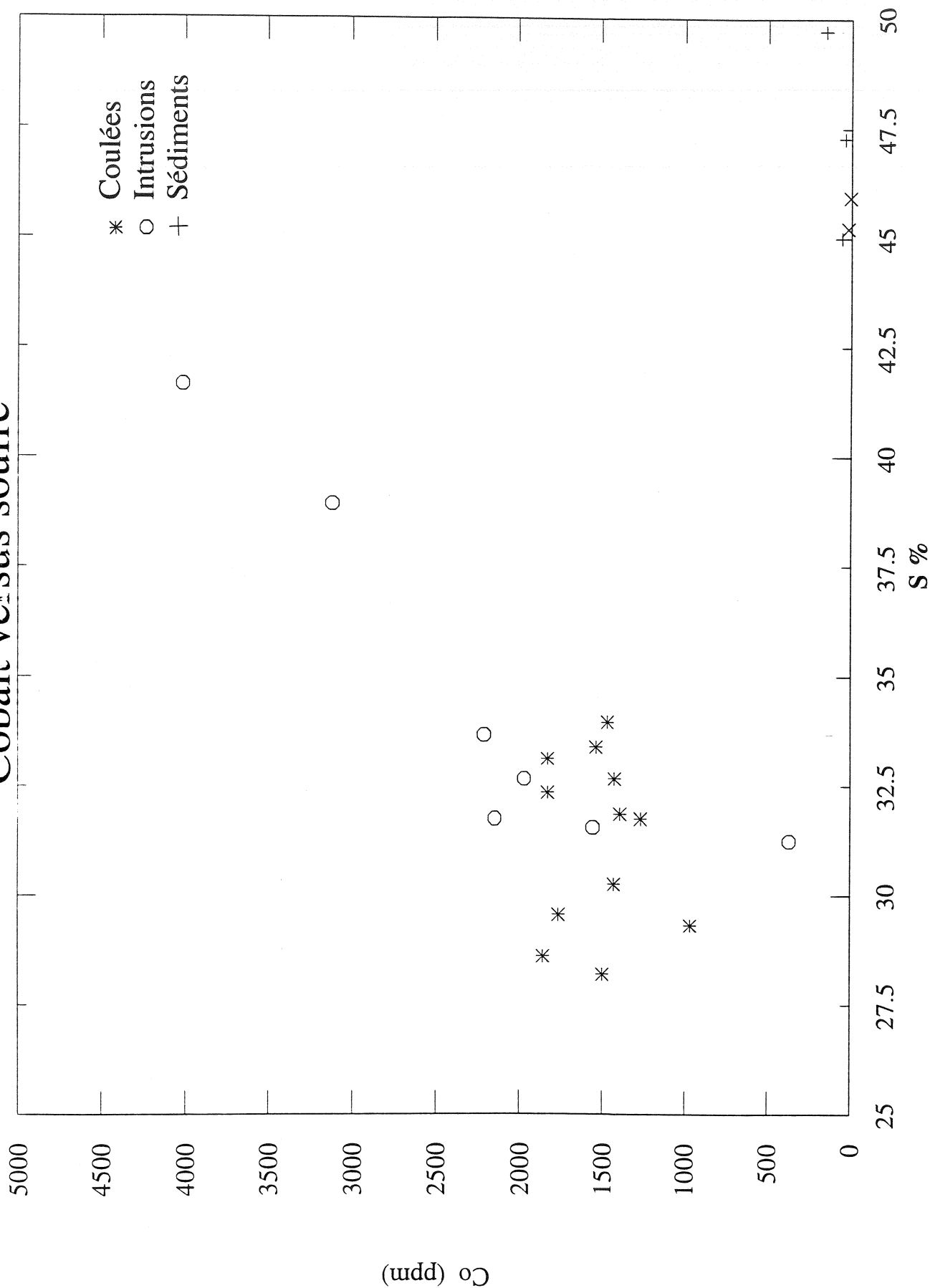


Figure 8. Graphique du cobalt en fonction du soufre

Fe versus soufre

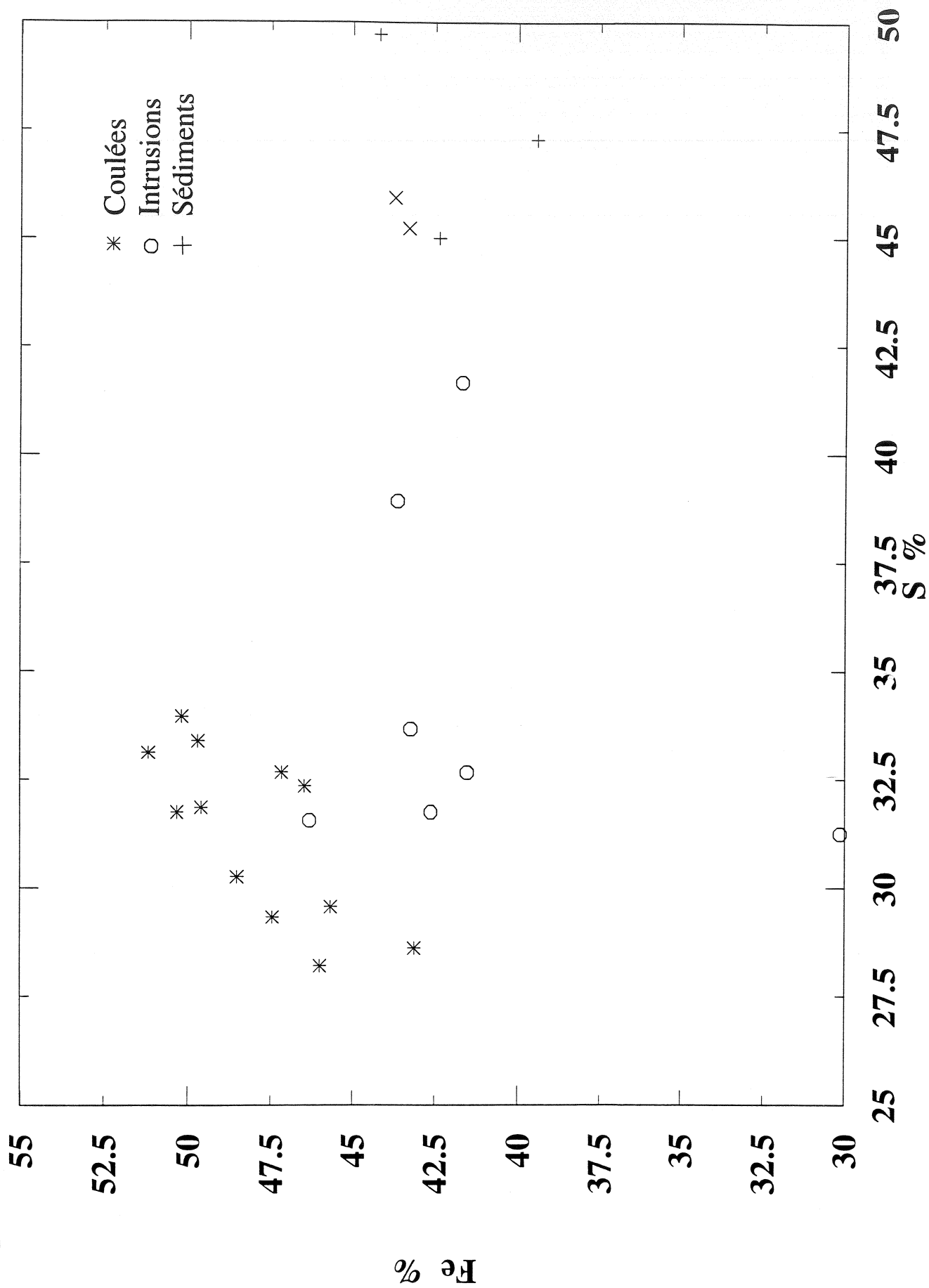


Figure 9. Graphique du fer en fonction du soufre

Nickel versus soufre

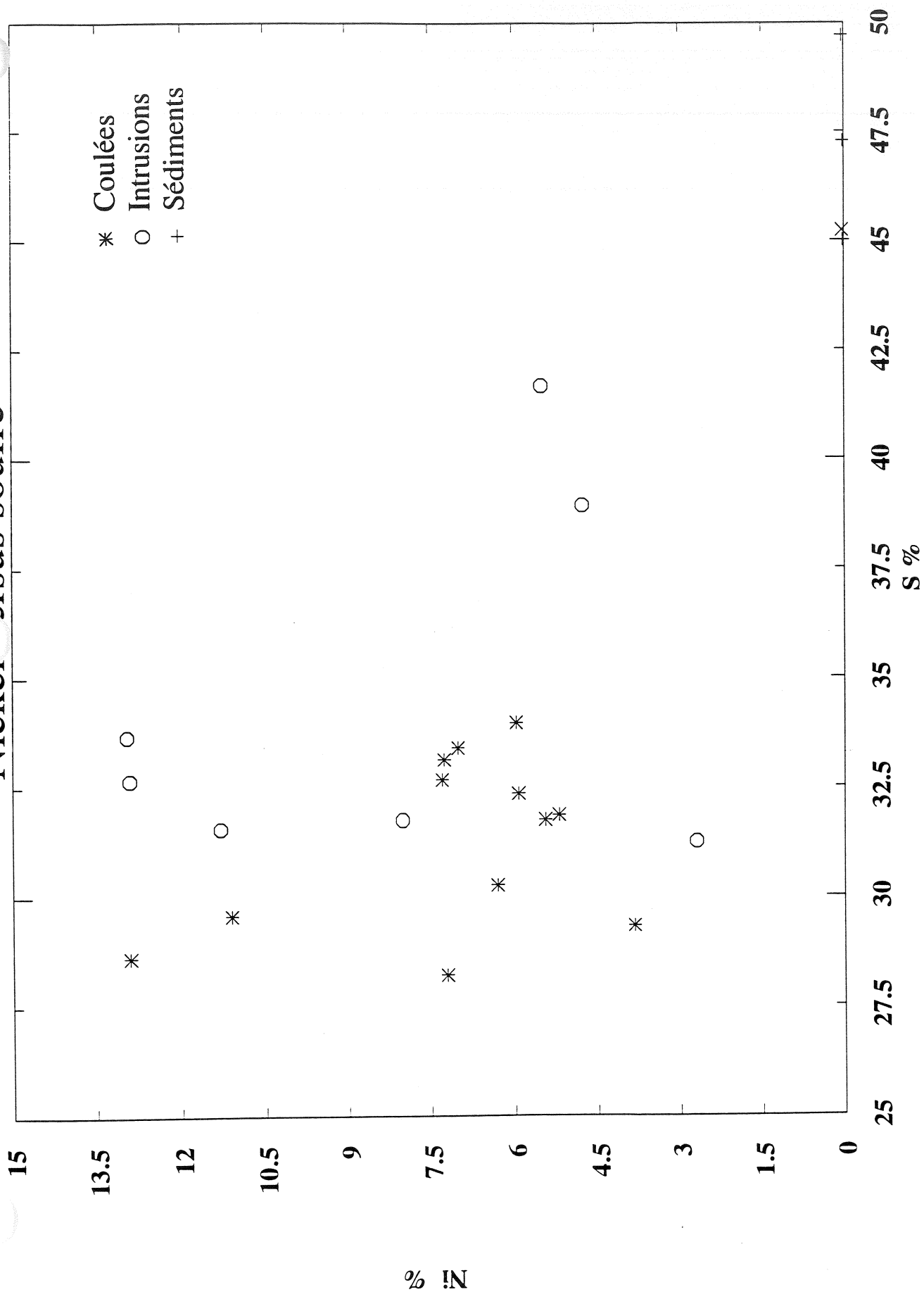


Figure 10 Graphique du nickel en fonction du soufre

Double diagramme triangulaire Fe-S-Ni-Cu

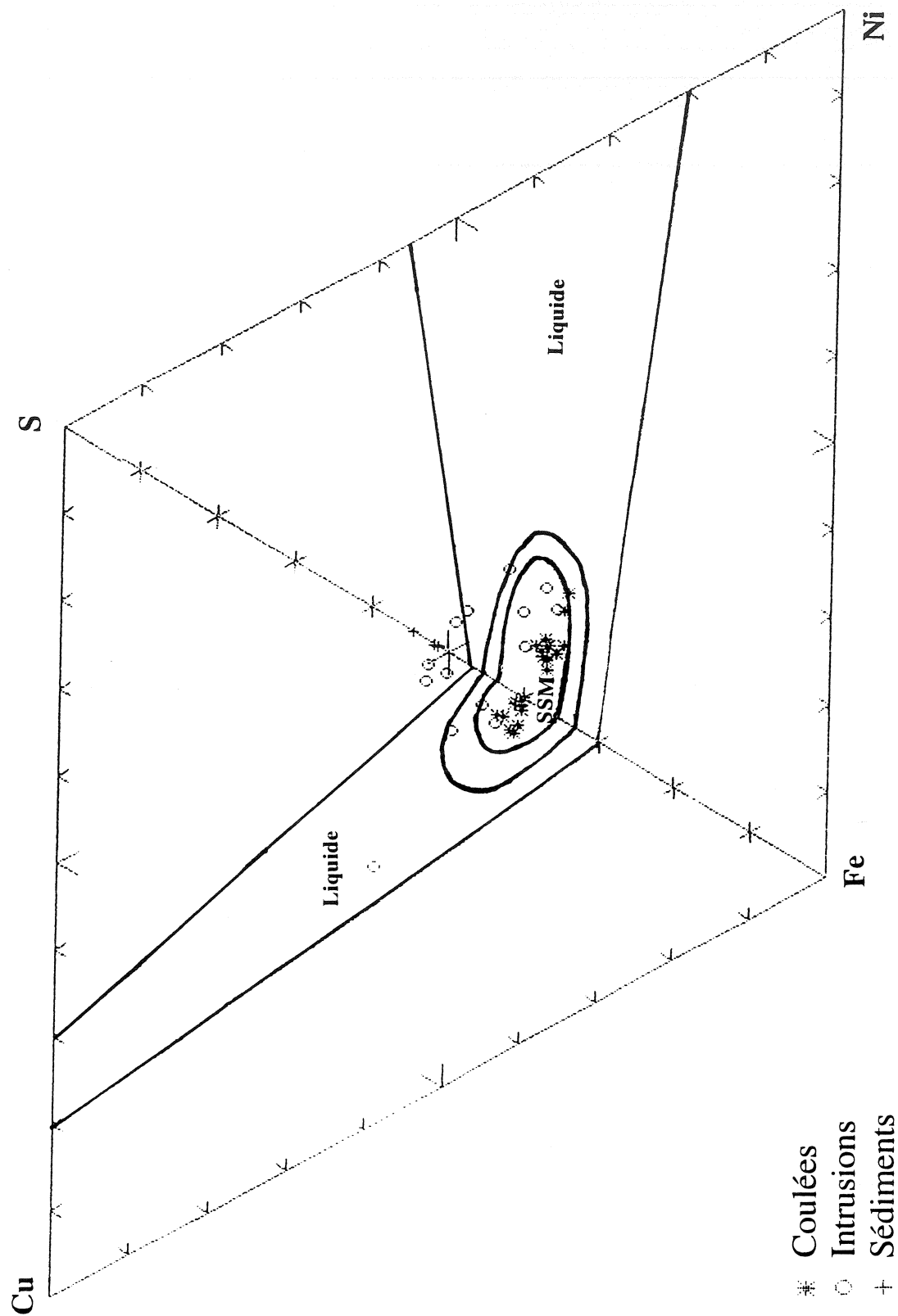


Figure 11. Double diagramme triangulaire, Fe-S-Ni-Cu, représenté avec les limites des solutions solides monosulfurées à 1100°C

	S (%)	Cu (%)	Fe	Ni	Co	Na
Sédiments						
22+48	49.71	0.018	71.35	561	178	0.107
40+41+42	47.28	0.041	55.89	278	37	0.245
2400/840	45.23	0.041	60.87	345	20.6	0.07
2400/834	45.94	0.071	61.89	61	5.6	0.039
2794/664	45.01	0.082	59.57	189	56	0.062
Intrusions						
2	41.67	4.2	57.94	53572	4001	0
3	33.67	2.87	62.91	127962	2195	0
4	31.56	1.72	42.81	26301	367	0
5	31.26	30.89	60.51	46698	3098	0.002
6	38.94	1.92	58.02	127282	1949	0
8	32.67	6.7	57.95	79512	2128	0.041
11	31.76	3.9	65.81	111275	1547	0.006
Coulées						
105	31.74	3.09	66.56	71106	1420	0
106	33.59	1.18	72.61	54716	1261	0
107	33.12	0.41	71.21	69968	1815	0
Sm-1	28.21	3.68	65.24	71623	1479	0
Sm-2	30.27	3	69.17	62643	1416	0
Ktw-1	28.63	0.83	60.59	127345	1853	0
Ktw-2	29.57	0.72	63.91	109123	1748	0
K-1	33.4	0.0443	71.53	69979	1531	0
KS-2	29.33	3.6	65.61	38871	963	0.0084
KS-3	32.35	3.18	65.77	58214	1802	0.023
KS-4	31.86	1.39	70.26	51377	1378	0.003
KS-23	33.96	1	71.98	59667	1458	0.0026

Tableau 2. Répartition des éléments majeurs (en ppm) dans les sédiments, les intrusions et les coulées.

Éléments mineurs qui diffèrent

Éléments traces et terres rares

À première vue, on remarque tout de suite que les résultats diffèrent en ce qui concerne les sulfures des sédiments par rapport à ceux des autres roches (tableau 3, 4a et 4b). Les sulfures des coulées et des intrusions sont riches en éléments du groupe du platine si on les compare aux sédiments. Par contre, certains éléments traces et les terres rares sont plus nombreux dans les sédiments que dans les coulées et les intrusions.

Afin de bien visualiser la distribution de certains éléments traces et de certaines terres rares, un diagramme araignée, normalisé selon les sulfures des sédiments, montre les proportions de ces éléments pour les sulfures compris dans les coulées et les intrusions (figure 12).

Ce diagramme permet de bien voir les différences entre les sulfures des sédiments et ceux des autres types de roches. Les éléments se situant en haut de la valeur 1 sont enrichis dans les coulées et les intrusions par rapport aux sédiments. Lorsque les éléments se situent en bas de 1, il y a appauvrissement de ces éléments chez les coulées et les intrusions par rapport aux sédiments.

Sur ce diagramme (figure 12) il est bien démontré que les coulées et les intrusions sont appauvries par rapport aux sédiments en Sb, Sc, La, Na_2O et Zn. Elles sont par contre enrichies en Th, Se, Cr, Ir, Cu, Co et Ni.

	La	Nd	Sm	Yb	Eu	Tb
Sédiments						
22+48	6.55	2.9	6.55	0.65	0.5	0.21
40+41+42	10.57	6.1	10.54	0.44	0.53	0.18
2400/840	8.89	3.34	1.101	0.32	0.25	0.05
2400/834	2.01	0.7	0.242	0.07	0.065	0
2794/664	15.35	9.2	1.81	0.65	0.45	0.08
Intrusions						
2	0.52	0	0.022	0	0	0.98
3	0.03	0	0	0	0	0.15
4	0.19	0	0.015	0.8	0	1.95
5	0.76	0	0.095	0	0	0
6	0.89	0	0	0	0	0
8	0.95	0	0.143	0	0.07	0
11	0.5	0	0.114	0	0	0
Coulées						
105	0.35	0	0.07	0	0	0
106	0.12	0	0.034	0	0	0
107	0.08	0	0.03	0	0	0
Sm-1	0.17	0	0.018	0	0	0
Sm-2	0.04	0	0.01	0	0	0
Ktw-1	0	0	0.047	0	0	0
Ktw-2	0.06	0	0.049	0	0	0
K-1	0.64	0	0.019	0	0	0
KS-2	3.47	0	0.547	0	0.09	0
KS-3	0.9	0	0.109	0	0.04	0
KS-4	1.1	0	0.301	0	0	0
KS-23	0.11	0	0.11	0	0	0.21

Tableau 3. Répartition des terres rares (en ppm) dans les sédiments, les intrusions et les coulées.

	Ag	As	Ba	Sb	Se	U	Cr
Sédiments							
22+48	0	21.5	3	4.51	23	4.6	115
40+41+42	5.8	182.3	40	29	28	0	109
2400/840	6.3	321.08	15	16.07	51	2.76	29.7
2400/834	1.1	72.7	0	6.97	6.4	0.48	15.8
2794/664	1.2	392.4	0	8.56	24.5	4.15	19.7
Intrusions							
2	9	0	0	0.14	71	0	123
3	2.3	0	0	0	73	0	45
4	81.6	6.3	0	0.19	61	0	161
5	3.3	331.3	10	0.78	104	0	124
6	12.8	1.4	0	0.09	72	0	31
8	8	21.3	0	0.98	79	0	229
11	5.1	8.5	3	0.15	82	0	119
Coulées							
105	9.6	307.3	0	2.55	73	0	301
106	2.6	19.8	0	1.28	52	0	931
107	1.8	22.9	0	0.17	51	0	1032
Sm-1	14.7	18.7	0	0.79	54	0	119
Sm-2	9.8	4.8	0	0.37	43	0	841
Ktw-1	44	115.5	11	0.81	115	0	0
Ktw-2	38	83.6	0	0.65	106	0	0
K-1	0	1.6	10	0.75	59	0	59
KS-2	9.3	66.9	0	1.89	47	0	833
KS-3	10	343.3	55	1.38	58	0	176
KS-4	3.9	2.1	0	1.09	133	0	381
KS-23	3.8	0	0	0.34	52	0	201

Tableau 4a. Répartition des éléments traces (en ppm) dans les sédiments, les intrusions et les coulées.

	Cs	Hf	Rb	Sc	Ta	Th	Zn
Sédiments							
22+48	0	1.45	6	6.51	0.33	1.8	35
40+41+42	0	1.07	7	13.9	0.11	0.8	151
2400/840	0	1.01	0	1.92	0.06	0.9	907
2400/834	0	0.21	0	0.91	0.06	0.2	85
2794/664	0.27	0.67	7	1.49	0.07	0.78	562
Intrusions							
2	0	0	0	0.06	0	5.9	28
3	0	0	0	0.02	0	2.9	12
4	0	0	7	0.09	0	0	1249
5	0	0	0	0.37	0	3.5	601
6	0.5	0	0	0	0	3.2	459
8	0.4	0	0	0.6	0	2.9	569
11	0	0	0	0.45	0	2.1	18
Coulées							
105	0	0	0	0.25	0	1.8	309
106	0	0	0	0.03	0	1.6	521
107	0	0	0	0	0	2.4	65
Sm-1	0	0	9	0	0	1.6	472
Sm-2	0	0	0	0.06	0	2.2	262
Ktw-1	0	0	0	0	0	2.4	10
Ktw-2	0	0	0	0	0	2.2	9
K-1	0	0	0	0.05	0	2.9	14
KS-2	0	0.42	0	2.69	0.06	1.5	298
KS-3	0	0	0	0.71	0	2.1	335
KS-4	0	0	0	1.09	0	1.8	30
KS-23	0	0	0	0	0	2.5	115

Tableau 4b. Répartition des éléments traces (en ppm) dans les sédiments, les intrusions et les coulées.

Diagramme araignée, éléments mineurs, normalisé selon les sédiments

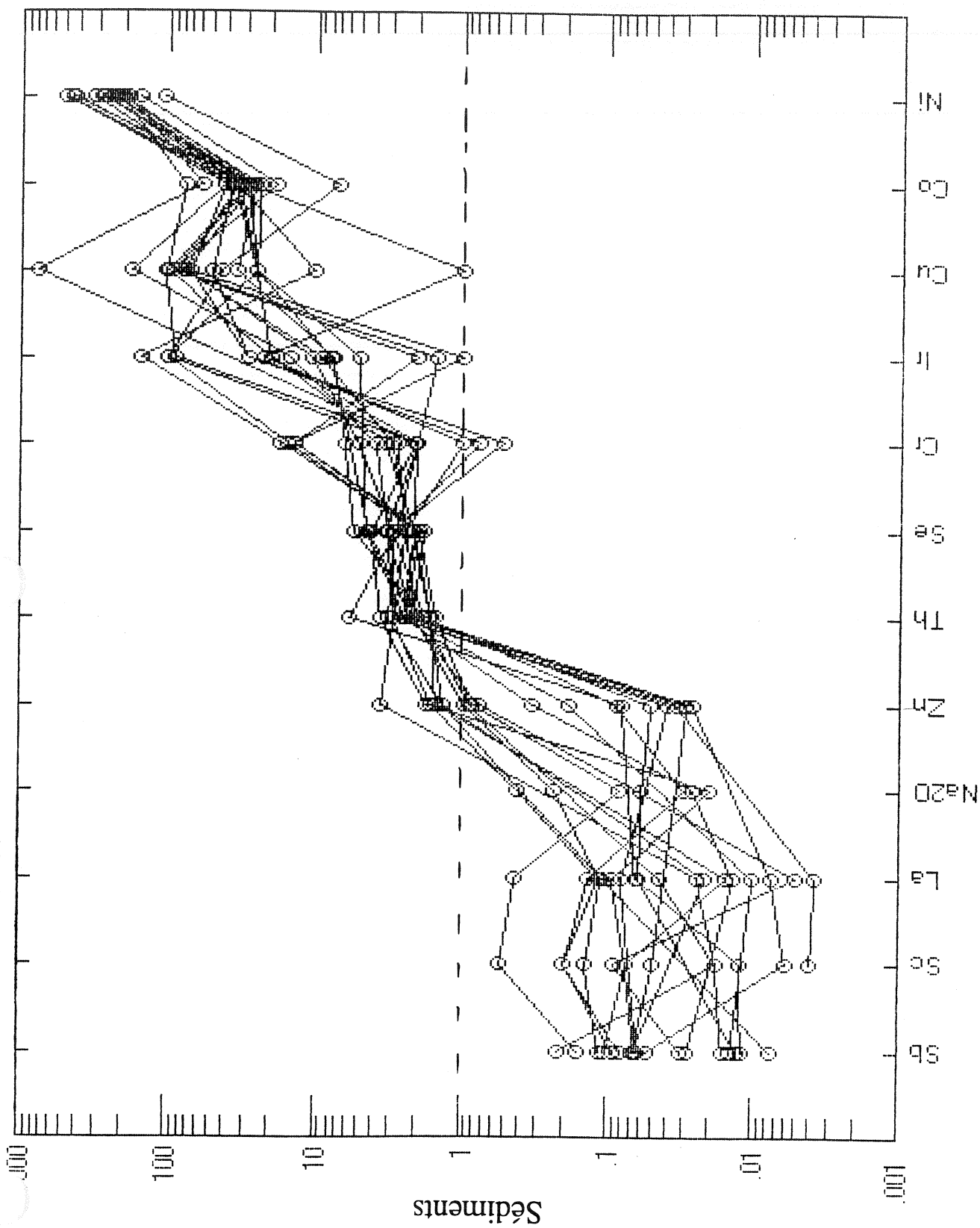


Figure 12. Diagramme araignée, éléments mineurs, normalisé selon les sédiments.

Éléments du groupe du platine (EGP):

Les éléments du groupe du platine sont retrouvés surtout dans les sulfures des intrusions et des coulées. La distribution n'est pas tout à fait la même dans ces deux types de roches (tableau 5).

Les sulfures compris dans les intrusions:

Pour ces sulfures, la répartition des EGP, par rapport au manteau primitif, est assez constante selon les divers échantillons (figure 13). Sur la figure 13, le champ typique des komatiites est obtenu en utilisant les valeurs moyennes pour des komatiites déjà connues. Le patron donné par les EGP cadre bien dans ce champ.

Une attention particulière doit être portée au cuivre. La concentration de ce dernier est beaucoup plus élevée dans les intrusions que dans une komatiite moyenne. Il semblerait que le matériel source, en terme d'éléments du groupe du platine, soit d'une composition similaire aux komatiites mais avec un enrichissement marqué en cuivre.

	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au
Sédiments							
22+48	0	0	2.2	0	14	5.1	25
40+41+42	0	0	0	0	0	0	93
2400/840	0	0	0	7.1	0	0	89
2400/834	0	0	2	0	0	0	38
2794/664	0	0	4	1.1	22	19	54
Intrusions							
2	245	120	279	1.4	213	299	49
3	75	50	84	0.5	20	4.9	3
4	40.9	199	47	3.4	209	149	21
5	34	0	45	1.1	134	56	429
6	72	52	100	0.4	135	153	4
8	61	36	58	1.1	101	142	485
11	69	40	67	2.5	442	497	16
Coulées							
105	26	29	47	1.6	167	88	61
106	63	1180	135	0.9	112	174	114
107	83	1250	170	1.5	494	675	82
Sm-1	17	0	20	1	211	118	591
Sm-2	42	0	78	0.8	1569	2353	103
Ktw-1	2	0	0	2.5	1445	1502	1570
Ktw-2	7	15	3	4.5	181	74	194
K-1	47	26	85	1.2	114	342	12
KS-2	1.17	0	3	0	13	17	23
KS-3	34	0	68	0	153	166	82
KS-4	16.3	0	36	0.9	110	137	49
KS-23	51	0	91	1.7	32	32	13

Tableau 5. Répartition des éléments du groupe du platine (en ppb) dans les sédiments, les intrusions et les coulées.

Distribution des EGP dans les intrusions

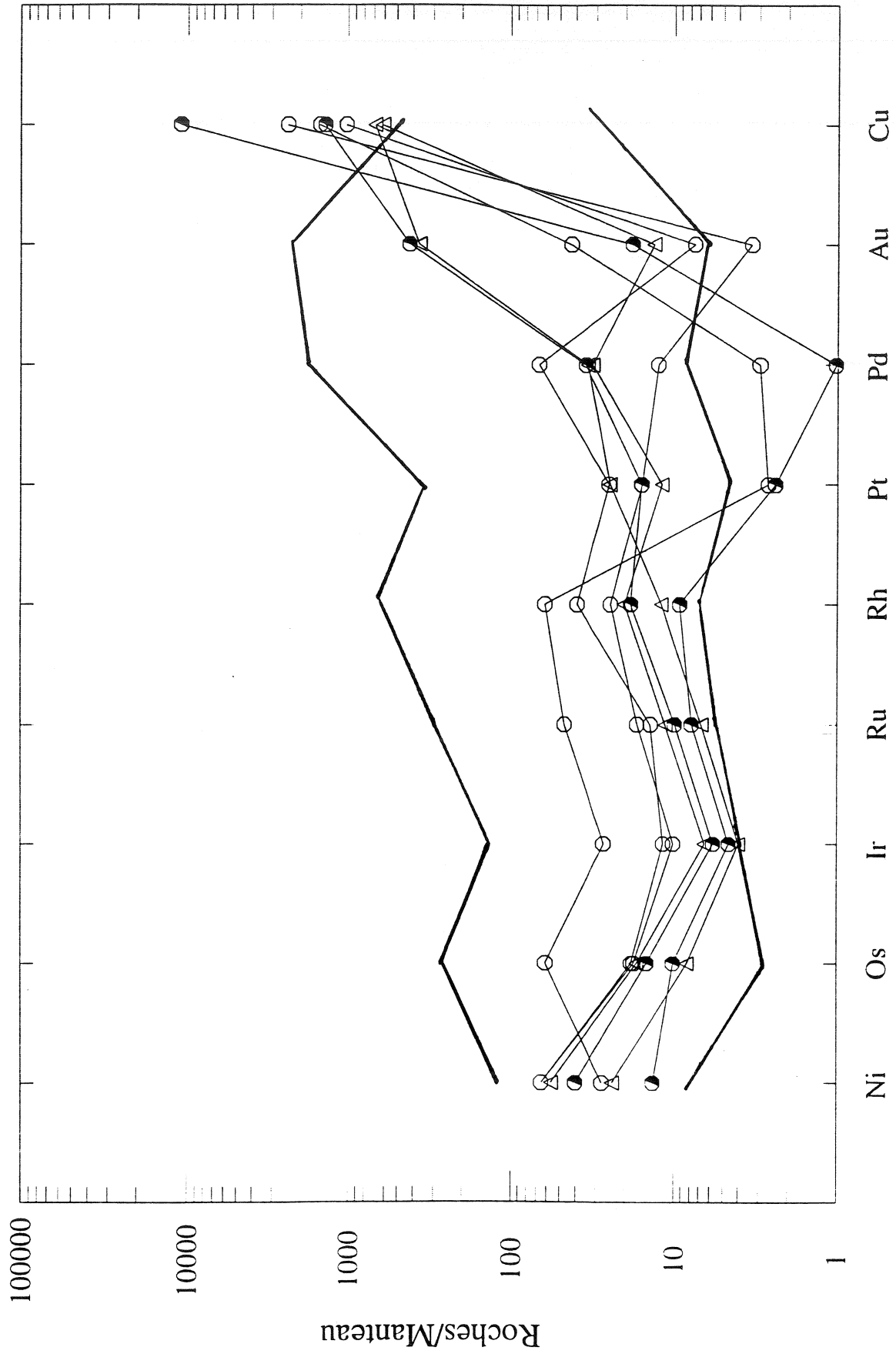


Figure 13. Diagramme araignée, pour les EGP des intrusions, normalisé selon le manteau primitif.

Les sulfures compris dans les coulées:

Pour les sulfures dans les coulées, la distribution des EGP, par rapport au manteau primitif, est cette fois-ci assez variable (figure 14). Il n'y a pas de patron constant comme dans le cas des intrusions.

La proportion d'EGP est toutefois sensiblement la même mais varie plus fortement à l'intérieur d'un même élément. Le patron des coulées ne cadre pas aussi bien avec le champ typique des komatiites car certains échantillons montrent plus de variabilité que dans le cas des intrusions.

Le cuivre est encore en grande proportion mais il est moins abondant que dans les intrusions. En effet, la comparaison entre les deux diagrammes montre que les intrusions contiennent environ dix fois plus de cuivre que les coulées.

Les sulfures compris dans les sédiments:

Pour les sédiments, la distribution est assez constante selon les divers échantillons (figure 15). Il y a appauvrissement, par rapport au manteau primitif, en éléments du groupe du platine dans les sédiments. Le cuivre est présent à un taux très faible.

Distribution des EGP dans les coulées

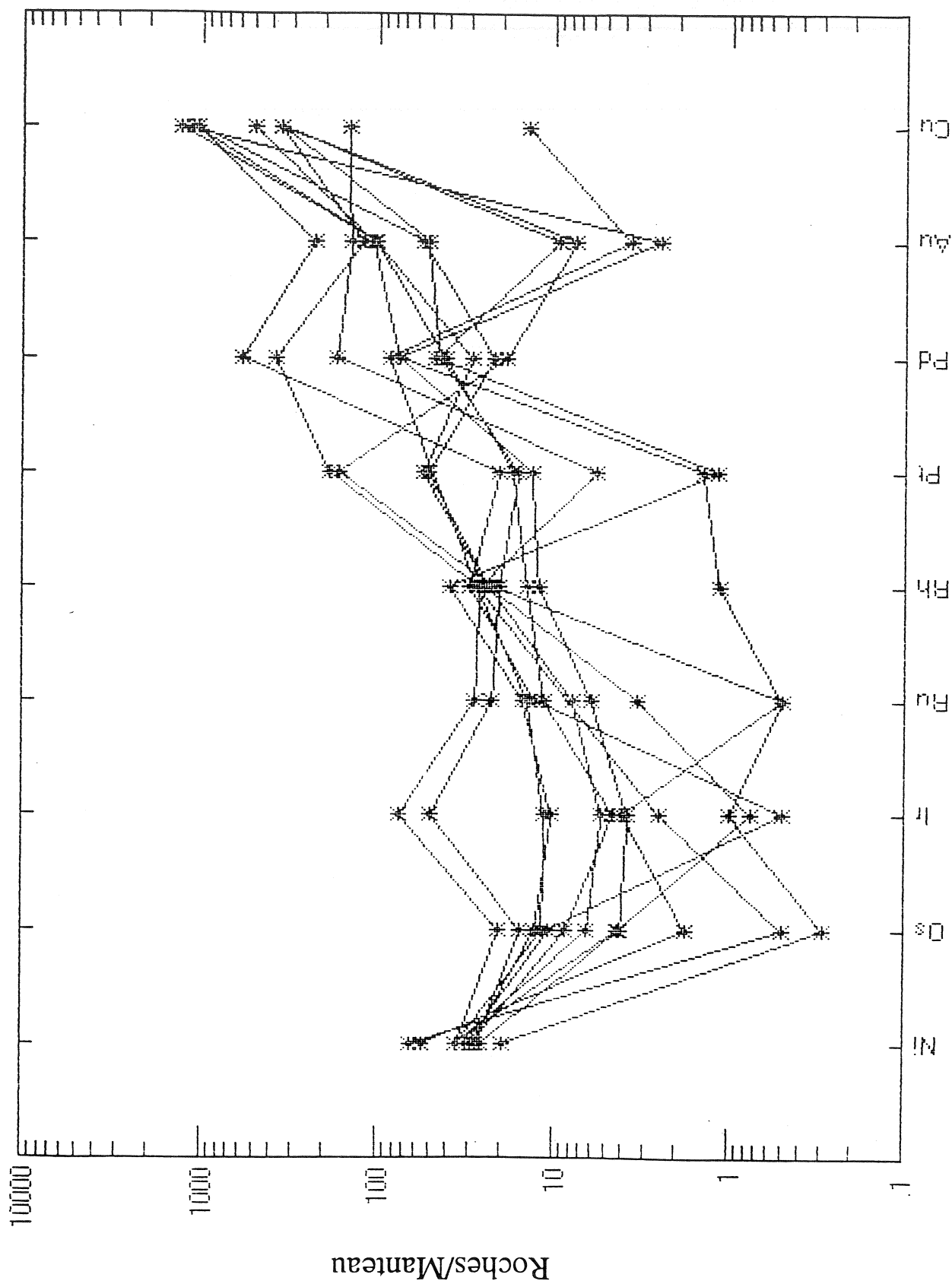


Figure 14. Diagramme araignée, pour les EGP des coulées, normalisé selon le manteau primitif.

Distribution des EGP dans les sédiments

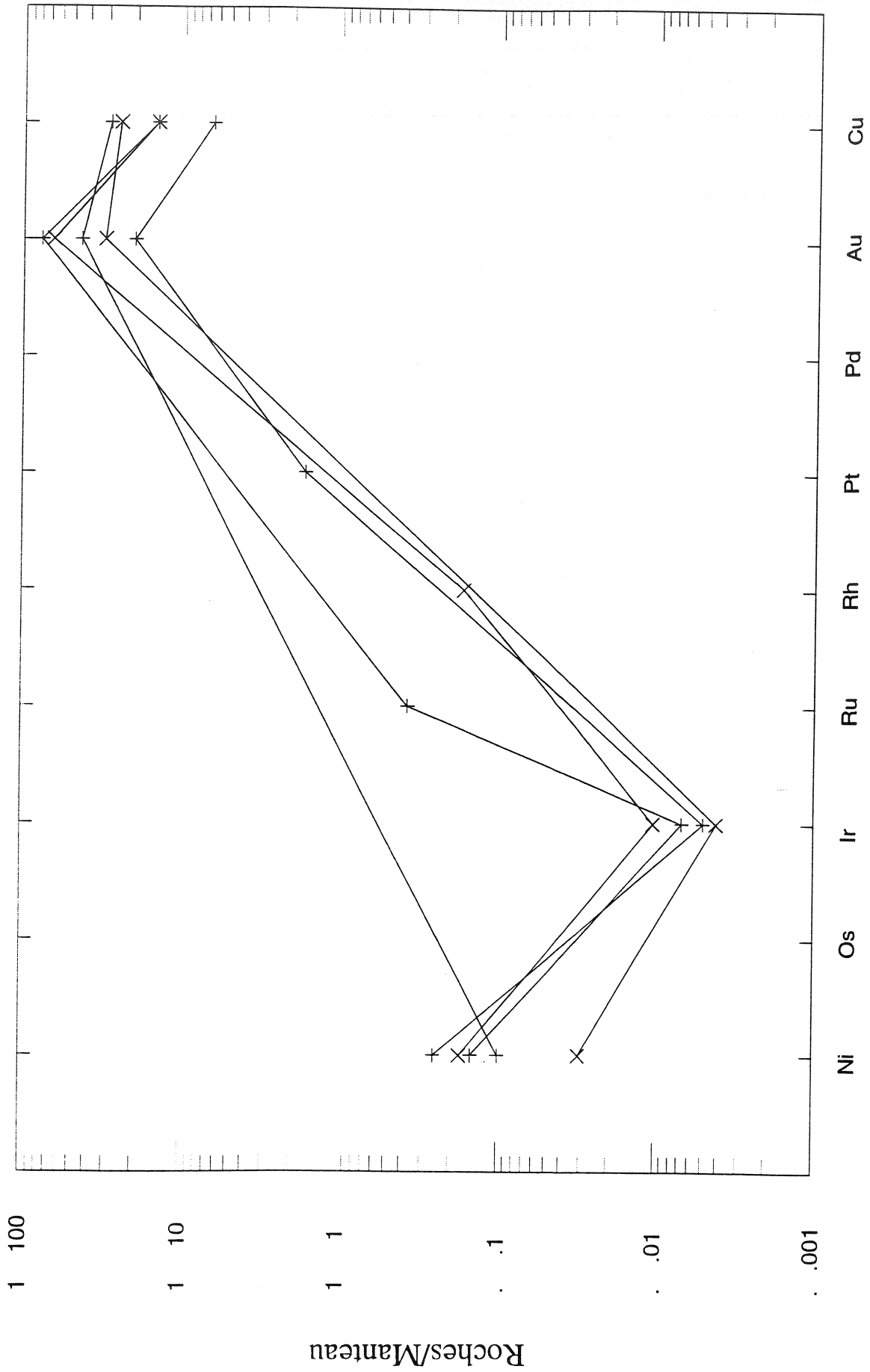


Figure 15. Diagramme araignée, pour les EGP des sédiments, normalisé selon le manteau primitif.

Diagramme Pd/Ir versus Ni/Cu

Une méthode d'interprétation du taux des EGP est l'utilisation des diagrammes Pd/Ir versus Ni/Cu et Ni/Pd versus Cu/Ir. Ces diagrammes montrent les champs spécifiques des différentes sources de dépôts des EGP.

Sur le graphique de la figure 16, seulement quelques échantillons sont dans le champ des basaltes riches en MgO. La plupart des points sont à gauche du champ des komatiites. Ceci peut être expliqué par le fait que la source étant très riche en cuivre, le rapport Ni/Cu est alors plus faible.

Diagramme Ni/Pd versus Cu/Ir

Le rapport Ni/Pd en fonction du Cu/Ir de la figure 17 représente les échantillons à droite du champ des komatiites. Encore cette fois-ci, le fort taux de cuivre en est responsable. Certains points sont au dessus des limites des komatiites. Un plus faible taux d'éléments du groupe du platine pourrait en être la cause.

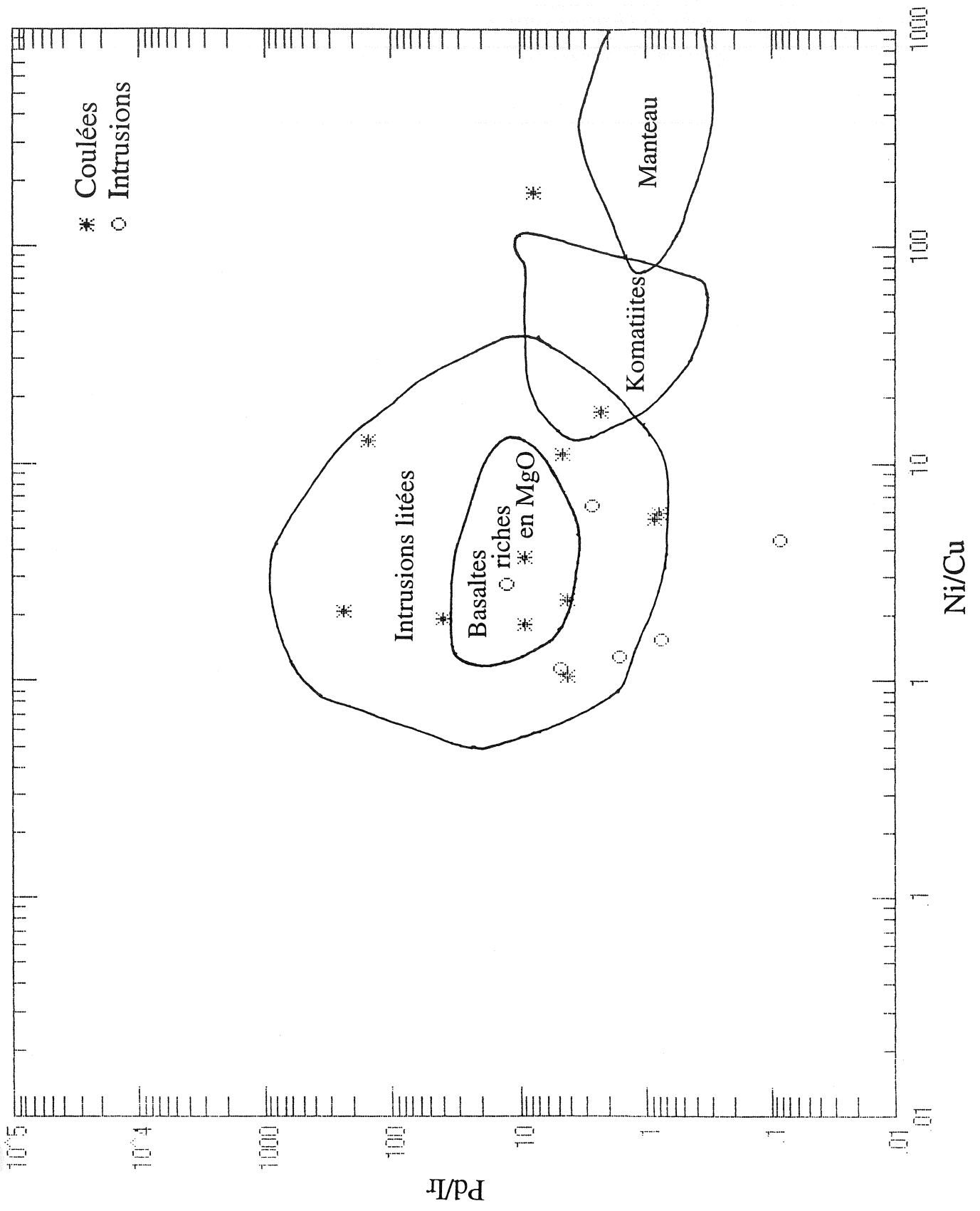


Figure 16. Rapport Pd/Ir en fonction du Ni/Cu

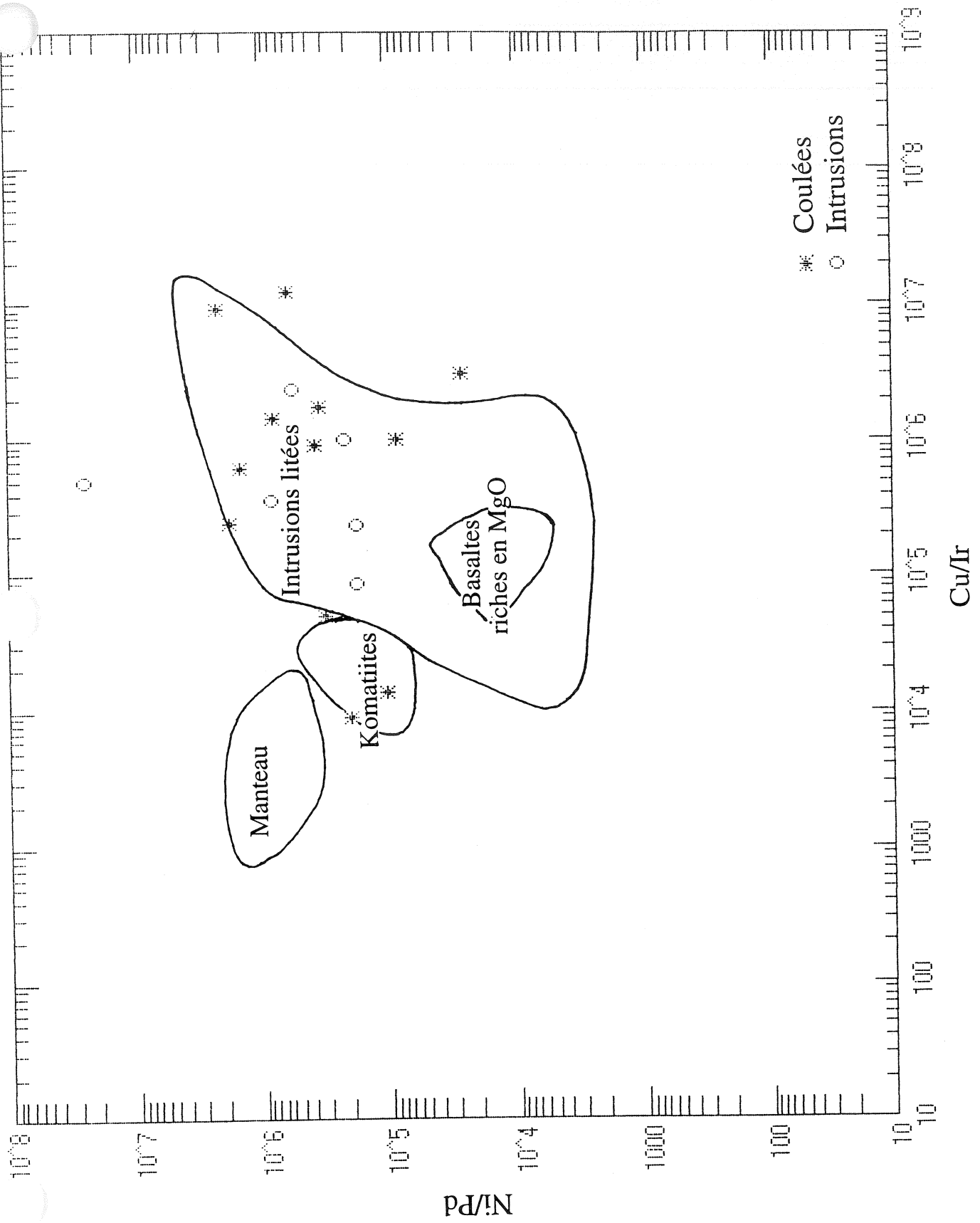


Figure 17. Rapport Ni/Pd en fonction du Cu/Ir

Rapport S/Se:

Le rapport S/Se est environ de 4 500 pour les sulfures des intrusions et des coulées. Ce ratio augmente à 15 000 pour ceux des sédiments. Ces chiffres indiquent que les sédiments sont très riches en soufre et pourraient donc en être la source pour les intrusions et les coulées. Le sélénium, dont la source est probablement mantellique, est très peu abondant dans les sédiments.

Le diagramme de la figure 16, représente le rapport S/Se en fonction du cobalt. Le champ dans lequel se situe le manteau en terme du rapport S/Se y est tracé. La plupart des sulfures compris dans les intrusions sont dans ce champ ou très près. Pour les coulées, le rapport S/Se est généralement un peu plus élevé que le champ typique du manteau. Ces informations pourraient suggérer que les intrusions et les coulées aient, en terme du rapport S/Se, un matériel source similaire au manteau.

Pour les sulfures dans les sédiments, le rapport S/Se est beaucoup trop élevé pour se situer dans le champ du manteau.

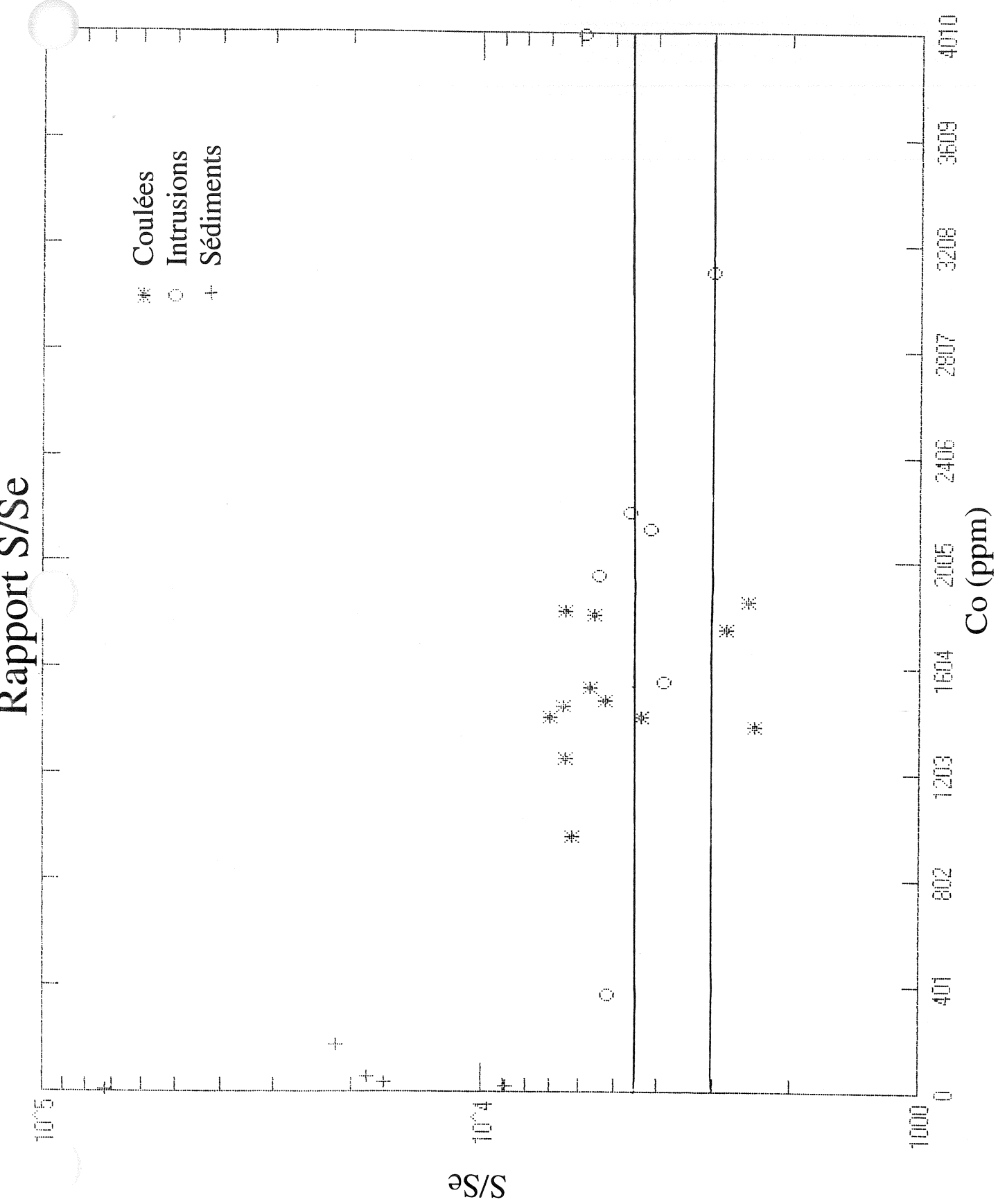


Figure 18. Rapport sélénium/soufre en fonction du cobalt

DISCUSSION

La composition du magma produisant les dépôts de nickel-cuivre dans les coulées et les intrusions est ultramafique. La source probable pour ce type de roche est mantellique. Cette affirmation est appuyée par le fait que la distribution des EGP est typique des komatiites et que le rapport S/Se est en majorité le même que celui du manteau.

Aussi, les données géochimiques montrent des concentrations d'éléments typiques d'une source mantellique sauf en ce qui concerne le cuivre. Pour ce dernier, le taux contenu dans les intrusions et les coulées est plus élevé que dans une komatiite moyenne.

Donc, pour les coulées et les intrusions, il semblerait que la source soit mantellique mais avec un enrichissement en cuivre marqué.

La comparaison entre les sulfures des sédiments et ceux des autres types de roches montre des différences énormes. Au point de vue de la composition, les sédiments sont riches en Sb, Sc, La, Na₂O et Zn par rapport aux coulées et aux intrusions. Ils sont par contre appauvris en Th, Se, Cr, Ir, Cu, Co et Ni. Les sédiments contiennent peu d'éléments du groupe du platine. Leur rapport S/Se est trois fois plus élevé que celui des intrusions et des coulées. Les sédiments sont ainsi beaucoup plus riches en soufre.

Au point de vue de la minéralogie des sulfures, les sédiments ne contiennent que de la pyrite tandis que les intrusions et les coulées montrent de la pyrhotite, pentlandite et chalcopyrite.

La comparaison entre les sulfures des intrusions et des coulées fait ressortir quelques différences. Tout d'abord, au point de vue pétrographique, les coulées et les intrusions n'ont pas du tout le même profil. Les intrusions sont beaucoup plus épaisses. Les types de roches sont différents. Par contre, pour les deux profils, les sulfures sont retrouvés à la base des coupes stratigraphiques. La composition est sensiblement la même dans les deux cas mais quelques éléments montrent des taux différents.

Les sulfures des intrusions sont plus riches en soufre que ceux des coulées. En supposant que les sédiments sont la source du soufre, les intrusions qui ont migré dans les failles à l'intérieur des sédiments sont plus fortement en contact avec ces derniers. Lors de la diffusion du soufre vers le magma, de plus grandes quantités de cet élément ont pu être transférées dans les intrusions qui refroidissent plus lentement que les coulées.

Cette différence de concentration de soufre pourrait aussi être expliquée par le fait que les coulées de ferropicrites peuvent être explosives. Lorsqu'il y a explosion, des quantités appréciables de H_2S peuvent être libérées, abaissant ainsi le taux de soufre à l'intérieur des coulées.

Le cuivre et le cobalt montrent des concentrations différentes selon le type de roche. En effet, pour les sulfures des intrusions, ces éléments sont plus

présents que pour les sulfures des coulées. La forte proportion de cuivre et de cobalt pour les intrusions est remplacée par un taux plus fort en fer chez les coulées.

La raison pour laquelle il y a plus de cuivre dans les intrusions que dans les coulées n'est pas connue. Le cuivre, qui est un élément très mobile, pourrait, comme le soufre, provenir des sédiments. Lorsque le magma chaud arrive en contact avec les sédiments, le cuivre serait diffusé vers le magma. Les intrusions, refroidissant plus lentement que les coulées, permettraient au cuivre d'être plus fortement diffusé. Ceci expliquerait le fait que les intrusions sont plus riches en cuivre que les coulées. Mais cette théorie ne peut être applicable car les sédiments contiennent très peu de cuivre (moins de 1%) et ne peuvent donc pas en être la source.

Ainsi, il semblerait que le fort taux de cuivre provient essentiellement de la source. La plume mantellique ayant formé les dépôts de nickel-cuivre serait vraisemblablement plus riche en cuivre que les plumes qui sont la source des komatiites moyennes.

CONCLUSION

Les résultats ont démontré de grandes différences entre les sulfures compris dans les sédiments et ceux dans les autres roches. Les sulfures des sédiments se sont avérés plus riches en Sb, Sc, La, Na₂O et Zn que les sulfures des coulées et des intrusions. Par contre, un appauvrissement en Th, Se, Cr, Ir, Cu, Co et Ni est remarqué dans les sédiments. Les éléments du groupe des platine sont aussi très peu présents dans les sulfures des sédiments. Le rapport S/Se est trois fois plus élevé chez les sulfures des sédiments que chez les sulfures des coulées et des intrusions. Le soufre est ainsi en plus grande quantité dans les sédiments. Au point de vue minéralogique, les sulfures des coulées et des intrusions sont principalement pyrrhotite, pentlandite et chalcopyrite. Le seul sulfure retrouvé dans les sédiments est la pyrite.

La comparaison entre les sulfures des coulées et ceux des intrusions montre aussi quelques différences. Les sulfures des intrusions sont plus riches en soufre en cuivre et en cobalt tandis que les sulfures des coulées sont plus riches en fer. Malgré ces différences, la composition de ces deux types de roches est assez semblable. Elle ressemble à une komatiite moyenne mais avec un enrichissement en cuivre marqué.

Le fait que les sédiments soient très riches en soufre suggère que ces derniers pourraient être la source pour les intrusions et les coulées. Cette

hypothèse est appuyée par le résultat de la courbe $\delta^{34}\text{S}$ qui donne un ratio d'environ 4.

Tout porte à croire que les sulfures des intrusions et des coulées proviennent donc d'une source mantellique riche en cuivre. Lors de la mise en place de ce matériel, il y aurait eu contamination avec les sédiments saturant ainsi le mélange et faisant précipiter les sulfures.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de mon projet.

Plus particulièrement, Sarah-Janes Barnes qui a su me guider, me conseiller et m'encourager tout le long de mon cheminement.

Merci aussi à Adam Nagy, Paul Bédard, Richard Lechasseur et Claude Dallaire de l'Université du Québec à Chicoutimi.

RÉFÉRENCES

Barnes, S.-J. 1990. The use of metal ratios in prospecting for platinum-group element deposits in mafic and ultramafic intrusions. *Journal of Geochemical Exploration*, **37**: 91-99.

Barnes, S.-J., et Francis, D. 1995. The Distribution of Platinum-Group Elements, Nickel, Copper, and Gold in the Muskox Layered Intrusion, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, **90**: 135-154.

Barnes, S.-J. et al. Factors Effecting the Composition of sulphides Associated with Intraplate Magmatism.

Barnes, S.-J., Picard, C., Giovenazzo, D., et Tremblay, C. 1992. The composition of nickel-copper sulphide deposits and their host rocks from the Cape Smith Fold Belt, Northern Quebec. *Australian Journal of Earth Sciences*, **39**: 335-347.

Bédard, L. P., et Barnes, S.-J. 1990. Manuel de l'utilisation de l'analyse par activation neutronique à l'UQAC. pp. 1-12.

Hanski, E. J. 1992. Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic, Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Geological Survey of Finland, Bulletin 367*, 196 p.

Lavoie, C. 1992. Evaluation du processus analytiques pour les éléments du groupe du platine et or dans les laboratoires géochimiques de l'UQAC. 50 p.

RÉFÉRENCES (suite)

Melezhik, V. A., Hudson-Edwards, P.K.Skuf'in et Nilsson, L.-P. 1994. Pechenga area, Russia-Part 1: geological setting and comparison with Pasvik, Norway. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.), **103**:B129-B144.

Melezhik, V. A., Hudson-Edwards, P.K.Skuf'in et Nilsson, L.-P. 1994. Pechenga area, Russia-Part 2: nickel-copper deposits and related rocks. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.), **103**: B129-B144.

Walker, R. J., Morgan, J.W., Hanski, E., et Smolkin, V.F. The Role of the Re-Os Isotope System in Deciphering the Origin of Magmatic Sulphide Ores: A Tale of Three Ores. Sudbury-Noril'sk; OGS Special Volume **5**: 343-355.