

CARACTÉRISATION DES ÉGP DU MERENSKY REEF :
MINE DE PLATINE IMPALA, AFRIQUE DU SUD.

par

Valérie Bécu

Mémoire présenté dans le cadre du cours

Projet de fin d'études

(6SCT00604)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
RÉSUMÉ	1
1.0 – INTRODUCTION	2
2.0 – MÉTHODOLOGIE	4
3.0 - GÉOLOGIE RÉGIONALE	6
4.0 - GÉOLOGIE LOCALE	7
4.1 – Mine	7
4.2 - Domaine d'étude	8
5.0 - ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE	10
6.0 – GÉOCHIMIE	24
6.1 - Concentration des ÉPG, Au, Cu, Ni, S et Cr en fonction des lithologies	24
6.1.1 – <i>Concentration des ÉGP en fonction des lithologies</i>	24
6.1.2 – <i>Concentration de Au, Cu, Ni et S en fonction des lithologies</i>	27
6.1.3 – <i>Concentration du Cr en fonction des lithologies</i>	27
6.2 - Corrélation des ÉPG, Au, Cu, Ni, Cr avec le S	30
6.2.1 – <i>Corrélation des ÉGP avec le S</i>	30
6.2.2 – <i>Corrélation de Au, Cu, Ni avec le S</i>	32
6.2.3 – <i>Corrélation du Cr avec le S</i>	36
6.3 - Corrélation des ÉPG, Au, Cu, Ni avec le Cr	36
6.3.1 – <i>Corrélation des ÉGP avec le Cr</i>	36
6.3.2 – <i>Corrélation de Au, Cu, Ni avec le Cr</i>	41
7.0 – DISCUSSION	43
8.0 – CONCLUSION	48
REMERCIEMENTS	49
RÉFÉRENCES	50
ANNEXE	52

LISTE DES FIGURES

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Fig. 1 – Géologie générale du lobe ouest du Complexe du Bushveld.	3
Fig. 2 – Colonne stratigraphique représentative du domaine d'étude.	9
Fig. 3 – Classification des échantillons.	10
Fig. 4 – Concentrations des PPGE et IPGE en fonction des lithologies.	26
Fig. 5 – Concentrations de Au, Cu, Ni, S et Cr en fonctions des lithologies.	28
Fig. 6 – Comparaison entre les concentrations de Pt, S et Cr en fonction des lithologies.	29
Fig. 7 – Graphique de S vs Pt	31
Fig. 8 – Graphiques de S vs Pd et Rh.	33
Fig. 9 – Graphique de S vs Os, Ir et Ru.	34
Fig. 10 – Graphiques de S vs Au, Cu, Ni et Cr.	35
Fig. 11 – Graphique de Cr vs Pt.	37
Fig. 12 – Graphiques de Cr vs Pd et Rh.	39
Fig. 13 – Graphique de Cr vs Os, Ir et Ru.	40
Fig. 14 – Graphiques de Cr vs Au, Cu, Ni.	42
Fig. 15 – Diagramme schématisé représentant un mécanisme d'intrusion de type « fontaine ».	44
Fig. 16 – Diagramme schématisé du comportement des amas d'ÉGP dans un système magmatique.	45

LISTE DES TABLEAUX

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Tableau 1 – Concentration en métaux des différentes lithologies du Merensky.	5
Tableau 2 – Subdivision du Complexe du Bushveld.	7

LISTE DES PLANCHES

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Planche 1 – Texture sub-ophitique d'un échantillon de leucogabbronorite.	14
Planche 2 – Même photo entre polariseurs croisés.	14
Planche 3 – Portion quasi-anorthositique de l'échantillon de leuconorite au contact de la chromitite.	14
Planche 4 – Même photo entre polariseurs croisés.	14
Planche 5 – Aspect général des lits de chromitite.	16
Planche 6 – Même photo entre polariseurs croisés.	16
Planche 7 – Sulfures interstitiels aux grains de chromite.	16
Planche 8 – Minéraux fortement réfléchissants, MGP.	16
Planche 9 – Gros grains d'OPX et de plagioclase dans l'échantillon de norite.	19
Planche 10 – Même photo entre polariseurs croisés.	19
Planche 11 – Grains de chromite et sulfures (pyrrhotite et chalcopyrite) retrouvés à l'intérieur des OPX de la norite.	19
Planche 12 – Texture ophitique locale dans un échantillon de mélagabbronorite.	22
Planche 13 – Même photo entre polariseurs croisés.	22
Planche 14 – Texture poecilitique dans un échantillon de gabbronorite.	22
Planche 15 – Même photo entre polariseurs croisés.	22

RÉSUMÉ

Le Complexe du Bushveld est une intrusion litée d'âge Paléoproterozoïque qui est l'hôte d'une grande partie des réserves mondiales d'éléments du groupe du platine. Ce complexe a une dimension approximative de 450 km en direction est-ouest et de 300 km en direction nord-sud. Il a une géométrie lobée qui est géographiquement séparée en quatre sections soit les lobes extrême ouest, ouest, est et de Potgietersrus. Le centre des activités minières de la mine de platine Impala se situe dans le lobe ouest, au cœur de la suite litée de Rustenburg qui comprend une succession de roches ultramafiques à mafiques.

Le Merensky Reef, exploité pour sa grande richesse en ÉGP, se retrouve dans la partie supérieure de la « Critical Zone » de la suite de Rustenburg. L'épaisseur de cet horizon minéralisé varie d'une échelle métrique à centimétrique. La section de carotte de forage étudiée (2m de longueur) montre deux lits de chromitite, le premier reposant sur une unité de leuconorite et le second, sur une unité de norite. La concentration en ÉGP est très élevée au voisinage, et extrême, dans les lits de chromitite même si ceux-ci sont très minces (respectivement 3 et 1,6cm). Par ailleurs, les concentrations en Au, Cu, Ni et S ne suivent pas la même tendance que les ÉGP. Elles sont plus élevées dans les unités de leucogabbronorite et de mélagabbronorite et diminuent dans les lits de chromitite.

Des graphiques de corrélations de la concentration des ÉGP versus les concentrations de S et Cr dénotent deux populations d'échantillons soit ceux dont la concentration en ÉGP semble être contrôlée par la concentration de S et ceux dont les ÉGP varient en fonction du taux de Cr. Ce dernier groupe est principalement constitué d'échantillons de chromitite et d'échantillons bordant celle-ci.

Ces observations indiquent qu'il existerait une relation étroite entre la précipitation de la chromite et l'enrichissement en ÉGP des horizons de chromitite.

1.0 – INTRODUCTION

Le Complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, est sans aucun doute l'un des plus vaste et de loin le plus riche réservoir d'ÉGP au monde (Guilbert et Park 1986). Cette minéralisation se concentre dans la suite litée de Rustenburg qui comprend une succession de roches ultramafiques à mafiques (Impala 1998). Le Merensky Reef est l'un des horizons platinifères les plus exploités de la « Critical Zone ». Les mines de platine Impala Platinum Ltd. sont le second plus grand producteur de platine du monde occidental. Le centre de leurs activités minières est situé dans le lobe ouest du Complexe du Bushveld de 5 à 30km au nord de la ville de Rustenburg (Figure1).

La présente étude porte sur une section de carotte de forage de 2m qui intercepte le Merensky Reef au sein des mines Impala Platinum Ltd. Elle a pour objectif de caractériser les ÉGP dans les différentes lithologies rencontrées et de considérer l'origine du Reef. Généralement, il est accepté que seulement deux liquides primitifs parents étaient impliqués dans la genèse des intrusions litées à travers le monde: un d'affinité ultramafique et l'autre d'affinité anorthositique (Sharpe 1985). Toutefois, de nombreuses spéculations quant au mécanisme gérant la ségrégation des ÉGP dans l'intrusion litée du Bushveld existent. L'adhésion à l'un de quatre modèles de ségrégation soit celui du mélange magmatique (Kuger et al. 1998), des amas d'ÉGP dans le magma (Tredoux et al. 1995), de la concentration des ÉGP à un front de réaction (Boudreau 1998) ou du fractionnement d'une solution solide monosulfurée (mss) par un fondu felsique (Maier et Barnes 1998) sera discutée.

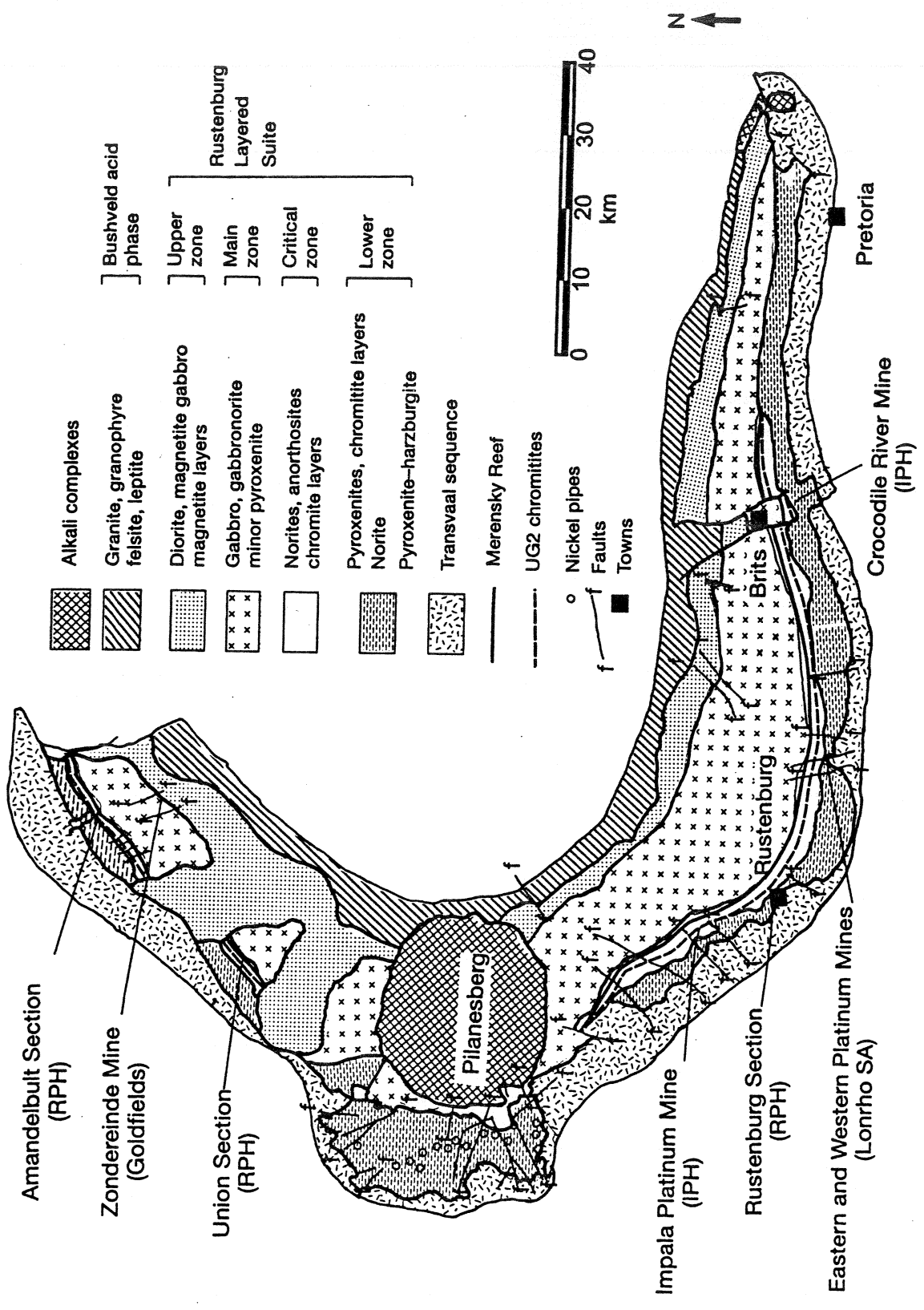


Figure 1. Géologie générale du lobe ouest du Complexe du Bushveld.
(tirée de Vermaak 1995)

Pour ce faire, des descriptions pétrographiques et minéralogiques ainsi que des analyses en contenus d'ÉGP, Au, Cu, Ni, S et Cr ont été réalisées sur une trentaine d'échantillons de leucogabbroïte, leuconorite, norite, chromite, mélagabbroïte et de gabbroïte couvrant la section étudiée.

2.0 – MÉTHODOLOGIE

Les échantillons ont été prélevés à chaque changement de lithologie et à chaque 5cm lorsque la lithologie demeurait la même. L'étude pétrographique et minéralogique a été réalisée au moyen d'un peu moins d'une vingtaine de lames-minces polies.

Les échantillons ont été concassés à une granulométrie de 1cm dans un « steel jaw crusher » et ont ensuite été broyés dans un « shatter-box » d'alumine. Les ÉGP ont été déterminés par INAA après avoir été préalablement traité par un processus de fusion utilisant un lit de Ni-S. La précision analytique varie de 10 à 25% selon la concentration et l'élément (Lavoie 1992). Un « blanc » de quartz soumis à cette procédure contient des concentrations en ÉGP sous la limite de détection et de 0,1 à 0,5ppb d'or. Le S et le Ni ont été déterminés à l'Université McGill par les méthodes respectives de titration LECO et de fluorescence de rayons X (XRF). Les limites de détection de ces analyses étaient de 10,010ppm pour le S et de 3ppm pour le Ni. Le Cu a été déterminé par activation atomique (AA) à l'UQAC dont la limite de détection étaient de 10ppm. Le Cr a été déterminé par INAA à l'UQAC selon la méthode décrite par Bédard et Barnes (1990). Des résultats pour le standard international AX-90 sont indiqués au tableau 1.

Tableau 1. Concentrations en métaux des différentes lithologies du Merensky Reef.

No. d'échantillon	Localisation	Profondeur (m)	Type de roche	S (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Os (ppb)	Ir (ppb)	Ru (ppb)	Rh (ppb)	Pt (ppb)	Pd (ppb)	Au (ppb)
1	Impala	1027,02	gabbronorite	1600	303	905	1916	<0,9	1,08	<5	2,7	62	21	50,9
3	Impala	1027,12	gabbronorite	1900	359	1105	2259	<1	1,07	8	<1	88	20	75,11
5	Impala	1027,23	gabbronorite	2600	437	1354	2311	1,6	1,5	<10	2	73	17	93,7
7	Impala	1027,32	gabbronorite	4500	793	2300	2404	2,5	3,86	27	4,6	169	42	235,6
9	Impala	1027,42	mélagabbbronorite	7300	941	2736	2552	4	5,52	18	7	213	44	266,4
11	Impala	1027,55	mélagabbbronorite	4600	649	1858	2390	4,6	5,3	35	11,2	144	30	164,9
13	Impala	1027,68	mélagabbbronorite	700	164	789	2414	2,9	2,11	9	3,8	50	8	22,78
15	Impala	1027,78	mélagabbbronorite	900	208	875	2425	<1	2,03	11	2,9	56	27	34,71
17	Impala	1027,88	mélagabbbronorite	700	169	765	2546	1,4	2,81	17	6,1	84,6	53	36
18	Impala	1027,95	mélagabbbronorite	1400	315	834	2429	4,7	4,65	27	14,8	136	147	44,25
19	Impala	1028	mélagabbbronorite	4700	1412	2468	2819	23	27,5	144	68,3	1062	1381	366
20	Impala	1028,05	mélagabbbronorite	12100	2231	4758	2546	54	40,5	160	89,4	7273	3064	1676
21	Impala	1028,1	mélagabbbronorite	20500	2452	7143	6080	390	403,7	2034	682	26529	6330	2000
22	Impala	1028,135	chromitite	3400	1251	2130	76365	413	543,5	2708	1141	22827	2056	299,9
23	Impala	1028,16	norite	6000	936	3060	20107	359	467,9	2334	830	19160	2807	1787
24	Impala	1028,2	chromitite	4100	887	10000	172381	1137	1693	8356	2665	49803	4173	494
25	Impala	1028,25	leuconorite	4100	691	1411	310	97	111,8	600	286	5126	3025	382
26	Impala	1028,28	leucogabbbronorite	18300	2442	6448	916	489	525	2710	770	29461	9925	3685,7
27	Impala	1028,32	leucogabbbronorite	4500	836	2117	905	105	124,4	704	263	5660	3699	754
28	Impala	1028,4	leucogabbbronorite	9700	1318	3680	851	166	189,6	1051	394	9501	3032	1153
30	Impala	1028,53	leucogabbbronorite	400	105	298	936	<1	2,38	<10	6,4	101	52	21,39
32	Impala	1028,68	leucogabbbronorite	196	69	223	906	0,9	0,42	<8	1,9	43	<14	1,64
34	Impala	1028,81	leucogabbbronorite	173	46	205	943	<0,6	0,37	<10	1,2	<4	<10	1,61
36	Impala	1028,88	leucogabbbronorite	178	46	203	852	<1	0,57	7	1,1	32	<10	1,45
ax90-1	déterminé			31 920	1203	6923		2,4	3,3	18,7	13,9	142	399	4,54
ax90-2	déterminé			35320	2063	6923		2,8	2,8	15,5	11,3	124	331	4,72
ax90	valeurs acceptées			35200	830	7154		2,7	3,10	19	11,80	134	328	4,5

3.0 - GÉOLOGIE RÉGIONALE

Le Complexe du Bushveld est une intrusion litée qui s'est mis en place dans les sédiments du Super Groupe du Transvaal à l'âge paléoproterozoïque (~2060 Ma) (Walraven et al. 1990). La dimension approximative du complexe est de 450km en direction est-ouest et de 300 km en direction nord-sud (Impala 1998). Il a une géométrie quadrilobée et la partie orientale est plus large que la portion occidentale. Le Complexe est considéré comme étant intrusif avec des unités plus anciennes de roches métavolcaniques et métasédimentaires, groupe de Rooiberg et granophyres associés, au-dessus, et des métasédiments du Super Groupe du Transvaal qui servent de socle à l'intrusion (Guilbert et Park, 1986). Deux périodes intrusives sont à l'origine du complexe soit une suite litée mafique-ultramafique en bordure et une seconde, plus récente qui est constituée de granites et granophyres au centre (Guilbert et Park, 1986).

La suite litée mafique-ultramafique est nommée suite litée de Rustenburg. Cette suite comprend quatre subdivisions principales soit la « Lower Zone » dont la composition varie de bronzitite à harzburgite, la « Critical Zone » renfermant les principaux horizons de chromitites minéralisées (LG, MG, UG-1, UG-2, Merensky Reef, Bastard Reef) dans des unités alternées de pyroxénites et norite-anorthosite, la « Main Zone » constituée de norite-anorthosite et de gabbronorite, ainsi que la « Upper Zone » qui est une alternance entre des unités de gabbronorite, de gabbro et de diorite à olivine (Impala 1998). Une corrélation entre les subdivisions formelle et informelle du Complexe du Bushveld est donnée au tableau 2.

Tableau 2. Subdivision du Complexe du Bushveld.
(modifié de Vermaak et Von Gruenewaldt, 1986)

Subdivision Formelle			Subdivision Informelle
Complexe du Bushveld	Suite granitique Lebowa	Granite Makhutso	Granite du Bushveld
		Granite Nebo	
	Suite granophyre Rashoop	Granophyre Stavoren	Granophyre du Bushveld
Suite litée Rustenburg	Gabbro Magnétite Bierkraal Gabbro-Norite Pyramid	Upper Zone Main Zone	
	Norite-Anorthosite Mathlagame Pyroxenite Ruighoek	Critical Zone	
Suite litée Rustenburg	Bronzitite Tweelaagte Harzburgite Groenfontein Harzburgite Makgope Bronzitite Eerlyk Norite Kroondal	Lower Zone	
	Norite Kolobeng	Marginal Zone	
Séquence du Transvaal	Groupe felsite Rooiberg	Formation Selonsrivier Formation Damwal	Felsite Rooiberg

4.0 - GÉOLOGIE LOCALE

4.1 - Mine

La mine Impala Platinum Ltd. est située dans la partie sud-ouest du lobe ouest du Complexe du Bushveld au cœur de la suite litée de Rustenburg (Leeb-du Toit 1986). Les principaux horizons minés sont le Merensky Reef et le UG-2 Chromitite Layer. Ces deux horizons sont situés dans la partie supérieure du « Critical Zone » du complexe dans l'unité noritique-anorthositique de Mathlagame.

L'unité Merensky est l'unité la plus régulière et cyclique de la « Critical Zone » (Leeb-du Toit 1986). Son épaisseur à la mine varie de 10 à 13m et différentes lithologies y sont reconnues telles un pegmatoïde basal, surmontée d'une pyroxénite qui varie stratigraphiquement vers un horizon fin de norite, une « spotted anorthosite » et une « mottled anorthosite ».

Le terme Merensky Reef fait référence à la partie de l'unité Merensky qui est économiquement exploitable. Ainsi, deux types de Reef sont reconnus; un « Pyroxenite Reef » qui a pour base un horizon de chromitite, dont l'épaisseur peut atteindre 3cm et un « Pegmatoïd Reef » qui possède une unité pegmatoïde sous l'unité basale de chromitite et où un second horizon de chromitite peut être présent au contact avec les unités du mur (Impala 1998).

4.2 - Domaine d'étude

Le domaine d'étude est une section de carotte de forage qui intercepte le Merensky Reef de type pegmatoïde à une profondeur de 1029 à 1027m. L'empilement stratigraphique (Figure 2) est constitué à la base d'une leucogabbronorite, suivi de la portion Reef qui se compose de deux lits de chromitite, le premier reposant sur une unité de leuconorite et le second, sur une unité de norite. Les unités qui reposent sur la portion de Reef sont une mélagabbronorite et une gabbronorite. Au niveau de la mine, les unités de leucogabbronorite, de norite et de mélagabbronorite sont respectivement identifiées comme anorthosite, pegmatoïde et pyroxénite.

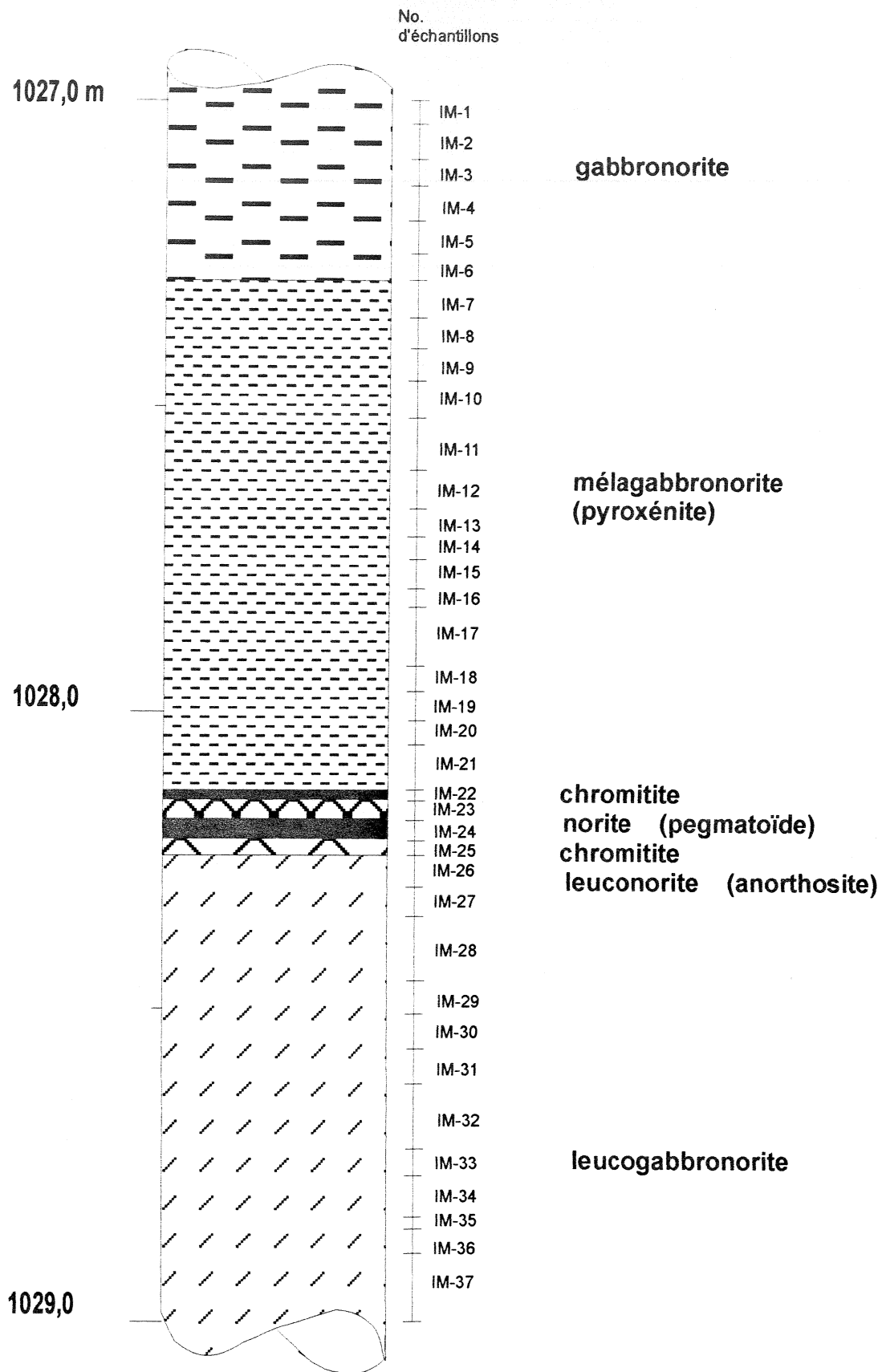


Figure 2. Colonne stratigraphique représentative du domaine d'étude
Les parenthèses indiquent la terminologie employée à la mine.

5.0 - ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

La description pétrographique s'est effectuée à l'aide d'un peu moins d'une vingtaine de lames-minces polies faites à partir d'échantillons représentatifs de la section de carotte forage sous étude. Les descriptions complètes d'échantillons types de chaque unité ainsi que des tableaux de compositions minéralogiques sont présentés à l'annexe. Une classification des échantillons selon leurs proportions de plagioclases, orthopyroxènes et clinopyroxènes est présentée à la figure 3.

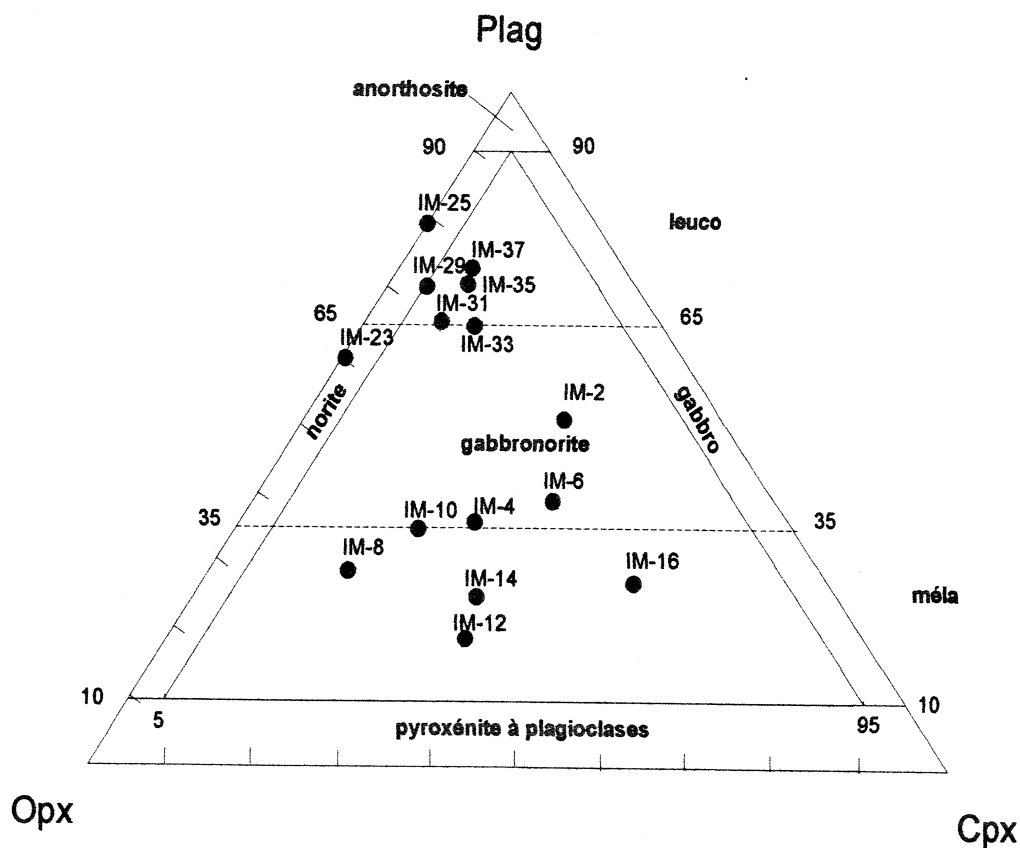


Figure 3. Classification des échantillons selon leurs proportions en plagioclases (Plag), orthopyroxènes (Opx) et clinopyroxènes (Cpx) (d'après Streckeisen 1976, Fig. 3).

L'unité de leucogabbronorite constitue la partie basale de la section de carotte de forage à l'étude soit de 1029 à 1028,3m. La composition minéralogique observée est essentiellement constituée d'orthopyroxènes et des clinopyroxènes dans des proportions moyennes respectives de 20 et 8% et des plagioclases (An_{60}) à 68%. De la biotite et de la pinite sont aperçues en proportions $\leq 3\%$ tandis les minéraux opaques ne comptent que pour 1%. Les orthopyroxènes sont de forme hypidiomorphe, de taille variant de 1 à 4mm et les grains sont généralement fracturés. Les clinopyroxènes ont une taille qui varie de 0,1 à 4mm et sont souvent présents sous forme d'inclusion dans les orthopyroxènes. Les minéraux de biotite et de pinite sont de taille approximative de 0,2mm et généralement de formes hypidiomorphes. Les minéraux opaques sont des sulfures, présents dans un rapport respectif de 2 : 1 : 1, de chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite. La taille des sulfures est environ 0,1mm et ils sont interstitiels et dans les fractures des orthopyroxènes. La texture générale est sub-ophitique (Planches 1 et 2). Une altération serpentineuse, qui se loge dans les fractures des orthopyroxènes, affectant environ 5% de la lame-mince.

L'horizon de leuconorite, qui fait 3,0cm d'épaisseur, est minéralogiquement composé d'orthopyroxènes à 20%, de plagioclases ($An_{\approx 60}$) à 76% et de minéraux opaques, sulfures, à 4%. De la biotite et de la pinite sont vues en traces. Les orthopyroxènes sont hypidiomorphes, de taille 0,5 à 8mm et fracturés tandis que les plagioclases, eux aussi hypidiomorphes mais de taille plus petite, sont de 0,2 à 3,5mm. Les minéraux opaques, en l'occurrence chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite sont dans un rapport 1 : 1 : 2 et

leurs tailles varient de 0,2 à 3mm et sont interstitiels entre les grains ou situés dans les fractures des orthopyroxènes. Une altération serpentineuse affecte la majorité des pyroxènes et il y a une veinule de chlorite-micas blanc qui recoupe l'échantillon. À l'approche du contact avec le lit de chromitite la composition varie pour être essentiellement formée de plagioclases hypidiomorphes avec une proportion moins élevée de sulfures (Planches 3 et 4). La texture globale est sub-ophitique.

Le premier lit de chromitite rencontré dans la stratigraphie se situe à 1028,2m de profondeur et a une épaisseur de 3cm. L'assemblage minéralogique retrouvé est composé de 20% d'orthopyroxènes, de 40% de plagioclases et de 40% de minéraux opaques qui se répartissent en 95% de chromite et 5% de sulfures. La taille des orthopyroxènes varie entre 5 et 15mm et les grains sont de forme hypidiomorphe et fracturés. Les plagioclases sont présents sous forme de gros grains, de 2 à 12mm, et forment une texture poecilitique avec les grains de chromite (Planches 5 et 6). Il a été impossible d'en déterminer la calcicité. Les grains de chromite sont hypidiomorphes, quasi-idiomorphes, de taille 0,2 à 3mm, fracturés et contiennent des inclusions de sphalérite ($\approx 0,05$ mm) et de sulfures. Les sulfures présents sont la chalcopryrite, la pyrrhotite et la pentlandite dont les tailles varient de 0,3 à 0,7mm. Des minéraux fortement réfléchissants, de la taille de quelques microns et de forme cubique, est aperçu en inclusion dans les plus gros sulfures (Planches 7 et 8).

Planche 1 – Texture générale sub-ophitique des plagioclases dans un CPX dans un échantillon de leucogabbronorite (IM-31). Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 7mm.

Planche 2 – Même photo entre polariseurs croisés.

Planche 3 – Portion quasi-anorthositique de l'échantillon de leuconorite (IM-25) au contact de la chromitite (Cr). Texture sub-ophitique. Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 15mm.

Planche 4 – Même photo entre polariseurs croisés.

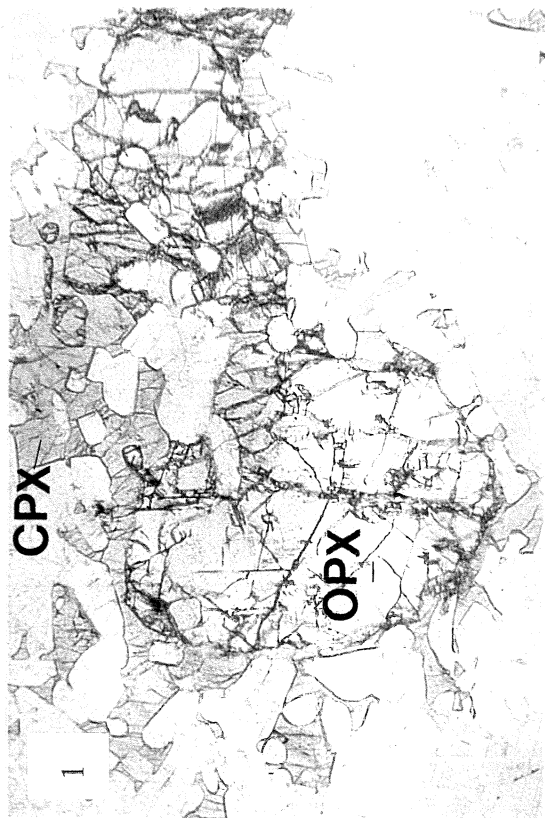
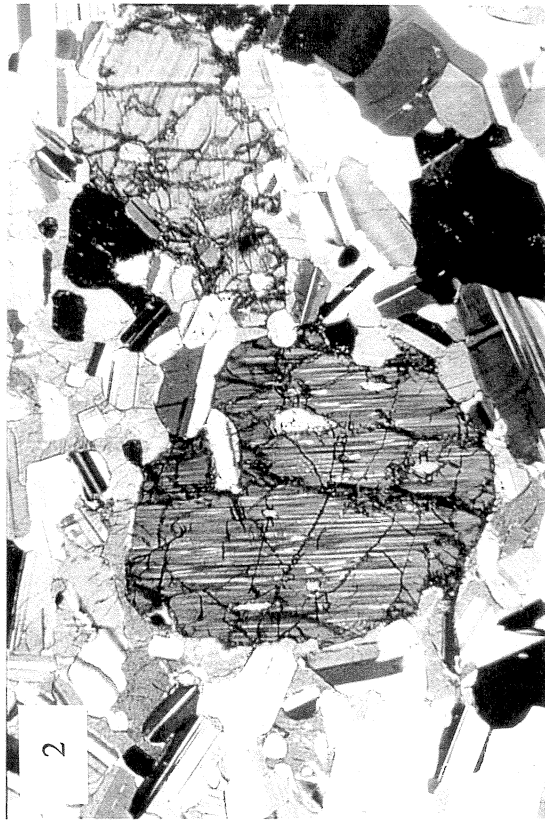
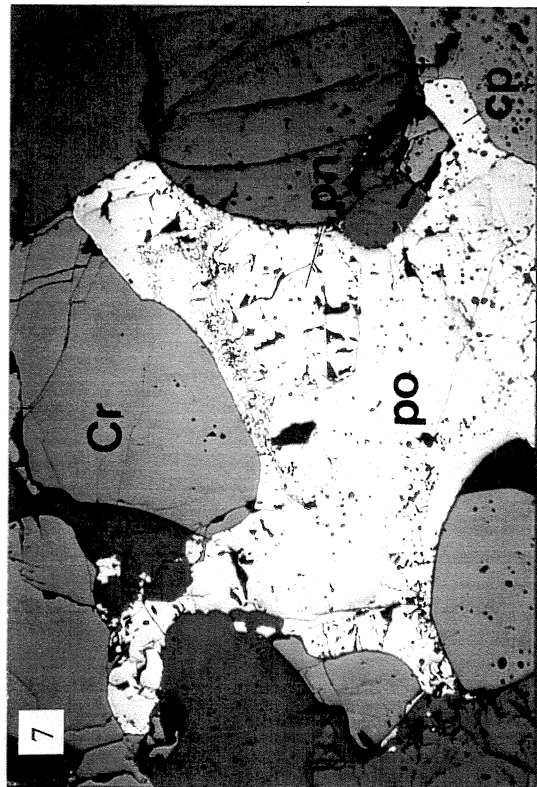
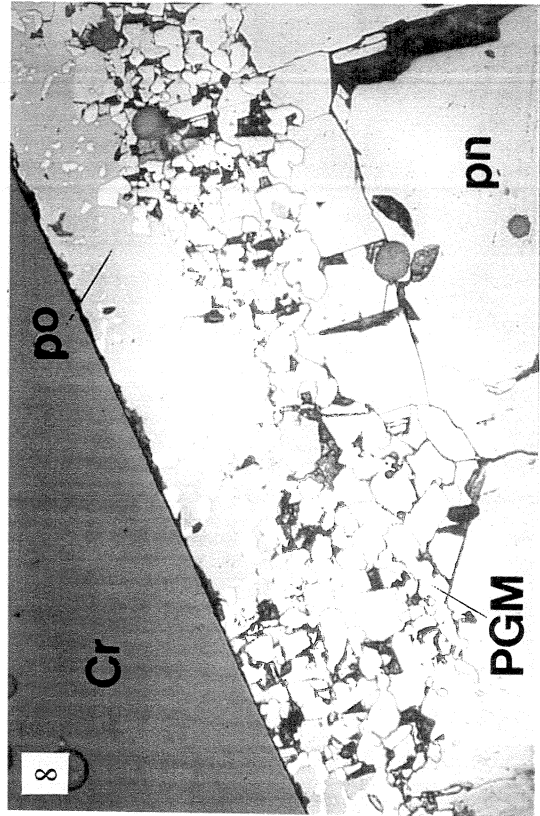
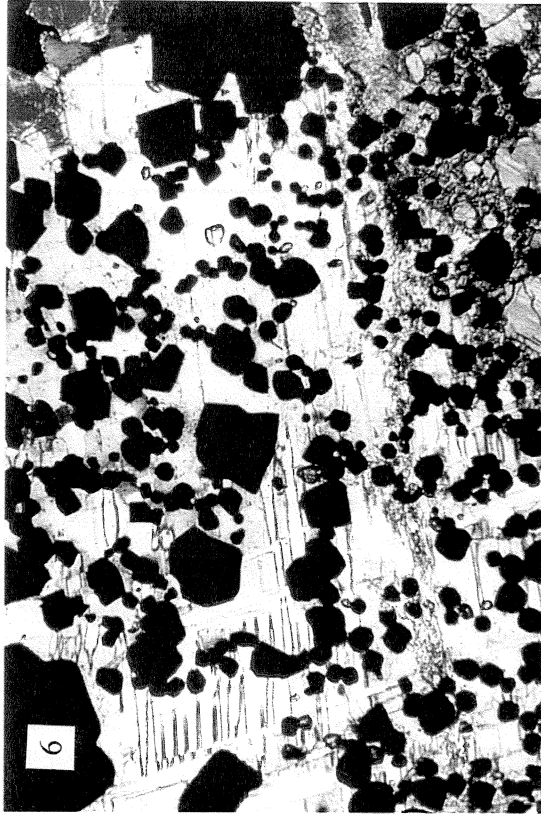


Planche 5 – Aspect général des lits de chromitite où un gros plagioclase poecilitique englobe des grains de chromite (Cr) quasi-idiomorphes. Une veinule d'altération (Alt.) de serpentine-chlorite et micas blancs recoupe les grains de chromite (échantillon IM-22). Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 7mm.

Planche 6 – Même photo entre polariseurs croisés.

Planche 7 – Sulfures interstitiels aux grains de chromite. Les phases présentes sont de la pyrrhotite (po), pentlandite (pn) et chalcopyrite (cp) (échantillon IM-24). Photo en lumière réfléchie, d'une largeur de 7mm.

Planche 8 – Grossissement de la photo précédente montrant des minéraux fortement réfléchissants au contact entre la pentlandite et la pyrrhotite qui sont possiblement des MGP. Photo en lumière réfléchie, d'une largeur de 0,7mm.



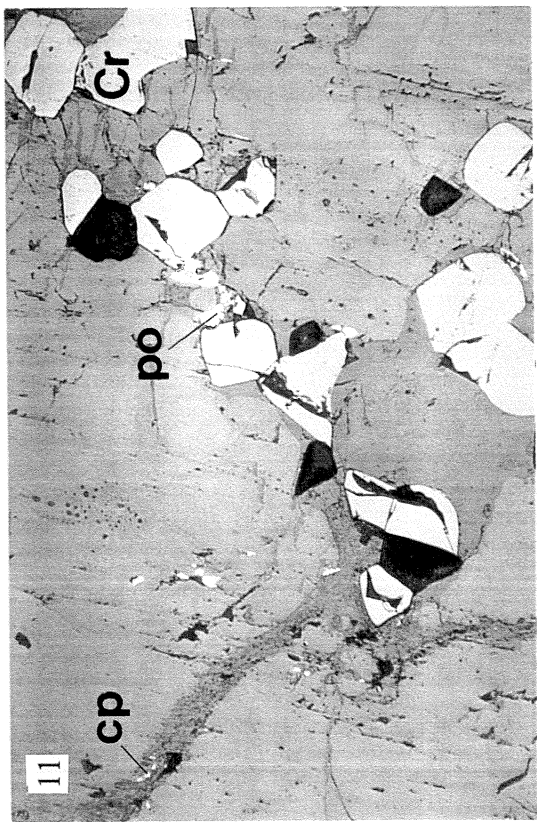
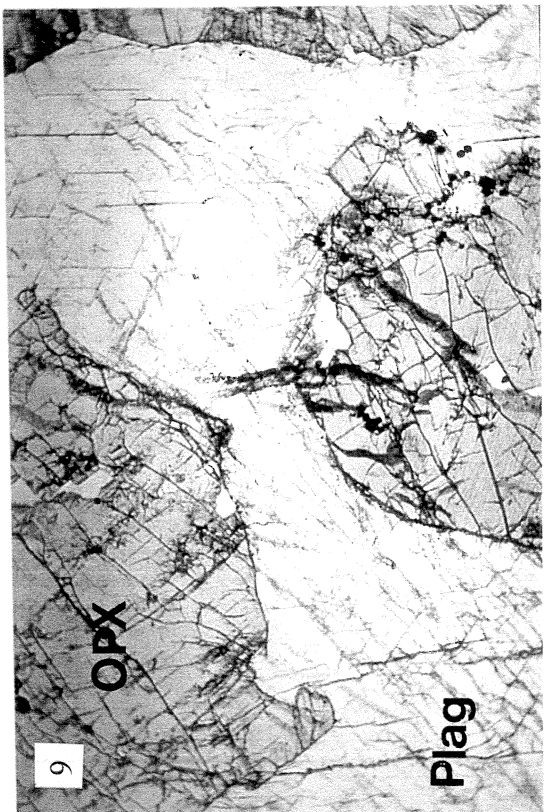
Compte tenu de la forte concentration en platine de cet horizon, de l'ordre des ppm, ce minéral est interprété comme étant un minéral du groupe du platine (MGP). Les MGP les plus abondants du Merensky Reef sont la braggite (Pt,Pd,Ni)S, la coopérite (Pt,Pd,Ni)S, la moncheite (Pt,Pd)(Te,Bi)₂ et la laurite (Ru,Os,Ir,Fe)S₂ (Impala 1998). La texture générale est poecilitique. Une veinule d'altération de chlorite-micas blancs recoupe la lame-mince et fracture les grains de chromite. Une altération serpentineuse est observable dans les fractures des OPX. La distribution des grains de chromite est variable et ceux qui se retrouvent en inclusion dans les OPX ont tendance à être mieux formés et plus petits que ceux qui sont dans les plagioclases.

L'unité de norite est située entre les lits de chromitite et fait une épaisseur de 3,1cm. La minéralogie se traduit par 38% d'orthopyroxènes, 60% de plagioclases et 2% de minéraux opaques. Dans cette unité la taille des grains, de 1 à 2cm pour les orthopyroxènes et de 2 à 4cm pour les plagioclases, peut s'apparenter à celle d'une pegmatite (Planches 9 et 10). La forme des grains est hypidiomorphe et les orthopyroxènes renferment des inclusions selon leur plan de clivage. Les minéraux opaques sont, dans un rapport 5 : 1, de la chromite idiomorphe de taille approximative de 0,4mm et des sulfures, chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite, xénomorphes de 0,05 à 0,3mm. Les grains de chromite sont généralement plus gros lorsqu'ils se retrouvent dans les orthopyroxènes le long des fractures (Planche 11). Les sulfures sont soit interstitiels entre les grains de chromite ou associés à l'altération serpentineuse qui suit les fractures dans les grains d'orthopyroxène. La texture est poecilitique.

Planche 9 – Gros grains d'OPX et de plagioclase (Plag) dans l'échantillon de norite (IM-23). Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 15mm.

Planche 10 – Même photo entre polariseurs croisés.

Planche 11 – Grains de chromite (Cr) et sulfures (pyrrhotite et chalcopyrite) à l'intérieur des OPX. Photo en lumière réfléchie, d'une largeur de 2mm.



L'unité de mélagabbronrite est l'unité la plus épaisse observée dans la section étudiée. Celle-ci a une composition moyenne de 65% de pyroxènes, soit 40% d'orthopyroxènes et 25% de clinopyroxènes, de 25% de plagioclases, de 5% de biotite, de 2% de pinitite et de 3% d'opakes. Les orthopyroxènes sont hypidiomorphes, de taille variant de 1 à 7 mm, fracturés et contiennent souvent des inclusions de clinopyroxènes le long des plans de clivage. Généralement ils sont peu altérés et sont associés à la biotite. Les clinopyroxènes sont de taille très variable soit de 0,3mm, lorsqu'en inclusions, et atteignant, quoique rarement, 2cm lorsqu'en texture ophitique avec les orthopyroxènes. Les plagioclases sont de forme hypidiomorphe, de taille de 0,7 à 15mm et forment une texture globale poecilitique avec les orthopyroxènes (Planches 12 et 13). La biotite est très ferrugineuse, couleur rouge intense, de taille 1,5 à 2,5 mm et elle se situe en bordure des orthopyroxènes. Les grains de pinitite sont associés à la biotite et sont d'une taille approximative de 0,3mm. Les minéraux opakes sont principalement des sulfures tels chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite, dans des proportions de 2 : 2 : 1. Leur taille globale est de 1,5mm et ils sont interstitiels aux autres minéraux. Des grains de chromite idiomorphes de 0,1mm sont aperçus en traces et parfois en inclusions dans la biotite.

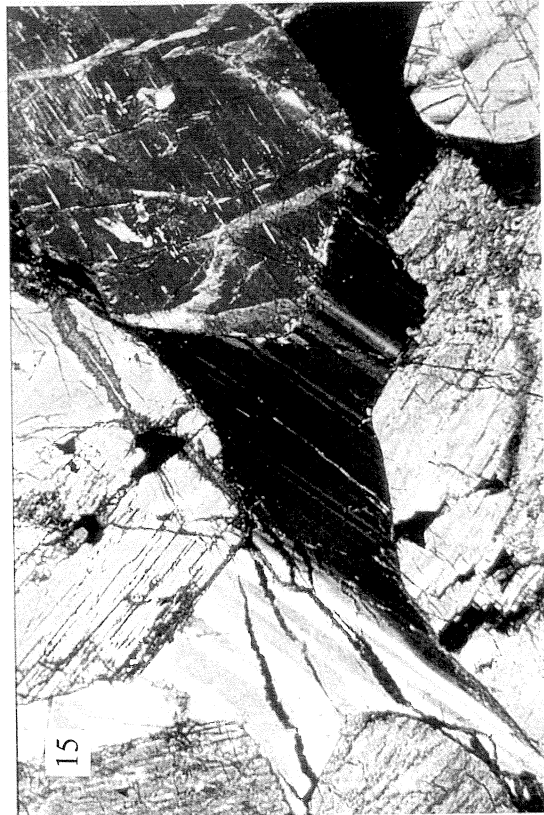
La dernière unité observée dans la succession stratigraphique est la gabbronrite. La composition minéralogique moyenne est de 53% de pyroxènes, qui se subdivisent en 25% d'orthopyroxènes et 28% de clinopyroxènes, de 38% de plagioclases (An_{55}), de 5% de biotite et de 4% d'opakes qui sont essentiellement des sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite). Les grains d' orthopyroxènes sont hypidiomorphes, de taille 1,5 à 15mm, fracturés et contiennent des inclusions de clinopyroxènes. Les clinopyroxènes sont

Planche 12 – Texture ophitique locale où un gros grains de CPX englobe des grains d'OPX dans un échantillon de mélagabbronorite (IM-14). Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 15mm.

Planche 13 – Même photo entre polariseurs croisés.

Planche 14 – Texture poecilitique, OPX dans plagioclase poecilitique, et veinule d'altération dans un échantillon de gabbronorite (IM-6). Photo en lumière naturelle, d'une largeur de 15mm.

Planche 15 – Même photo entre polariseurs croisés.



généralement retrouvés sous forme d'inclusion dans les orthopyroxènes où ils ont une taille $\approx 0,1\text{mm}$. Parfois ils sont sous forme de grains assez gros, $\approx 2\text{cm}$, pour faire une texture ophitique avec des bâtonnets de plagioclases et quelques orthopyroxènes. Les plagioclases sont hypidiomorphes et leur taille varie de $0,2$ à 3mm . Les orthopyroxènes présentent une faible altération serpentineuse le long des fractures. La texture observée est poecilitique (Planches 14 et 15).

De manière générale les orthopyroxènes et clinopyroxènes observés sont de la bronzite et de la pigeonite. Le contenu en pyroxènes, surtout en clinopyroxènes, semble augmenter en fonction de la stratigraphie.

Les textures observées des différentes unités varient de sub-ophitique (leucogabbronorite) à poecilitique (mélagabbronorite, gabbronorite) de part et d'autre du Reef. Cette différence de texture est surtout attribuable à la forme et à la dimension des grains de clinopyroxènes et plagioclases.

Les minéraux opaques, majoritairement des sulfures, sont moins abondants dans l'unité de leucogabbronorite ($\approx 1\%$) que dans les unités de mélagabbronorite ($\approx 3\%$) et de gabbronorite ($\approx 5\%$).

6.0 - GÉOCHIMIE

L'étude géochimique a été réalisée sur une trentaine d'échantillons pour les éléments majeurs, mineurs, en traces et ÉGP. Une partie de ces résultats soit ceux pour les ÉGP, Au, Cu, Ni, S et Cr est présentée au tableau 1.

6.1 - Concentration des ÉPG, Au, Cu, Ni, S et Cr en fonction des lithologies

6.1.1 - *Concentration des ÉPG en fonction des lithologies*

La concentration des ÉGP varie autant en fonction de la lithologie que de la position stratigraphique de cette dernière par rapport aux lits de chromitite. Ainsi, les concentrations maximales observées pour Pt, Pd et Rh, PPGE (Barnes et al. 1985), correspondent aux lits de chromitite. Os, Ir et Ru, IPGE (Barnes et al. 1985), quoique de concentration généralement plus faible, ont aussi tendance à être plus abondants à l'intérieur et aux abords des chromitites.

En observant de plus près la variation des concentrations des PPGE (Figure 4a), le caractère platinifère du Merensky Reef est clairement défini avec une concentration de Pt de l'ordre de 50ppm dans un lit de chromitite de seulement trois centimètres d'épaisseur. Les brisures observées de la courbe de concentration après les pics sont attribuables au fait que les lits de chromite reposent respectivement sur des unités de leuconorite et de norite. L'accentuation de la brisure de courbe dans l'unité de leuconorite peut être expliquée par la présence d'une couche de composition quasi-anorthositique

immédiatement au contact de la chromitite. La petite proéminence de la courbe, observée entre les profondeurs 1027,6 et 1027,2m, peut être expliquée par une légère augmentation de la proportion de sulfures dans ces roches.

Les courbes de concentrations des IPGE en fonction des lithologies décrivent un patron similaire à celui des PPGE avec des pics dans les lits de chromitite accompagnés de brisures de courbes (Figure 4b). Toutefois, l'ordre de grandeur des concentrations est approximativement de 30 fois inférieur pour Os et Ir.

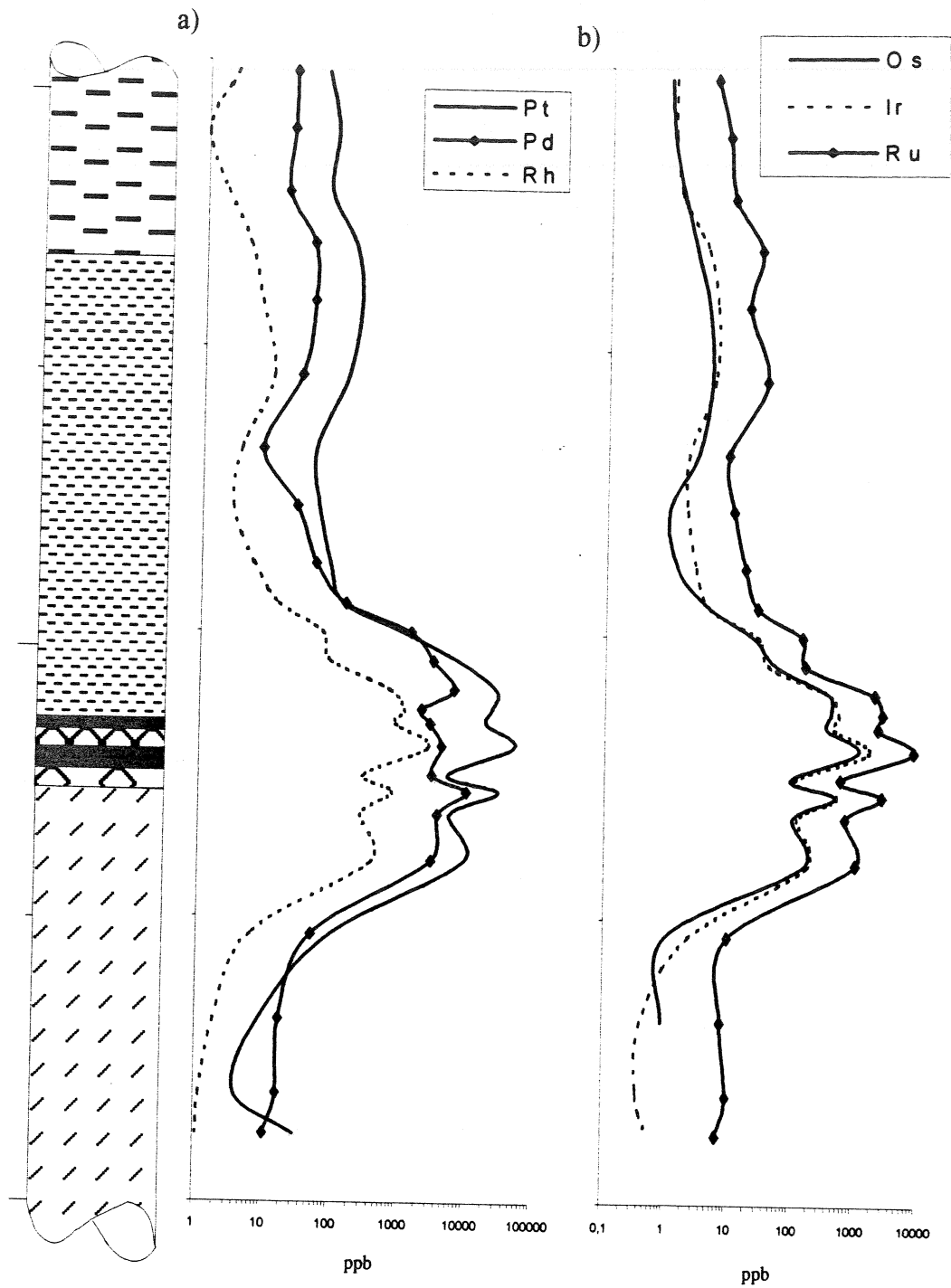


Figure 4. a) Concentrations des PPGE et b) des IPGE, en fonction des lithologies.

6.1.2 - Concentration de Au, Cu, Ni et S en fonction des lithologies

Les concentrations de Au, Cu, Ni et S ont un comportement similaire par rapport aux mêmes unités lithologiques (Figure 5a). Les valeurs extrêmes observées se retrouvent en bordure du Reef soit dans les unités de mélagabbronorite et de leucogabbronorite. Entre celles-ci une brisure abrupte de la courbe des concentrations en fonction des lithologies est aperçue à la hauteur du premier lit de chromitite. Une seconde brisure, beaucoup plus douce cette fois, souligne la présence du second lit de chromitite. La douceur de la brisure peut être expliquée par le fait que l'unité supérieure de leuconorite ne contient pas une forte proportion de sulfures, spécialement au contact avec la chromitite, portion quasi-anorthositique. Une légère augmentation des concentrations est visible entre les profondeurs de 1027,6 et 1027,3m. Cette zone de plus hautes concentrations dans l'unité de mélagabbronorite se traduit par une plus grande abondance de sulfures lors de l'observation au microscope.

6.1.3 - Concentration de Cr en fonction des lithologies

La concentration en Cr semble suivre une tendance linéaire où les concentrations sont 2,5 fois plus élevées dans les unités de mélagabbronorite et de gabbronorite que dans la leucogabbronorite (Figure 5b). Cette tendance subit toutefois de la distorsion avec de fortes et faibles concentrations dans les unités formant le Reef. Ainsi, les valeurs élevées sont attribuables à la présence des lits de chromites tandis que les valeurs faibles correspondent aux unités de norite et de leuconorite.

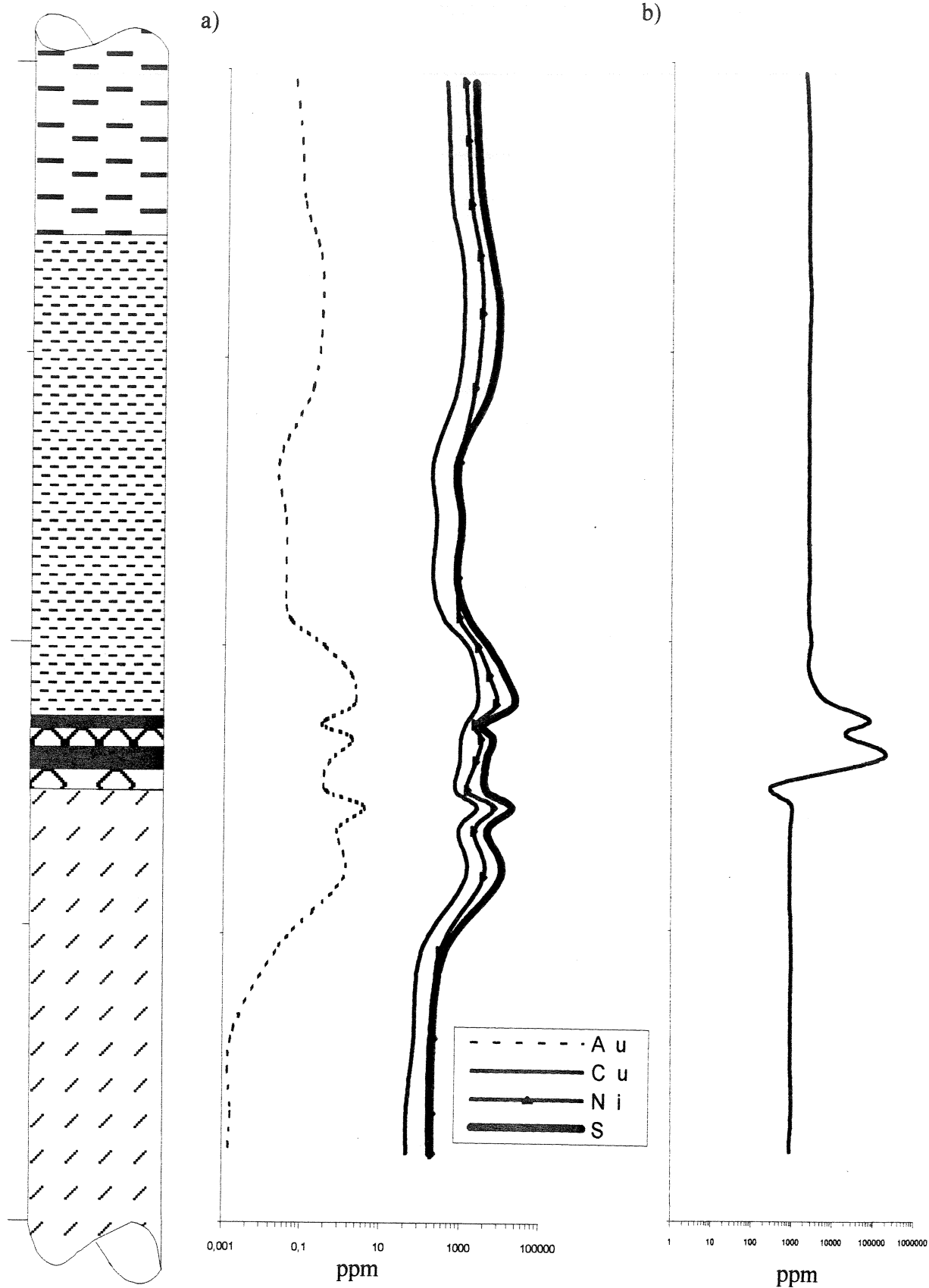


Figure 5. a) Concentrations de Au, Cu, Ni, S et b) Cr, en fonction des lithologies.

Lorsque que l'on compare les concentrations de Pt, Cr et S par rapport aux différentes lithologies (Figure 6), on note que la concentration en Pt est en corrélation avec celle du S dans les unités de leucogabbroïte, mélagabbroïte et gabbroïte tandis que dans les unités du Reef, celle-ci est en corrélation avec le Cr.

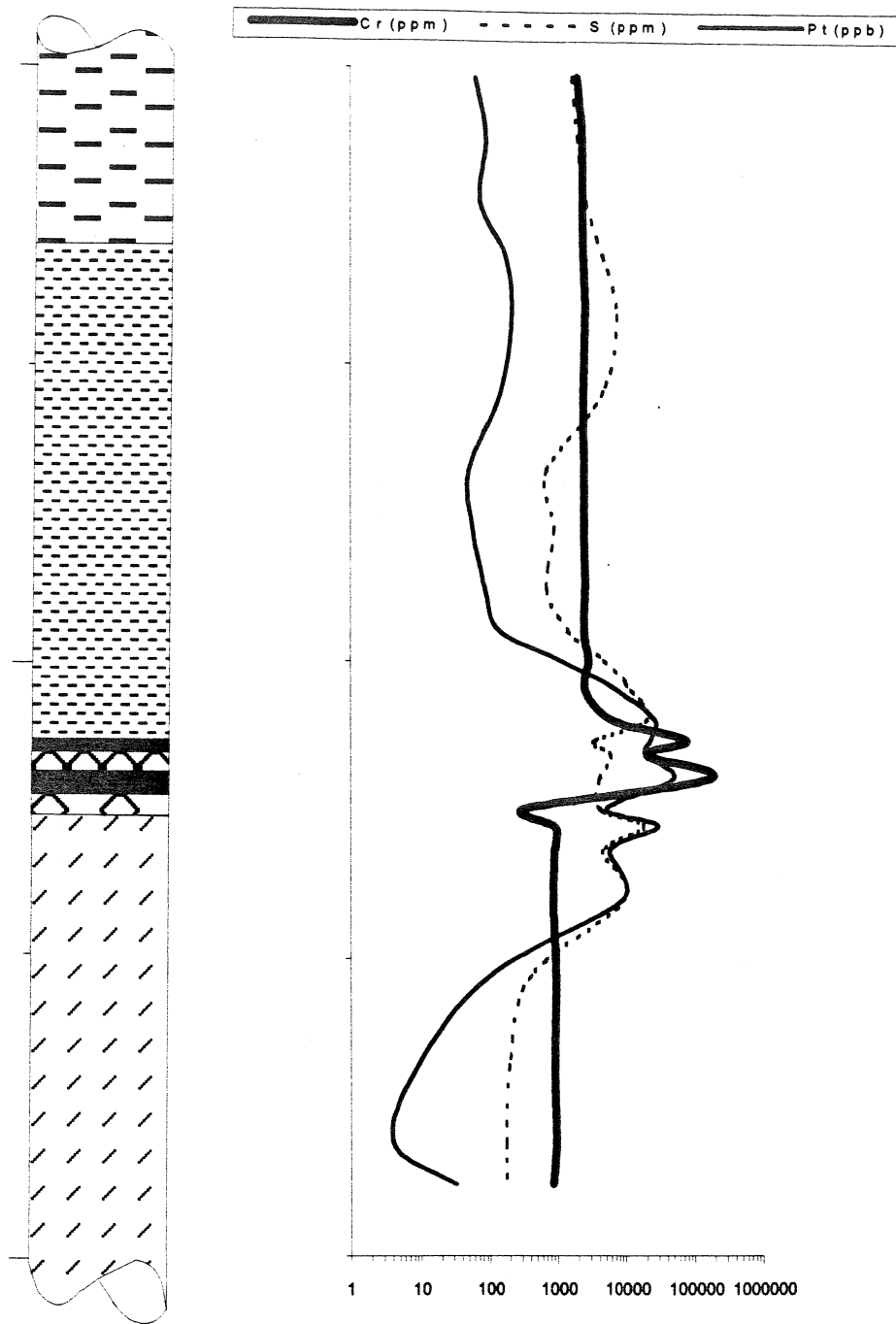


Figure 6. Comparaison entre les concentrations de Pt, S et Cr en fonction des lithologies.

6.2 - Corrélation des ÉPG, Au, Cu, Ni et Cr avec le S

6.2.1 - *Corrélation des ÉGP avec le S*

Si la phase principale qui a contrôlé la concentration des ÉGP était un liquide sulfureux, le graphique du S en fonction de ces métaux devrait donner une corrélation positive (Barnes et Francis 1995). Sur le graphique du S en fonction du Pt (Figure 7) il est possible d'observer que certains échantillons ont effectivement une corrélation positive et que ceux-ci semblent se diviser en deux groupes distincts.

Ainsi, un premier groupe englobant les échantillons prélevés en bordure du Reef dans les unités de leucogabbronorite et mélagabbronorite, présente une plus forte corrélation avec des teneurs élevées tant en S qu'en Pt. Le second groupe, de corrélation et de teneurs plus faibles, est principalement défini par les échantillons de mélagabbronorite restant, ceux de gabbronorite et un échantillon de leucogabbronorite. Les membres de l'extrême gauche de ce groupe correspondent à la proéminence observée dans la concentration de Pt versus les lithologies entre les profondeurs 1027,6 et 1027,3m de la section de carotte de forage (voir Figure 4a). Les échantillons du Reef, la leuconorite, les deux lits de chromitite et la norite, ainsi que ceux provenant de la base de la leucogabbronorite, ne montrent aucune corrélation entre les concentrations de S et Pt.

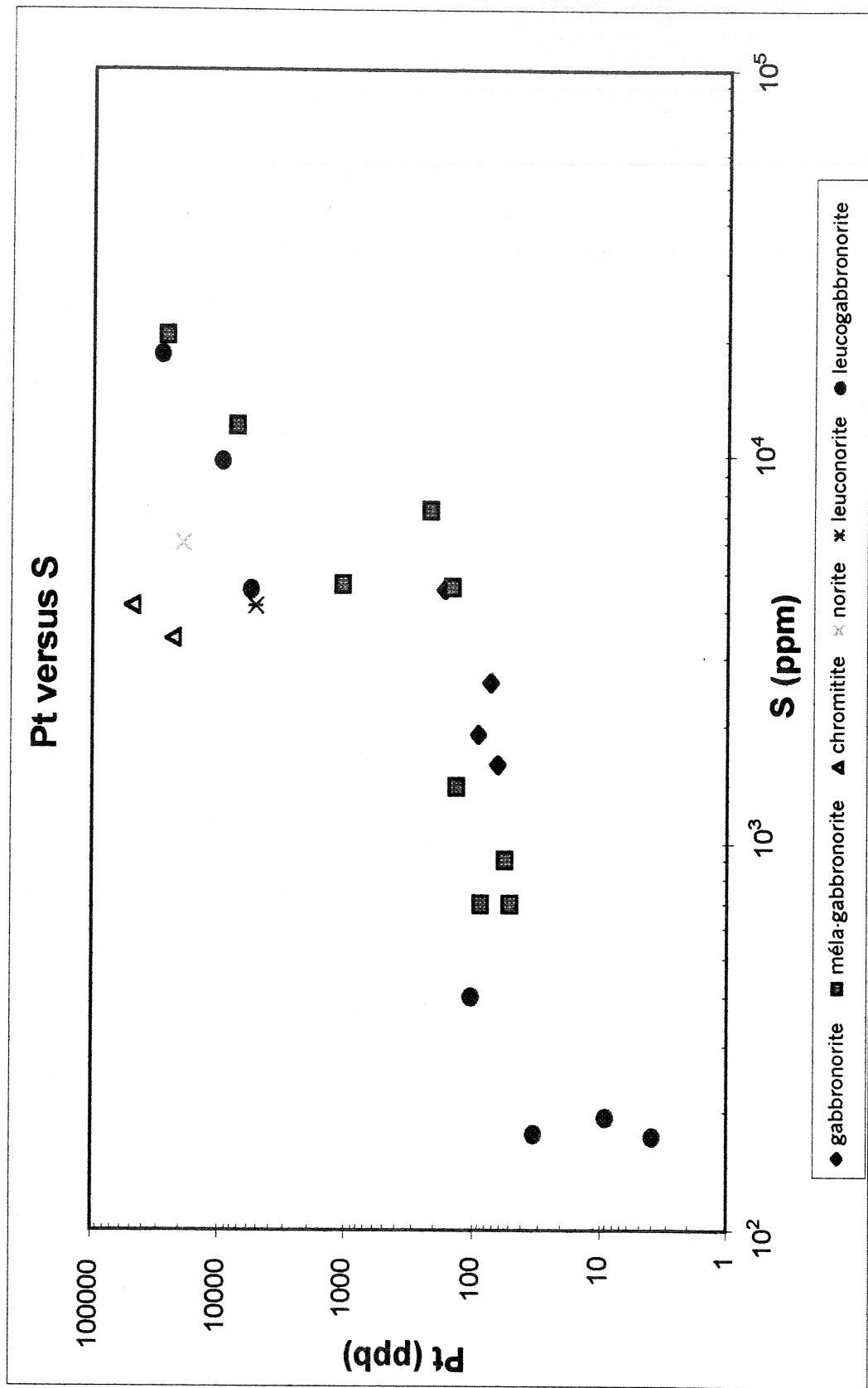


Figure 7. Graphique de S vs Pt.

L'ensemble des autres ÉGP, tant PPGE que IPGE, ont un comportement semblable à celui du Pt lorsque corrélé avec le S (Figures 8 et 9). Deux groupes de taux de corrélation différents sont identifiables et regroupent les mêmes échantillons que ceux identifiés dans le cas du platine. Toutefois les échantillons provenant de la leucogabbronorite ont des concentrations de métaux plus rapprochées et peuvent être englobés par le groupe de plus faible corrélation. Les échantillons du Reef ont toujours un comportement qui ne peut être corrélé à celui du S. Les échantillons des chromitites sont toujours ceux qui possèdent les plus fortes concentrations en métaux sauf pour le Pd où les échantillons de bordures de leucogabbronorite et de mélagabbronortie sont plus riches. Ceci appuie le caractère platinifère du Reef.

6.2.2 - *Corrélation de Au, Cu, Ni avec le S*

Les graphiques de Au, Cu et Ni en fonction du S soulignent de fortes corrélations (Figure 10a-c). L'or semble être l'élément dont la pente de corrélation est la plus élevée et où de faibles valeurs sont exclues de la droite de régression. Ces valeurs reflètent le comportement des échantillons de leucogabbronorite se retrouvant à la base de la colonne stratigraphique schématique de la section étudiée (voir Figure 2). Le Cu et le Ni ont des comportements avec le S très similaires et il est évident que la concentration de ces métaux est contrôlée par la présence de S. Dans le cas de l'or, une relation certaine existe entre les concentrations en S et en Au mais elle un moins bien définie, il s'agit d'un champ de corrélation plutôt que d'une ligne comme dans les cas du Cu et du Ni.

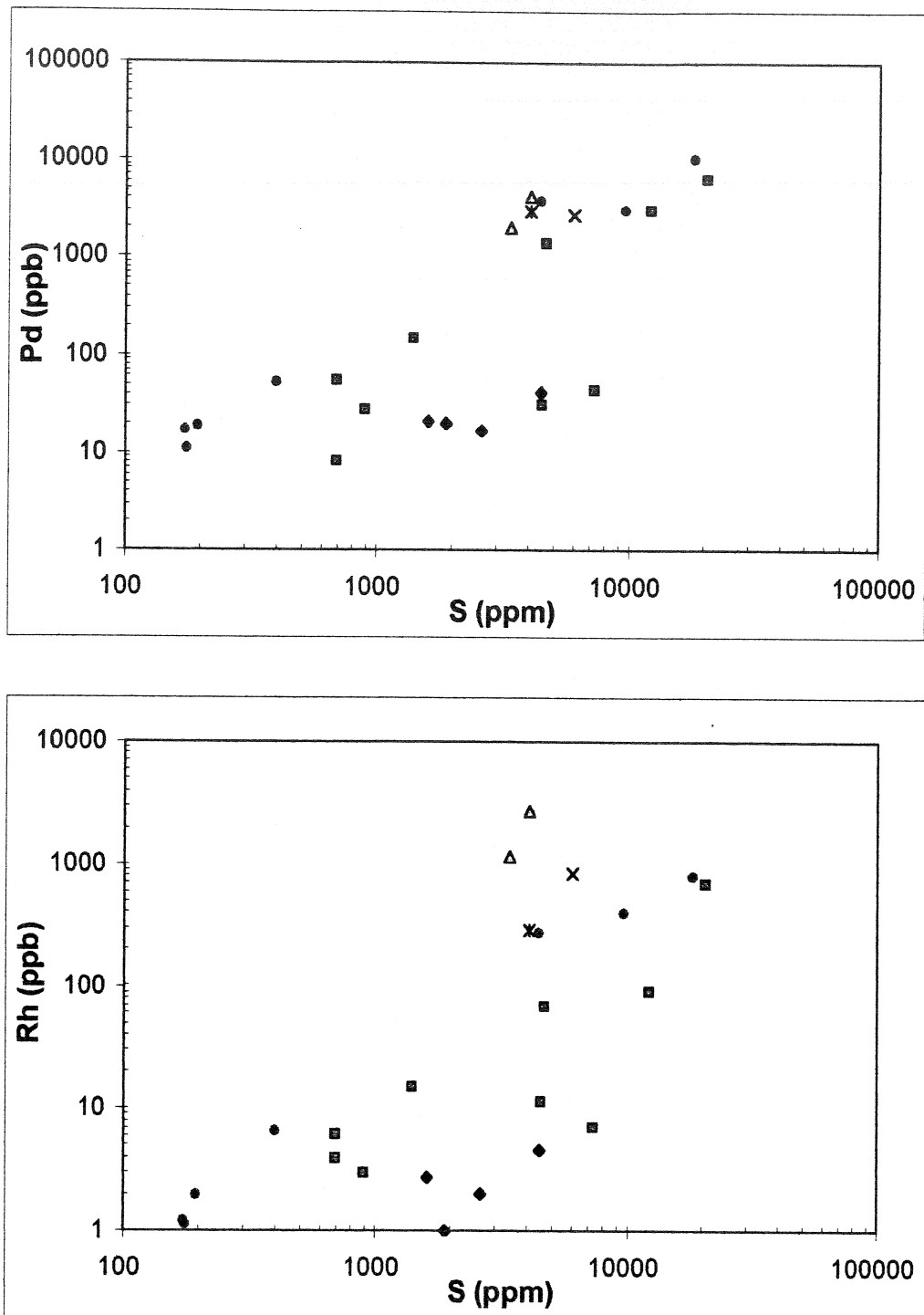


Figure 8. Graphiques de S vs Pd et Rh. Se référer à la légende de la Figure 7.

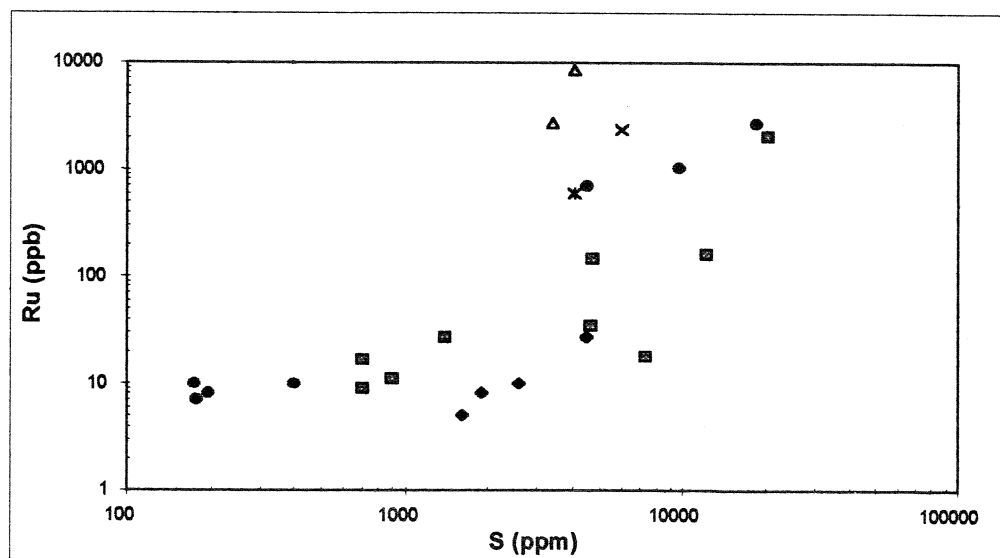
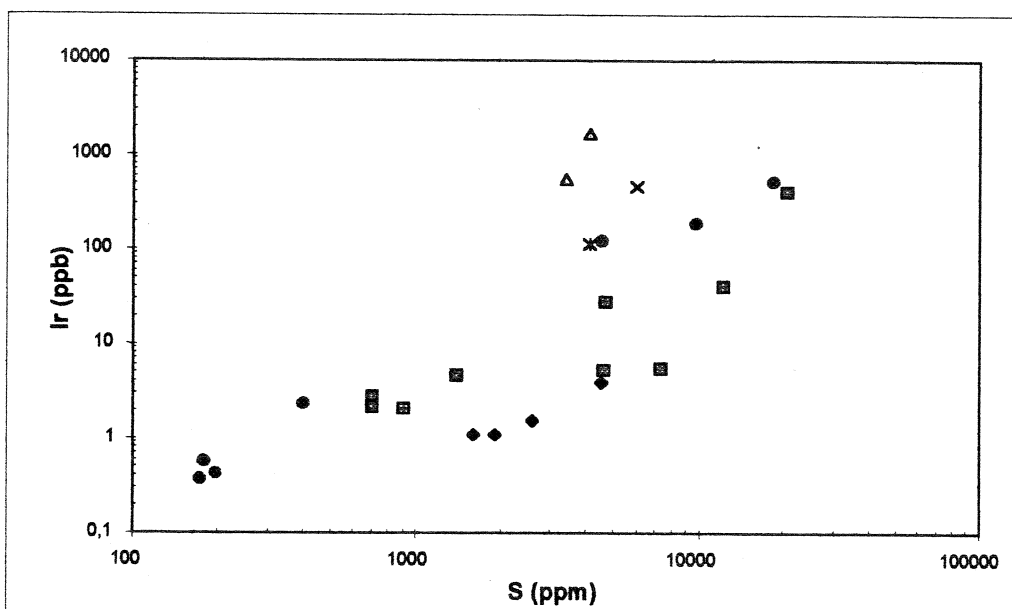
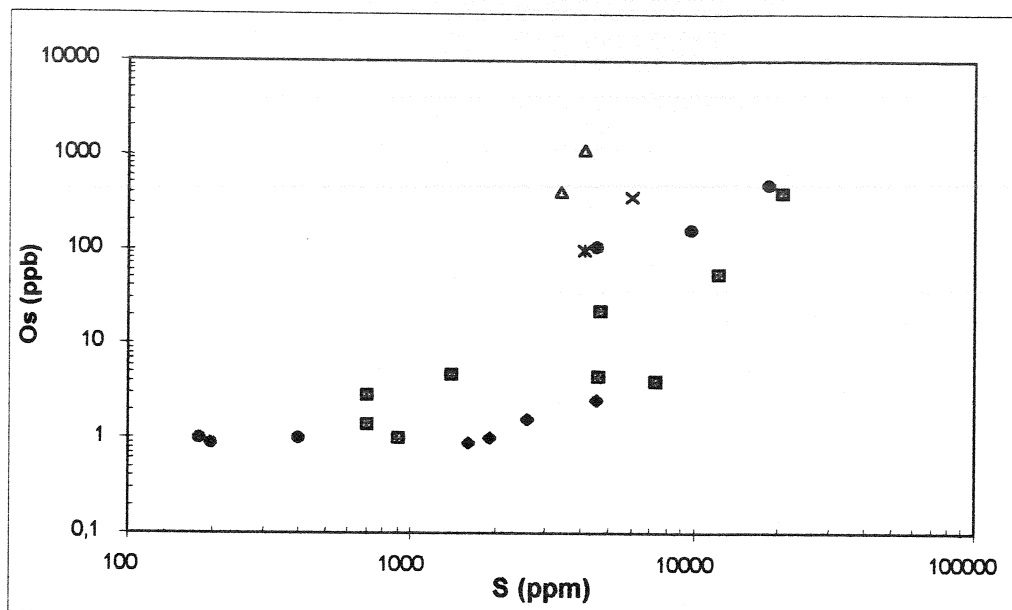


Figure 9. Graphiques de S vs Os, Ir et Ru. Se référer à la légende de la Figure 7.

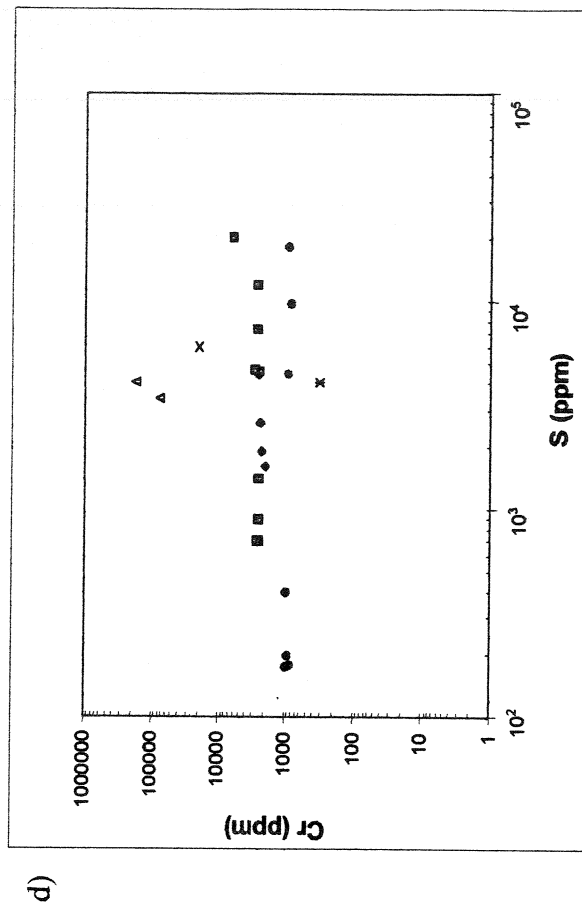
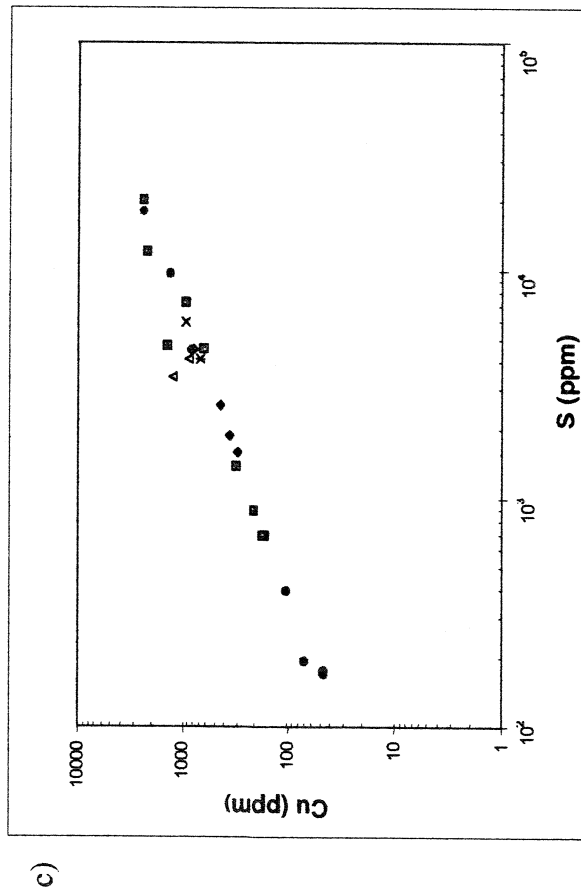
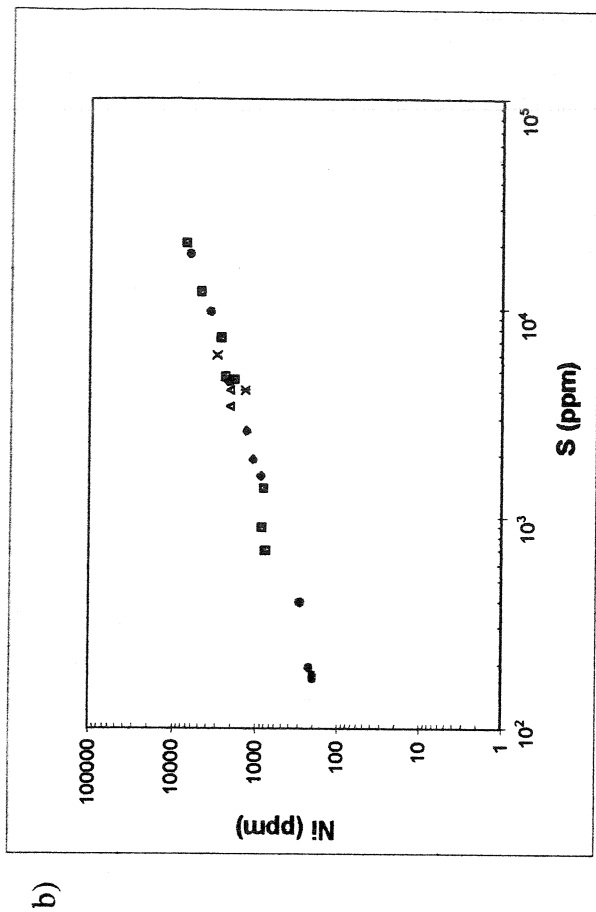
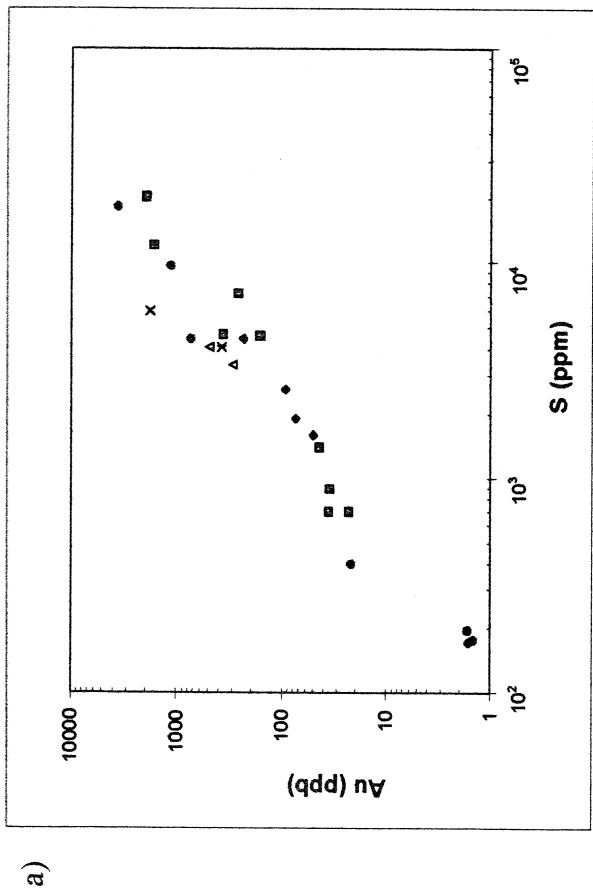


Figure 10. (a-d) Graphiques de S vs Au, Cu, Ni et Cr. Se référer à la légende de la Figure 7.

6.2.3 - *Corrélation du Cr avec le S*

Aucune corrélation n'est identifiable entre le Cr et le S sur le graphique du S en fonction de Cr (Figure 10d). Une tendance linéaire du type ordonnée à l'origine se démarque pour les échantillons de leucogabbronorite, de mélagabbronorite et de gabbronorite. Les concentrations en Cr sont constantes pour ces échantillons avec des valeurs plus faibles pour ceux provenant de la leucogabbronorite. Les échantillons du Reef ont, quant à eux, une concentration en S quasi-constante avec des valeurs de Cr augmentant rapidement de la leuconorite aux lits de chromitite.

6.3 - *Corrélation des ÉPG, Au, Cu, Ni avec le Cr*

6.3.1 - *Corrélation des ÉGP avec le Cr*

Comme dans le cas du S, si la concentration des métaux était contrôlée par la concentration de Cr, les graphiques des métaux en fonction du Cr devraient donner des corrélations positives. La distribution des points sur le graphique de Cr versus Pt (Figure11) dénote deux populations d'échantillons où l'une est indépendante et l'autre influencée par les différentes concentrations de Cr.

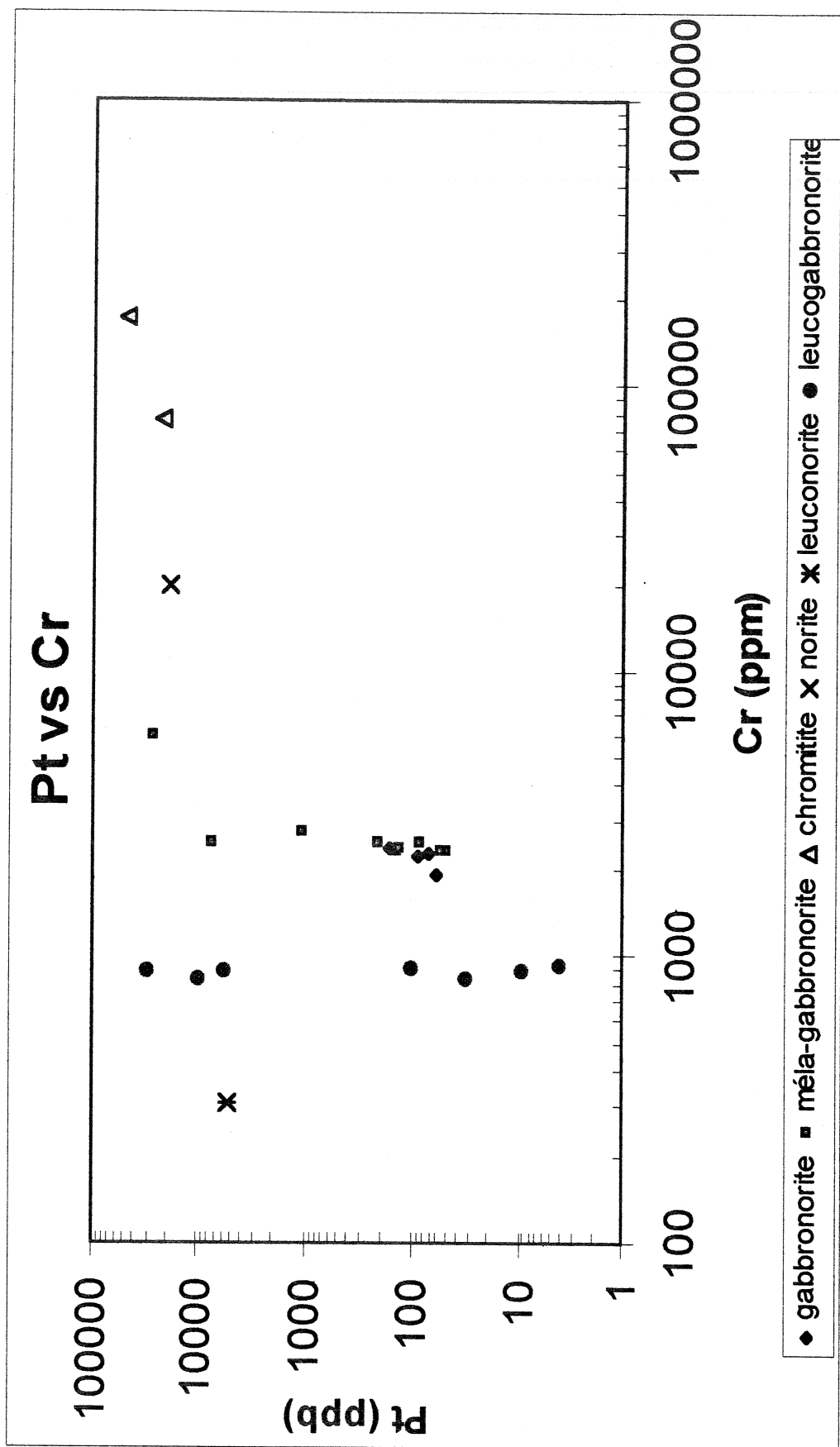


Figure 11. Graphique de Cr vs Pt.

Ainsi, la concentration en Pt des échantillons de leucogabbronrite, de mélagabbronrite et de gabbronrite semble indépendante de la concentration en Cr. Cette dernière est presque constante pour l'ensemble de la leucogabbronrite et ne varie que peu dans la mélagabbronrite et gabbronrite à l'exception de l'échantillon prélevé au contact de la chromitite avec l'unité de mélagabbronrite. Les échantillons riches en Pt sont encore une fois ceux bordant les unités du Reef tant en-dessous qu'au-dessus stratigraphiquement. La seconde population englobe les échantillons dont le contenu en Pt semble se corréler avec celui en Cr. Ces échantillons proviennent des unités définissant le Reef soit la leuconorite, les lits de chromitite et la norite. Toutes sont très riches en Pt, spécialement les horizons de chromitite. Parfois la corrélation semble vouloir se stabiliser lorsque la concentration de Cr est très élevée. Ce phénomène est attribuable à la taille variable des échantillons causée par la quantité restreinte d'échantillons de certaines lithologies en l'occurrence des chromitites. L'ensemble de ces observations est applicable aux autres ÉGP lorsqu'ils sont comparés au Cr (Figures 12 et 13).

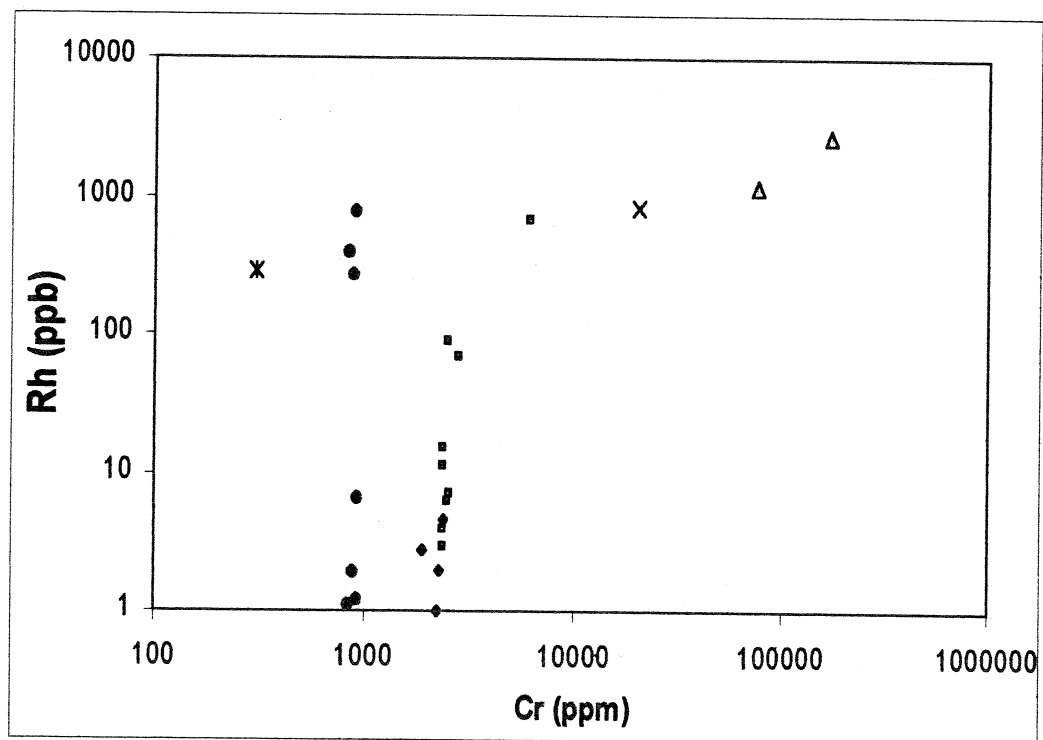
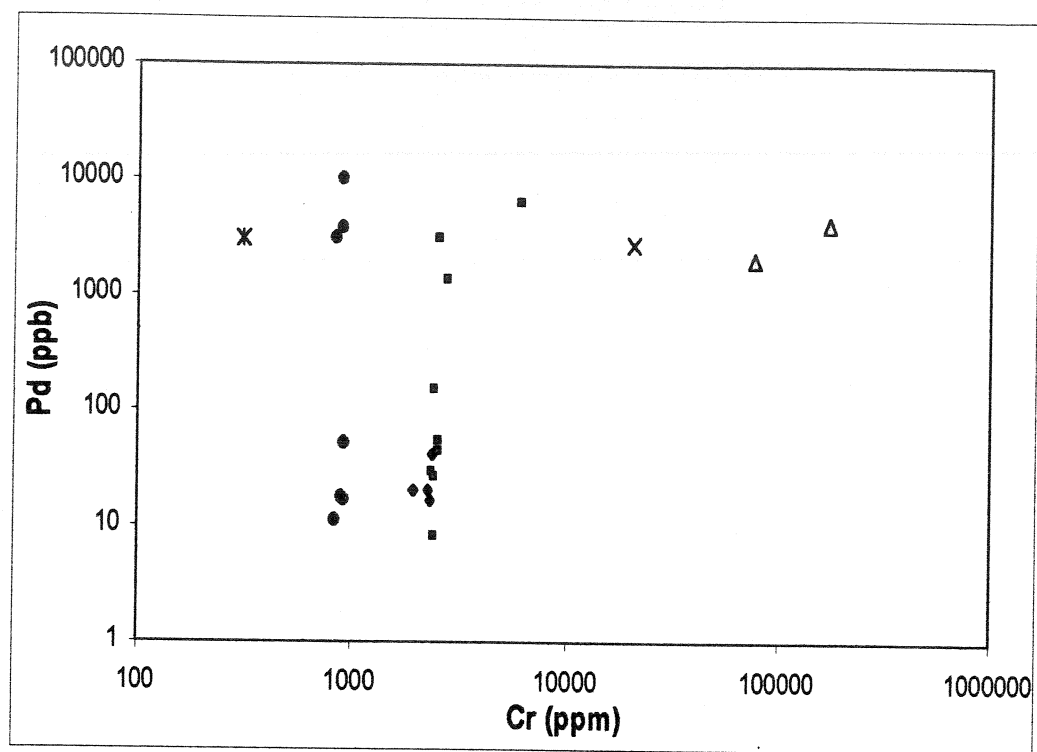


Figure 12. Graphiques de Cr vs Pd et Rh. Se référer à la légende de la Figure 7.

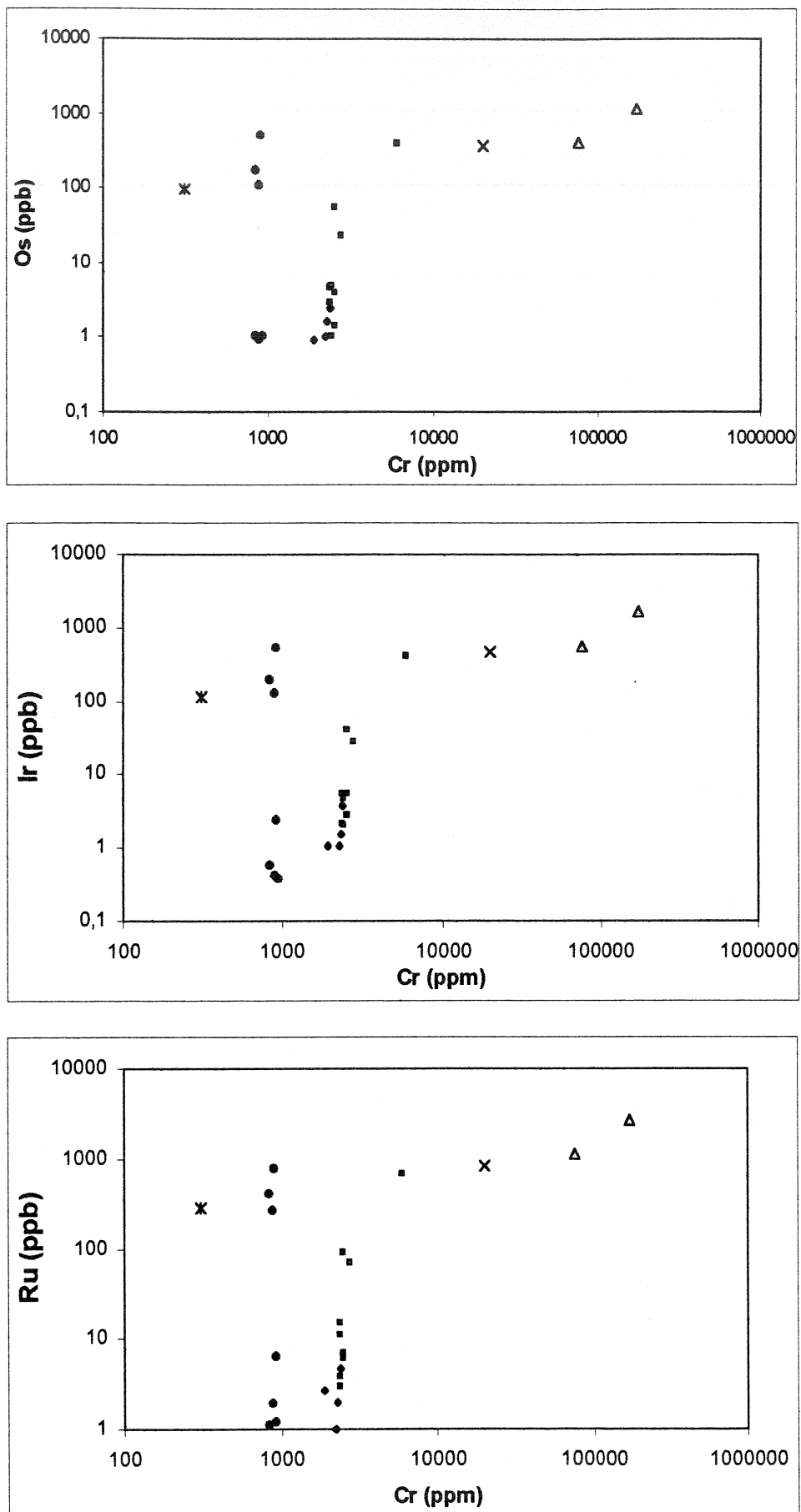


Figure 13. Graphiques de Cr vs Os, Ir et Ru. Se référer à la légende de la Figure 11.

6.3.2 - *Corrélation de Au, Cu, Ni avec le Cr*

L'Hypothèse d'un contrôle par le Cr est écartée dans les cas de Au, Cu et Ni puisqu'aucune corrélation ne peut être observée dans les graphiques de Au, Ni, Cu en fonction du Cr (Figure 14).

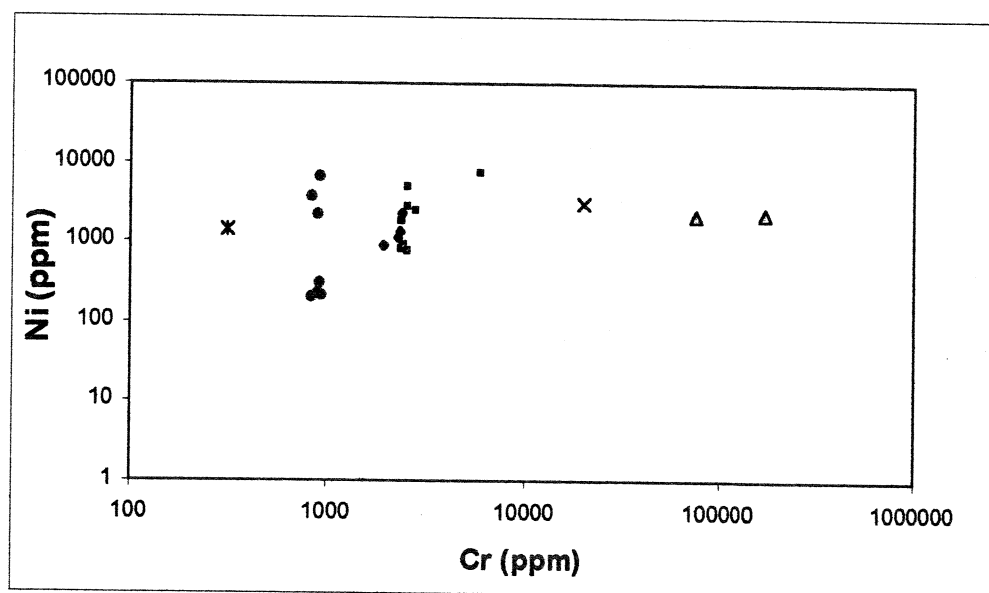
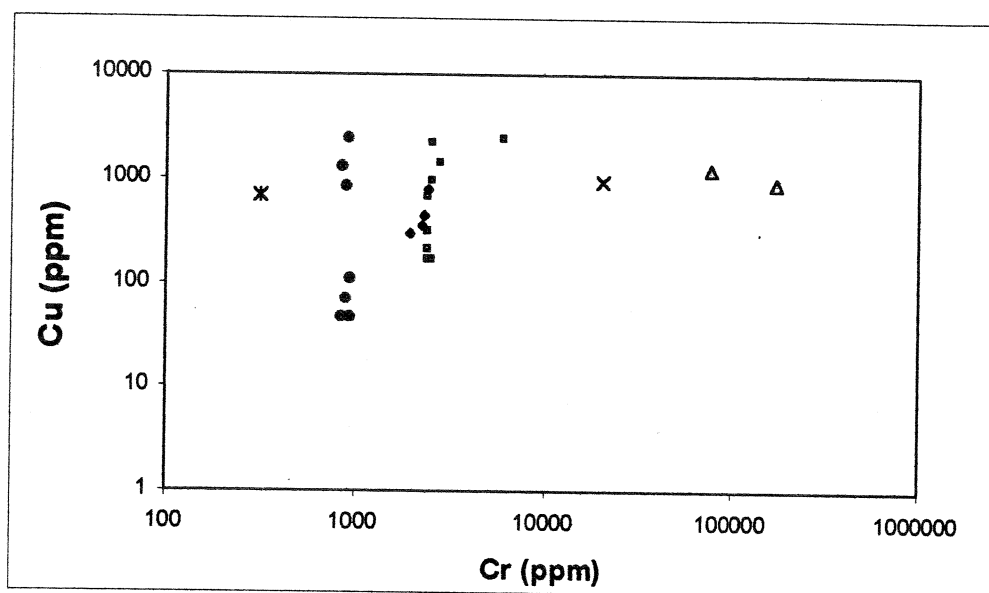
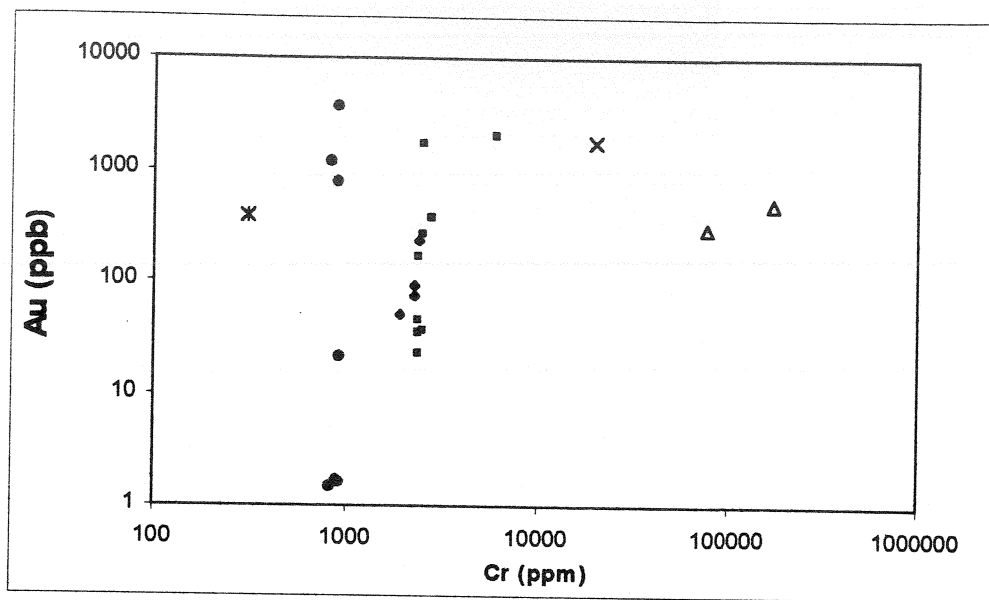


Figure 14. Graphiques de Cr vs Au, Cu et Ni. Se référer à la légende de la Figure 11.

7.0 – DISCUSSION

De nombreux modèles génétiques ont été élaborés pour expliquer la présence de gîtes d'ÉGP de type horizon minéralisé tel que représenté par le Merensky Reef. Ce qui suit est une description de quatre de ces modèles.

Un des mécanismes les plus invoqués est celui d'un mélange de magmas où celui qui était en place aurait connu des contaminations locales, par un fondu felsique, ce qui aurait favorisé la précipitation de couches de cumulats et un enrichissement en ÉGP des sulfures magmatiques. Kruger et al. (1998) ont noté d'abrupts changements dans la composition isotopique, notamment en Sr, dans les « Lower and Critical Zone » et une signature isotopique riche dans les chromitites ce qui indiquerait que le magma entrant était initialement contaminé par du vieux matériel de la croûte ou qu'il y a eu de la contamination *in situ*. La contamination du magma résiduel, riche en ÉGP calcophiles et en sulfures, par un fondu crustal riche en SiO₂ aurait induit la précipitation de la chromite. Ce produit de saturation serait responsable de la formation du Merensky Reef et expliquerait sa plus grande concentration en Pt, Pd et Rh (ÉGP calcophiles) plutôt qu'en Ir, Ru et Os (ÉGP sidérophiles). Les auteurs proposent que les anomalies isotopiques qui sont sensiblement restreintes aux chromite suggèrent qu'un mécanisme d'intrusion de type « fontaine » dominait l'addition de nouveaux magmas (Figure 15). Dans ce processus, le nouveau magma est plus dense que le liquide résidant. La densité est attribuable à une caractéristique de composition ou thermique, ou aux deux. Dans le

cas de Merensky, Kruger et al. (1998) proposent que ce soient les deux : un magma injecté plus froid et plus riche en Fe que le magma résident.

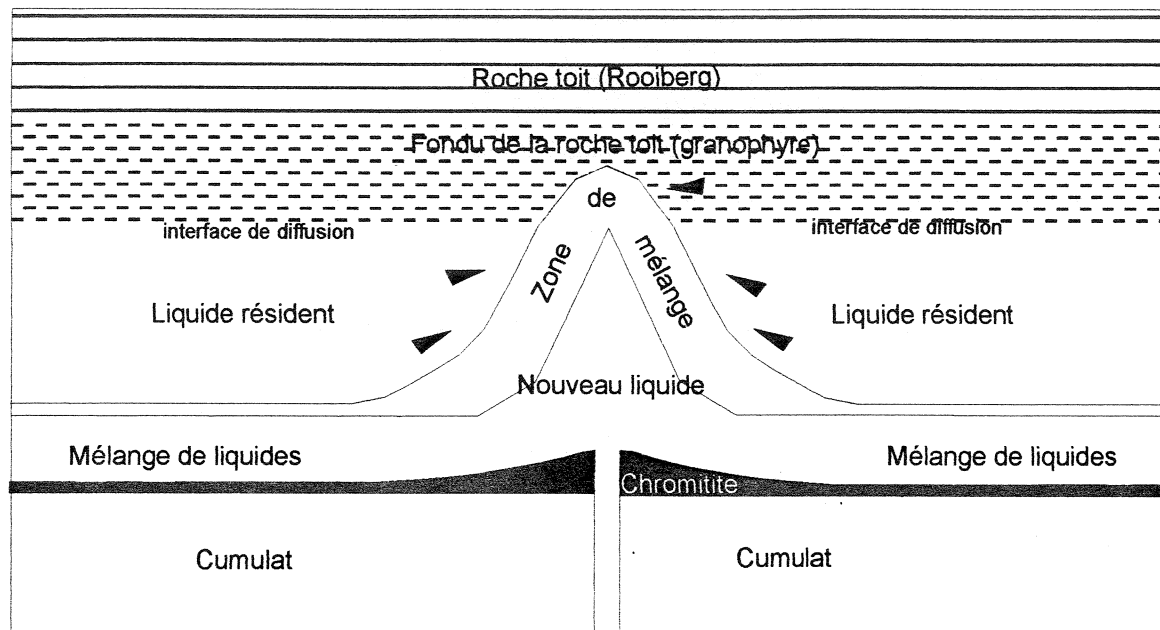


Figure 15. Diagramme schématisé représentant un mécanisme d'intrusion de type « fontaine » (tirée de Kruger et Schoenberg 1998).

Un second modèle proposé par Tredoux et al. (1995) est basé sur la nature sidérophile des ÉGP. Ce modèle invoque que les ÉGP peuvent être présents dans le magma sous forme d'amas métalliques de 50-100 atomes plutôt que sous forme de cations ou toutes autres espèces moléculaires. De tels amas seraient stabilisés par une enveloppe externe de ligands (eg. S, As, Sb, Te) et ceci pourrait favoriser leur incorporation dans un fondu de sulfures ou de chromite mais que cette association entre les amas de ÉGP et sulfures référerait plus à des mécanismes mécaniques que chimiques. Dans le modèle proposé

par les auteurs (Figure 13), les ÉGP sont présents dans un fondu sous forme initiale d'amas métallique (50-100 atomes par amas) et non comme molécules individuelles de ÉGP. Les amas sont stabilisés par adsorption à la surface de « chalcogenides »(S, As, Sb, Te) ou d'autres ligands mous (CO). Dans un environnement riche en S, les amas ÉGP activés par leur enveloppe chalcogène, sont prêts pour s'introduire dans le fondu de sulfures. Les amas d'ÉGP demeurent associés avec le fondu de sulfure jusqu'à ce qu'il y ait coalescence d'où ils précipitent (pour former ÉGP arsenures, tellures, alliages et sulfures complexes). La proportion d'amas qui demeure sera ultérieurement précipitée avec les sulfures métalliques de base. Dans un environnement pauvre en S, les amas d'ÉGP vont demeurer en suspension dans le fondu silicaté jusqu'à ce qu'il y ait coalescence pour former des alliages (molécules; MGP).

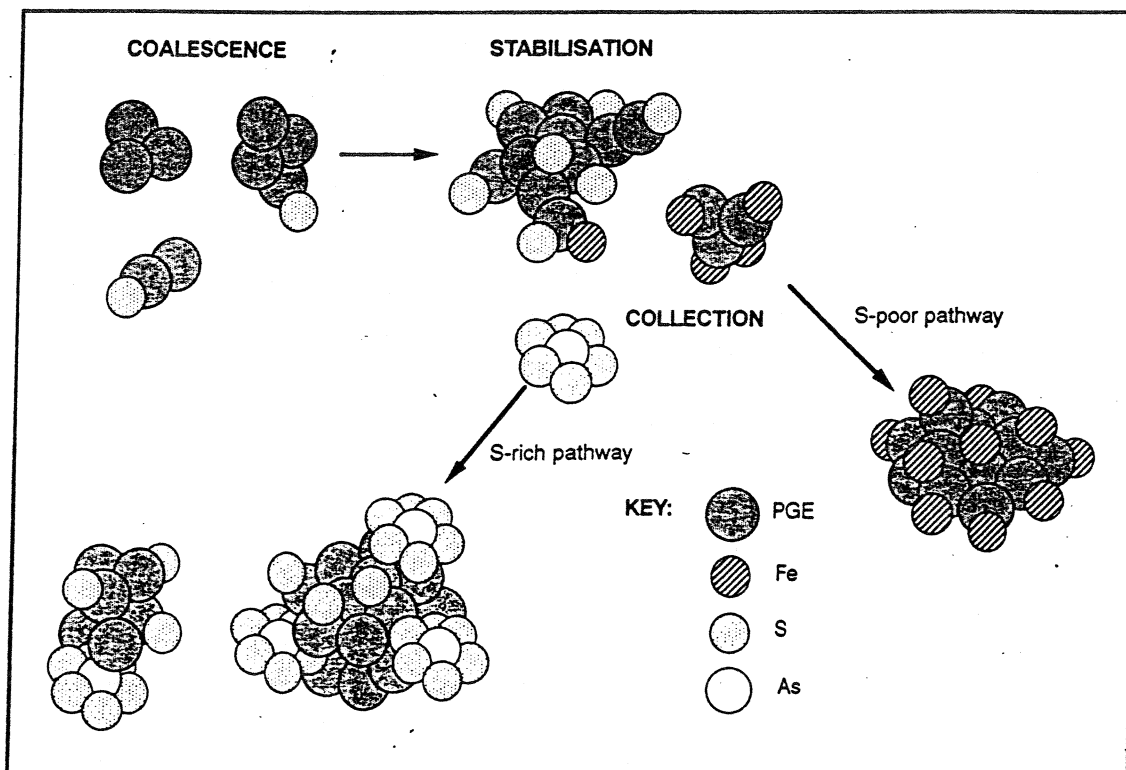


Figure 16. Diagramme schématisé du comportement des amas d'ÉGP dans un système magmatique (tirée de Tredoux et al. 1998).

Boudreau (1998) propose un modèle où les ÉGP sont concentrés à un front de réaction à mesure qu'il y a eu percolation d'un fluide volatile vers le haut de la chambre magmatique et que celui-ci retire les minéraux de sulfures pré-existants. L'interprétation de l'auteur est basée sur certains calculs de modèles qui ont démontré que, dans les intrusions litées, les zones riches en sulfures d'ÉGP peuvent être expliquées comme étant le résultat de la migration du front d'enrichissement-résorption des sulfures accompagnée par le dégazage des liquides interstitiels. Des séparations stratigraphiques peuvent donc être produites pendant la migration du front de résorption des sulfures dues aux différences de vitesse des ÉGP comparativement à celles de l'or et les métaux de base. Ainsi, le fluide qui se sépare ne transporte pas les ÉGP à l'exception du front de résorption des sulfures. La migration de fluides au-dessus ou en-dessous du front de résorption ne contient que de très peu d'ÉGP en solution. Le taux d'enrichissement d'ÉGP serait donc une fonction de la longueur du déplacement du front chromatographique. Plus sera long le déplacement du front, plus sera élevée la concentration d'ÉGP. Ceci impliquerait que de hauts ratios en ÉGP-S peuvent être produits par un tel mécanisme chromatographique sans avoir recours à de hauts ratios de masse liquide silicaté/liquide sulfuré (valeurs-R).

Un modèle suggérant que la précipitation des ÉGP est contrôlée par le S est proposé par Maier et Barnes (1998). D'après leur modèle, les auteurs indiquent que les concentrations d'ÉGP dans les chromitites, les Reefs contenant des sulfures et les roches silicatées peuvent être modélisées via un fractionnement d'une solution solide monosulfurée (mss) par un fondu sulfuré. Il est suggéré que le fractionnement se

produit par l'inclusion de cristaux mss dans des oxydes de cristallisation précoce et par une filtration sous pression (filter pressing) d'une bonne part du fondu sulfureux fractionné dans la chambre magmatique supérieure. Le fractionnement durant la filtration sous pression peut être le résultat d'un contraste de densité entre mss et le fondu sulfureux.

Les données pétrographiques fournies au cours de l'étude de la section de forage, permettent effectivement d'adhérer au modèle de mélanges de magmas tel que proposé par Kruger et al. (1998). Une augmentation du pourcentage en sulfures dans les échantillons prélevés dans la mélagabbronorite adjacente au Reef accompagnée d'une baisse progressive de l'abondance de ces derniers au fur et à mesure que l'on monte dans la stratigraphie peuvent être remarquées. Kruger et al. 1998 expliquent que la déficience en sulfures de la « Main Zone » indique que les influx du magma qui ont dominé étaient appauvris en sulfures ce qui implique que la quasi-totalité du S qui a précipité par mélange au Merensky Reef était dérivé du liquide résidant et que le liquide entrant était suffisamment riche en SiO_2 pour induire une saturation transitoire des sulfures. La géochimie indiquant que les concentrations en ÉGP sont reliées au taux de S dans toutes unités sauf dans les chromitites et reliées au Cr dans ces dernières (revoir Figure 6) est en accord avec le mécanisme d'intrusion de type « fontaine » suggéré par ce modèle.

7.0 – CONCLUSION

L'étude pétrographique et minéralogique permet une meilleure définition des différentes lithologies et souligne le caractère interstitiel des sulfures. Le changement, vers le haut de la colonne stratigraphique, de textures sub-ophitique à poecilitique, témoigne d'un mélange magmatique. La géochimie des unités du Merensky Reef et des lithologies les bordant indique clairement que les concentrations en ÉGP varient en fonction du S dans toutes les unités à l'exception des chromitite où il semble y avoir un contrôle par le Cr. Ces observations sont en accord avec le modèle de ségrégation des ÉGP provoquée par contamination du magma en place par un fondu felsique introduit par un mécanisme de type « fontaine » (Kruger et al. 1998).

Cependant, une étude approfondie faisant appel à l'ensemble des éléments majeurs, mineurs, traces et ÉGP serait plus appropriée pour pouvoir adhérer correctement à un modèle particulier.

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Wolfgang D. Maier de l'université de Pretoria, Afrique du Sud, ainsi que Impala Platinum Ltd. pour l'accès aux données. Je remercie également MM. Jean-Philippe Gobeil et Richard Lechasseur pour les analyses, M. Jean Lafrance pour son soutien technique et M. Adam Nagy pour la correction du texte. Je tiens finalement à exprimer ma gratitude envers Mme Sarah-Jane Barnes pour son support tout au long de ce projet.

Références

- BARNES, S.-J. et FRANCIS, D.M. 1995. The distribution of platine-groupe elements, nickel, copper and gold in the Muskox layered intrusion, NWT, Canada. *Economic Geology*, **90** : 135-154.
- BARNES, S.-J., NALDRETT, A.J. et GORTON, M.P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, **53** : 303-323.
- BÉDARD, L.P. et BARNES, S.-J. 1990. Instrumental neutron activation analysis by collecting only one spectrum; results for international geochemical reference samples. *Geostandards Newsletter*, **14(3)** : 479-484.
- BOUDREAU, A.E. 1998. Chromatographic separation of the platinum-group elements during degassing of a compacting, solidifying cumulate pile. Abstracts-8th International platinum symposium, Symposium series S18 : 41-43.
- GUILBERT, J.M. et PARK, C.F. 1986. The geology of ore deposit. W.H., Freeman. New York, 985p.
- IMPALA PLATINUM LTD. 1998. Visitors bBrochure – Technical Visit on Thursday, 2 July 1998 – 8th International Platinum Symposium, Geology Department, 11p.
- KRUGER, F.J. et SCHOENBERG, R. 1998. Isotope evidence for the origin of PGE rich Bushveld chromitites and the Merensky Reef by felsic magma mixing. Abstracts-8th International platinum symposium, Symposium series S18 : 185-188.
- LAVOIE, C. 1992. Évaluation du processus analytique pour les éléments du groupe du platine et or dans les laboratoires géochimiques de l'UQAC. Projet de fin d'études non-publié, Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, 50p.
- LEEB-DU TOIT, A. 1986. The Impala platinum mines. *Mineral Deposits of Southern Africa* : 1091-1106.
- MAIER, W.D. et BARNES, S.-J. 1998. Platinum-groupe elements of the Lower, Critical, and Main Zones of the Bushveld Complex. Abstracts-8th International platinum symposium, Symposium series S18 : 221-223.
- SHARPE, M.R. 1985. Strontium isotope evidence for preserved density stratification in the main zone of the Bushveld Complex. *Nature*, **316** : 119-126.
- STRECKEISEN, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews. International Magazine for Geo-Scientists*. Amsterdam, **12** : 1-33.

TREDOUX, M., LINDSAY, N.M., DAVIES, G. et McDONALD, I. 1995. The fractionation of platinum-group element in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism. *South Africa Journal of Geology*, **98(2)** : 157-167.

VERMAAK, C.F. 1995. The platinum group metals – a global perspective. Mintek, Randburg, South Africa, 247p.

VERMAAK, C.F. et VON GRUENEWALDT, G. 1986. Introduction to the Bushveld Complex. *Mineral Deposits of Southern Africa* : 1021-1029.

WALRAVEN, F., ARMSTRONG, R.A. et KRUGER, F.J. 1990. A chronostratigraphic framework for the north-central Kaapvaal craton, the Bushveld Complex and the Vredefort structure. *Tectonophysics*, **171** : 23-48.

Annexe

Tableaux synthèses de compositions minéralogiques
et
Fiches de descriptions pétrographiques

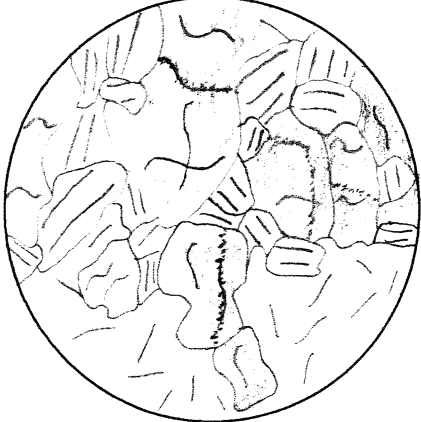





	IM-2	IM-4*	IM-6	IM-8	IM-10	IM-12	IM-14*	IM-16
OPX	17	38	24	50	40	40	38	20
CPX	30	25	30	15	20	30	30	45
Plagioclases	45	30	35	25	33	16	20	25
Biotite	3	5	4	5	2	8	5	5
Pinnite						5	5	4
opaques	5	2	7	5	5	1	2	1

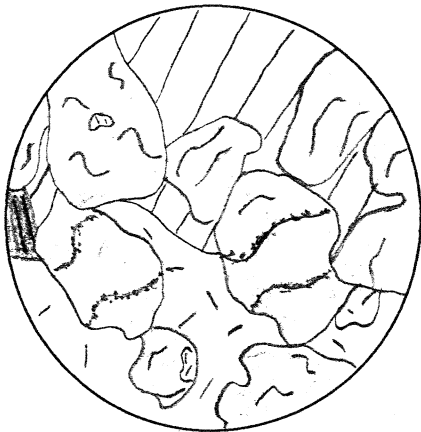
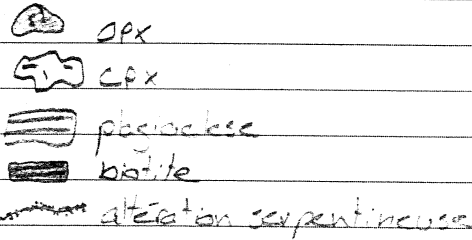
	IM-29*	IM-31	IM-33	IM-35	IM-37
OPX	25	25	20	20	17
CPX	5	10	10	7	7
Plagioclases	70	64	65	69	72
Biotite	Tr.	Tr.	Tr.	Tr.	Tr.
Pinnite	Tr.	Tr.	3	3	3
opaques	Tr.	1	1	1	1

* description pétrographique complète

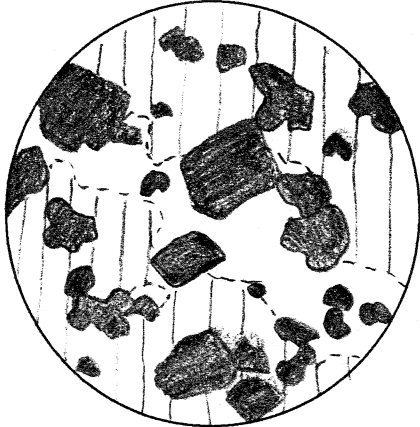
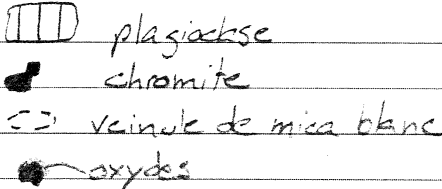
	IM-22 ₁ *	IM-22 ₂ *	IM-23*	IM-24*	IM-25*
OPX	45		38	20	20
CPX	24				
Plagioclases	20	55	60	40	76
Biotite	1	Tr.		Tr.	Tr.
Pinnite	Tr.	5 (en veinule de mica blanc)	Tr.		Tr.
oxyde	Tr.	Tr.			
opaques	10	40	2	40	4

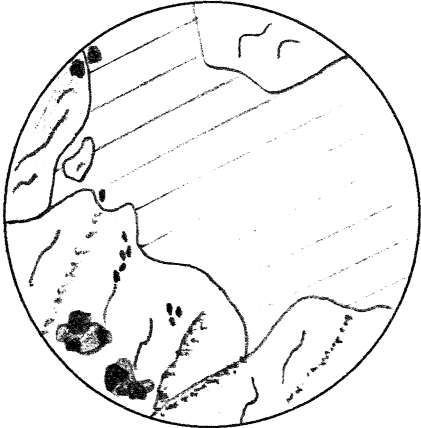
* description pétrographique complète

Échantillon No. IM-4		
Description mégascopique :		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX (bronzite)	38	≈ 1,5 à 15 mm; hypidiomorphe; fractures; inclusion de CPX
CPX (pigeonite)	25	≈ 2 cm; L.N. léger pléochroïsme brun pâle; L.P. couleur de biréfringence du 2 ^{ème} ordre, quasi-uniaxe
Plagioclases (An 55)	30	≈ 0,2 à 3 mm; hypidiomorphe
Biotite	5	≈ 0,5 à 1,5 mm; hypidiomorphe
Minéraux opaques	2	≈ 0,5 à 3 mm; 2 sortes dont une xénomorphe et interstitielle et l'autre hypidiomorphe de forme cubique en inclusion dans la biotite et les OPX
Schéma		Légende
 <p>Échelle :  1,5 mm</p>		 OPX  alteration serpentine  plagioclase  CPX
		Texture : poecilitique
<p>Remarques: Les CPX sont généralement en inclusion (≈ 0,1 mm) dans les OPX. Toutefois, un gros grain de CPX (≈ 2 cm) fait une texture poecilitique avec les OPX et plagioclases. Les OPX et plagioclases sont hypidiomorphes granulaires entre eux. Les opaques sont principalement constitués de sulfures (85%) et de chromite (15%). Les sulfures se subdivisent en chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite dans un rapport de 2 : 2 : 1. La chalcopyrite a des bordures nettes avec les autres sulfures tandis que la pyrrhotite et la pentlandite montrent des bordures ondulées ce qui traduirait une cristallisation ± simultanée. En inclusion dans la chalcopyrite il a des grains hautement réfléchissant (< 0.1mm); PGM ? Les sulfures sont généralement dans les fractures des OPX ou dans les veinules d'altération qui traversent la lame-mince. Ces veinules sont de composition chlorite-micas blancs.</p>		
<p>Nom : gabbronorite</p>		

Échantillon No. IM-14		
Description mégascopique :		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX (bronzite)	38	≈ 1 à 7mm; hypidiomorphe, fracturés, contenant parfois des inclusions de clinopyroxènes.
CPX (pigeonite)	30	≈ 0,3 à 0,7mm mais un grain fait plus de 2cm formant une texture ophitique avec avec OPX
Plagioclases	20	≈ 0,7 à 15 mm; pseudo-hypidiomorphe; texture poecilitique avec OPX
Biotite	5	≈ 1,5 à 2,5 mm; hypidiomorphe; couleur rouge très foncée (ferrugineuse); située en bordure des OPX
Pinite	5	≈ 0,3mm; associé e à la biotite
Minéraux opaques	2	≈ 1,5mm; principalement sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite) interstitiels; et chromite idiomorphe ≈ 0,1mm en traces.
Schéma		Légende
 <p>Échelle : 1,2 mm</p>		 <p>OPX</p> <p>CPX</p> <p>plagioclase</p> <p>biotite</p> <p>altération serpentineuse</p>
		Texture : poecilitique
<p>Remarques: Les OPX sont généralement peu ou pas altérés (serpentine). La biotite est associée aux OPX altérés. La biotite est concentrée par endroit où elle fait une bordure aux OPX. Les CPX sont rares et sont en inclusions dans OPX sauf pour le gros grain de plus de 2cm qui fait une belle texture ophitique avec les OPX. Les sulfures sont dans des proportions respectives de 2 : 2 : 1 de chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite. La pentlandite est fracturée.</p>		
<p>Nom : mélagabbronrite</p>		

Échantillon No. IM-22 (1 ^{ère})		
Description mégascopique : La lame-mince couvre 2 lithologies : une pyroxénite grossièrement grenue avec des OPX (bronzite) de 3 à 5 mm ($\approx 80\%$), des plagioclases interstitiels de 3 à 10 mm ($\approx 15\%$), des sulfures interstitiels aux OPX de 0,5 à 2 mm ($\approx 3\%$) et des grains de chromite de taille < 1 mm ($\approx 2\%$); et un lit de chromite composé de grains de chromites qui varient de 0,3 à 3 mm, de plagioclases interstitiels de 0,3 à 2 mm ($\approx 63\%$) et de sulfures de 0,2 à 1 mm ($\approx 7\%$). La pyroxénite équivaut à 80% de l'échantillon tandis que le lit de chromite occupe les 20% qui restent.		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX (bronzite)	45	≈ 5 à 10 mm; L.N. faible pléochroïsme brun pâle, clivage 010 ; L.P. parfois mâclé : inclusion de CPX
CPX (pigeonite)	24	≈ 5 à 10 mm
Plagioclases	20	≈ 3 à 10 mm et plus; mâcles s'apparentent parfois à celles de la cordierite
Biotite	1	$\approx 0,5$ à 2 mm; idiomorphe; L.P. biréfringence parfois très élevée
Pinite	tr.	$\approx 0,1$ à 0,4 mm; léger pléochroïsme vert; L.P. biréfringence de la fin du 2 ^{ème} ordre
Minéraux opaques	10	2 sortes : une xénomorphe, $\approx 0,2$ à 3 mm, sulfures (chalcoppyrite, pyrrhotite, pentlandite) (5%) et l'autre idiomorphe $\approx 0,005$ à 0,9 mm, (chromite) (5%)
Oxydes	tr.	Couleur brun orangé; isotrope
Schéma		Légende
		<p>plagioclase</p> <p>OPX</p> <p>CPX</p> <p>altération serpentineuse</p> <p>sulfures</p> <p>chromite</p>
Échelle :		Texture : poecilitique
Remarques : La bronzite est hypidiomorphe et la texture générale est poecilitique. Des grains de chromite sont regroupés et sont encaissés dans les plagioclases ou en bordure des OPX, rarement à l'intérieur de ceux-ci. Les sulfures sont interstitiels entre les grains d'OPX ou de chromite et sont présents dans un rapport 2:2:1 de chalcoppyrite, pyrrhotite et pentlandite. Environ 15% des OPX présentent une altération serpentineuse sous forme de veinules recoupantes.		
Nom : mélagabbronorite		

Échantillon No. IM-22 (2 ^{ième})		
Description mégascopique :		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
Plagioclases	55	≈ 5 à 10 mm; xénomorphe, double mâcle; L.P. biréfringence dans les jaunes 1 ^{er} ordre
Biotite	tr.	≈ 0,5 mm; hypidiomorphe, associée aux grains de chromite
Minéraux opaques	40	2 sortes : une première hypidiomorphe quasi idiomorphe, ≈ 0,1 à 3 mm, chromite (35%) et l'autre, xénomorphe, interstitiel entre la chromite, sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite) (5%)
Oxydes	tr.	Couleur orangée; associés aux grains de chromite
Veinule de mica blanc	5	< 0,4 mm; L.N. réfringence moyenne, incolore; L.P. biréfringence élevée du 2 ^{ième} ordre, extinction commune
Schéma		Légende
 <p>Échelle : 0,3 mm</p>		 <p>plagioclase chromite veinule de mica blanc oxydes</p>
		Texture : poecilitique
<p>Remarques : Le lit de chromite est encaissé dans des gros grains (≈ 1 cm et plus) de plagioclases. Les grains de chromite sont généralement de forme cubique et les plus gros sont rencontrés au contact avec la pyroxénite. Au centre du lit on retrouve une veinule d'environ 0,1 à 0,7 mm d'épaisseur. Cette veinule semble composée de micas blancs parfois bordée de rares grains de chloritoïde (< 0,4 mm). Les sulfures sont quasi absents de cet horizon riche en chromite. Les sulfures sont retrouvés dans des proportions respectives de 2 : 2 : 1 de chalcopyrite, pyrrhotite et pentlandite.</p>		
<p>Nom : chromitite</p>		

Échantillon No. IM-23		
Description mégascopique : Roche homogène de couleur brunâtre foncé, où il est possible de voir des OPX (bronzite) et des plagioclases. Une texture poecilitique des OPX dans les plagioclases est visible avec un plagioclase situé au centre de la lame mince ($\approx 2,5$ cm). La granulométrie est grossière. Il y a des sulfures interstitiels et le plus gros grain (≈ 3 mm) se retrouve en bordure d'un OPX et du gros plagioclase. Quelques grains de chromite se concentrent près des OPX.		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX	38	≈ 1 à 2 cm; inclusions de CPX le long du clivage, altération serpentiniteuse
CPX		
Plagioclases	60	≈ 2 à 4 cm
Pinite	tr.	$\approx 0,4$ mm; pléochroïque vert, se retrouve en inclusions dans OPX; L.P. biréfringence élevée
Minéraux opaques	2	2 sortes : la première, xénomorphe de taille $\approx 0,05$ à $0,3$ mm, sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite) et l'autre, idiomorphe (cubique), de taille $\approx 0,4$ mm, chromite.
Schéma		Légende
		<p>⊖ OPX</p> <p>▨ plagioclase</p> <p>..... altération serpentiniteuse</p> <p>••• chromite</p> <p>•• oxides</p>
Échelle :		Texture : poecilitique
Remarques : Les OPX (bronzite) sont peu altérés et l'altération serpentiniteuse semble suivre les cassures dans le minéral. Les inclusions sont selon le plan de clivage. Les grains de chromite sont plus gros lorsqu'ils sont dans les OPX (près des craquelures) et sont parfois accompagnés d'une altération ferrugineuse. Les minéraux opaques sont dans un rapport 5 :1 chromite vs sulfures. Les grains de chromite sont retrouvés en inclusion dans les grains d'OPX et les sulfures suivent l'altération en serpentine des OPX.		
Nom : norite		

Échantillon No. IM-24

Description mégascopique : Lit de chromite moyennement grenu. Les grains de chromite sont contenus dans les pyroxènes et plagioclases. Des sulfures interstitiels avec la chromite sont présents. La lame-mince montre aussi une partie de l'échantillon IM-23, elle ne fera toutefois pas partie de la description.

Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX	20	≈ 5 à 15 mm; fracturés et altérés en serpentine
CPX		
Plagioclases	40	≈ 2 à 12 mm
Biotite	tr.	≈ 0,3 mm; associée aux sulfures
Minéraux opaques	40	2 sortes : la première, ≈ 0,2 à 3 mm, hypidiomorphe et contient parfois des inclusions, chromite (≈ 38%) et l'autre, ≈ 0,3 à 0,7 mm, xénomorphe, interstitiel entre les grains de chromite ou en inclusion, sulfures (≈ 2%; chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite)

Schéma

Légende

Échelle : 1,5 mm

Texture : poecilitique

Remarques : Les grains de chromite sont poecilitique avec les plagioclases et leur forme varie de parfaitement cubique à xénomorphe. Même chose pour les grains qui se retrouvent dans les OPX dont la forme est mieux préservée et la taille plus petite. Ils semblent suivre les fractures et ne contiennent pas d'inclusions. Une veinule d'altération de micas blancs traverse la lame-mince et fracture les grains de chromite sur son passage (période d'altération hydrothermale??). Certains sulfures sont associés à cette veinule mais la majorité de ceux-ci sont interstitiels ou en inclusion dans les grains de chromite. Dans les plus gros sulfures il y a un minéral fortement réfléchissant de la taille de quelques microns (PGM?).

Nom : chromitite

Échantillon No. IM-25

Description mégascopique : Roche de couleur gris moyen de granulométrie moyenne à grossière avec des pyroxènes (≈ 3 mm) disséminés dans une matrice de plagioclases. Il y a moins de 5% de sulfures interstitiels entre les pyroxènes. Le haut de la lame-mince intercepte une partie de l'échantillon IM-24. Le lit de chromite ne sera pas considéré dans la description.

Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX	20	$\approx 0,5$ à 8 mm; hypidiomorphe, pléochroïme brun pâle, fracturés
CPX		
Plagioclases	78	$\approx 0,2$ à 3,5 mm; hypidiomorphe
Biotite	tr.	$\approx 0,3$ mm; hypidiomorphe, altéré en chl ??? (pinnite?)
Mica blanc	tr.	$\approx 0,2$ mm; hypidiomorphe à xéno...
Minéraux opaques	2	$\approx 0,2$ à 3 mm; interstitiel entre les grains ou dans les fractures des OPX, sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite)

Schéma**Légende**


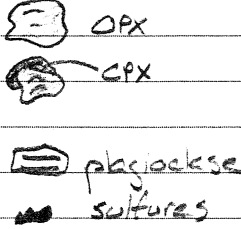
Échelle : $\underline{\hspace{1.5cm}}$ 1,5mm

- OPX
- plagioclase
- sulfures

Texture : sub-ophitique

Remarques : L'altération des OPX en serpentine recouvre le centre des grains (remplacement massif ?) pour ne laisser que des textures relique d'OPX en bordures. Elle apparaît aussi sous forme de veinules parcourant les OPX. Les sulfures sont xénomorphes et interstitiels ou en inclusions dans OPX et sont dans un rapport 1 : 1 : 2 de chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite. Une veinule de chlorite-micas blancs recoupe la lame-mince et des filonnets recoupent les grains d'OPX et plagioclases. Il semble avoir une transition de chlorite vers micas blancs du bas vers le haut de la lame-mince. À l'approche de IM-24, les OPX se font rares et de tailles plus petites tandis qu'il y a plus de sulfures. La composition minéralogique est presque entièrement des plagioclases à ce stade.

Nom : leuconorite

Échantillon No. IM-29		
Description mégascopique :		
Minéralogie	%	Descriptions microscopiques
OPX (bronzite)	25	≈ 1 à 4 mm; hypidiomorphe, un peu d'altération en serpentine
CPX (pigeonite)	5	≈ 0,1 à 4 mm; en inclusion dans OPX ou fait une texture ophitique avec OPX et plagioclases où le CPX semble interstitiel; L.P. quasi uniaxe
Plagioclases (An 60)	70	≈ 0,5 à 3 mm; hypidiomorphe
Biotite	tr.	≈ 0,2 mm
Pinite	tr.	≈ 0,2 mm; biotitisée par endroit
Minéraux opaques	tr.	≈ 0,1 mm; sulfures (chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite)
Schéma		Légende
 <p>Échelle : 1 mm</p>		 <p>OPX CPX plagioclase sulfures</p>
		Texture : sub-ophitique
<p>Remarques : Une altération en serpentine affect 5% de la lame-mince et se loge dans les fractures des OPX. Les sulfures sont présents dans un rapport de 2 : 1 : 1 de chalcopyrite, pyrrhotite, pentlandite. La pyrrhotite a une bordure commune avec la pentlandite. Les sulfures sont généralement en inclusion dans les OPX.</p>		
<p>Nom : leucogabbronorite</p>		