



le platine

données économiques

description et approche typologique
des principaux gisements

guides de recherche

L. Guilloux
J. Méloux

mars 1987
87 DAM 013 DEX

RESUME

Ce rapport est l'aboutissement d'un travail documentaire sur les éléments du groupe du platine réalisé à la demande de la Direction des activités minières.

Après un rappel des caractéristiques générales des platinoïdes (propriétés, présentations minéralogiques et comportements géochimiques), quelques données essentielles permettent de fixer l'intérêt économique des divers platinoïdes : utilisations, prix, évolution des marchés, principaux pays producteurs.

La répartition mondiale des ressources en platinoïdes est très inégale puisque la production est actuellement assurée pour l'essentiel par deux pays : l'Afrique du Sud et l'URSS. Elle pourrait être sensiblement modifiée lorsque le gisement du Stillwater, aux USA, entrera en production.

Parmi les principaux gisements PGE, nous avons distingué quatre types principaux :

- Les gisements à PGE dominant, avec Ni, Cu et Cr en sous-produits, associés à des complexes stratiformes ultramafiques à mafiques. Ils sont très rares et se limitent à deux exemples. Il s'agit du complexe du Bushveld en Afrique du Sud avec les horizons du Merensky Reef, de l'UG-2 et du Platreef et des gisements du Stillwater aux USA (J.M. Reef et Picket Pin). Les niveaux platinifères sont peu épais (0,5 à 1,0 m) mais très étendus (plusieurs dizaines de kilomètres). Les réserves représentent plusieurs milliards de tonnes au Bushveld avec des teneurs comprises en général entre 3 et 8 g/t. Au Stillwater, les teneurs peuvent être sensiblement plus élevées et atteindre jusqu'à 20-25 g/t.
- Les gisements à PGE en coproduits de minéralisations à Ni-Cu. Ces gisements sont associés à des complexes basiques stratifiés (lopolite) d'âge précambrien (Sudbury, Canada) à triasique (Noril'sk Talnakh). Les tonnages sont très importants mais les teneurs sont toujours inférieures à 10 g/t PGE.
- Les gisements de PGE, en sous-produits de minerais à Ni-Cu, qui sont associés pour la plupart aux volcanites ultramafiques de type komatiitique des greenstone belts archéennes à protérozoïques. Les gisements de Ni de Kambalda (Australie) sont de ce type. Les teneurs en PGE sont faibles, toujours inférieures à 1 g/t.

- Les gisements secondaires, en particulier les placers, ne fournissent que 2 à 3 % de la production totale. La plupart sont alimentés par des complexes alaskéens (placers de l'Oural, de l'Alaska...).

Tous les gisements primaires de PGE sont associés à des roches ultramafiques à mafiques. Les concentrations de PGE font intervenir des processus métallogéniques précoces et complexes, en liaison étroite avec les phénomènes de ségrégation magmatique .

Des évidences de remobilisation hydrothermale sont localement très marquées. Cependant, certains phénomènes hydrothermaux spécifiques sont aujourd'hui fréquemment évoqués pour expliquer la genèse des concentrations économiques.

Quoique proche des éléments de transition Fe, Ni-Cu-Co, les PGE n'ont pas un comportement géochimique identique :

- les uns sont réfractaires (Ru, Ir, Os) : ils sont les premiers à cristalliser principalement sous forme de sulfures (laurite) de très petite taille ; ces sulfures sont ensuite englobés dans les chromites des niveaux chromifères ;
- les autres montrent une tendance hydrolysable (Pt, Pd et Rh) ; souvent associés à l'or et à l'argent, ils se fixent plus tardivement lors de la cristallisation des magmas résiduels et des phénomènes post-magmatiques qui vont donner les dépôts sulfurés à Ni-Cu.

Cette capacité de remobilisation des PGE peut être engendrée par le métamorphisme et/ou un hydrothermalisme pour donner des concentrations de PGE à plus fortes teneurs. La redistribution des PGE implique des transformations notables des roches-mères (serpentinisation) et des roches-hôtes (altération). Les sites de dépôts sont surtout structuraux (accidents majeurs, shear-zones ...). Les minéralisations de remobilisation montrent une signature polymétallique très marquée avec l'association PGE, Au, Ag, Sb, As, Cu, Co, Te ... ; de plus, on observe que les teneurs en PGE sont plus fortes dans les minerais à sulfures disséminés (surtout chalcopyrite) que dans les sulfures massifs.

Aussi, les ensembles ultramafiques à mafiques présentent des potentialités métallifères différentes qui dépendent en grande partie du cadre géodynamique où ils se sont développés et des modifications postérieures liées aux déformations tectoniques qui les ont affectées.

A partir de ces observations et après une revue des caractères géologiques, gîtologiques et métallogéniques des principaux gisements en exploitation et en cours de prospection, il est possible d'envisager pour chaque type de gisement des critères de sélection et des guides de recherche.

Dans les complexes stratifiés de type Bushveld, les critères d'identification de la partie favorable de l'empilement ("zone critique") ont été rappelés avant de préciser les caractères spécifiques des deux types de niveaux minéralisés en PGE : niveau à chromite et niveau à sulfures de Ni-Cu.

Dans les séries volcaniques à komatiites des greenstone belts archéennes et protérozoïques, les sites favorables sont associés à divers types d'intrusions tels que des corps de dunite, des sills différenciés, des complexes annulaires. Des phénomènes hydrothermaux, susceptibles de donner lieu à des remobilisations de préconcentration, et par conséquent, de conduire à des teneurs économiques, peuvent se produire à des emplacements bien particuliers : zones de contact des intrusions avec leur encaissant ; accidents tectoniques de type shear-zone ; base hydrothermalisée de sills différenciés.

Cependant, il faut insister plus particulièrement sur deux types de contextes : les ensembles stratifiés de type Bushveld qui contiennent les gisements les plus importants ; les séries volcaniques ultramafiques à mafiques de greenstone belts antécambriennes où l'on a découvert récemment de nouveaux types de concentrations (Canada).

On retiendra donc surtout que la "vocation platinifère" de certains ensembles volcaniques ultramafiques à mafiques, des greenstone belts archéennes et protérozoïques, semble aujourd'hui beaucoup plus affirmée qu'il ne paraissait. Relativement fréquents dans les zones d'intervention du BRGM, ces ensembles pourraient constituer des objectifs de première importance pour la découverte de gisements de dimensions beaucoup plus modestes que ceux des complexes stratifiés de type Bushveld, mais avec des teneurs qui pourraient être relativement élevées et un minerai associant l'or aux PGE.

Le rapport se termine par un bref bilan de cette étude documentaire et quelques recommandations pour orienter les travaux de prospection de ces gisements dont l'approche, très spécifique, restera difficile tant qu'on n'en maîtrisera pas les techniques.

TABLE DES MATIERES

	page
AVANT-PROPOS	9
1 - IDENTIFICATION	11
1.1. Caractères généraux	11
1.2. Comportement géochimique	11
1.3. Prix	13
2 - REPARTITION DES CONCENTRATIONS EN PLATINE	19
2.1. Pays producteurs	19
2.1.1. Historique	19
2.1.2. Situation actuelle	19
2.1.3. Afrique du Sud	23
2.1.4. URSS	24
2.1.5. Canada	25
2.1.6. Etats-Unis	25
2.1.7. Les autres producteurs	26
2.2. Les principales classifications des gisements	26
2.2.1. Classification de E.F. Stumpfl (Gîtes primaires)	26
2.2.2. Classification en fonction des différents types de complexes ultramafiques et mafiques définis par A.J. Naldrett et L.J. Cabri	27
2.2.3. Classification de B. Henry et P. Chevremont	27
3 - LES PRINCIPAUX GISEMENTS MONDIAUX	31
3.1. Le complexe de Bushveld (RSA)	31
3.1.1. Géologie générale	31
3.1.2. Les horizons platinifères	39
3.1.3. Origine du gisement	45
3.2. Le complexe du Stillwater (USA)	47
3.2.1. Géologie générale	48
3.2.2. L'horizon platinifère du J.M. Reef	54
3.2.3. Origine et découverte du gisement	56
	./.

3.3. Le complexe de Sudbury (Canada)	57
3.3.1. Géologie régionale	57
3.3.2. Les gisements	57
3.3.3. Origine du complexe du Sudbury	67
3.4. Le district de Norils'k (URSS)	67
3.4.1. Géologie régionale	67
3.4.2. Les gisements	71
3.4.3. Origine	75
3.5. Les gisements de Ni (Pt) de Kambalda (Australie)	75
3.5.1. Géologie régionale	75
3.5.2. Les principaux gisements	77
3.5.3. Origine	81
3.6. Les placers	81
3.7. Bilan sur les gisements en exploitation	86
4 - METHODES SPECIFIQUES POUR LA PROSPECTION DES GISEMENTS PRIMAIRES DE PGE	89
5 - PRINCIPAUX CARACTERES DES COMPLEXES ULTRAMAFIQUES A MAFIQUES STRATIFORMES DIFFERENCIES	92
5.1. Critères d'identification des complexes	92
5.2. Critères de position dans la suite pétrologique	93
5.3. Principaux caractères d'identification de la zone critique	93
5.3.1. Principaux caractères d'identification des minéralisations à PGE associées aux niveaux de chromite	95
5.3.2. Principaux critères d'identification des minéralisations sulfurées à PGE	97
5.3.3. Principaux caractères des pipes de dunites	99
6 - PRINCIPAUX CARACTERES DES MINERALISATIONS A PGE ASSOCIEES A DES ZONES DE RIFT	101
6.1. Caractéristiques générales	101
6.2. Caractères favorables	101
7 - LES MINERALISATIONS A PGE ASSOCIEES A DES GREENSTONE BELTS	105
7.1. Les gisements de Ni-Cu et PGE des ensembles komatiitiques	105

7.2. Les gisements de Ni-Cu associés aux sills ultramafiques différenciés	111
7.3. Les gisements de Ni-Cu associés à des intrusions dunitiques de faibles dimensions	119
7.4. Les gisements de PGE associés aux complexes annulaires	125
8 - LES GISEMENTS DE Ni-Cu LIES AUX INTRUSIONS CIRCONSCRITES DEFORMEES	133
8.1. Principaux caractères d'identification	133
8.2. Type de gisement associé	133
9 - LES COMPLEXES DE TYPE ALASKEEN	137
9.1. Principaux caractères d'identification	137
9.2. Les principales minéralisations associées aux complexes alaskéens	137
9.3. Les complexes alaskéens : source de minéralisations à PGE	144
10 - LES COMPLEXES OPHIOLITIQUES	147
10.1. Place des minéralisations à PGE dans la suite ophiolitique	147
10.2. Les PGE associés aux minéralisations chromifères	147
10.3. Les PGE associés aux minéralisations sulfurées	149
10.4. Méthodes d'approche pour la recherche de minéralisations à PGE dans les complexes ophiolitiques	152
10.5. Conclusions	153
11 - AUTRES GISEMENTS POSSIBLES DE PGE : LES KUPFERSCHIEFER	155
CONCLUSIONS GENERALES	157
BIBLIOGRAPHIE	169
LISTE DES FIGURES	189
LISTE DES TABLEAUX	192
ANNEXE 1 - MINERALOGIE DES PGE	
ANNEXE 2 - LES SERIES KOMATIITIQUES : PRINCIPAUX CARACTERES D'IDENTIFICATION	
ANNEXE 3 - CLASSIFICATION DES SPINELLES	

AVANT - PROPOS

Dans la période actuelle de récession, le platine est avec l'or l'une des matières premières dont les prix ne se sont pas trop dégradés ; ils sont même en hausse depuis un peu plus d'un an, bien que les cours actuels (564 dollars/onçe troy en septembre 1986) soient loin d'atteindre les sommets de l'année 1980 (900 dollars en janvier).

L'utilisation généralisée du platine dans les pots catalytiques des voitures, destinés à réduire les nuisances des gaz d'échappement, ne fera qu'accroître la consommation de ce métal (actuellement, environ 10 t de platine et palladium, par an). La France est totalement dépourvue de ce métal et est sous la dépendance totale des deux seuls grands producteurs, l'URSS et l'Afrique du Sud, qui contrôlent la quasi-totalité de la production minière.

Face à cette situation, la direction de la DAM a demandé de lui présenter un bilan sur l'action du BRGM et son savoir-faire dans ce domaine particulier. C'est dans ce sens qu'ont été recueillis des faits et des idées pour les ordonner et les présenter à ceux qui ont pouvoir de décision.

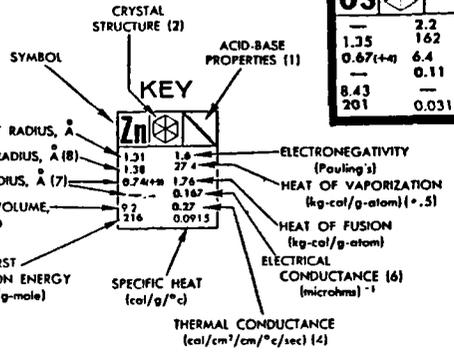
L'enquête a été structurée en plusieurs parties et comporte :

- l'identification du produit,
- la localisation des pays producteurs et des types de gisements,
- les recherches de critères de sélection des zones à prospector et des guides de recherche en particulier pour de nouveaux types de gisements.

PERIOD

GROUP IA

1	1.00797 1 -252.7 -259.2 0.071 H Hydrogen	IIA																
2	3 4.0015 1320 108.3 0.53 ³ Li Lithium	4 9.0122 2770 1777 1.85 ⁴ Be Beryllium																
3	11 22.9898 892 97.8 0.97 ¹¹ Na Sodium	12 24.312 1107 650 1.74 ¹² Mg Magnesium																
4	19 39.102 750 63.7 0.86 ¹⁹ K Potassium	20 40.08 1440 1539 1.55 ²⁰ Ca Calcium	21 44.956 2730 1668 3.0 ²¹ Sc Scandium	22 47.90 3260 1668 4.51 ²² Ti Titanium	23 50.942 3430 1900 6.1 ²³ V Vanadium	24 51.996 2665 1875 7.19 ²⁴ Cr Chromium	25 54.938 2130 1900 7.43 ²⁵ Mn Manganese	26 55.847 3000 1536 7.06 ²⁶ Fe Iron	27 58.933 2900 1495 8.9 ²⁷ Co Cobalt	28 58.71 2730 1083 8.9 ²⁸ Ni Nickel	29 63.54 2895 1083 8.96 ²⁹ Cu Copper	30 65.37 906 119.5 7.14 ³⁰ Zn Zinc	31 69.72 2237 29.8 5.91 ³¹ Ga Gallium	32 72.59 2830 937.4 5.32 ³² Ge Germanium	33 74.922 413 817 5.72 ³³ As Arsenic	34 78.96 685 479 4.79 ³⁴ Se Selenium	35 79.909 36 -7.2 3.12 ³⁵ Br Bromine	36 83.80 -132 -137.3 2.6 ³⁶ Kr Krypton
5	37 85.47 888 36.9 1.53 ³⁷ Rb Rubidium	38 87.62 1380 1857 2.6 ³⁸ Sr Strontium	39 88.905 2927 1509 4.47 ³⁹ Y Yttrium	40 91.22 3580 1857 6.49 ⁴⁰ Zr Zirconium	41 92.906 3300 2415 8.4 ⁴¹ Nb Niobium	42 95.94 3560 2610 10.3 ⁴² Mo Molybdenum	43 (99) - 2200 11.5 ⁴³ Tc Technetium	44 101.07 4900 2500 12.2 ⁴⁴ Ru Ruthenium	45 102.905 4500 1966 12.4 ⁴⁵ Rh Rhodium	46 106.4 3980 1532 12.0 ⁴⁶ Pd Palladium	47 107.870 2210 960.8 10.5 ⁴⁷ Ag Silver	48 112.40 765 320.9 8.65 ⁴⁸ Cd Cadmium	49 114.82 2000 156.2 7.31 ⁴⁹ In Indium	50 118.69 2270 231.9 7.30 ⁵⁰ Sn Tin	51 121.75 1380 630.3 6.62 ⁵¹ Sb Antimony	52 127.60 989.8 449.5 6.24 ⁵² Te Tellurium	53 126.904 183 113.7 4.94 ⁵³ I Iodine	54 131.30 -108.0 -111.9 3.06 ⁵⁴ Xe Xenon
6	55 132.905 690 267 1.90 ⁵⁵ Cs Cesium	56 137.34 1640 920 4.17 ⁵⁶ Ba Barium	57 138.91 3470 920 6.17 ⁵⁷ La Lanthanum	72 178.49 3400 2221 13.1 ⁷² Hf Hafnium	73 180.948 3425 2996 16.6 ⁷³ Ta Tantalum	74 182.85 3920 3410 19.3 ⁷⁴ W Wolfram	75 186.2 3900 3180 21.0 ⁷⁵ Re Rhenium	76 190.2 5300 2700 22.6 ⁷⁶ Os Osmium	77 192.2 5300 2454 22.3 ⁷⁷ Ir Iridium	78 195.09 4330 1769 21.4 ⁷⁸ Pt Platinum	79 196.967 2970 1063 19.3 ⁷⁹ Au Gold	80 200.59 357 -38.4 13.6 ⁸⁰ Hg Mercury	81 204.37 1457 303 11.4 ⁸¹ Tl Thallium	82 207.19 1725 327.4 9.8 ⁸² Pb Lead	83 208.980 1360 271.3 9.8 ⁸³ Bi Bismuth	84 (210) - 254 19.3 ⁸⁴ Po Polonium	85 (210) - 209 10.8 ⁸⁵ At Astatine	86 (223) - - - ⁸⁶ Rn Radon
7	87 (223) - - - ⁸⁷ Fr Francium	88 (226) - - - ⁸⁸ Ra Radium	89 (227) - - - ⁸⁹ Ac Actinium	90 232.038 3850 1750 11.7 ⁹⁰ Th Thorium	91 (231) - - - ⁹¹ Pa Protactinium	92 238.04 3818 1132 19.07 ⁹² U Uranium	93 (237) - - - ⁹³ Np Neptunium	94 (243) - - - ⁹⁴ Pu Plutonium	95 (243) - - - ⁹⁵ Am Americium	96 (247) - - - ⁹⁶ Cm Curium	97 (247) - - - ⁹⁷ Bk Berkelium	98 (251) - - - ⁹⁸ Cf Californium	99 (254) - - - ⁹⁹ Es Einsteinium	100 (253) - - - ¹⁰⁰ Fm Fermium	101 (256) - - - ¹⁰¹ Md Mendelevium	102 (254) - - - ¹⁰² No Nobelium	103 (257) - - - ¹⁰³ (Lw) See note 3 (Lawrencium)	



(I) A = Acidic oxide
B = Basic oxide
A/B = Amphoteric oxide

Ru	A	Rh	A/B	Pd	B	Ag	A/B
1.34 0.69(+3) 8.3 173	2.2 148 6.1 0.10 0.057	1.34 0.86(+2) 8.3 178	2.2 127 5.2 0.22 0.059	1.37 0.50(+3) 8.9 192	2.2 90 4.0 0.093 0.17 0.058	1.53 1.44 1.26(+1) 10.3 175	1.9 60.7 2.70 0.616 0.98 0.056
Os	A	Ir	B	Pt	B	Au	A/B
1.35 0.67(+4) 8.43 201	2.2 162 6.4 0.11 0.031	1.36 0.66(+4) 8.54 212	2.2 152 6.6 0.189 0.031	1.38 0.52(+2) 9.10 207	2.2 122 5.2 0.095 0.17 0.032	1.50 1.44 1.37(+1) 10.2 213	2.4 81.8 3.03 0.42 0.71 0.031

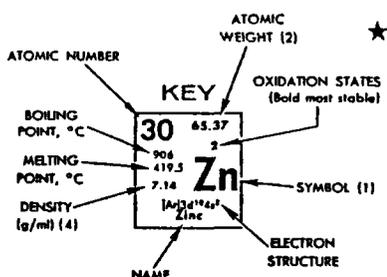
(2) Cubic, face centered; Cubic, body centered; diamond; cubic;
hexagonal; rhombohedral; tetragonal; orthorhombic; monoclinic

(3) Proposed; not officially accepted (4) At room temperature. (5) At boiling point.
(6) From 0° to 20°C (7) Ionic (crystal) radii for coordination number 6.
(8) Metallic radii for coordination number of 12.

INERT GASES

2	4.0026 -268.9 -269.7 0.126 ² He Helium
---	--

III A	IVA	VA	VIA	VII A	VIII	IB	II B										
5 10.811 2450 640 2.34 ⁵ B Boron	6 12.0111 4830 3727.9 2.26 ⁶ C Carbon	7 14.0067 2853.42 -195.8 -210 0.81 ⁷ N Nitrogen	8 15.9994 -183 -218.8 1.14 ⁸ O Oxygen	9 18.9984 -188.2 -198.2 1.11 ⁹ F Fluorine	10 20.183 -244 -248.6 1.20 ¹⁰ Ne Neon	13 26.9815 2450 640 2.70 ¹³ Al Aluminum	14 28.086 2800 1410 2.33 ¹⁴ Si Silicon	15 30.9738 444.6 44.2 1.82 ¹⁵ P Phosphorus	16 32.064 444.6 119.0 2.07 ¹⁶ S Sulfur	17 35.453 -34.7 -101.0 1.56 ¹⁷ Cl Chlorine	18 39.948 -185.8 -189.4 1.40 ¹⁸ Ar Argon	31 69.72 2237 29.8 5.91 ³¹ Ga Gallium	32 72.59 2830 937.4 5.32 ³² Ge Germanium	33 74.922 413 817 5.72 ³³ As Arsenic	34 78.96 685 479 4.79 ³⁴ Se Selenium	35 79.909 36 -7.2 3.12 ³⁵ Br Bromine	36 83.80 -132 -137.3 2.6 ³⁶ Kr Krypton



NOTES:
(1) Black — solid.
Red — gas.
Blue — liquid.
Outline — synthetically prepared.
(2) Based upon carbon - 12. () indicates most stable or best known isotope.
(3) Proposed; not officially accepted
(4) Values for gaseous elements are for liquids at the boiling point.

Tableau 1 - Tableau périodique des éléments : position des six éléments du groupe du platine (PGE)

1 - IDENTIFICATION

1.1. - CARACTERES GENERAUX

Le platine fait partie d'un groupe de six métaux* qui se caractérisent par des propriétés bien particulières. Ce sont des métaux rares, lourds (l'osmium étant le plus lourd de tous les métaux), qui ont des points de fusion et d'ébullition très élevés ; ainsi celui de l'osmium atteint un tel niveau que ce métal est difficilement usinable. Ils offrent une grande résistance à la corrosion car ils ne s'oxydent ni à l'air ni dans l'eau et sont difficilement attaquables par les acides. Ils sont également de bons conducteurs et possèdent un pouvoir catalytique qui se maintient à haute température. Cette dernière propriété leur vaut d'être très appréciés pour le traitement des gaz polluants émis par les pots d'échappement des voitures.

1.2. - Comportement géochimique

Au sein du tableau de classification périodique des éléments (tableau 1), ces 6 métaux du groupe du platine forment bloc et sont entourés des éléments avec lesquels ils présentent le plus d'affinité : Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Ag et Au.

De ces positions, il résulte en particulier que les PGE ont des propriétés électroniques et chimiques analogues à celles des éléments métalliques de la triade Fe-Co-Ni (tableau 2).

Tous ces métaux liés aux roches ultramafiques à mafiques ont des rayons atomiques voisins, compris entre 1,24 et 1,43 Å.

* Les six métaux du groupe du platine peuvent porter des noms variés : platinides, platinoïdes, métaux de la mine du platine. Actuellement, on a tendance à les désigner par des sigles : PGE (Platinum Group Elements), PGM (Platinum Group Metals).

	Platine	Palladium	Iridium	Rhodium	Osmium	Ruthénium	Or	Argent
Symbole	Pt	Pd	Ir	Rh	Os	Ru	Au	Ag
Masse atomique	195,09	106,4	192,2	102,9	190,2	101,1	196,97	107,87
Densité (20°C) (g/cm ³)	21,45	12,02	22,65	12,41	22,57	12,45	19,32	10,49
Point de fusion (°C)	1 772	1 554	2 447	1 963	3 050	2 314	1 064,43	961,93
Point d'ébullition (°C)	3 800	2 900	4 500	3 700	5 000	4 100	2 808	2 210
Chaleur spécifique (J/kg.K)	134	242,8	129,8	247	129,8	230	129,8	234,5
Conductivité thermique (0-100°C) (W/m.K)	71,2	75,4	146,5	151	87,9	104,5	293	418,7
Résistivité électrique (20°C) (μΩ cm)	9,85	9,93	4,71	4,33	8,12	6,71	2,36	1,59

Tableau 2 - Propriétés des métaux précieux (PGE + Au + Ag) d'après le Comptoir Lyon Alemand Louyot (1986).

	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Pt	117	124,2	132,5	123,0	127,1	152,2	185,0	169,9	168,4	167,7	237,1	351,8	436,8	475,0	333,2	425,9
Pd	47,1	32,20	35,9	35,2	48,8	77,3	126,	70,4	47,6	49,7	62,8	119,2	188,2	94,6	67,4	138,3
Rh	252,2	231,5	210,8	197,9	196,5	273,9	646,9	288,5	313,8	411,3	533,2	776,6	728,5	501,9	327,7	316,0
Au	45,0	45,0	45,0	45,0	49,8	56,7	57,5	47,6	37,7	35,8	34,5	33,4	36,1	33,2	26,7	29,7
Os	237,5	234,4	212,5	200,4	179,2	156,7	152,5	152,5	134,2	132,5	132,5	132,5	132,5	132,5	132,5	135,8
Ir	190,7	172,3	154,1	146,5	361,2	374,20	731,7	423	278,1	264,	246,3	285	651,7	535,4	367,5	318,3

Tableau 3 - Moyennes annuelles des prix "dealers" aux USA pour les six métaux du groupe du platine (en \$/oz.).

Les PGE sont soit à l'état natif, soit sous forme d'alliages, et sont fréquemment magnétiques. Les minéraux platinifères, en particulier les sulfures, se prêtent volontiers au procédé de flottation.

1.3. - PRIX

En raison de leurs prix, les métaux du groupe du platine sont classés avec l'or et l'argent dans les métaux précieux. Il n'existe pas de cotation pour le minerai et les prix sont donnés seulement pour le métal, et exprimés en US \$/oz (dollars US/once avec 1 once = 31,1 g).

Le platine et le palladium, qui sont de loin les deux métaux du groupe les plus abondants dans la nature et les plus utilisés, puisqu'ils représentent à eux deux 90 % de l'ensemble de la consommation des six PGE, sont cotés tous les jours au New York Mercantile Exchange.

Pour l'ensemble des six métaux, il existe deux prix, celui du producteur (producer price) et celui du négociant (dealer price). Ce dernier est fixé par les sociétés de négoce qui commercialisent la très grande majorité des métaux du groupe du platine. Il dépend de l'équilibre offre-demande et notamment des ventes russes (ventes épisodiques de stock) ; il est soumis à des fluctuations parfois spectaculaires.

Signalons que les métaux du groupe du platine sont commercialisés sous des formes différentes :

- platine : lingots de 5 kg ou plaques de 50 onces,
- palladium : lingots de 2,8 à 7,5 kg,
- iridium : poudre, plus rarement lingots,
- rhodium : éponge ou poudre,
- osmium : éponge,
- ruthénium : poudre.

Mining Journal (édition hebdomadaire) publie régulièrement le prix de 5 PGE sur le marché de Londres. Pour l'année 1986, entre le 3 janvier et le 11 avril, les prix des principaux métaux précieux (en dollars/once troy) sont passés sur le marché de Londres de :

Pt = 342 à 424	Os = 950
Pd = 95 à 197	Ir = 430 à 450
Rh = 1125 à 1150	Au = 327 à 338

Dans une première approche très grossière, on peut retenir qu'actuellement :

- le prix du platine est légèrement supérieur à celui de l'or ;
- le palladium est presque 4 fois moins cher que le platine ;
- le rhodium est actuellement le métal le plus cher ; encore peu demandé (4 à 5 t/an), il est néanmoins l'objet d'une hausse très importante (plus de 1000 dollars/once), qui traduit l'anticipation des spéculateurs sur le marché face à la future demande de Rh pour les pots catalytiques trois voies en Europe ;
- les prix des autres métaux du groupe n'interviennent que très peu en raison de leur faible incidence due à une consommation restreinte ; ils restent néanmoins élevés et supérieurs à ceux du platine pour osmium et iridium.

Rappelons que la consommation annuelle de l'iridium, du ruthénium et de l'osmium reste faible Ir = 2 à 3 t/an, Ru = 6 t/an et Os = 200 kg/an par comparaison à celle du platine et du palladium (plus de 80 t/an pour chacun).

Evolution des prix

Entre les années 1983 et 1986, les moyennes annuelles des prix (en \$/oz) sur le marché libre aux USA ont été les suivantes pour les six métaux du groupe (M. Jaujou, 1985) (tableau 3).

L'observation des courbes de prix des différents métaux précieux (PGE et Au) montre assez clairement que :

1- Depuis plus de 20 ans, jusqu'à la fin de l'année 1983, la majorité des PGE (Pt, Pd, Rh et Ir) ont des prix qui évoluent de manière parallèle avec trois "pics" très caractéristiques : en 1968, année de la libération du cours de l'or, fixé depuis 1935 à 35 dollars/once ; en 1974 année marquée par une hausse commune à la plupart des métaux, et en 1980 année où les cours du dollars US ont atteint leur niveau le plus bas, soit 1 dollars US = 4 francs français).

Le tableau 4 indique la hauteur des trois "pics" des prix courants des négociants (en dollars/once) :

Tableau 4 - Prix maximum des éléments Pt, Pd, Rh et Ir en \$/oz.

	1968	1974	1980	Cours au 31.01.86
Pt	300	230	900	376
Pd	55	145	220	106
Rh	250	720	800	1 120
Ir	200	820	800	

Quant aux deux autres PGE (Os, et Ru), ils ont connu depuis 1968 une baisse quasi continue de leurs prix (tant ceux des producteurs que des négociants), jusqu'à fin 1983.

Depuis le début de l'année 1984, deux métaux, l'osmium et le rhodium se singularisent. Le premier, régulièrement stable depuis 1973, est passé en 1984 de 120 dollars/once à près de 1 000 dollars. Le deuxième, le rhodium, partant d'un niveau un peu plus haut (environ 300 dollars) a allègrement franchi le cap des 1 000 dollars. Au début de l'année 1986, les prix de ces deux métaux tournaient encore autour de 1 000 dollars/once. Le platine et le palladium n'ont pas emprunté les mêmes chemins, car tous deux ont suivi les fluctuations de l'or, c'est-à-dire baisse régulière des cours depuis le début 1983, avec une remontée amorcée début 1985, qui se poursuit encore.

dollars par once troy

dollars par once troy

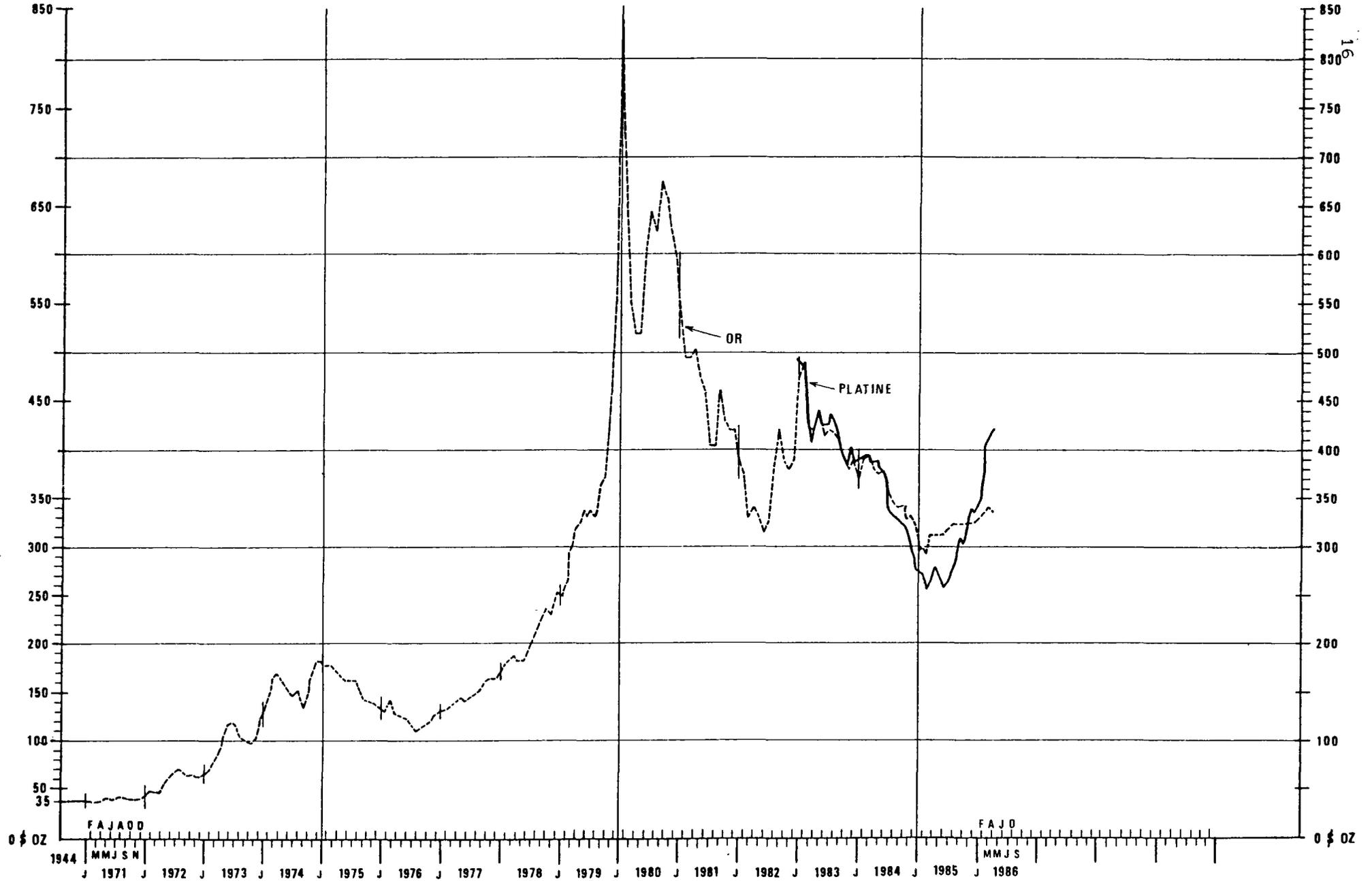


Tableau 5 - Evolution comparée des prix du platine et de l'or en dollars par once troy

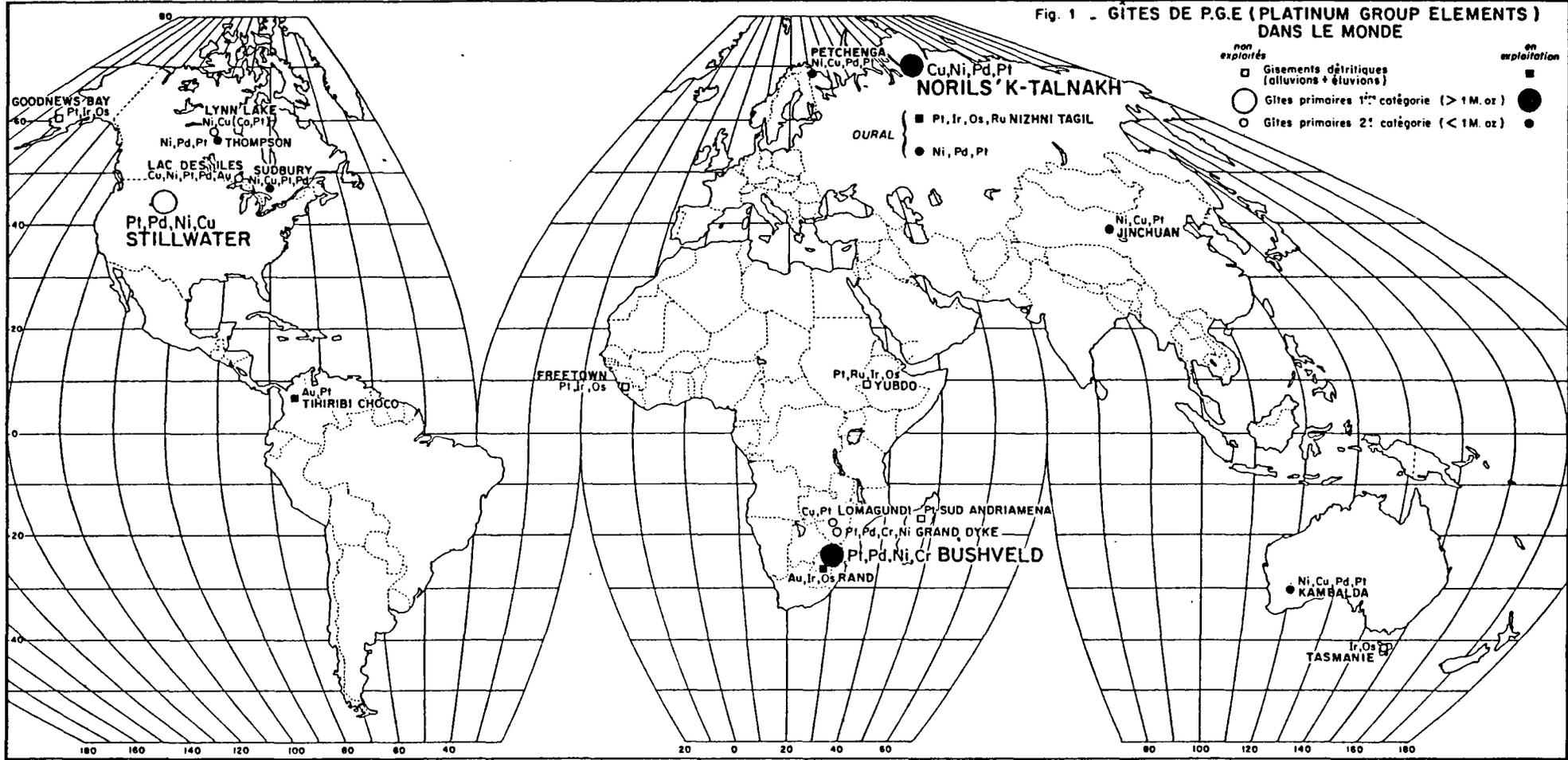
2- Depuis la libéralisation du prix de l'or en 1968, les cours de l'or et du platine (et du palladium) ont des courbes parallèles, avec leurs pics caractéristiques en 1974, 1980 et 1983. Le prix le plus élevé est celui de 1980 avec des cours de l'or et du platine supérieur à 800 dollars/once.

La symétrie inverse des prix du platine (et de l'or), avec le cours du dollar US en francs français, existe mais elle n'est pas très étroite (tableau 5). Au point le plus haut de janvier 1980, pour le platine et l'or, correspondent bien les cours les plus bas du dollar (1 dollar US = 4 F). Au point le plus bas de la mi-mars 1985 (268 dollars pour Pt, 245 pour Au) correspond le summum atteint par le dollar (1 dollar US = 10,35 F). Entre ces deux dates, les différentes fluctuations des cours du dollar sont moins marquées que celles des cours du platine et de l'or, mais les corrélations subsistent.

Depuis peu cependant, suite aux sanctions économiques prises par les Etats-Unis et les pays de la CEE envers l'Afrique du Sud contre sa politique d'apartheid, les cours des PGE ont subi une hausse importante. Au 22 octobre 1986, à la bourse de Londres, les prix étaient les suivants : Ir = 420 \$/Oz, Os = 650-700 \$/Oz, Pd = 134-136 \$/Oz, Pt = 584 \$/Oz, Rh = 1180\$/Oz.

Quoiqu'il en soit, le platine apparaît de plus en plus comme un métal d'avenir, dont la consommation devrait sensiblement s'accroître dans les prochaines années. Lorsque la France et l'Europe rejoindront concrètement les Etats-Unis et le Japon dans la lutte contre la pollution automobile, la demande de platine progressera d'autant.

Mais si les prix devenaient exorbitants, les solutions de substitution et de récupération pourraient être développées par les pays utilisateurs. Déjà plus de 60 % des besoins industriels français en platine sont fournis par le recyclage. Des recherches menées par les groupes Lyon Alemand et Johnson Matthey vont aussi dans le sens d'une substitution par de nouveaux alliages à base d'oxydes.



2 - REPARTITION DES CONCENTRATIONS EN PLATINE

2.1. - PAYS PRODUCTEURS

2.1.1. Historique

Utilisé depuis longtemps par les indiens des civilisations précolombiennes de l'Equateur, le platine a été redécouvert au 17ème siècle par les Espagnols dans les placers aurifères de Colombie ; ils donnèrent le nom de "platina" (petit argent) à ce métal blanc, infusible qu'ils trouvaient associé à l'or et qu'ils considéraient comme gênant. Très prisé dans les cours européennes de Versailles et de Madrid au milieu du XVIIIème siècle, il sera utilisé par les frères Janety pour confectionner, au lendemain de la révolution, le mètre-étalon dont le prototype est déposé depuis 1798 aux Archives nationales de Paris. La Colombie en a été le seul producteur jusqu'à la découverte des placers platinifères de l'Oural en 1819. La Russie devint dès 1824, le principal producteur et le restera jusqu'en 1934.

Après la guerre de 1914-18 en effet, le Canada commença à récupérer les PGE à partir du minerai de Sudbury, et en 1934 il en devint le premier producteur mondial. Puis la découverte en Afrique du Sud du Merensky Reef (Bushveld), en 1920, permettra à ce pays de supplanter momentanément le Canada de 1956 à 1959. La Russie reprit la tête en 1962 grâce à la récupération des métaux du Pt contenus en grande quantité dans les minerais de nickel-cuivre de Noril'sk-Talnakh.

2.1.2. Situation actuelle

Actuellement (tableaux n° 6 et 7 et fig. 1), la plus grande partie de la production mondiale de PGE est assurée par deux pays : l'URSS et l'Afrique du Sud. Le Canada n'arrive qu'en troisième position, loin derrière ces deux grands, suivi par une cohorte de petits producteurs marginaux : Australie, Colombie, Ethiopie, Finlande, Japon, USA, Yougoslavie.

Pour les prochaines années, la montée en production du gisement de Stillwater (Montana) devrait permettre aux USA de se glisser au quatrième rang, derrière le Canada.

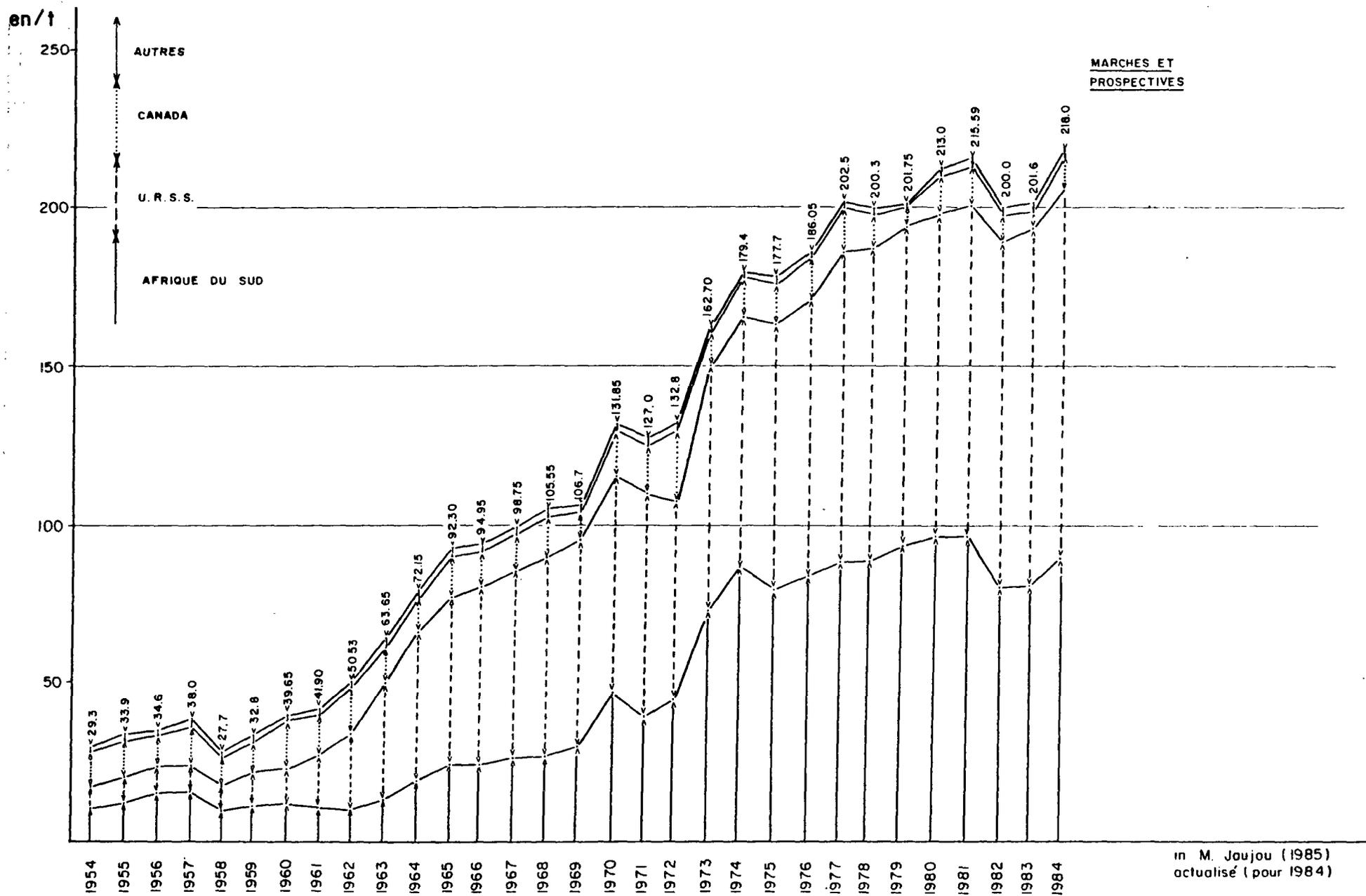


Tableau 6 : Répartition par pays de la production de platinoïdes

Tableau 7 —Platinum-group metals: World production, by country¹

(Troy ounces)

Country ²	1980	1981	1982	1983 ^P	1984 ^Q
Australia, metal content, from domestic nickel ore ³					
Palladium	10,545	12,896	13,379	*12,000	12,000
Platinum	2,058	2,093	2,398	*1,900	2,000
Canada: Platinum-group metals from nickel ore	410,757	382,658	228,425	223,925	*348,216
Colombia: Placer platinum	14,345	14,804	11,896	10,303	10,000
Ethiopia: Placer platinum ⁴	*113	125	125	125	125
Finland					
Palladium	675	1,993	4,662	2,283	2,200
Platinum	225	1,608	4,147	2,186	2,000
Japan, metal from nickel-copper ores ⁵					
Palladium	28,968	25,748	27,862	37,122	35,000
Platinum	12,366	10,521	15,411	21,460	20,300
South Africa, Republic of: Platinum-group metals from platinum ore ⁶					
	3,100,000	3,110,000	2,600,000	2,600,000	2,900,000
U.S.S.R.: Placer platinum and platinum-group metals recovered from nickel-copper ores ⁷					
	3,250,000	3,350,000	3,500,000	3,600,000	3,700,000
United States: Placer platinum and platinum-group metals from gold-copper ores					
	3,348	7,318	8,033	6,257	*14,635
Yugoslavia:					
Palladium	4,501	3,119	*3,000	*2,900	3,000
Platinum	418	482	*480	*400	350
Zimbabwe:					
Palladium	6,784	5,200	2,765	*2,000	2,000
Platinum	2,990	2,300	1,704	*1,200	1,200
Total	6,848,093	*6,930,865	6,424,267	6,524,061	7,053,026

^QEstimated ^PPreliminary. ^RRevised.¹Table includes data available through May 14, 1985. Platinum-group metal production by the Federal Republic of Germany, Norway, and the United Kingdom is not included in this table because the production is derived wholly from imported metallurgical products and to include it would result in double counting.²In addition to the countries listed, China, Indonesia, Papua New Guinea, and the Philippines are believed to produce platinum-group metals, and several other countries may also do so, but output is not reported quantitatively, and there is no reliable basis for the formulation of estimates of output levels. However, a part of this output not specifically reported by country is presumably included in this table credited to Japan. (See footnote 5.)³Partial figure; excludes platinum-group metals recovered in other countries from nickel ore of Australian origin; however, a part of this output may be credited to Japan. (See footnote 5.)⁴Reported figure⁵Japanese figures do not refer to Japanese mine production, but rather represent Japanese smelter-refinery recovery from ores originating in a number of countries; this output cannot be credited to the country of origin because of a lack of data. Countries producing and exporting such ores to Japan include (but are not necessarily limited to) Australia, Canada, Indonesia, Papua New Guinea, and the Philippines. Output from ores of Australian, Indonesian, Papua New Guinean, and Philippine origin are not duplicative, but output from Canadian material might duplicate a part of reported Canadian production.⁶Includes osmiridium produced in gold mines.

in MINERALS YEARBOOK (1984)

Tableau 8 - CLASSEMENT DES PRODUCTIONS PAR VALEUR
(en millions de dollars courants)

	1950		1973		1983	
	valeur	rang	valeur	rang	valeur	rang
Or	2 600	3	6 100	3	19 000	1
Fer	3 100	1	10 100	2	14 000	2
Cuivre	2 600	2	14 000	1	11 000	3
Argent	340	10	1 100	12	4 500	4
Phosphates	330	11	1 300	10	3 700	5
Potasse	410	9	1 600	8	3 000	6
Sel	470	8	1 700	7	3 000	7
Zinc	990	5	2 300	4	2 800	8
Soufre	280	18	700	16	2 600	9
Diamant	230	14	1 600	9	2 600	10
Nickel	230	15	1 900	6	2 500	11
Etain	840	6	1 300	11	2 100	12
Bauxite	130	17	820	15	1 800	13
Platine	85	18	850	13	1 700	14
Amiante	260	12	850	14	1 500	15
Kaolin	150	16	550	18	1 300	16
Plomb	1 000	4	1 700	5	1 300	17
Manganèse	510	7	620	17	770	18

Suivent dans l'ordre : carbonate de soude naturel, borates, pyrites, molybdène, magnésite, talc, fluorine, chromite, tungstène, bentonite, barytine, vanadium, cobalt, feldspath, sulfate de sodium, ébonite, mica, etc.

Sources : Observatoire des matières premières - Annales des Mines.

in P.H. BOURRELIER (1985)

Depuis maintenant une dizaine d'années (tableau 9), la production mondiale dépasse les 200 t par an (platine et autres métaux du groupe confondus). Après une stabilité relative à ce niveau, jusqu'en 1983, elle eut un net accroissement depuis cette date (218 t en 1984). La valeur de cette production (de l'ordre de 1600 à 1700 M\$) reste forte. Elle est néanmoins sans commune mesure avec la production d'or (environ 1150 t Au en 1984 pour le seul monde occidental).

D'après P.H. Bourrelier (1985), qui a établi un classement des productions mondiales de minerais par valeur en millions de dollars courants (tableau 8), pour l'année 1983, le platine arrive en 14^{ème} position (avec 1 700 M\$), alors que l'or occupe la première place (avec 19 000 M\$)*. La France, pour sa part, n'a aucune production minière de platine.

Il est également intéressant de voir le très net accroissement de la production durant ces 20 dernières années :

- 1357 t de PGE produites de l'origine (1737) jusqu'en 1966 ;
- près de 3000 t de 1967 à nos jours.

Il faut enfin remarquer que si l'URSS et l'Afrique du Sud interviennent pour une part sensiblement égale dans le total de la production des PGE, ils se différencient très nettement par la nature -donc les prix- des métaux qu'ils produisent, ainsi que le montre clairement le tableau 9 établi pour l'année 1982. L'Afrique du Sud produisait 57,8 % du Pt et 26 % du Pd, alors que l'URSS avait des pourcentages sensiblement inverses (26,5 % Pt, 64 % Pd).

* "Cette estimation très approximative a été établie à partir du prix du marché international . La valeur du minerai au stade de la production n'est qu'un indicateur parmi d'autres de son importance réelle" (P.H. Bourrelier).

Tableau 9 - Tonnage de PGE produits par l'Afrique du Sud, l'URSS et le reste du monde (année 1982)

	Pt (kg)	Pd (kg)	Ru,Rh,Os et Ir (kg)	Total des PGE	Valeur* Pt + Pd (M dollars)
Afrique du Sud	52 210	23 545	11 539	90 294	789
URSS	23 247	56 712	7 651	87 610	495
Total monde	82 249	84 207	20 110	186 566	1 347

* Valeur calculée avec les prix du 15 mars 1986 (Pt à 412 dollars/oz, Pd à 112 dollars/oz).

2.1.3. Afrique du Sud

Le platine en Afrique du Sud vient du Bushveld, "monstre minier sacré" (B. Henry, 1986) qui représente un potentiel de minerai platinifère et aurifère de 10 à 12 milliards de tonnes à une teneur de 3 à 15 g/t de PGE + Au (J.J. Bache, 1980). Actuellement, Rustenburg Platinum Mines Limited (RPM) est encore le plus grand producteur de platine d'Afrique du Sud, devant l'Union Corporation Ltd et Western Platinum.

Les chiffres d'exploitation mensuelle connus et donnés en 1980, donnent une idée de l'importance des principales mines en activité.

Tableau 10 - Statistique d'exploitation des principales mines d'Afrique du Sud (d'après J.J. Bache, 1980)

	Tonnage mensuel de minerai exploité (t)	Réserves (t)
Rustenburg Platinum Mines		
Rustenburg Section	500 000	83 000 000
Union Section	250 000	24 000 000
Amandelbult Section	50 000	1 200 000
Atok Section	25 000	1 500 000
Union Corporation Ltd		
Impala Platinum	600 000	inconnues
Lonrho		
Western Platinum	100 000	inconnues

D'après le Minerals Yearbook, la production de PGE s'élève pour 1984 à 2,9 M onces (89,9 t).

Indiquons rapidement que, dans le complexe de roches basiques et ultrabasiques du Bushveld, le "Merensky reef", horizon platinifère le plus connu, a une puissance moyenne de 0,80 m, s'étend sur 230 km et pend vers le centre du complexe de 9 à 10°. Il a été reconnu par sondages à une profondeur supérieure à 1900 m.

L'exploitation de l'horizon platinifère UG2 à teneur en chrome élevée, situé à 350 m en dessous du Merensky Reef est assez récente. Trois compagnies minières l'exploitent ou vont l'exploiter :

- Rustenburg Platinum Mines dans la région de Maandagshoek,
- Impala Platinum dans les régions de Rustenburg et près de Marikana,
- Western Platinum près de Marikana.

2.1.4. URSS

L'URSS est le premier pays producteur de platine et autres métaux du groupe, y compris le palladium. Ces ressources s'accroissent d'une année sur l'autre et ont très nettement dépassées le cap des 100 t, 115 t en 1984 d'après la revue annuelle du Mining Magazine et d'après le Minerals Yearbook, depuis que le pays s'est ouvert au marché occidental. En contrepartie, le rapport Pt/Pd = 1/2,7, sensiblement l'inverse de celui d'Afrique du Sud, est nettement moins favorable. La basse teneur des minerais est de moindre importance dans un pays à économie planifiée, d'autant plus que palladium et platine ne sont que des bonis aux minerais de nickel-cuivre dont ils sont extraits.

Géographiquement, le platine c'est avant tout Noril'sk-Talnakh en Sibérie orientale au bord du fleuve Ienisseï avec sa fonderie de Krasnoyarsk, la plus grande raffinerie de PGE du monde, qui produit 75 % de la production nationale. C'est aussi Petchanga et Severonickel dans la presqu'île de Kola, au nord du cercle polaire. Ce sont enfin les multiples petits placers qui bordent l'Oural.

2.1.5. Canada

Les métaux du groupe du platine sont produits au Canada par deux compagnies, Inco et Falconbridge, en tant que sous-produits de leurs mines de cuivre-nickel. La plus grosse partie provient du district de Sudbury, même si Inco a une petite activité à Thompson (Manitoba). Les mattes qui contiennent les PGE sont traitées à l'étranger : raffinerie d'Acton (Angleterre) pour Inco et de Kristiansand (Norvège) pour Falconbridge car il n'y a pas de raffinerie de PGE au Canada. Par rapport à celle du duo de tête, la production canadienne est faible, environ 10 t dont 80 % par Inco. Les réserves canadiennes sont estimées à 280 t (Pt + Pd) avec une proportion sensiblement égale de platine et palladium.

Actuellement, le Canada fait de très gros efforts de recherches, en particulier dans l'Ontario (gisement du lac des Iles).

2.1.6. Etats-Unis

Aux USA, des métaux du groupe du platine sont extraits des minerais d'or et de cuivre. La récupération est très faible (moins de 500 kg en 1984). Mais cette situation devrait se modifier très bientôt avec la mise en production du gisement de Stillwater.

En effet, dans l'état du Montana, le complexe de Stillwater contiendrait 225 M.oz (environ 7000 t) à une teneur comprise entre 13 et 22 g/t (Robson et al., 1985). D'après le Mining Journal du 17 janvier 1986 (n° 7848), les réserves du gisement sont estimées à 12,1 Mt à 0,125 oz/t Pt (3,88 g/t Pt) et 0,438 oz/t Pd (13,6 g/t Pd) dans le seul secteur de Minneapolis Adit (SMC). Un complément de 21,4 Mt avec des teneurs équivalentes a été identifié dans d'autres zones voisines. La production pourrait être de l'ordre de 55 000 onces Pt (1,71 t) et 164 000 oz Pd (5,1 t). L'horizon riche, le "J.M. reef" aurait deux mètres de puissance moyenne, s'étend sur 43 km et renferme 0,5 à 2 % de minerais sulfurés métalliques avec des PGE. Il a été reconnu (H.K. Conn, 1979) par sondages et travaux miniers sur une longueur de 5,5 km et 2,10 m de puissance, avec des teneurs de 22,3 g/t (Pt + Pd). Le minerai de Stillwater présente donc une teneur nettement plus élevée que les minerais du Bushveld. Par contre, le rapport de la teneur en platine à la teneur en palladium est nettement moins favorable : Pt/Pd = 1/3,5 à Stillwater, Pt/Pd = 3/2 dans le Bushveld.

2.1.7. Les autres producteurs

Parmi les autres petits producteurs recensés dans Minerals Yearbook, 1984, notons :

- le **Zimbabwe** avec 24 kg de platine et 38 kg de palladium pour l'année 1984 (comm. orale J.J. Bache), obtenus à la fonderie d'Alaska à partir des concentrés du cuivre provenant des gisements de Mangula, Shackleton et Angwa, dans le district de l'Omagundi au Nord-Ouest d'Harare (Salisbury) ;

- la **Colombie** avec 310 kg extraits en 1984 de son placier Au-Pt de Tihiribi Choco ;

- l'**Australie** en 1984, 372 kg de palladium et 62 kg de platine, provenant de ses fonderies qui traitent le minerai de nickel sulfuré de Kambalda (Ouest Australien) ;

- la **Finlande** en 1984, 68 kg Pd + 62 kg Pt provenant des minéralisations sulfurées à Cu-Ni du Complexe protérozoïque inférieur de Koillismaa ;

- l'**Ethiopie** en 1984, 4 kg de platine provenant des placiers de Yubdo ;

- le **Japon** en 1984, 1085 Pd + 630 kg Pt provenant des minerais de Cu-Ni étrangers que ce pays traite dans ces fonderies ;

- la **Yougoslavie** en 1984, 104 kg (Pd + Pt).

2.2. LES PRINCIPALES CLASSIFICATIONS DES GISEMENTS

2.2.1. Classification de E.F. Stumpfl (1974) (Gîtes primaires)

E.F. Stumpfl a distingué 3 types de gisements de PGE en fonction des roches associées :

- 1) "deposits associated with basic and ultrabasic rocks : Aldan Shield (South Yakutia, USSR), Bushveld (S. Africa), Stillwater (Montana, USA), Norils'k-Talnakh (Siberia, USSR), Monchegorsk (Kola Peninsula, USSR) ;

- 2) deposits associated with sediments and sedimentary rocks : Witwatersrand (S. Africa), Goodnews Bay (Alaska, USA), Southeast Borneo ;

- 3) deposits associated with metamorphic rocks : Thompson (Manitoba, Canada), Western Australia, Inagli, S. Yakutia (USSR)".

Cette classification est peu satisfaisante sur le plan métallogénique car :

- les roches métamorphiques du type 3 sont des serpentinites si bien que la différence entre les types 1 et 3 ne repose que sur le degré de serpentinisation des roches ultramafiques ;
- le type 2 résulte du remaniement des types 1 et 3 ;
- cette classification ne tient aucun compte du contexte géodynamique qui a gouverné la mise en place des complexes ultramafiques.

2.2.2. Classification en fonction des différents types de complexes ultramafiques et mafiques définis par A.J. Naldrett et L.J. Cabri (1976)

Si l'on excepte les gisements en placers éluvionnaires, alluvionnaires ou marins, dont la source des métaux sera mentionnée plus loin, pour ne tenir compte que des minéralisations de PGE disséminées dans des roches basiques et ultrabasiqes en place, il est plus judicieux de classer les minéralisations de PGE (tableau 11) en fonction de la typologie des complexes ultramafiques et mafiques établie par A.J. NALDRETT et L.J. CABRI.

La classification des minéralisations primaires en PGE est alors la suivante :

- les minéralisations liées à des complexes anorogéniques :
 - . grands complexes stratifiés ("large stratiformly layered complex"),
 - . intrusions de dimension moyenne à petite ("medium and small sized intrusions") ;
- les minéralisations liées à des complexes orogéniques :
 - . complexes komatiitiques,
 - . complexes de type Alaska,
 - . complexes de type alpin.

C'est cette dernière classification que nous adopterons en la complétant dans un sens plus évolutif.

2.2.3. Classification de B. Henry et P. Chevremont (1984)

Cette classification présentée au Conseil de la recherche minière du BRGM le 20 avril 1984 (note GMX n° 1044) prend en compte la typologie de A.J. Naldrett et L.J. Cabri en l'adaptant au platine et en la complétant (tableau 12).

Class	Examples	Remarks
A. Bodies emplaced in active orogenic areas		
1. Bodies contemporaneous with eugeosynclinal volcanism		
(i) Tholeiitic suite		
(a) Picritic subtype		
	Munro-Dundonald area (Naldrett & Mason, 1968; McRae, 1969; Arndt, 1975, 1976) Kakagi Lake (Ridler, 1966) Pechenga (Gorbunov, 1968)	Gravity-differentiated flows, capped by hyaloclastite with 13-15 wt% MgO (see Table 2, cols. 12 & 14). Gravity different- iated sills.
	(b) Anorthositic subtype Doré Lake Complex (Allard, 1970) Bell River Complex (Sharpe, 1965) Kamiskotia Complex, Timmins, Ont.	Some examples of this class are conformable, others appear to be discordant. They are possibly differentiation chambers for over- lying volcanism.
(ii) Komatiitic suite		
	Munro-Dundonald area, Ont. (Naldrett & Mason, 1968; Pyke et al., 1973; Arndt et al., in prep.)	Simple flows, spinifex-capped flows, differentiated flows, and differentiated sills. Composition of flows ranges from peridotite to basalt and of sills from dunite to anorthositic gabbro.
	Eastern Goldfields, Australia (McCall & Leishman, 1971; Nesbitt, 1971; Hallberg & Williams, 1972; Williams, 1972; Naldrett & Turner, 1977)	
2. Alpine-type bodies		
(i) Large obducted sheets		
	New Caledonia (Guillon, 1975) Papua-New Guinea (Davies, 1968, 1971)	
(ii) Ophiolite complexes		
	Vourinos (Moores, 1969) Troodos (Gass, 1967, 1968; Moores & Vine, 1971) Bay of Islands (Dewey & Bird, 1971; Irvine & Findlay, 1972) Canyon Mountain (Thayer & Himmelberg, 1968) Eastern Townships, Quebec (Lamarche, 1972; Laurent, 1975)	
(iii) Deformed ophiolite complexes and clastic blocks in mélange terranes		
	Twin Sisters, Washington (Ragan, 1967) Vermont serpentinites (Jahns, 1967) Iran (Gansser, 1959) Franciscan Series (Hamilton, 1969; Hsu, 1968)	
(iv) Possible diapirs		
	Mt. Albert, Quebec (MacGregor, 1962)	
3. Alaskan-type complexes		
	Intrusions of Alaska and British Columbia, including Duke Island (Irvine, 1974), Union Bay (Ruckmick & Noble, 1959), Tulameen (Findlay, 1969) Intrusions of Urals (Vorobeyeva et al., 1962)	
B. Bodies emplaced in non-orogenic areas		
4. Large stratiformly layered complexes		
	Bushveld (Hall, 1932; Wager & Brown, 1968; Visser & von Gruenewaldt, 1970) Stillwater (Hess, 1960; Jackson, 1961; Bowes et al., 1973) Muskox (Irvine & Smith, 1967) Duluth (Taylor, 1964; Phinney, 1970) Kiglapait (Morse, 1969) Sudbury (Naldrett et al., 1970, 1972)	
5. Sills and sheets equivalent to flood basalts		
	Palisades sill (F. Walker, 1940; K. Walker, 1969) Insizwa-Ingeli intrusion, South Africa (Maske, 1966) Dufek Intrusion, Antarctica (Ford & Boyd, 1968; Ford, 1970; Himmelberg & Ford, 1976)	Generally occur in areas in which extrusion of flood basalts has occurred. The sills are chem- ically similar to the extruded basalts.
6. Medium- and small-sized intrusions		
	Skaergaard (Wager & Brown, 1968) Rhum (Wager & Brown, 1968) Noril'sk-Talnakh area (Godlevskii, 1959; Zolotuchin & Vasil'ev, 1967)	
7. Alkalic ultramafic rocks in ring complexes and kimberlite pipes		

Tabl. 11 - Classification des complexes mafiques et ultramafiques de Naldrett A.J. et Cabri L.J. (1976)

On en retiendra quelques faits essentiels :

- les gisements primaires sont essentiellement situés dans des complexes intrusifs anorogéniques, principalement précambriens, qui donnent la majeure partie de la production mondiale ;
- les gisements secondaires, d'importance très limitée, peuvent dériver en particulier des complexes de type alaskéen ou des complexes ophiolitiques de type alpin qui ne renferment jamais de minéralisations primaires exploitables.

TYPE DE GITES	CAPACITE PGE
<p>A - Gisements primaires</p> <p>A.1. - Grands complexes UB-B stratifiés du Précambrien inférieur PGE associés à sulfures Ni, Cu, Fe et/ou chromite ; exploités pour PGE avec Ni, Cu, Cr en sous-produits Gisements : Merensky Reef (Complexe du Bushveld, RSA) Stillwater Complex (Montana, USA, en développement) Indices : Great Dyke (Rhodésie), Musko (NWT, Canada) Freetown (Sierra Leone), Lac des Iles (Ontario, Canada)</p> <p>A.2. - Grands complexes basiques stratifiés d'âge précambrien à triasique PGE associés à sulfures Ni, Cu, Fe sans chromite ; exploités pour Ni, Cu ; PGE en sous-produits Sudbury (Ontario, Canada) Norilsk-Talnakh (Sibérie)</p> <p>A.3. - Ceintures archéennes à ultrabasites de type komatiite PGE associés à sulfures Ni, Fe + chromite ; exploités pour Ni ; PGE en sous-produits Western Australia Thompson (Manitoba, Canada)</p> <p>A.4. - Ceintures précambriennes à petits complexes plissés ; exploités pour Ni, Cu ; PGE en sous-produits Lynn Lake (Manitoba) Empress (Zimbabwe)</p> <p>A.5. - Autres gisements Des PGE ont été ou sont récupérés comme sous-produits dans des gîtes divers : porphyres Cu (USA) ou Cu-Mo (Arménie, URSS), carbonatite à Cu (RSA), kupferschiefer (Pologne)</p> <p>B - Gisements secondaires (placers)</p> <p>B.1. - Dérivant de "plugs" UB-B de type Alaska Goodnews Bay (Alaska) Nizhni-Taghil, Perm (Oural) Birbir, Yubdo (Ethiopie)</p> <p>B.2. - Dérivant de complexes de type alpin renfermant des lentilles de chromite à Ru, Os, Ir Choco (Colombie) Witwatersrand ? (RSA) osmiridium, sous-produit de l'or</p> <p>C - Divers (Asal)</p> <p>NB - B = Basique UB = Ultrabasique</p>	<p>Production mondiale : 5 à 6 M onces 2,5 à 3,5 M onces/an, 2/3 prod.mond.Pt 130 000 onces/an (Pt + Pd)</p> <p>3 M onces/an ; 2/3 prod. mond. Pd</p> <p>Très faible mais non négligeable</p> <p>~ 2% de la production mondiale</p> <p>50 000 onces/an (Pt) 10 à 20 000 onces/an à partir d'irisdomine</p>

Tabl. 12 - Classification des gisements de PGE (d'après Henry B. et Chèvremont P., 1984)

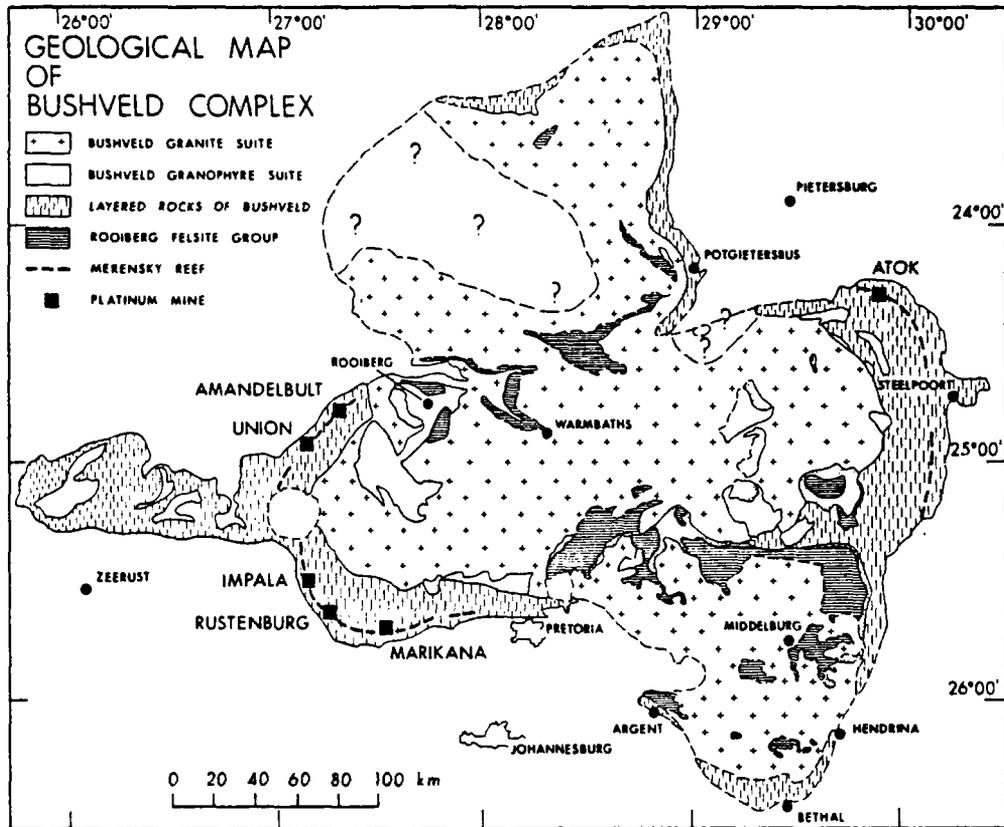


Fig. 2 - Carte géologique du Bushveld (d'après
Willense C.J. (1969) in Campbell I.H.,
Naldrett A.J. et Barnes S.J., 1983)

3 - LES PRINCIPAUX GISEMENTS MONDIAUX

Les principaux gisements producteurs de PGE, sur lesquels nous avons recueilli une documentation sont :

- le complexe du Bushveld (RSA),
- le complexe de Stillwater (USA),
- le complexe de Sudbury (Canada),
- le complexe de Norils'k-Talnakh (URSS),
- les gisements de Ni (Pt) de Kambalda (Australie).

3.1. LE COMPLEXE DU BUSHVELD

Le complexe igné du Bushveld s'étend dans le Transvaal central suivant une vaste cuvette synclinale ovale de faible pendage (lopolite) de 450 km de long en direction est-ouest, entre les villes de Lydenburg et Zeerust et 240 km de large en direction nord-sud entre les villes de Pretoria et Potgietersrus (fig. 2).

Dans la partie septentrionale du complexe (région de Potgietersrus), apparaît un diverticule orienté nord-sud, dans l'axe du grand dyke de Rhodésie, porteur des gisements (cubés mais non exploités) de Great Dyke et Empress (Zimbabwe), sur une grande ligne de faiblesse méridienne de l'écorce terrestre, direction majeure des grands rifts d'Afrique de l'Est.

3.1.1. Géologie générale (fig. 3 à 5)

Le complexe du Bushveld (2000 Ma \pm 50) est un énorme corps intrusif stratiforme différencié intercalé dans la série précambrienne du Transvaal (Rustenburg layered suite sur la figure 3).

On y distingue fréquemment trois secteurs géographiques correspondant aux grands districts miniers (chromite et platinoïdes) :

- Rustenburg ou Western Bushveld,
- Steelport ou Eastern Bushveld,
- Potgietersrus au Nord, zone du "Platreef" en cours de reconnaissance.

Ce complexe montre quatre ensembles successifs, schématisés sur la figure 5. De bas en haut, ce sont :

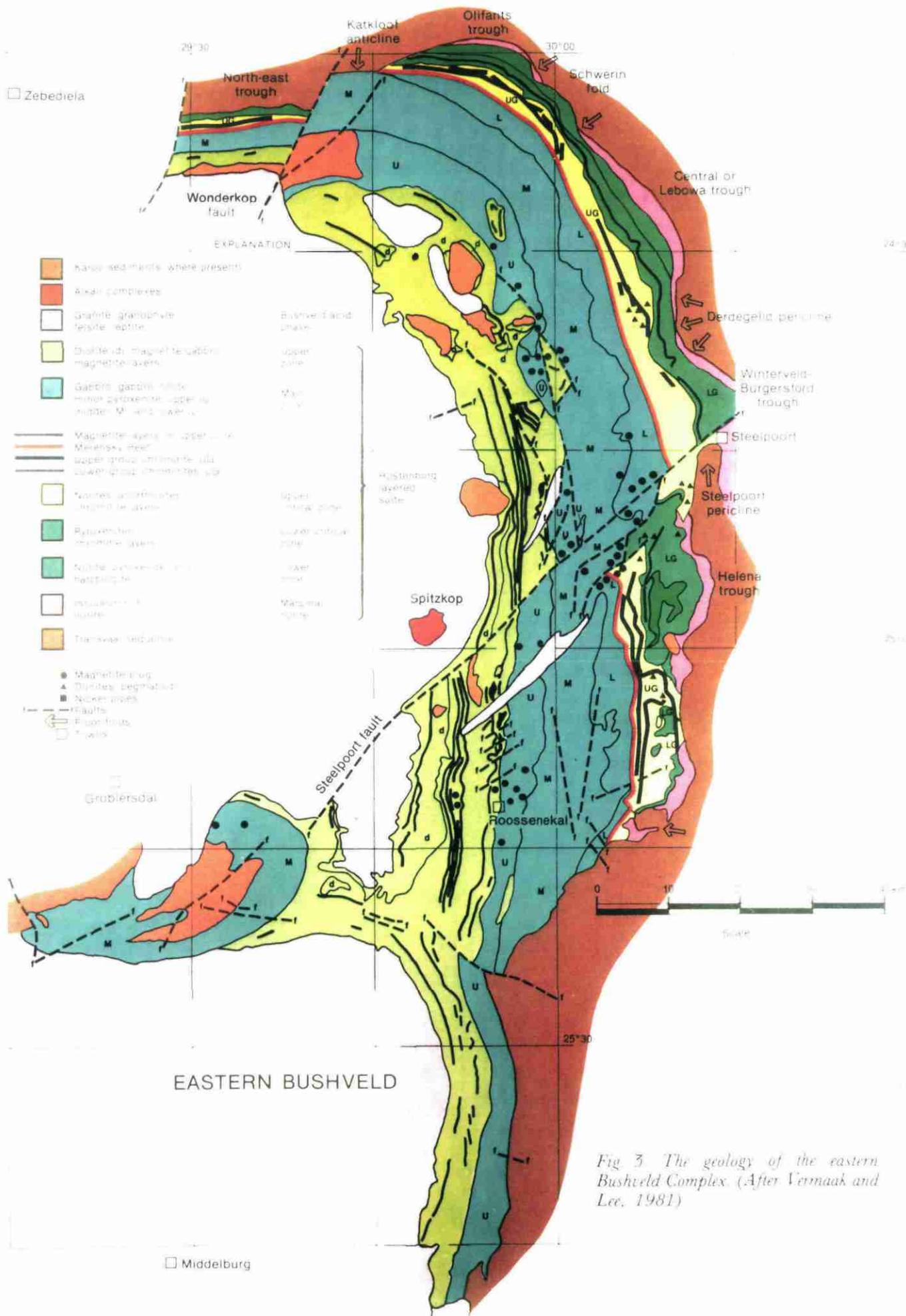


Fig 3 The geology of the eastern Bushveld Complex. (After Vermaak and Lee, 1981)

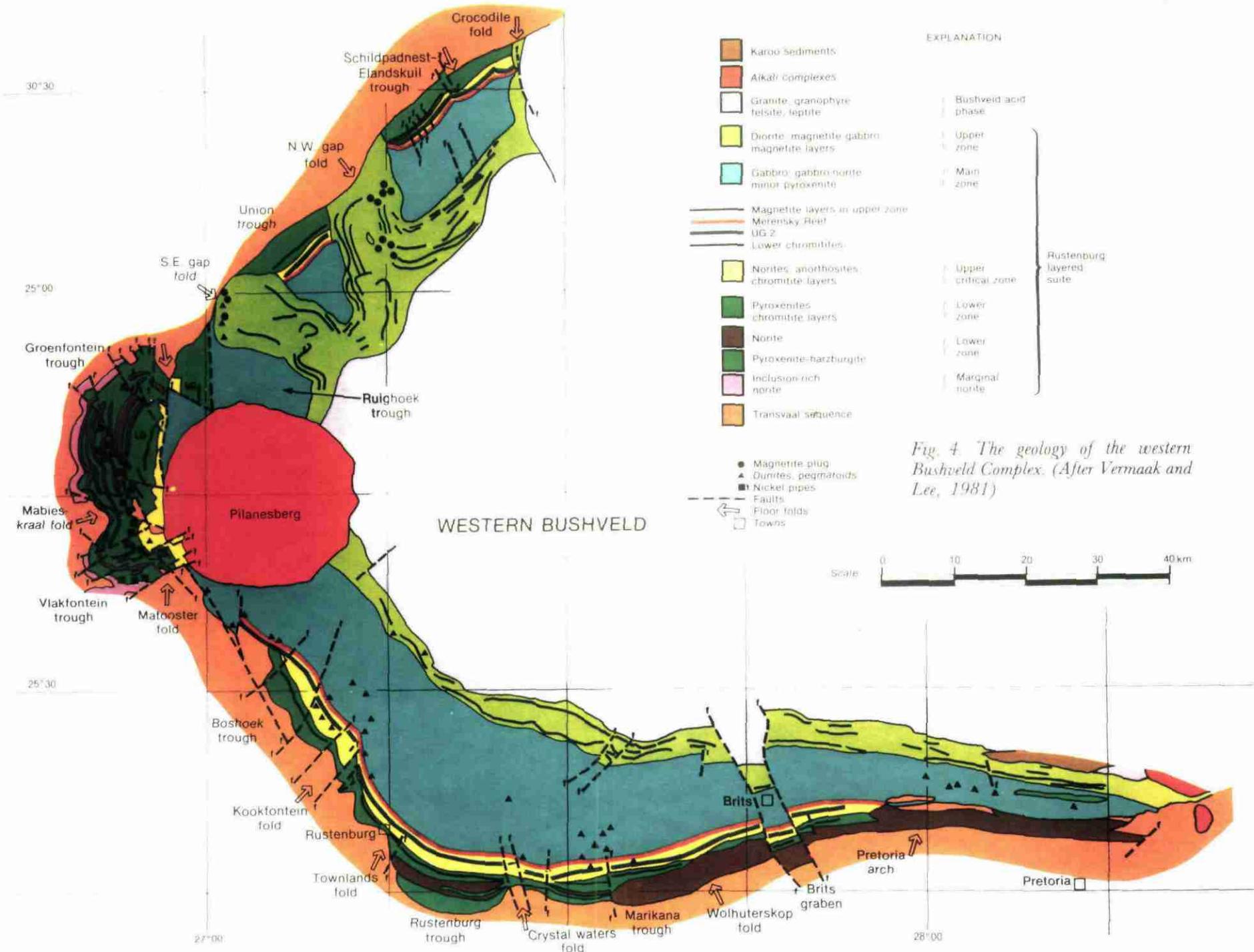


Fig. 4. The geology of the western Bushveld Complex. (After Vermaak and Lee, 1981)



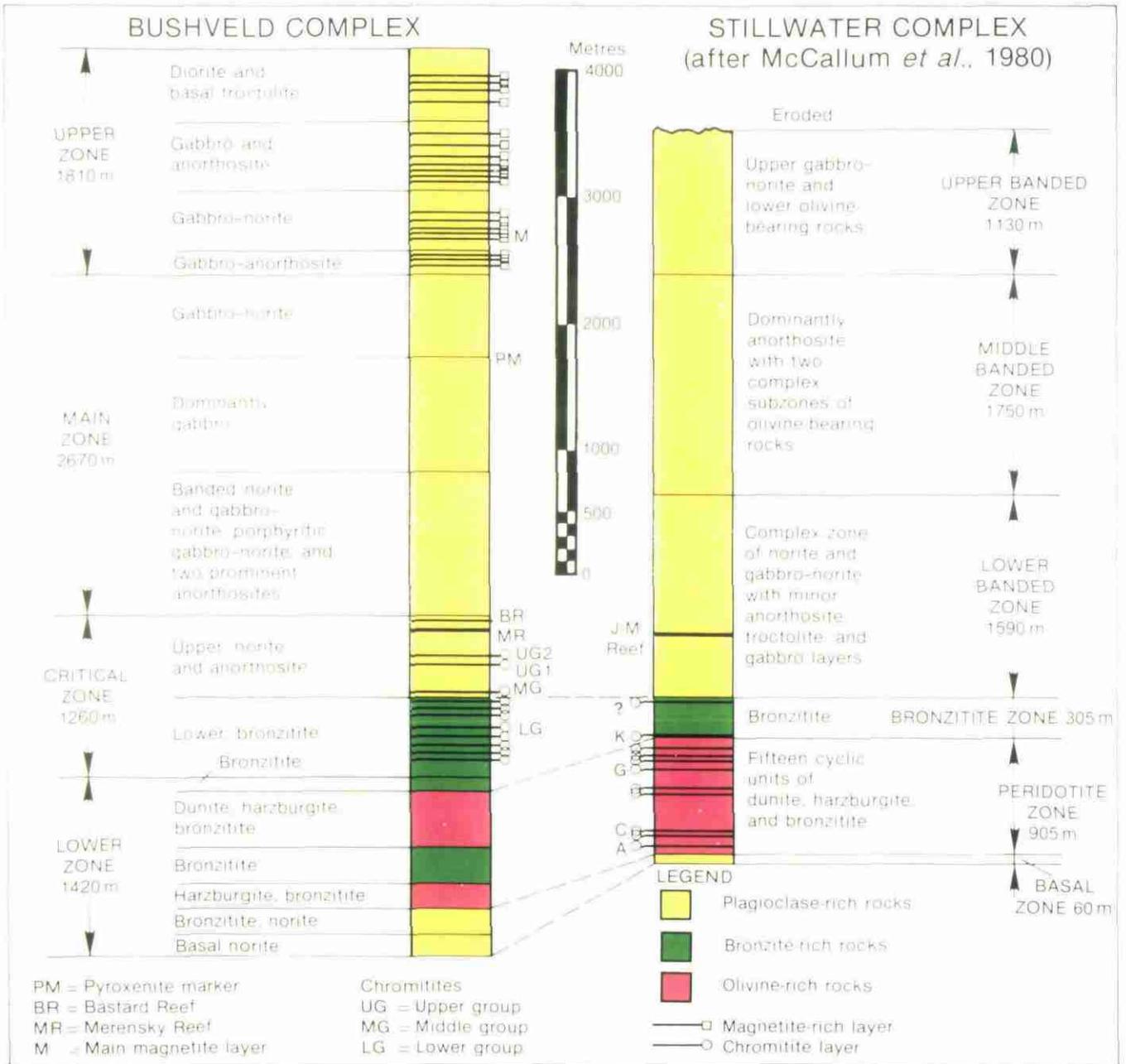


Fig. 5. A comparison of the generalised stratigraphies of the Stillwater Complex of Montana with that of the Bushveld Complex of the Transvaal, South Africa. (Stillwater data reworked from McCallum *et al.*, 1980)

- une zone inférieure, principalement constituée de roches ultrabasiques (dunites et pyroxénites) ;
- la zone critique, où la différenciation est la plus poussée (pyroxénites à anorthosites), qui contient les niveaux chromifères et l'horizon platinifère du Merensky Reef et son équivalent latéral probable, le Platreef ;
- une zone principale, très puissante, à gabbros et anorthosites ;
- une zone supérieure à gabbros, anorthosites et diorites, renfermant des horizons à magnétite.

3.1.2. Les horizons platinifères

Les énormes réserves de PGE du complexe du Bushveld sont concentrées principalement dans trois horizons :

- le "Merensky Reef", le plus connu,
- l'horizon "UG-2 chromite seam",
- le "Platreef" (dans le secteur de Potgietersrus).

a - Le Merensky Reef

C'est l'horizon le mieux connu du Bushveld, sa puissance varie de quelques centimètres (10 cm) à un maximum de 7,50 m (0,80 m en moyenne). Dans la mine de Wildebeesfontein South, appartenant à Impala Platinum Ltd, le Merensky Reef mesure moins de 1 m de puissance. Par contre, à Western Platinum, le Reef atteint 4 m de puissance, mais seule une partie de celui-ci est minéralisée. Le Merensky Reef s'étend sur plus de 230 km avec un pendage général de 9 à 10° vers le centre du complexe. Il a été reconnu par sondages à une profondeur supérieure à 1900 m. La principale mine de Rustenburg l'exploite jusqu'à 520 m de profondeur.

La figure 6 montre la succession observée à Rustenburg, dans l'unité différenciée Merensky ("Merensky cyclic unit") dont l'épaisseur est d'une dizaine de mètres. Cette succession comporte de bas en haut 4 termes superposés :

- "Merensky pegmatoïd" : c'est une pyroxénite feldspathique à biotite, qui localement peut être de type harzburgitique. Son épaisseur (30 cm environ) est relativement constante ; elle renferme un petit niveau continu à chromite avec des plages de sulfures et surtout des minéraux du groupe du platine ;

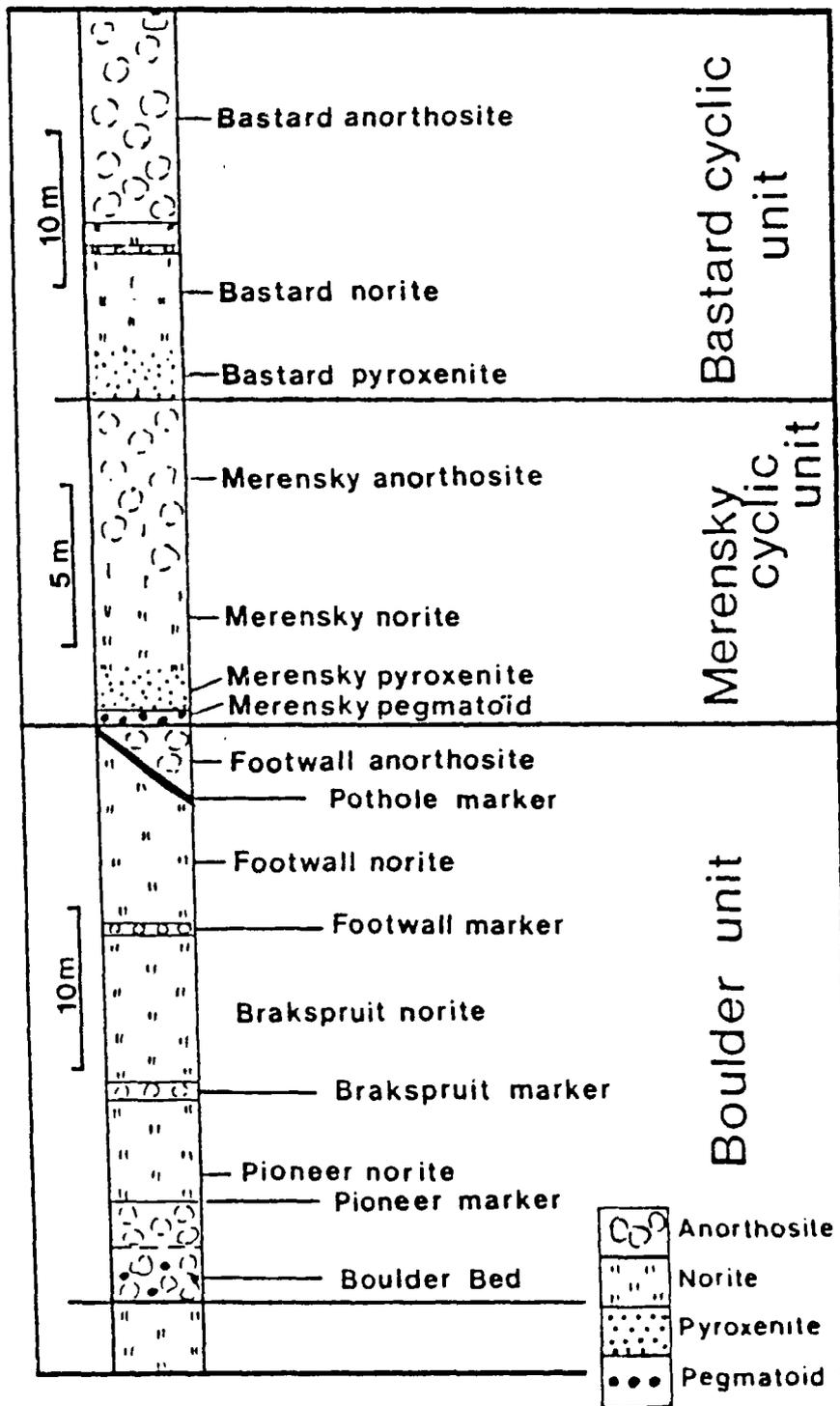


Fig. 6 The geologic succession at the Rustenburg Platinum mines (Rustenburg section) and the nomenclature used in this work. Subdivisions based on Willemse (1969) and Vermaak (1976).

- **"Merensky pyroxénite"** : de 1 à 1,5 m de puissance, à texture porphyrique, avec des cristaux de clinopyroxènes englobant quelques cumulats granulaires d'orthopyroxènes, dans une matrice de plagioclases devenant plus abondante vers le haut. La partie basale qui contient des sulfures disséminés constitue l'horizon minéralisé proprement dit ;

- **"Merensky norite"** : 3 à 4 m de puissance, à orthopyroxènes qui disparaît vers le sommet en même temps que la roche devient plus feldspathique, pour passer au terme suivant ;

- **"Merensky anorthosite"** : de 5 à 6 m d'épaisseur, composée pour l'essentiel de plagioclases zonés et de taille millimétrique (2 à 3 mm) ; quelques phénocristaux d'orthopyroxènes sont présents. Ces minéraux de taille centimétrique (2 à 3 cm) et bordés par une petite frange de clinopyroxènes sont poecilites ; ils renferment des petits cristaux de plagioclases de même composition que ceux de la roche en général.

Le Merensky Reef, composé par l'empilement de plusieurs niveaux différenciés, forme un dispositif qui est dans l'ensemble très régulier. Seules des cavités de remaniement intramagmatiques ou "pot holes" viennent perturber localement la régularité du dispositif. Leur distribution est imprévisible et leur taille, très irrégulière (plusieurs mètres à dizaines de mètres, voire plus de 100 m de diamètre et plusieurs dizaines de mètres de profondeur).

Ces "pot holes" sont interprétés comme des griffons d'émergence de fluides hydrothermaux. On enregistre, à partir de ces centres émissifs, une distribution concentrique de zones à "conditions volatiles" bordées d'un front à arsenic (Pt As₂). Elle illustre la circulation de fluides et l'évolution spatiale des conditions physico-chimiques de dépôts des minéraux de PGE.

Dans la partie est du Bushveld, les "pot holes" sont cicatrisés par des pipes de dunites-hortonolites (pipes d'Onverwacht, de Mooikoek et de Driekop). Ce sont des structures circulaires de plusieurs dizaines de mètres de diamètre qui se situent à un niveau plus bas dans les norites et pyroxénites de la "critical zone" en dessous du niveau de chromite de Steelport.

Certains niveaux inférieurs de chromite sont conservés, suggérant une mise en place de ces dykes liée à des phénomènes métasomatiques.

Ces dunites, riches en spinelles Fe-Al-Ti, contiennent du graphite et des minéraux de PGE (sperrylite, alliages Fe-Pt, sulfoarséniures de Pt-Pd) localisés dans les fractures ou les espaces intergranulaires. Ce caractère indique un dépôt postérieur à la cristallisation de la dunite hôte.

L'influence de ces pipes de dunites est surtout très nette dans l'horizon UG2 immédiat provoquant des perturbations importantes dans la composition et la distribution des principaux PGE. On note aussi une augmentation très significative des teneurs en PGE à l'approche de ces pipes d'hortonolite.

Element	UG2 ore			Merensky ore		
	Distn %	Grade, g/t (kg/t)	Value \$/t	Distn %	Grade, g/t (kg/t)	Value \$/t
Raw ore	100	7,06	61,51	100	6,47	55,13
Recoverable	85	6,04	52,28	85	5,50	46,86
Pt	45,0	2,718	25,60	57,82	3,180	29,96
Pd	28,0	1,591	5,60	24,16	1,329	4,40
Ru	14,1	0,852	2,19	7,68	0,422	1,08
Rh	8,5	0,513	13,52	4,17	0,229	6,05
Ir	1,9	0,115	1,55	1,57	0,086	1,16
Os	1,7	0,103	3,31	1,30	0,071	2,28
Au	0,8	0,048	0,51	3,30	0,182	1,93
Ni	0,037	(0,37)	2,61	0,167	(1,67)	11,77
Cu	0,022	(0,22)	0,32	0,095	(0,95)	1,38
Ni recov.	0,027	(0,27)	1,90	0,121	(1,21)	8,53
Cu recov.	0,016	(0,16)	0,23	0,068	(0,68)	0,99

Tabl. 13 - Principales teneurs en PGE, Au, Ni et Cu entre les horizons UG2 et Merensky Reef du complexe du Bushveld (d'après Overbeek P.W. et al., 1984)

Dans le Merensky Reef, les principaux PGE et l'or sont surtout concentrés dans la pyroxénite feldspathique et dans le petit niveau de chromite.

En ce qui concerne la teneur (tableau 13), elle varie de 4 à 15 g/t (J.J. Bache, 1980). D'après les données recueillies par G. Sustrac (1981), la teneur du Merensky Reef est de 8,1 g/t PGE, soit après dilution du tout-venant : 5,3 g/t PGE , 0,2 % Ni , 0,14 % Cu, 0,25 % Cr et 0,01 % Co.

Pourcentage des différents métaux contenus (PGE et Or), dans le Merensky Reef:

- platine	60 %
- palladium	27 %
- ruthénium	5 %
- rhodium	2,7 %
- osmium	0,6 %
- or	4 %.

Principaux minéraux platinifères :

- braggite (Pt, Pd, Ni) S₂
- coopérite Pt S
- sperrylite Pt As₂
- laurite (Ru, Os, Ir) S₂
- alliage de ferro-platine
- minéraux rares : telluro-bismuth de platine et de palladium.

Des sulfures de métaux de base existent également dans le Merensky Reef ; par ordre d'importance, citons : pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite, pyrite, cubanite, mackinavite.

La minéralogie des PGE est très complexe, les espèces minérales où rentrent les éléments du groupe du platine sont très nombreuses (voir ann. 1).

Réserves

Les réserves estimées jusqu'à une profondeur exploitable, soit au maximum 1200 m, à cause du fort gradient géothermique, sont de :

3,3 milliards de tonnes à 4-5 g/t PGE + Au, 0,13 % Ni (récupéré) et 0,1 % Cu.

b - "UG 2 chromite"

Des minéraux platinifères sont associés aux principaux horizons chromifères du complexe igné du Bushveld : le plus important, l'"UG 2 chromite" apparaît à une dizaine de mètres environ sous le Merensky Reef.

Il est interstratifié à la base d'un horizon de pyroxénite feldspathique (10 m environ). Sa puissance varie de 0,45 à 1,25 m et son extension a été reconnue sur 250 km environ.

Ce niveau de chromite (43,5 % Cr_2O_3 ; $\text{Cr}/\text{Fe} = 1,35$) contient des sulfures (pentlandite, pyrrhotite et chalcopyrite) auxquels sont associés la majeure partie des PGE ; ceux-ci peuvent néanmoins apparaître pour une faible part en inclusion dans la chromite ou dans les silicates.

Pourcentage des différents éléments contenus (PGE et or) dans l'UG 2 :

- platine	59 %
- palladium	25 %
- ruthénium	8 %
- rhodium	3 %
- osmium	1 %
- or	3,2 %.

Principaux minéraux platinifères :

- laurite
- braggite
- coopérite
- sulfure à Pt-Rh-Ir-Cu
- alliages complexes où peuvent entrer Pb-Cu-Bi-Sb-Te-Ag.

Réserves

Les réserves estimées, toujours jusqu'à une profondeur inférieure à 1200 m sont de 5,5 milliards de tonnes, à des teneurs de 3 à 10 g/t de PGE + Au.

NB. Pour G. Von Gruenewaldt, de l'Institut de recherche géologique sur le complexe du Bushveld à l'Université de Prétoria, les réserves seraient environ le double de celles de Merensky Reef (comm. orale).

c - Le Platreef (fig. 7)

La géologie du Platreef, en cours de reconnaissance, est encore mal établie. Il s'agit d'un ensemble reposant soit sur un granite archéen, soit sur une formation dolomitique. Son épaisseur est de l'ordre de 200 m. Il est constitué par des norites (170 m environ) et des pyroxénites ; ces dernières constituent la base et le sommet de cet ensemble minéralisé. Celui-ci comporte localement des faciès pegmatoïdiques et renferme des xénolithes de roches sédimentaires de l'encaissant du complexe du Bushveld (dolomies) dans sa partie basale.

La minéralisation sulfurée comporte principalement, par ordre d'abondance : pyrrhotite, pyrite, pentlandite et chalcopryrite. De nombreux sulfures accessoires de Cu, Pb, Zn, Mn ont été identifiés.

Les platinoïdes sont le plus souvent associés à la chalcopryrite (la coopérite et la braggite sont les minéraux les plus communs).

A la base du Platreef, la minéralisation est erratique là où existent beaucoup d'éléments stériles des roches sous-jacentes, mais elle devient plus continue dans la dizaine de mètres supérieure. Cependant, d'importants travaux d'exploration sont nécessaires pour confirmer cette continuité.

A l'heure actuelle, la minéralisation a été reconnue sur une trentaine de kilomètres avec un pendage moyen de 45°. Si la zone minéralisée se révélait continue, le tonnage potentiel pourrait être de plusieurs milliards de tonnes à 4-15 g/t PGE + Au.

3.1.3. Origine du gisement

Outre l'extraordinaire continuité de la pseudostratification de la masse magmatique du Bushveld, sa dimension actuelle (de l'ordre de 450 km x 250 km) représente, de loin, le plus grand volume de roches basiques mis en place en domaine cratonique. A faits extraordinaires, causes extraterrestres : l'impact météorique a été évoqué mais non démontré, alors que pour Sudbury (Canada), autre "monstre" basique, il est fortement soupçonné, avec plusieurs "évidences" à l'appui. L'hypothèse d'une mise en place à la faveur d'une fracture crustale profonde à partir de matériel mantélique est actuellement la plus plausible. Les successions de roches correspondent

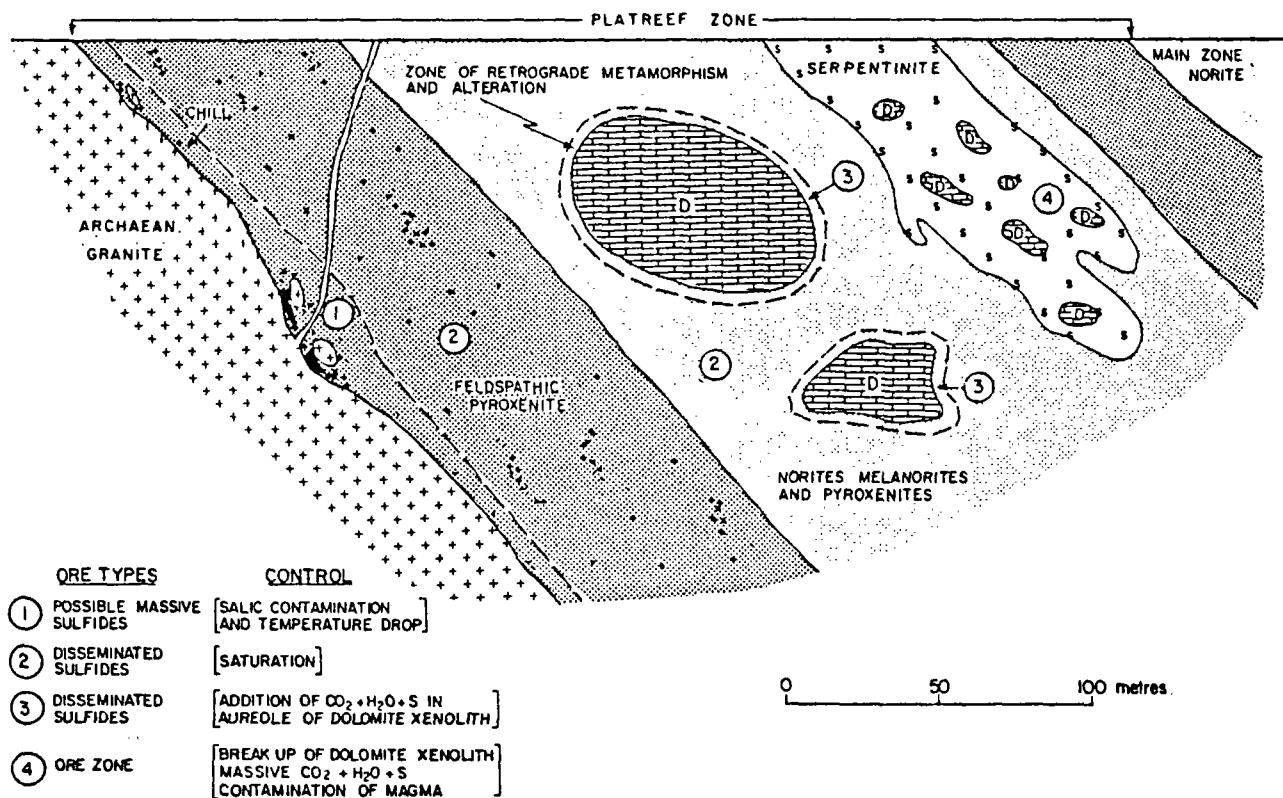


Fig. 7 - Coupe géologique du Platreef, montrant la distribution des minéralisations à Ni-Cu et PGE (d'après Gain S.B. and Mostert A.B., 1982)

à différentes venues magmatiques. Plusieurs auteurs ont déjà distingué deux grandes lignées de magma originel, respectivement ultramafiques et anorthositiques. Les pulsations successives et répétées expliqueraient la stratification remarquable du complexe.

Par le jeu des saccades magmatiques, certaines minéralisations se trouvent à des niveaux anormaux dans le complexe : en particulier l'horizon Merensky, producteur de platinoïdes associés à des sulfures de nickel-cuivre et à de la chromite, devrait être encaissé dans les roches ultrabasiques de la partie inférieure. Il n'en est rien, pas plus d'ailleurs que dans un autre "grand" des complexes de ce type : le Stillwater des Etats-Unis. Dans les deux cas, les horizons platinifères sont encaissés dans des termes magmatiques gabbro-anorthositiques déjà très évolués, mais au sein desquels, plusieurs milliers de mètres au-dessus de la base du complexe existent encore de nombreuses récurrences ultramafiques. Celles-ci (pyroxénites et chromitites) soulignent les ultimes pulsations du magma correspondant" (B. Henry, 1986).

Les recherches entreprises au GIS ont mis en évidence, dans la zone critique du complexe du Bushveld une concentration élevée en éléments volatils (Cl,F) ce qui remet en cause le caractère anhydre des liquides magmatiques (Z. Johan, 1985).

Ceci implique qu'une phase hydrothermale a joué un rôle important, sinon primordial, dans la genèse des PGE liés aux grands complexes stratifiés, en particulier dans le cas du Bushveld où le Merensky Reef renferme non seulement 2 % de biotite mais également des minéraux qui sont inhabituels dans des roches ultramafiques : quartz, tourmaline, molybdénite, graphite (Brynard et al., 1976).

3.2. LE COMPLEXE DU STILLWATER

Le complexe de Stillwater est situé au Sud-Ouest de Billings dans l'état du Montana (USA). C'est la plus importante concentration connue de platine aux USA : environ 225 Moz, soit environ 7000 t à une teneur variant entre 13 et 22 g/t PGE avec un ratio Pd/Pt = 3,5.

3.2.1. Géologie régionale

Le Stillwater est un complexe stratiforme d'âge archéen (2700 à 3100 Ma), fortement redressé (avec un pendage vers le Nord) et en grande partie érodé. Il a été reconnu néanmoins sur 43 km de longueur selon une direction WNW-ESE avec une puissance d'environ 6000 m (fig. 5 et 8).

Le complexe a été divisé en trois unités principales qui sont de bas en haut :

- une série basale (18 à 400 m) comprenant norites, gabbros et pyroxénites ; cette zone contient 135 Mt de minerai de Ni-Cu à 0,25 % Ni, et 0,25 % Cu (sous forme de pyrrhotite, pentlandite et chalcopyrite) avec un peu de cobalt ;

- une zone ultramafique (500 à 2000 m) renfermant principalement dunite, harzburgite, bronzitite et chromitite ;

- une zone rubanée ("banded series") correspondant à une puissante série (jusqu'à 4700 m quand la série est complète) de roches riches en plagioclases : norites, anorthosites, gabbros.

Cette zone rubanée renferme à intervalles réguliers cinq zones interstratifiées de troctolites et anorthosites (fig. 5).

Dans la partie inférieure de la zone rubanée, c'est-à-dire la zone à 425 m environ au-dessus de sa base contient l'horizon riche en PGE, le J.M. Reef (fig. 9). Latéralement vers l'Ouest, le J.M. Reef porte le nom de Howland Reef en l'honneur du premier géologue A.L. Howland qui signala en 1936, la présence de platine dans le complexe du Stillwater.

La zone II est composée de 3 niveaux successifs de bas en haut : norite, gabbro et au sommet troctolite-anorthosite (fig. 9). C'est dans ce dernier niveau très complexe de troctolite-anorthosite, composé d'une succession de petits niveaux (36 au total) formés de péridotites, troctolites, gabbros, anorthosites..., qu'apparaît l'horizon platinifère du J.M. Reef (fig. 9).

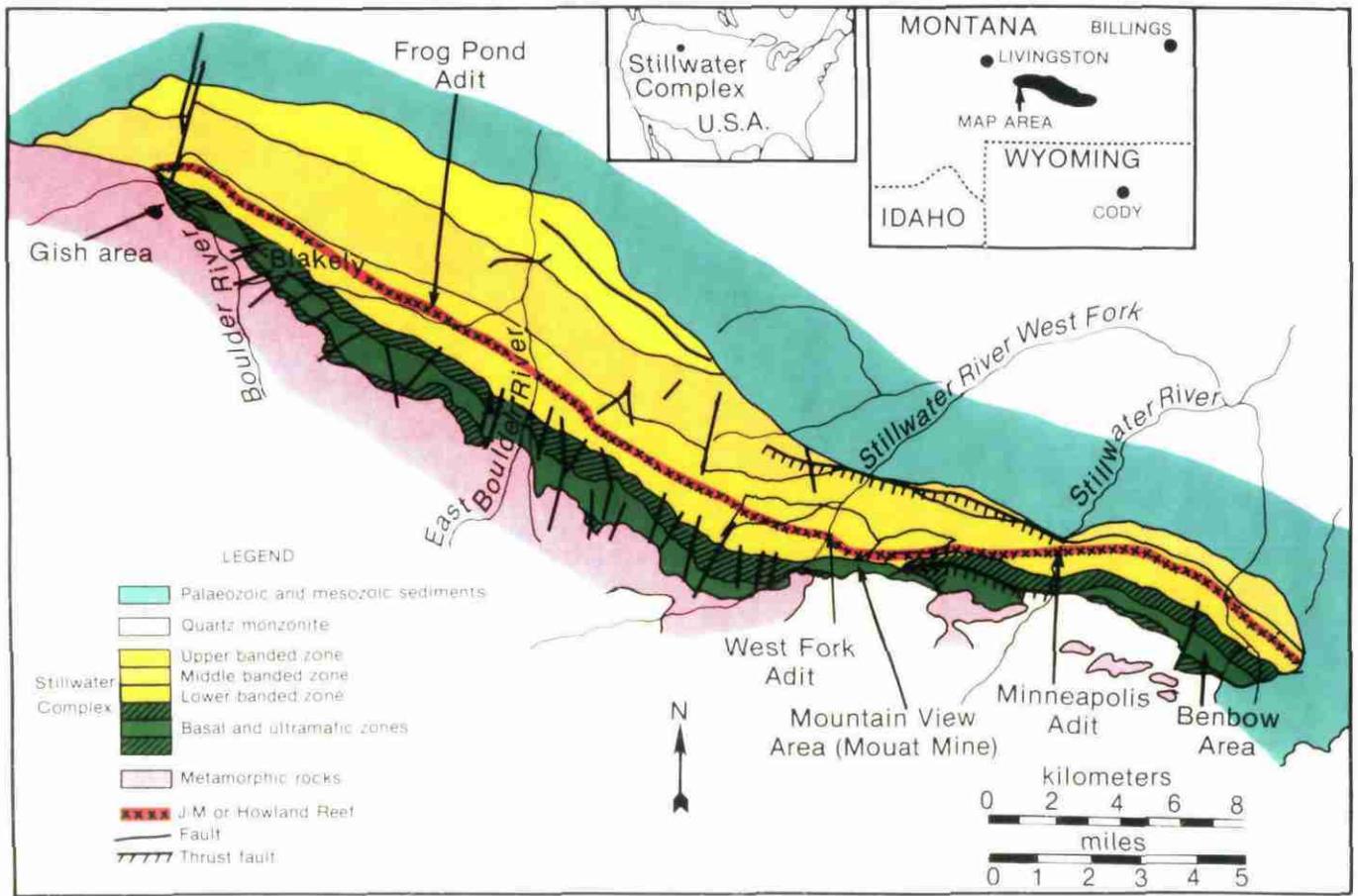


Fig. 8 Generalised geological map of the Stillwater Complex, Montana showing also the position of the prospecting excavation (adits) and the areas where chromite has been mined in the past (After Todd et al., 1982)

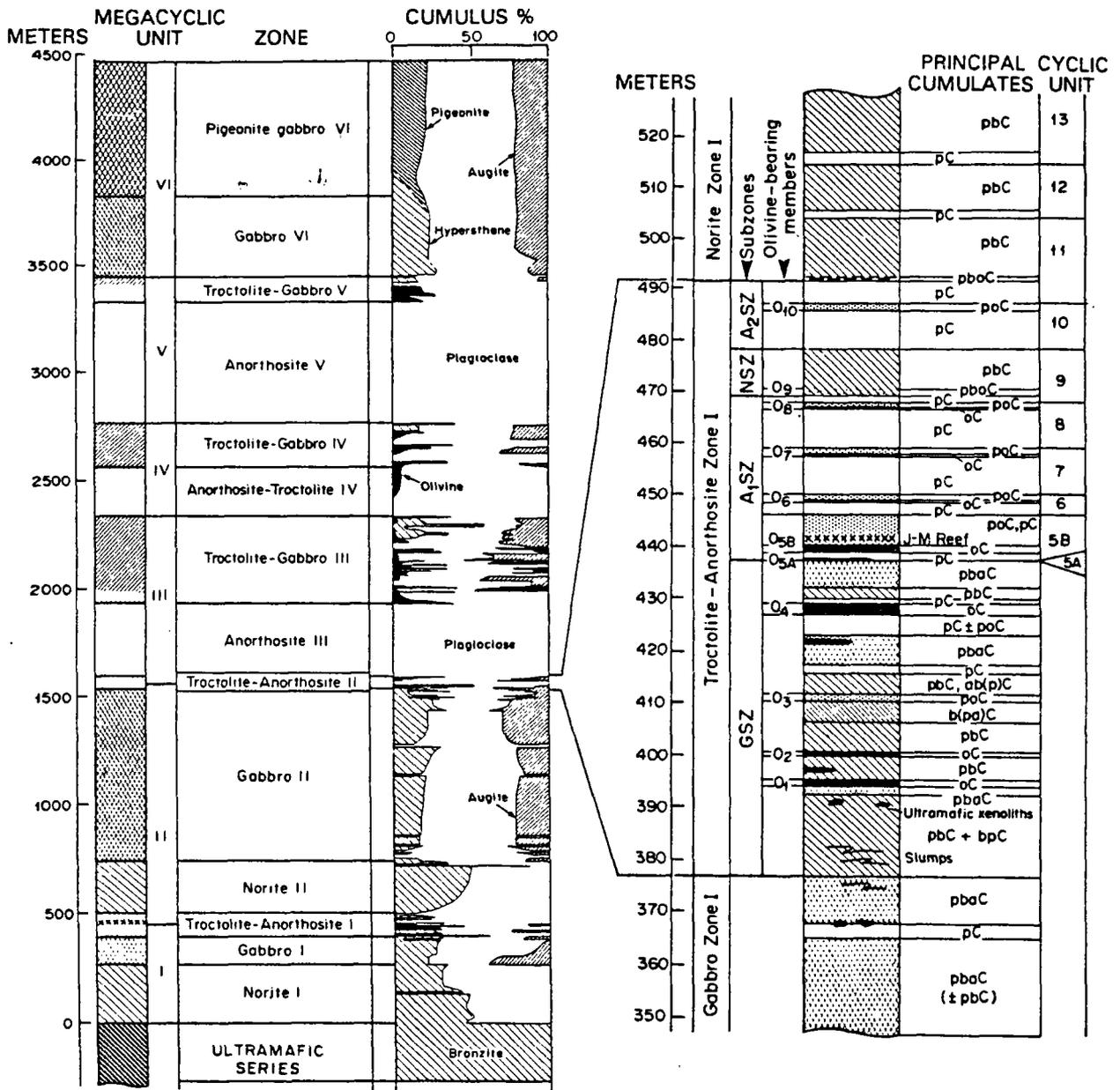


Fig. 9 - Lithostratigraphie de la zone rubanée du complexe de Stillwater. Position du J.M. Reef-Dead Tree contact Mountain section. (d'après Todd et al., 1982 et Irvine et al., 1983)

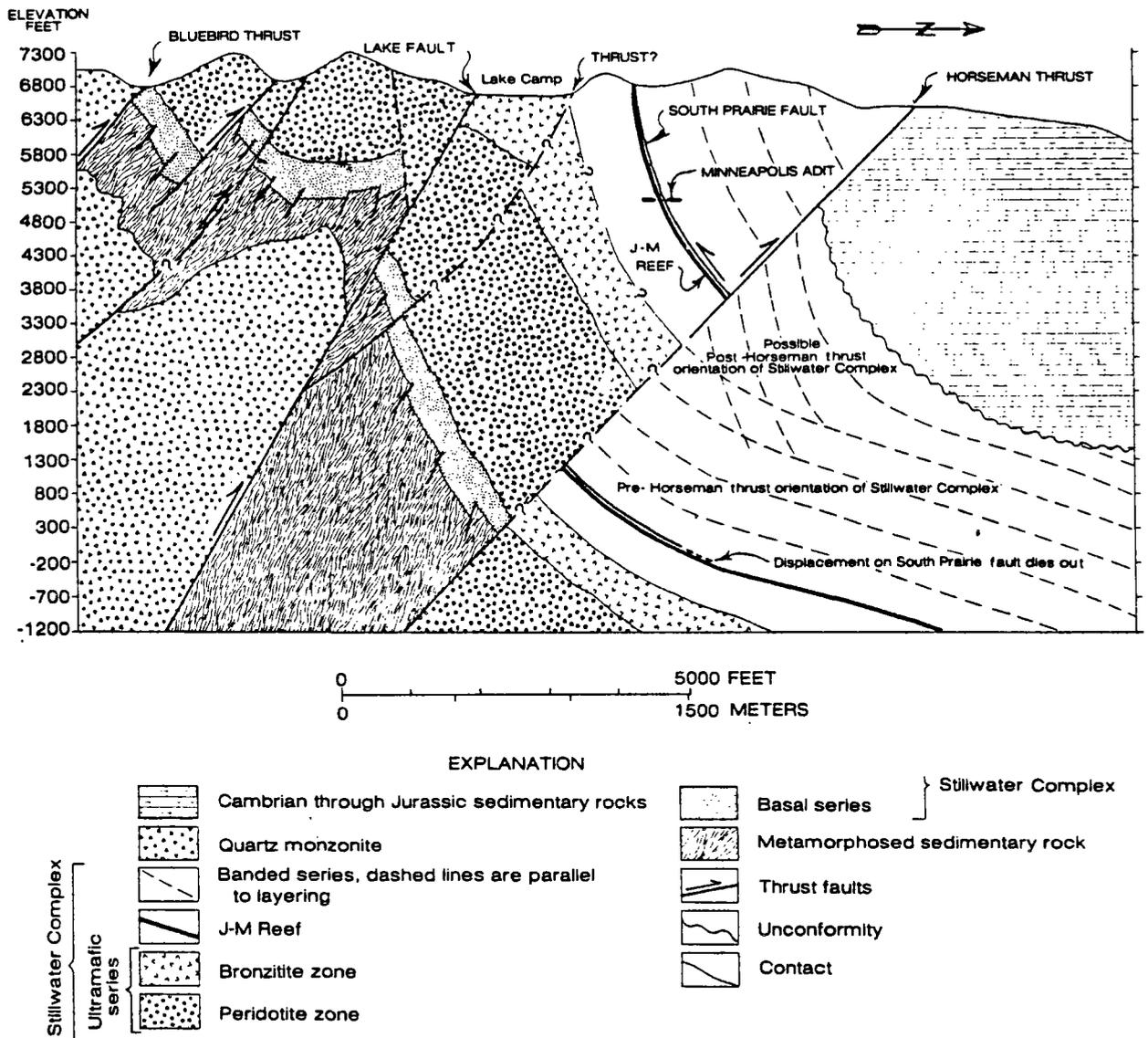


Fig. 10 - Coupe du complexe de Stillwater dans la région de Mountain View, en bordure nord du dôme de Beartooth. (d'après Turner A.R. et al. (1985))

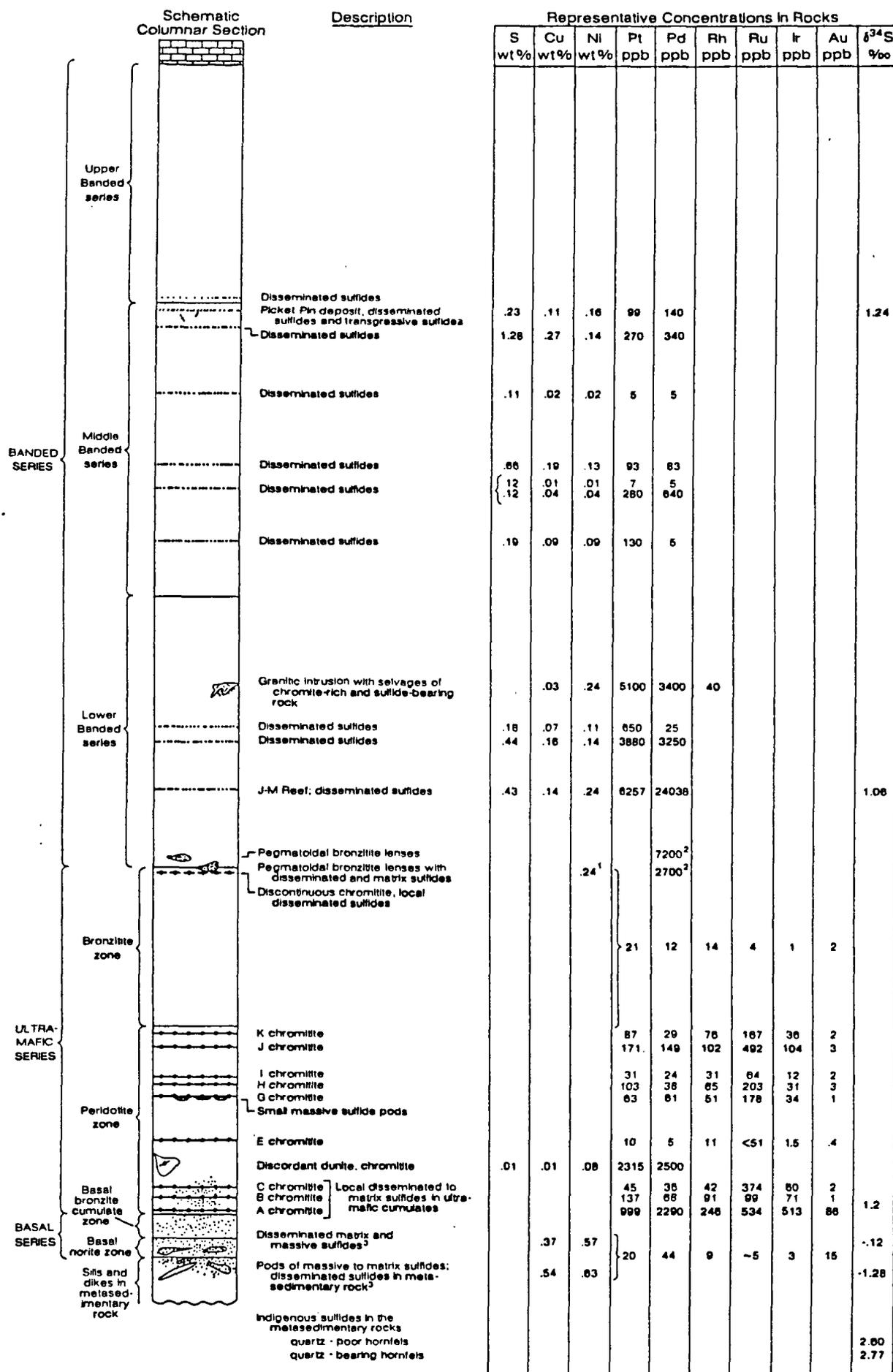


Fig. 11 - Log stratigraphique du complexe de Stillwater montrant la localisation des diverses minéralisations (sulfures, PGE et chromite) et les teneurs correspondantes (1) = Ni + Cu ; (2) = Pt + Pd ; (3) = roches contenant plus de 50 % de sulfures visibles (d'après Page N.J. et al., 1985)

3.2.2. L'horizon platinifère du J.M. Reef

Le J.M. Reef est un niveau semi-continu de 2 m de puissance environ ; de composition identique aux roches encaissantes mais avec en plus 2 à 5 % de sulfures disséminés. Il est encaissé successivement d'Est en Ouest dans des troctolites, des anorthosites et des norites.

Dans la partie est du complexe, en particulier dans la région de Mountain View et de Minneapolis Adit où des concentrations économiques ont été mises en évidence, l'horizon à PGE du J.M. Reef est très redressé près de la surface ; avec la profondeur, son pendage s'infléchit très notablement et il devient sub-horizontale (fig. 10).

Dans cette région, l'apparition des sulfures coïncide avec la diminution des teneurs en chrome (fig. 11) mais surtout avec la première apparition de l'olivine dans la subzone -Troctolite-Anorthosite Zone I ; dans la partie ouest (West Fork et Frog Pond), les sulfures sont associés au cinquième niveau d'olivine cumulative. Ce caractère signale une évolution latérale et aussi verticale de la stratigraphie de la subzone à olivine (fig. 12), ce qui reflète sans doute la différenciation latérale par rapport à la zone d'alimentation du complexe.

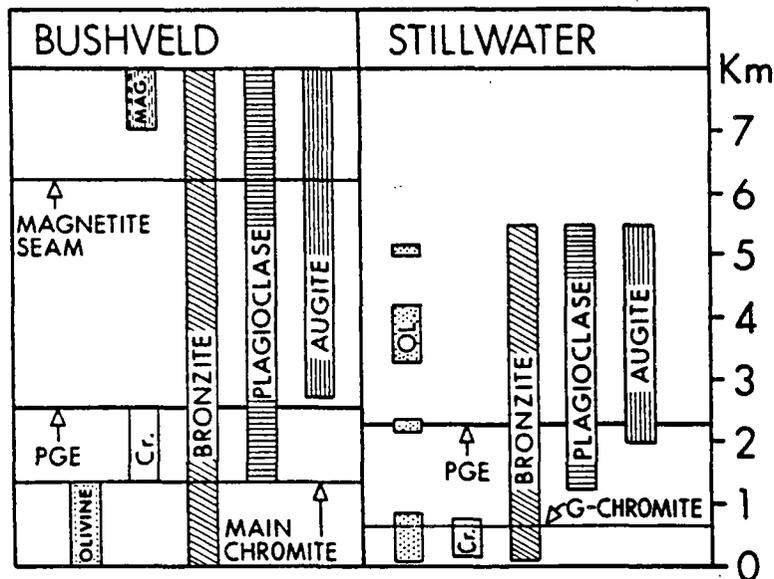


Fig. 12 -

Comparative average stratigraphic columns of the Bushveld and Stillwater Complexes, drawn to the same scale, showing vertical stratigraphic extent of the major cumulus phases. Also shown are the stratigraphic positions of the main PGE reefs (Merensky and H.P. Reefs) and the major oxide seams in the two complexes. Data are from average stratigraphic columns of Vermaak (1976) and von Gruenewald (1979) for the Bushveld, and McCallum *et al.* (1980) and Jackson (1961) for the Stillwater.

D'après I.H. Campbell, A.J. Naldrett et S.J. Barnes (1983).

La composition des roches encaissantes varie progressivement : dans l'Est du complexe, l'olivine est très abondante et diminue progressivement sur 700 m vers l'Ouest ; dans la partie ouest, le J.M. Reef est encaissé dans une norite où l'olivine est par contre résorbée en bronzite.

Dans le J.M. Reef, les sulfures les plus fréquents sont : pentlandite, pyrrhotite et chalcopirite. La pyrite est rare, elle apparaît surtout dans les zones riches en bronzite et pauvres en olivine. Comme sulfures accessoires citons : millérite, violarite, mackinavite et marcassite dans les zones altérées ainsi que des minéraux complexes à Te, As, Bi et Sn.

Les minéraux de PGE les plus fréquents sont la monchéite, la coopérite, la braggite et les alliages Pt-Fe.

Comme dans le Bushveld, les horizons de chromite sous-jacents au J.M. Reef montrent aussi des teneurs en PGE (à un niveau moins élevé), surtout Pd, Rh, Ru et Ir (fig. 10). Les éléments les plus abondants sont Ru, Ir et Os. Ce sont les premiers à être piégés sous forme de laurite en fines inclusions de 10 à 50 μ dans la chromite, les silicates et les sulfures de métaux de base ; les éléments Pd, Pt et Rh, restant en solution dans le magma, vont cristalliser plus tard pour former des alliages et surtout des arséniures à Pt, Pd et Ni. Ces minéraux seront par la suite englobés dans les sulfures interstitiels chalcopirite-pentlandite (Talkington R.W. and Lipin B.R., 1986).

Au Stillwater, on retrouve aussi la marque d'un hydrothermalisme postérieur qui se surimpose au processus de ségrégation magmatique de dépôt de la minéralisation. On l'observe dans le J.M. Reef mais aussi et surtout dans le niveau Picket Pin (fig. 11) où les remobilisations hydrothermales sont très bien développées et beaucoup plus nettes (Boudreau A.E. et Mc Callum I.S., 1986).

Le Picket Pin est un niveau sulfuré à PGE. Il apparaît dans les derniers 150 m supérieurs de l'Anorthosite sub-Zone II, à 3000 m au-dessus du J.M. Reef. Son extension latérale est importante : il a été reconnu sur 22 km dans la partie nord-ouest du complexe.

La minéralisation forme un niveau de lentilles effilochées continues de 0,10 à 1,50 m de puissance. Ce niveau est interstratifié dans la formation d'anorthosite composée de plagioclase, pyroxène, hornblende, quartz apatite, graphite.

La minéralisation est composée de pyrrhotite, chalcopyrite, pentlandite, et comme minéraux de PGE stibiopaladinite ($Pd_5 Sb_2$) et des sperrylites. Ces sulfures ne sont jamais très abondants (1 à 5 %), ils se logent dans les interstices entre les silicates. Par rapport au J.M. Reef, les teneurs sont nettement plus faibles (inférieures à 5 g/t de Pt + Pd), par contre, les teneurs en Cu sont plus élevées.

Sporadiquement, des pipes minéralisés ("sulfides pipes") ont été reconnus, ils sont de dimensions métriques et s'enracinent dans l'Anorthosite sub-Zone II jusqu'à une profondeur d'environ 150 m. Leur rôle exact n'est pas encore très net, on ne peut affirmer s'ils représentent les cheminées hydrothermales.

L'altération, bien marquée par le développement d'épidote, clinozoïsite, quartz, chlorite, calcite, talc, magnétite, est progressive, formant d'abord des halos autour des plagioclases, pyroxènes et sulfures, avant d'affecter l'ensemble de la roche. A ce stade, des veines remplies de calcite, graphite, chlorite, trémolite, clinozoïte, apparaissent.

Indépendante de la position de la minéralisation, l'altération localisée surtout dans les zones tectonisées, est nettement secondaire par rapport aux processus magmatiques du dépôt de la minéralisation.

Cette altération est la marque d'un hydrothermalisme postérieur ayant donné de faibles remobilisations sans augmentation notable des teneurs en PGE.

3.2.3. Origine et découverte du gisement

L'origine du gisement est identique à celle présentée pour le complexe du Bushveld (chap. 3.1.3.).

La décision d'explorer le complexe de Stillwater pour le platine a été prise en 1962 en raisonnant par analogie avec le gisement bien connu du Bushveld. Plusieurs méthodes d'exploration ont été utilisées (H.K. Conn, 1979), depuis la prospection classique et cartographie géologique avec géochimie, magnétométrie, P.S., VLF, jusqu'aux sondages diamant et travaux souterrains. Le développement de la sensibilité des techniques d'analyses de Pt et Pd a été déterminant dans la mise en évidence du gisement.

La mise en production du gisement est imminente, plus de 20 ans après le début des travaux d'exploration.

3.3. LE COMPLEXE DE SUDBURY

Le complexe de Sudbury est situé dans la province d'Ontario au Nord de la ville qui porte le même nom. C'est un appareil qui se présente sur une soixantaine de kilomètres de long et un peu plus de 25 km de large. Il porte à sa périphérie les gisements exploités de nickel et de cuivre qui contiennent également les métaux du groupe de platine (fig. 13).

3.3.1. Géologie régionale

Sudbury est un complexe de forme elliptique, d'âge protérozoïque inférieur (1850 Ma) de 3000 à 4000 m d'épaisseur, recouvert par les roches à prédominance sédimentaire du White Water Group (fig. 13). Il compte trois unités principales :

- des norites de la zone inférieure qui affleurent en bordure du massif, sous forme d'anneaux concentriques ;
- des gabbros dans la zone intermédiaire ;
- des granophyres dans la zone supérieure.

Les gisements de Ni-Cu sont associés soit à un sous-niveau de norites qui affleure de manière discontinue à la base du complexe, soit à des corps en forme de dyke de roches éruptives et appelés "offset".

3.3.2. Les gisements

A.J. Naldrett (1984) classe les gisements de Ni-Cu du district de Sudbury en cinq groupes, en prenant pour chacun des quatre premiers, une mine à titre d'exemple et en donnant une coupe synthétique (fig. 13) :

- les gisements de la bordure sud avec la mine de Murray (fig. 14a) ;
- les gisements de la bordure nord avec la mine de Strathcona (fig. 14b) ;
- les gisements du type offset avec le gisement de Froid (fig. 14c) ;
- les gisements liés à des failles avec la mine de McKim (fig. 14d) ;
- le cinquième groupe "miscellaneous" est seulement cité sans exemple.

Trois des quatre coupes précisent clairement la position de la minéralisation à la base de la zone inférieure des norites situées directement sur les formations du mur. Le type offset est plus particulier car il pénètre dans les formations du mur.

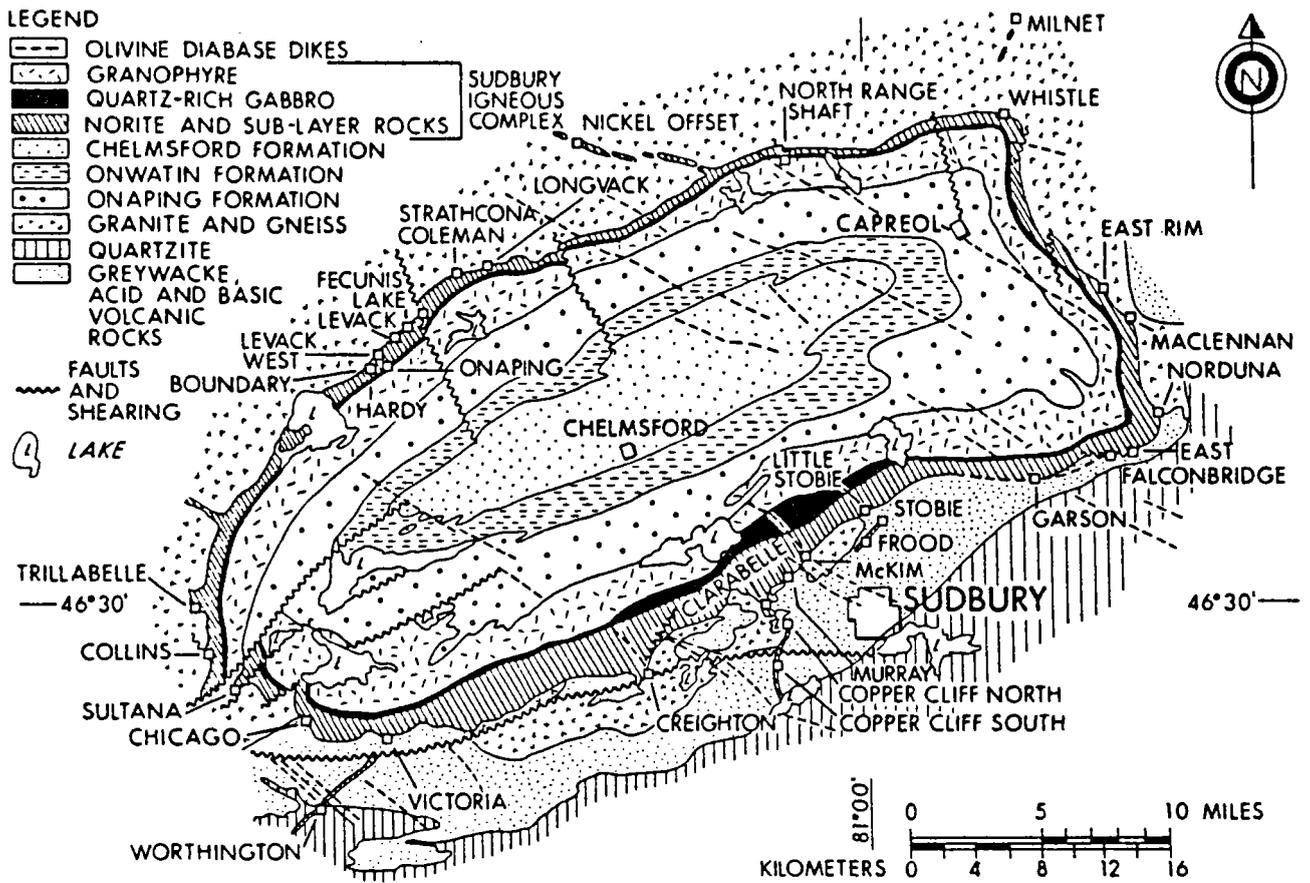


Fig. 13 - Géologie du complexe de Sudbury (d'après A.J. Naldrett, 1986)

Le minerai est complexe ; quelque trente-deux minéraux ont été identifiés formant deux principales paragenèses :

- paragenèse à Fe-Ni-S incluant principalement pyrrhotite, pentlandite et pyrite ;
- paragenèse à Cu-Fe-S regroupant surtout chalcopyrite, cubanite et bornite.

Comme minéraux accessoires, il faut noter la présence de magnétite dont le pourcentage varie de 5 à 10 % et peut aller jusqu'à 25 %, ainsi que :

- sphalérite et galène, surtout présents dans les zones cuprifères,
- niccolite, monchélite, gersdorffite et cobaltite ; ces minéraux sont très enrichis en PGE surtout Pt, Pd et Rh.
- minéraux PGE : au total treize minéraux PGE ont été reconnus. Ce sont des arséniures (sperrylite), des tellures (michénélite, monchélite, kotulskite et merenskiyite ...) et d'autres alliages qui sont le plus souvent associés aux sulfures de Ni plutôt qu'aux sulfures de Cu.

D'un gisement à l'autre, les teneurs en PGE sont très variables (tableau 14).

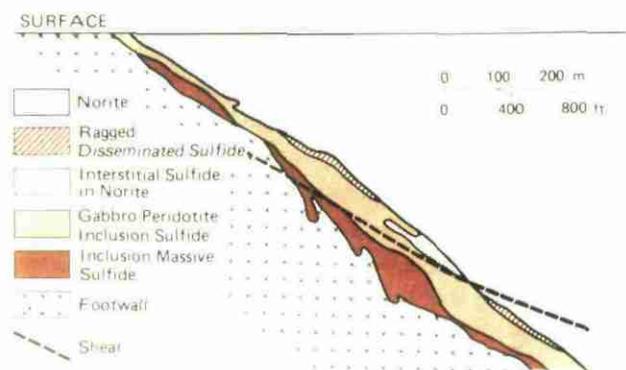
Examinons les trois types principaux de gisements de Sudbury :

Les gisements de la bordure nord (district Onaping-Levack) apparaissent dans les formations du mur, dans de petites dépressions. Elles sont recouvertes par une succession de roches variées ("mafic norite sublayer") de puissance plus importante. Les zones minéralisées (lentilles et veines) sont encaissées dans la "Footwall Breccia", formation du mur de composition hétérogène à éléments variés : gneiss felsiques, amphibolites, cumulats mafiques-ultramafiques englobés dans une matrice à plagioclases, quartz et amphiboles.

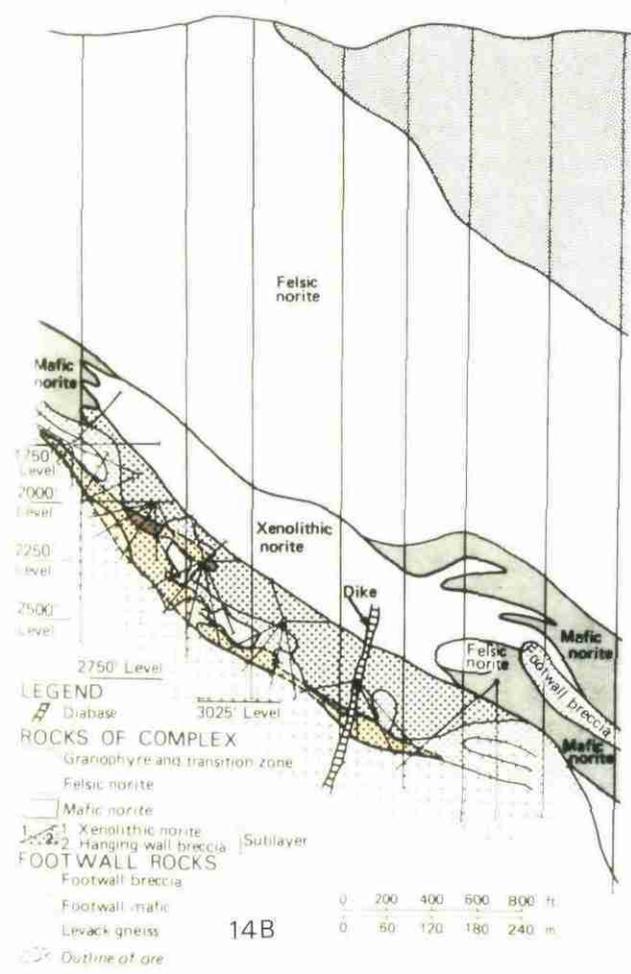
Les sulfures sont disséminés dans la matrice ou se rassemblent en un réseau plus ou moins dense de veines et filonnets.

Les gisements de type offset localisés dans le district de Copper Cliff sont associés à une apophyse du complexe de Sudbury recoupant vers le Sud-Est les formations encaissantes (granite de Creighton, ensembles métasédimentaires et métavolcaniques d'âge huronien et dyke de diabase Nipissing).

La minéralisation en amas massif jalonne une zone de contact entre un ensemble disloqué en lambeaux de la "Sudbury Breccia" - roche à fragments d'amphibolites de gabbros et de roches métasédimentaires - et un dyke de quartz-diorite qui peut être minéralisé.

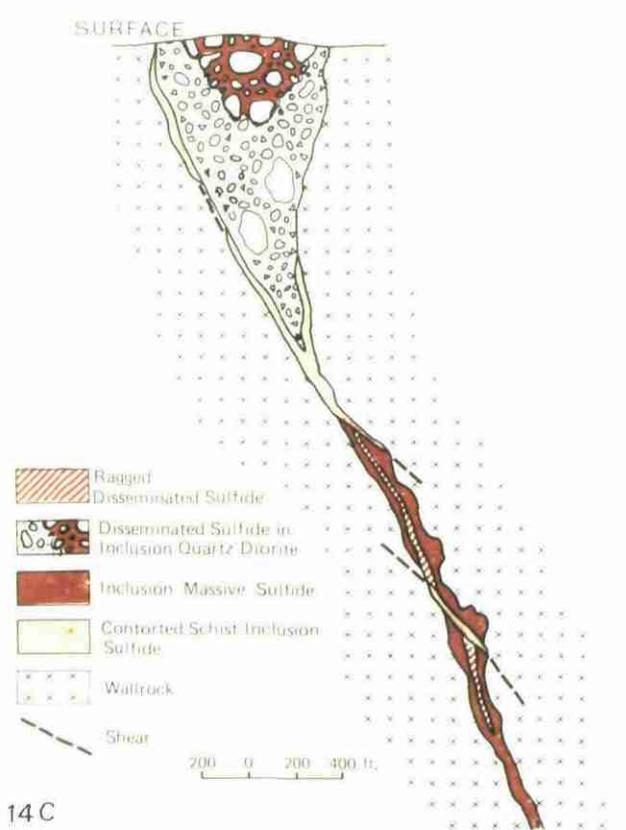


14 A
Generalized sections through the Murray Mine looking west (after Souch, Podolsky *et al.* 1969)

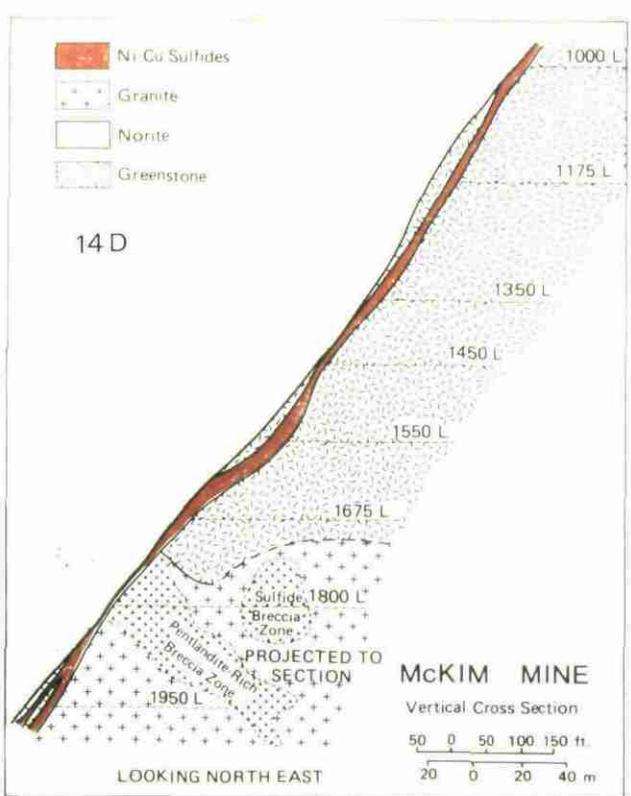


14 B
Vertical cross-section (21 200 E) through the Strathcona Mine looking east (after Naldrett and Kullerud 1967)

Fig. 14 - Coupe simplifiée des 4 principaux types de gisements du complexe de Sudbury



14 C
Generalized section through the Frood orebody, looking southwest (after Souch, Podolsky *et al.* 1969)

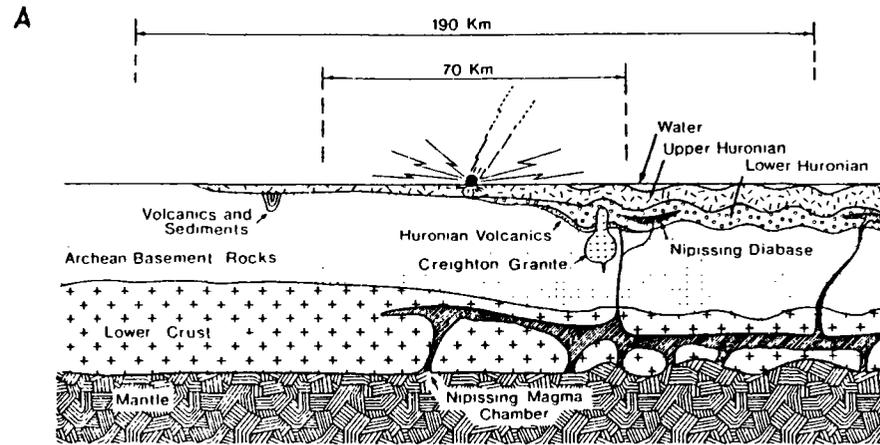


14 D
Cross-section showing the dip of the main ore zone and position of the pentlandite-rich and Footwall Breccia ore at McKim Mine. Looking east (after Clarke and Potapoff 1959)

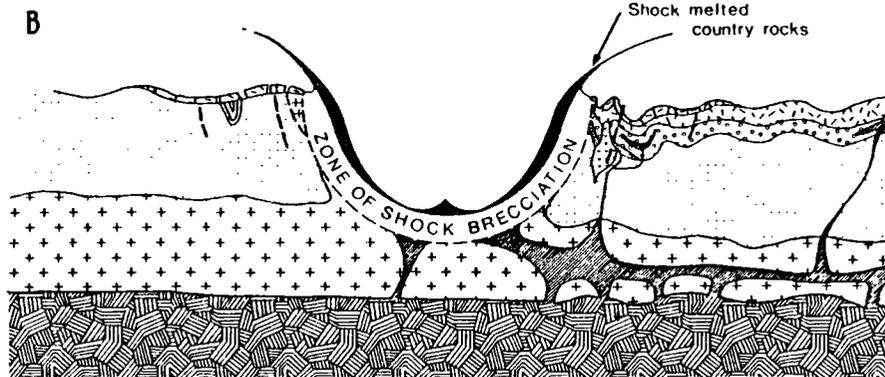
Fig. 15

Various stages of evolution of the SUDBURY structure.

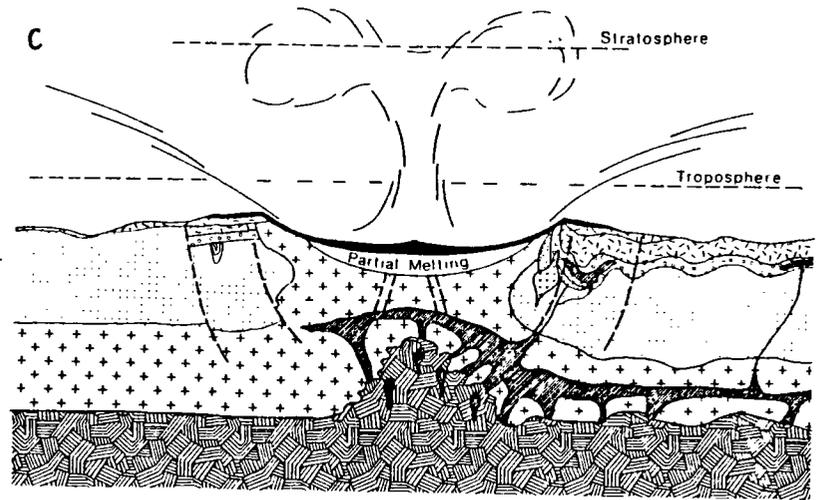
D'après W.V. PEREDERY and G.G. MORRISON -1984-



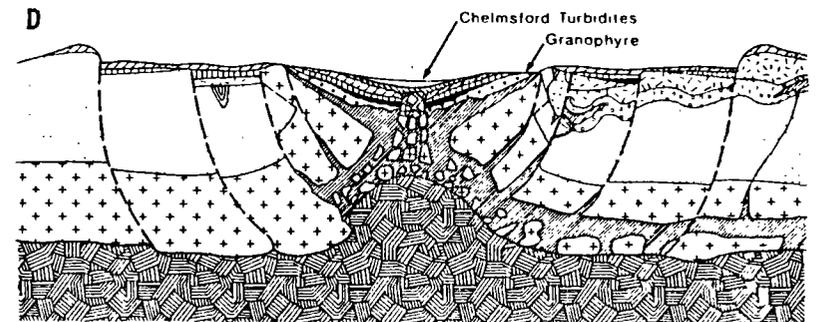
Regional setting



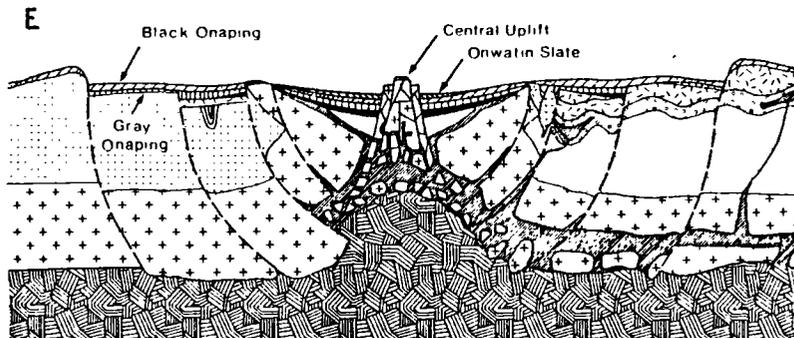
Shock compression and excavation of the transient crater.



Ejection of melt, shocked, and brecciated country rock radially out of crater, followed by the elastic rebound and isostatic adjustments to form a modified crater.



Collapse of the magma chamber and central uplift resulted in the emplacement of the granophyre (a mixture of fractionated norite, impact melt, and molten country rock). Deposition of the Chelmsford Formation turbidites was followed by the Penokean Orogeny and deformation of the Sudbury Structure into an elliptical shape.



Accumulation of fallback was followed by a tsunami-wave wash-in of fallback debris from outside the modified crater back into the crater. This was possibly also the time of upwelling in the central part of the modified crater giving rise to the central uplift. This was followed by emplacement of the noritic magma along the base of the modified crater, and erosion of the Onaping Formation to produce the Onwatin Formation mudstones. Collapse and adjustments continued producing a crater basin about 190 km in diameter.

Deposit	No. of samples	Wt percent			Parts per billion							Cu/Cu + Ni	Pt/Pt + Pd	Pt + Pd/Ru + Ir + Os	
		Ni	Cu	Co	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au				
Levack West	21	5.73 (0.31)	3.72 (1.95)	0.16 (0.008)	1,150 (108)	1,250 (225)	186 (32)	60 (14)	47 (11)	22 (4)	150 (43)	0.394	0.479	18.6	Hoffman et al. (1979)
Strathcona	37	3.63 (0.13)	1.23[2.8] (0.08)	0.15[0.14] (0.012)	420[590] (69)	372[511] (60)	30[19] (4.7)	21[9] (4.4)	12[8] (2.4)	8[5] (1.6)	54[79] (11)	0.253	0.532	19.3	This study
Little Stobie 1	23	3.83 (0.13)	4.41 (0.65)	0.19 (0.003)	1,930 (415)	2,120 (344)	119 (12)	123 (16)	62 (6)	29 (3)	862 (23)	0.535	0.477	19.2	Hoffman et al. (1979)
Little Stobie 2	11	4.00 (0.18)	3.60 (0.65)	0.17 (0.004)	2,130 (871)	3,170 (829)	303 (28)	247 (40)	113 (14)	46 (7)	868 (314)	0.474	0.402	13.2	Hoffman et al. (1979)
Falconbridge	23	5.35 (0.14)	1.52 (0.39)	0.22 (0.014)	546 (109)	381 (95)	287 (28)	225 (31)	144 (14)	40 (6)	174 (60)	0.221	0.589	2.27	This study
Chondrites (C1)					1,020 ¹	545 ²	200 ³	690 ³	540 ²	514 ⁴	152 ⁴				See below for references

Analyses have been, first, recalculated to reflect the concentration of metal in the sulfide fraction and, then, averaged; the standard errors of the mean are given in parentheses. Values for Strathcona in brackets are based on an average of our samples weighted to give the same Cu/(Cu + Ni) ratio as the published ore reserves for the deposit rather than on a straight average.

References for chondritic abundances are as follows: ¹ Ehmman and Gillum (1972); ² Wolf and Anders (1980); ³ Mason (1971); ⁴ Krähenbühl et al. (1973)

Tabl. 14 - Evolution des teneurs en métaux de base et PGE dans quelques gisements du complexe de Sudbury (d'après Naldrett A.J. et al., 1984)

Les principaux sulfures sont pyrrhotite, pentlandite en inclusions dans la pyrrhotite et chalcopyrite. Comme autres minéraux, il faut citer pyrite, cubanite, ilménite et magnétite. Les minéraux PGE identifiés sont la michénérinite (Pd Bi Te), la sperrylite (Pt As₂) et la sudburyite (Pd Sb).

- A Coppercliff, le "120 orebody" de forme lenticulaire est encaissé dans le dyke de quartz-diorite ; il montre une zone centrale à sulfures massifs ceinturée par une zone de sulfures disséminés où le pourcentage relatif de chalcopyrite est plus élevé et les teneurs en Pt, Pd et Au plus importantes. En profondeur, on observe le même phénomène avec une augmentation des teneurs en Cu, Pt, Pd et Au. Le minerai devient plus siliceux et les sulfures de cuivre chalcopyrite et cubanite de plus en plus abondants.

Des observations identiques ont été faites sur le 810 orebody encaissé dans le dyke de quartz-diorite et situé à quelque 3 km plus au Sud du précédent gisement.

- Dans les gisements de Froot-Stobie, on note une zonalité verticale très prononcée avec une augmentation en profondeur des teneurs en cuivre par rapport au nickel. Ces gisements se présentent comme des dykes mis en place dans la "Sudbury Breccia" ; ils sont parallèles au rebord sud du complexe de Sudbury.

Les teneurs en PGE dans cette zone sont anormalement élevées ; elles se concentrent surtout, selon A.J. Naldrett (1984), dans des formations silicifiées qui apparaissent comme des remobilisations hydrothermales.

Le groupe des gisements liés aux failles ; dans ce groupe, deux types ont été distingués : l'un au contact des norites et des formations du mur, l'autre sur des accidents recoupant des protrusions développées dans les formations du mur.

Les deux gisements de Little Stobie, représentatifs des deux types précédents, montrent de bonnes teneurs en PGE (2,13 g en Pt et 3,17 en Pd) qui sont deux à trois fois plus élevées dans les zones cuprifères.

Cette relation s'observe aussi dans le gisement de Falconbridge situé sur le rebord sud du complexe, les teneurs en cuivre sont faibles ; il en est de même pour les éléments Pt, Pd et Au (tableau 15), alors que pour Os, Ir, Ru et Rh, leurs teneurs sont aussi élevées que dans les zones les plus riches de Sudbury.

Tableau 15 - Concentration des métaux dans le gisement de Falconbridge (d'après O.L. Owen and C.J.A. Coats, 1984).

Ni	Cu Wt %	Co	Pt	Pd	Rh	Ru ppb	Ir	Os	Au
5.35	1.52	0.22	546	381	287	225	144	40	174
Cu/Cu + Ni = 0.22		Pt/Pt + Pd = 0.0589				Pt + Pd/Ru + Ir + Os = 2.27			

*No. of samples 23. Recalculated values to reflect concentration in 100% sulfide. Data from Naldrett et al. (1982)

Selon A.J. Naldrett et al. (1982), les éléments Cu, Pt et Pd ont été remobilisés en liaison avec une fracturation après dépôt du minerai. Des évidences de remobilisation hydrothermale, qui pourraient être contemporaines du dépôt de la minéralisation, ont été observées.

Dans le district de Sudbury, la répartition des sulfures et des PGE est différente non seulement entre les gisements du Nord et ceux du Sud mais aussi à l'intérieur même de chaque gisement.

Dans tous les gisements, on note une zonalité dans la distribution des principaux éléments :

- Rh, Ru, Ir et Os sont enrichis avec Co dans les formations du toit, riches en sulfures de nickel ;
- Pt, Pd, Ag et Au sont concentrés avec Cu et (Ni) dans les formations du mur.

Selon A.J. Naldrett et al. (1982), cette zonalité, bien marquée dans les gisements au Nord du district, résulte du fractionnement du liquide sulfuré primaire.

Dans les gisements du Sud du district, cette zonalité est moins nette, en outre, la minéralisation se distingue par la présence d'arséniures et de sulfosels de PGE et des teneurs relativement plus élevées en Ni, Cu et PGE (c'est le cas dans les gisements de Frood Stobie et de Copper Cliff).

Les enrichissements en PGE et Cu proviendraient selon A.J. Naldrett (1984) de remobilisations hydrothermales. Dès à présent, nous devons insister sur le lien existant entre les processus hydrothermaux et les fortes concentrations en PGE et métaux de base. Est-il nécessaire de rappeler que ces processus se marquent aussi dans l'environnement proche à plus lointain par des modifications lithologiques significatives (silicification, chloritisation...) qui peuvent être des guides généraux de recherche pouvant orienter la prospection.

3.3.3. Origine du complexe de Sudbury

L'origine du complexe de Sudbury a été et est toujours très controversée. Sa morphologie évoque une lopolite, un "ring dyke" ou une "funnel-shaped intrusion" (intrusion cylindrique). Selon les auteurs, la minéralisation résulte soit d'une activité hydrothermale et/ou d'une ségrégation magmatique. Cette double origine expliquerait ainsi les différences que l'on observe au niveau de la composition et de la distribution de la minéralisation. Certains caractères sont imputables à un événement majeur unique explosif centré sur la structure (fig. 15). L'hypothèse d'un impact de météorite est toujours vraisemblable.

3.4. LE DISTRICT DE NORILSK

3.4.1. Géologie régionale

Les gisements de Cu-Ni-PGE de Norilsk-Talnakh se trouvent en Sibérie à 600 km au Sud de la côte de l'océan Arctique. Ils sont situés sur la bordure nord-ouest du bouclier sibérien, considéré comme un craton stable depuis la fin du Paléozoïque (fig. 16).

Les gisements sont associés aux plateaux basaltiques d'âge permotriasique, lesquels recouvrent les diverses séries sédimentaires de la plate-forme sibérienne ; série de Tungusk (Permo-Carbonifère) constituée de sédiments clastiques et de couches de charbon ; série dévonienne formée de calcaire et d'évaporites (fig. 17).

Les trapps sibériens couvrent une très grande étendue, environ 1500 km². Ils reposent sur les sédiments marins de faible profondeur et continentaux de la plate-forme sibérienne. Cette dernière se limite en sa périphérie par les remontées du socle précambrien formant relief : Yenisei Range, Aldan Shield. Dans la partie centrale, l'Anaban shield correspond aussi à une remontée de ce socle (fig. 18).

L'activité volcanique a débuté au Permien (250 Ma) et s'est poursuivie jusqu'au Trias (210 Ma). Dans la partie centrale de la "plaine volcanique", le bassin de Tunguska correspond, selon A.J. Naldrett (1981), à une étroite dépression de type rift dont le remplissage est fait de produits volcaniques sub-aériens. Les flancs de ce bassin (flexure) sont parcourus par de nombreux dykes et sills en liaison avec de grandes failles profondes. Ces dykes se poursuivent sur une très grande étendue vers le Sud (plus de 500 km).

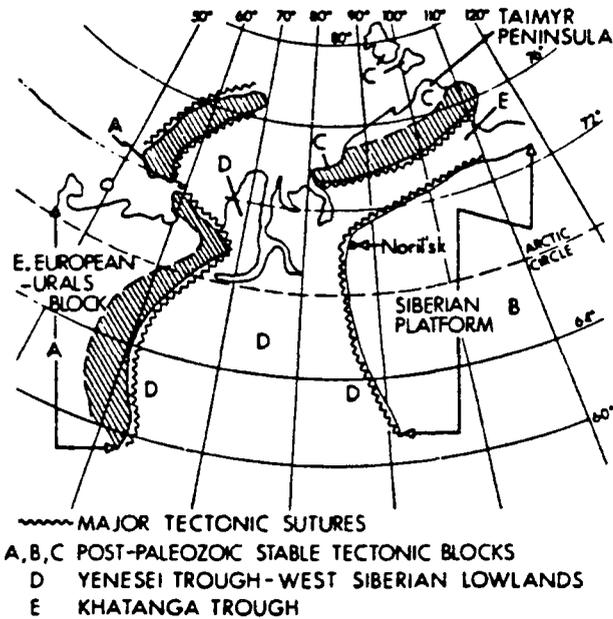


Fig. 16 - Cadre géotectonique de la Sibérie centrale (d'après Ye M Maksimov and M. Ya Rudkeviche (1974) in A.J. Naldrett, 1981)

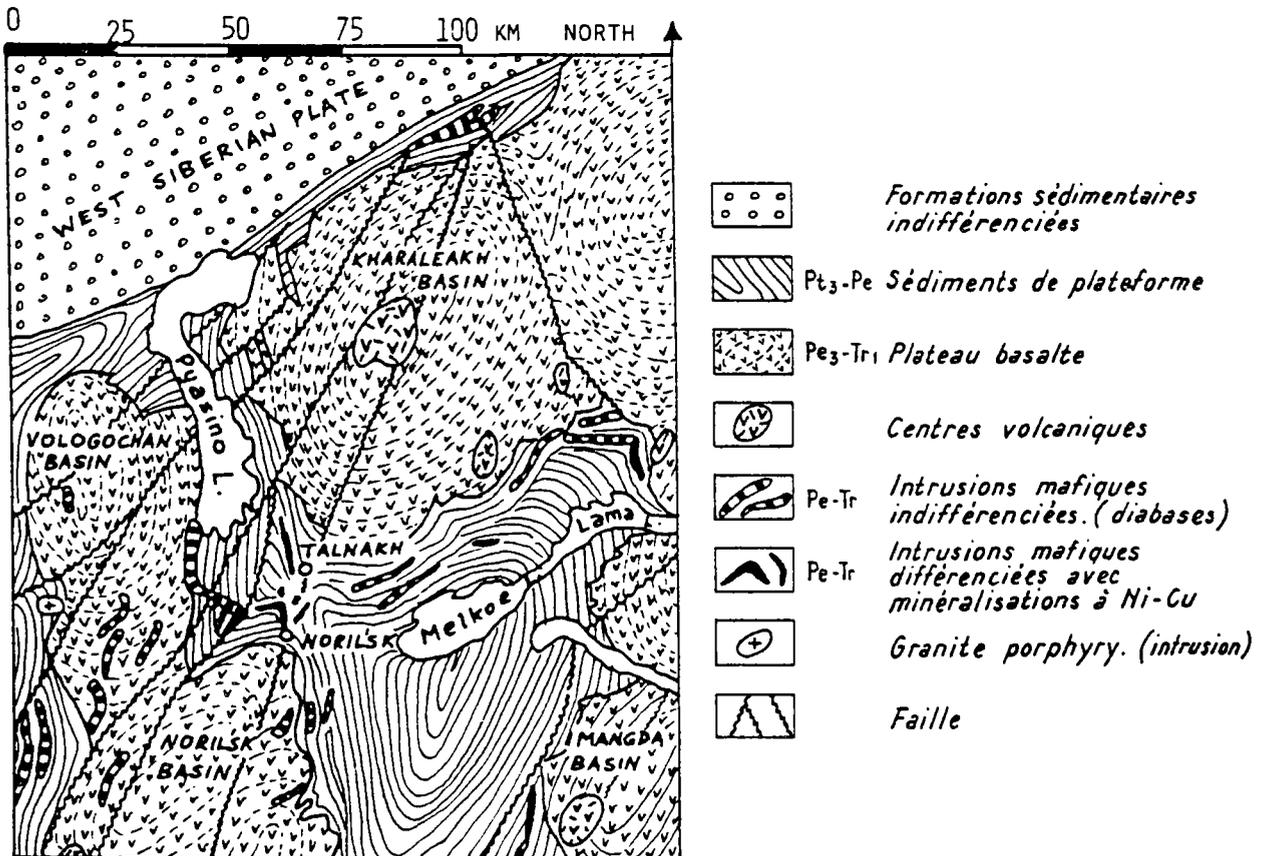
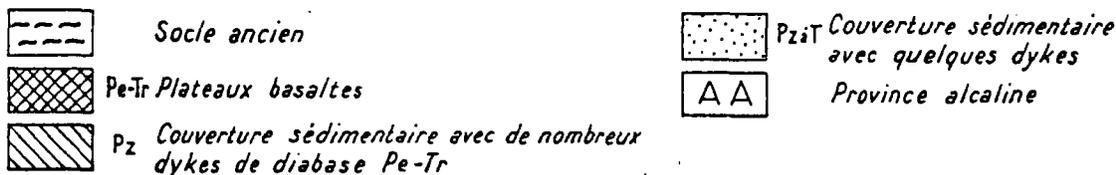
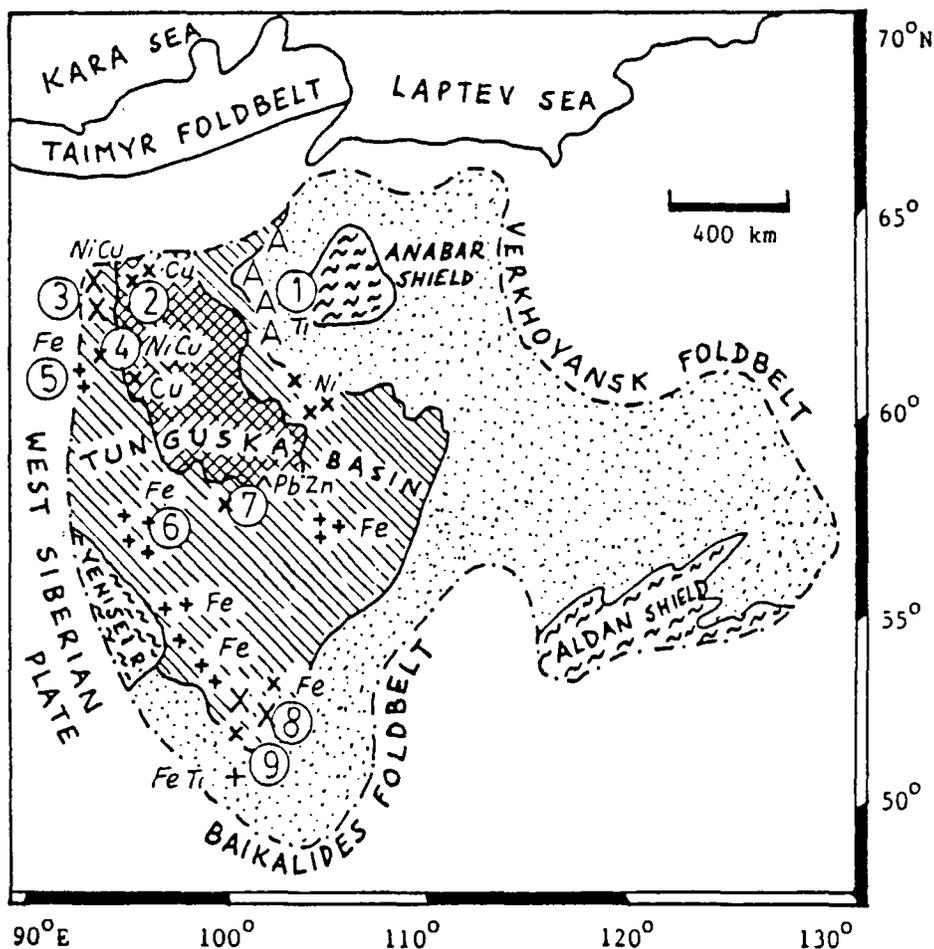
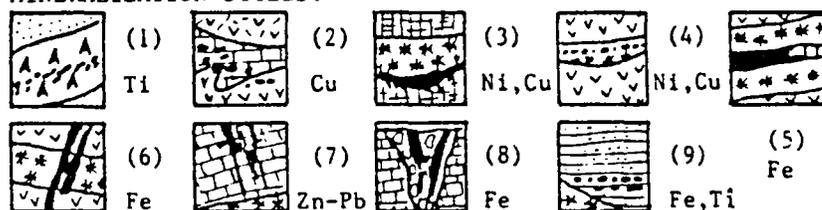


Fig. 17 - Carte géologique simplifiée de la région de Noril'sk Talnakh d'après Akad. Nauk SSSR "Sulfidnye medno-nikelevye rudy Noril'sk kikh meslorozhdenii" Nauka, Moscow, 1981, d'après Laznicka P (1985)

MINERALIZATION STYLES:



PRINCIPALES MINÉRALISATIONS

(1) Meimecha-Kotui ilmenite and Ti-magnetite layers and disseminations in alkaline intrusions; (2) Arylakh, native Cu along plateau basalt and carbonate contact; (3) Noril'sk and Talnakh Ni-Cu sulphides with Pt+Pd at footwall of differentiated mafic intrusions; (4) Kureika, Ni-Cu sulphides disseminated in lightly differentiated gabbro sills; (5) Tunguska Basin, magnetite layers in or near contacts with gabbro and diabase sills; (6) Podkamennaya Tunguska, Bakhta Fe district; magnetite veins and sheets in or near dolerite sills; (7) Tunguska Basin, sphalerite, galena veins or replacements in PZ carbonates near diabase sills; (8) Angara Ilim district, magnetite veins in diatreme breccias; (9) southern Siberian Platform: magnetite, ilmenite, zircon paleoplacers in J sandstone.

Fig. 18 - Principales minéralisations associées aux plateaux basaltiques de la plateforme sibérienne. (d'après Laznicka P., 1985)

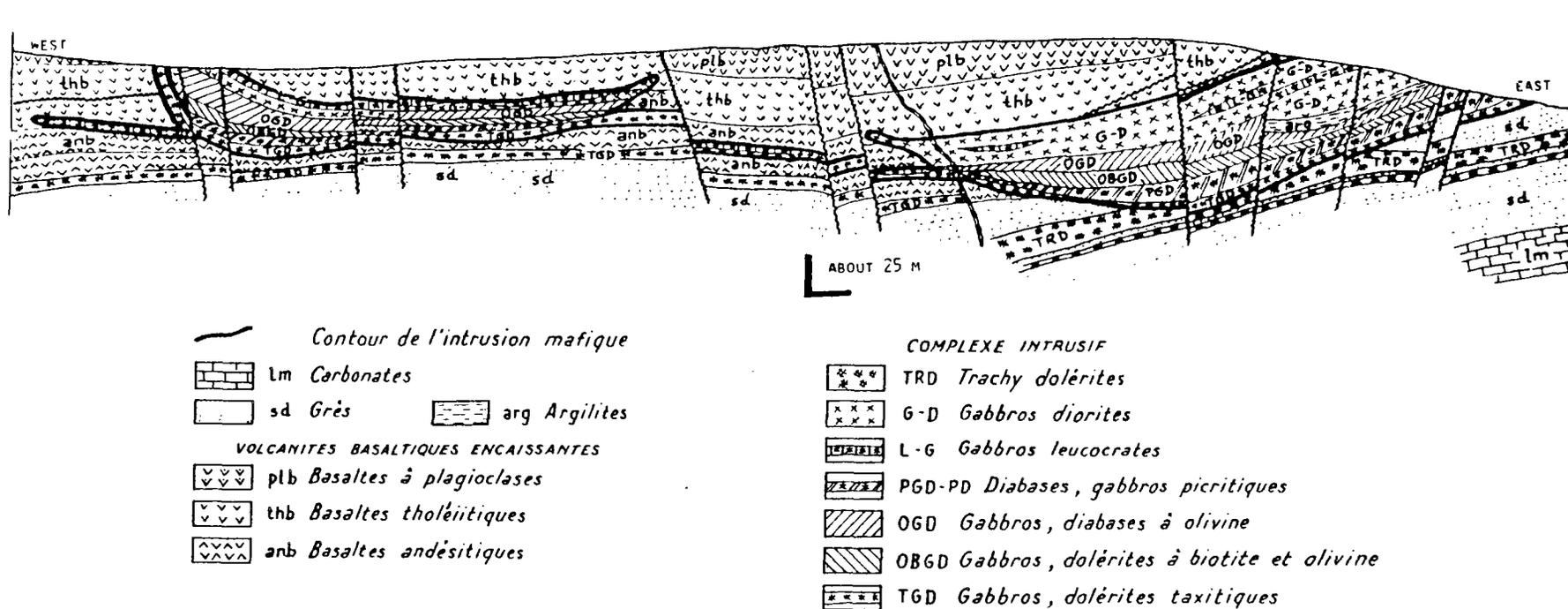


Fig. 19 - Coupe de l'intrusion mafique différenciée de Noril'sk I
(d'après Dobin et al., 1971) in Laznicka P. (1985)

La phase terminale de l'activité volcanique se caractérise par un volcanisme mafique explosif avec mise en place de corps et sills intrusifs.

Dans l'ensemble, les produits sont peu différenciés ; les premières émissions forment des sills et dykes de diabases dont la mise en place est contrôlée par le litage des roches sédimentaires et par des accidents développés au contact avec les roches encaissantes.

3.4.2. Les gisements

Parmi les nombreux gisements associés aux trapps sibériens, ceux à Ni-Cu et PGE sont les plus spectaculaires.

Les intrusions minéralisées très allongées (10 à 12 km sur 2 km de large), de 100 à 300 m de puissance (fig. 19, 20) sont pénécordantes avec les formations volcaniques ou sédimentaires encaissantes. Localement, elles montrent un début de différenciation qui peut être assez prononcée avec à la base des termes hypermagnésiens à olivine et de fortes teneurs en Ni et au sommet des gabbros et dolérites (fig. 21).

La minéralisation est complexe ; les principaux sulfures sont par ordre d'importance pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite, bornite, cubanite et une série de sulfures, sulfoarséniures de Ni, Cu, Pt-Pd, Bi, Sb, Te. Elle se présente sous trois aspects différents (A.D. Genkin et T.L. Evstigneeva, 1986) :

- en amas massif, près de contact inférieur avec les formations du mur, formés principalement de coopérite et d'un alliage Fe-Pt ; ces phases, ayant cristallisées directement à partir du magma, sont associées à des sulfures comme la pyrrhotite, la chalcopyrite et la pentlandite ;
- en brèche de minerai surtout près du contact inférieur ;
- en veines et filonnets qui s'infiltrent dans les méta-sédiments paléozoïques altérés du mur, ou qui recourent les brèches et le minerai massif.

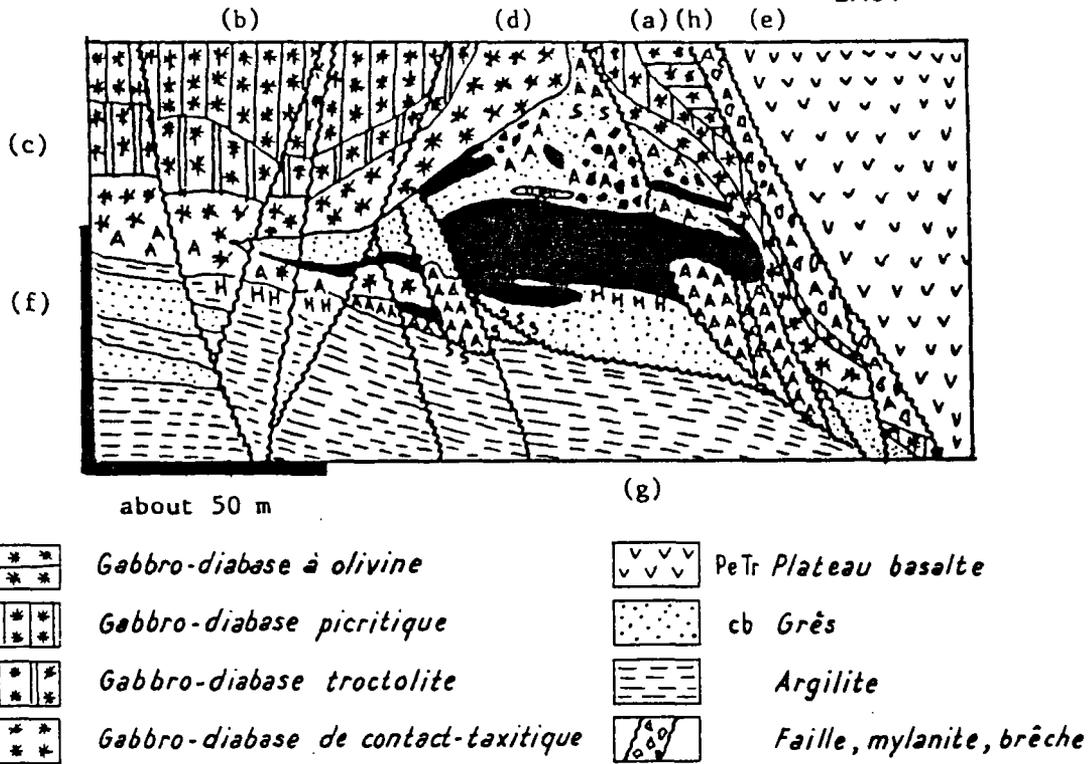


Fig. 20 - Coupe détaillée du gisement Ni-Cu. Partie nord de la zone sud-ouest du gisement (d'après Tavasov, 1974 ; in Laznicka P., 1985)

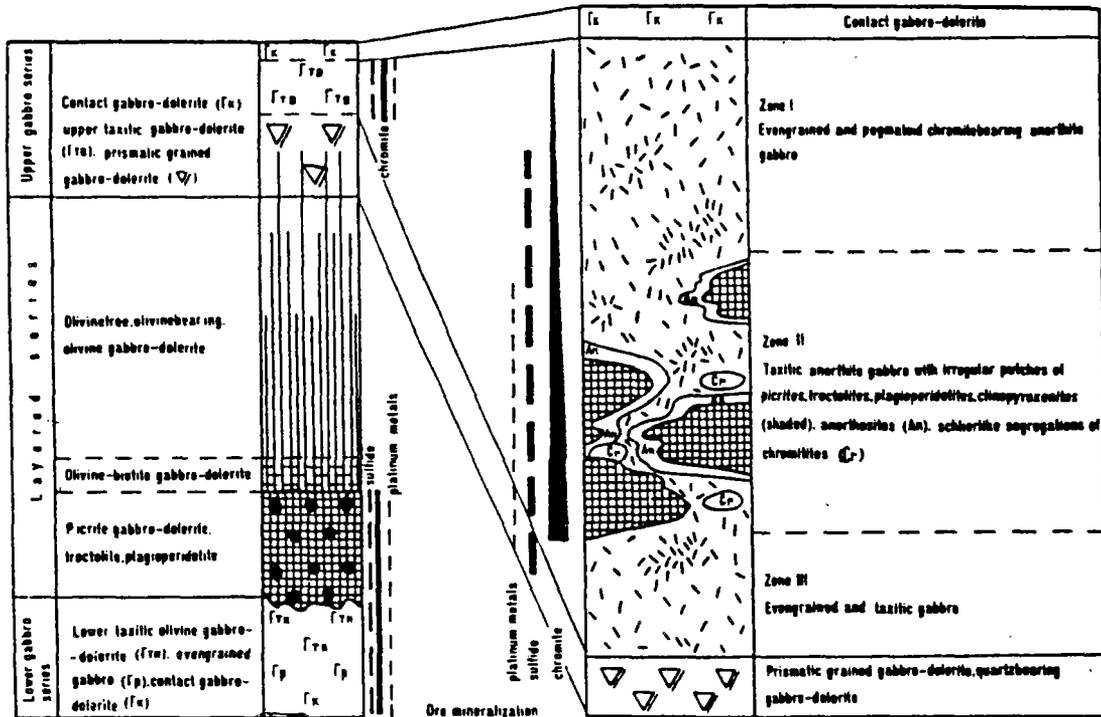


Fig. 21 - Répartition de la minéralisation dans le complexe intrusif de Talnakh (d'après Distler V.V. et al., 1986)

Dans ces deux derniers faciès (brèches et veines), les PGE sont exprimés sous forme de sulfures, de tellurures simples ou complexes. Ces phases minérales ont cristallisé à partir d'un liquide très enrichi en Pt, Pd, Sn Pb, As, Sb, Bi, Cu, Ag, Au et en éléments volatiles (Cl). Ils sont associés à d'autres sulfures comme la galène, la sphalérite et la bornite. Les sulfures de PGE peuvent aussi se développer en auréole autour des premiers sulfures formant les amas massifs, former des intercroissances entre différents grains de sulfures et silicates, ou se disperser (minéralisation disséminée) dans les troctolites, les norites et gabbros formant la partie médiane et supérieure des sills.

Les teneurs en PGE dans le minerai de seconde génération sont nettement plus élevées. Dès à présent, on doit mettre l'accent sur l'importance des processus hydrothermaux dans la formation des minéralisations à fortes teneurs en PGE. En effet, les zones minéralisées près du contact sont associées à une intense altération hydrothermale qui se marque par :

- une albitisation des grès et gabbros,
- la formation de skarns dans les sédiments carbonatés,
- le développement de biotite dans les gabbros,
- l'apparition de scapolite et de chlorite le long des joints et plans de failles.

Les teneurs sont variables, les meilleures atteignent respectivement : 1,23 % Ni, 2,16 % Cu, 0,1 % Co, 11 g/t Pt + Pd avec un rapport Pt/Pd de 1 à 10 avec traces Au, Ag et Te (Wagner et Berthold, 1979). Les réserves sont très importantes : 10 à 15 Mt de nickel métal.

D'après la littérature sur les gisements de Norils'k-Talnakh, les contrôles de la minéralisation sont nombreux. Nous retiendrons (fig. 31, chap. 6) :

- la présence de nombreuses failles profondes,
- le développement, au contact des corps intrusifs avec les roches encaissantes, de skarns indiquant des températures élevées de mise en place,
- l'abondance de basaltes picritiques et de volcanites associées dans les roches encaissantes,
- la présence de sulfates (gypse/anhydrite) dans les sédiments du mur,
- le caractère faiblement différencié des corps intrusifs, gabbro, dolérite à la base, roches hybrides de nature felsique au sommet.

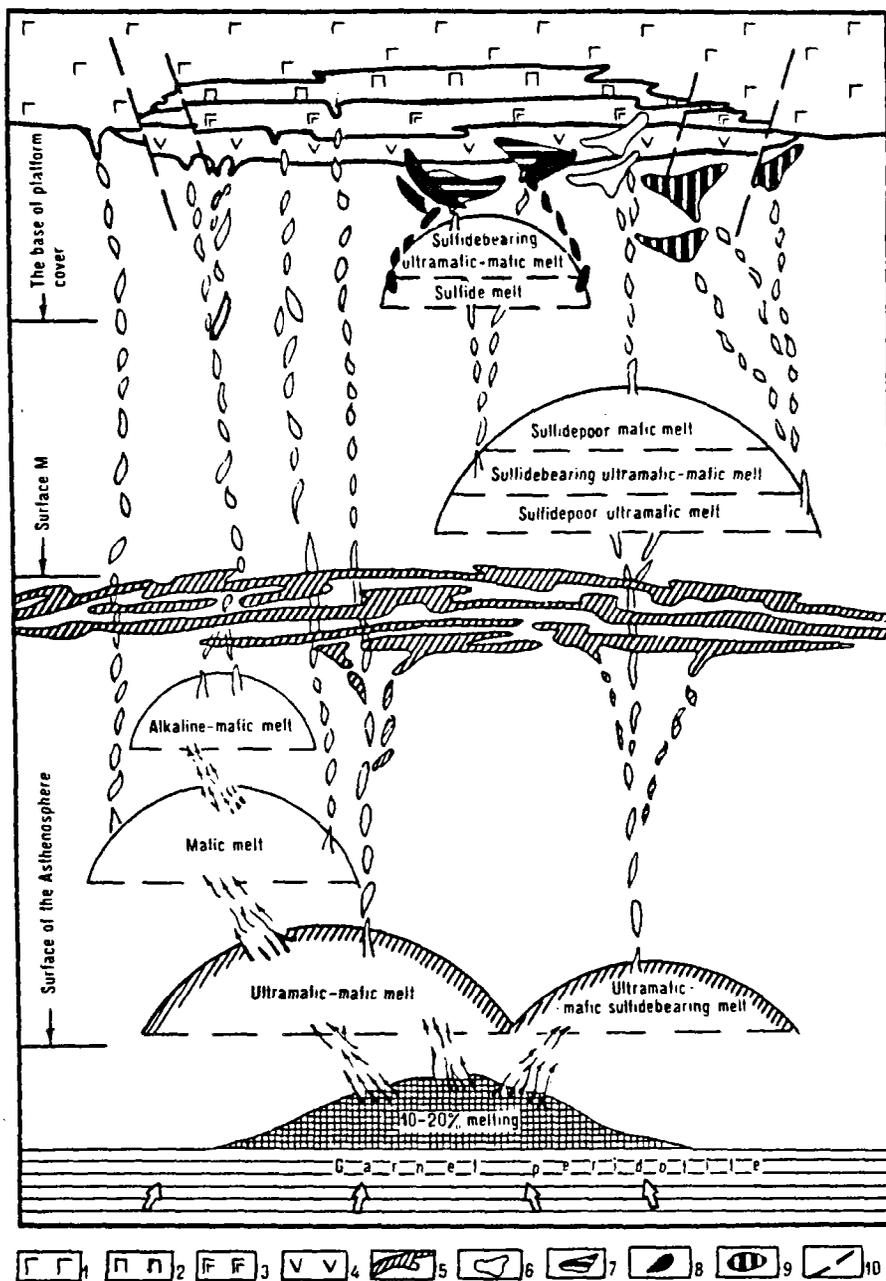


Fig. 22 -

Genetic model of magmatism and sulfide copper-nickel ore formation in the Norilsk region. 1-4 Late Paleozoic-Early Mesozoic volcanogenic rocks: 1 Tholeiite basalts of later magmatism; 2 hyperbasite-basite basalts (comagmatic to differentiated intrusives); 3 tholeiitic basalts of enhanced alkalinity in the early stage of magmatism; 4 alkaline-basite basalts; 5 Deep sills of hyperbasite-basites; 6-9 sulfide-bearing intrusives and massive ores: 6 leukocratic differentiates (Phase I); 7 differentiates with ore inclusion (Phase II); 8 massive ores; 9 melanocratic differentiates (Phase III); 10 deep faults controlling the alkaline-basite and hyperbasite-basite volcanogenic rock development

(d'après Distler V.V., Gentin A.D. and Dyuzhikov O.A., 1986)

3.4.3. L'origine

Quant à l'origine de la minéralisation, les géologues russes l'envisagent à partir de processus de différenciation magmatique (fig. 22) donnant un liquide riche en sulfures juvéniles. Ces processus sont responsables pour une bonne part de la ségrégation des liquides sulfurés immiscibles ce qui explique les variations de composition des intrusions mais aussi celles des teneurs en sulfures.

Les gisements sont associés à des colonnes intrusives mafiques-ultramafiques dont le niveau d'intrusion s'échelonne depuis le manteau supérieur pour atteindre la croûte consolidée.

La mise en place des sills mafiques-ultramafiques contrôlée par de grands accidents profonds et d'envergure régionale va donner une croûte plus épaisse mais aussi plus lourde qui s'enfoncera par panneaux à la faveur de failles. Les gisements Ni-Cu-Co localisés près de ces accidents ou dans des dépressions, se sont développés dans des conditions sub-volcaniques hypabyssales évolutives marquées par des formations mafiques-ultramafiques mais aussi alcalines dans les termes plus récents.

Deux types de dépôt de sulfures sont possibles : le premier à partir du magma lui-même, le second à partir d'une interaction entre l'environnement et les circulations hydrothermales accompagnant la mise en place des sills.

3.5. LES GISEMENTS DE Ni (Pt) DE KAMBALDA

3.5.1. Géologie régionale

Kambalda est un district à nickel sulfuré situé dans la Western Australia (fig. 23). Il fait partie, avec ceux du Zimbabwe et d'Abitibi, des gisements en relation étroite avec les komatiites, roches issues de la recristallisation de magmas ultramafiques, très riches en magnésium (la teneur en MgO est supérieure à 18 % et de manière courante comprise entre 20 et 30 %).

Les gisements de nickel de Kambalda, exploités depuis mars 1967, ont déjà produit, jusqu'en juin 1982, 15,69 Mt de minerai à 3,11 % Ni. A cette même date, les réserves étaient estimées à 2,5 Mt à 3,3 % Ni. Les PGE n'ont été reconnus que récemment, et malgré leurs faibles teneurs dans le minerai (326 ppb Pt, 425 ppb Pd), ils sont récupérés dans les mattes de nickel qui titrent net 4,2 g/t Pt et 10,9 g/t Pd (tableau 16).

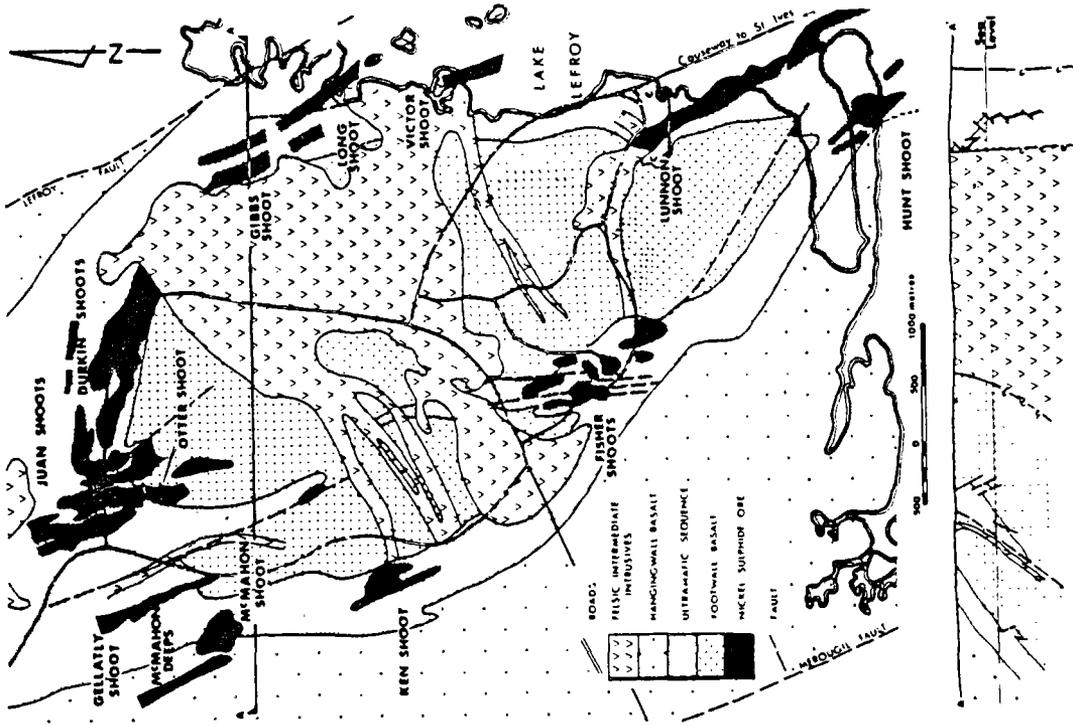


Fig. 24 - Répartition des principaux gisements autour du dôme de Kambalda (d'après Gresham J.J. and Loftus Hill J.D., 1981)

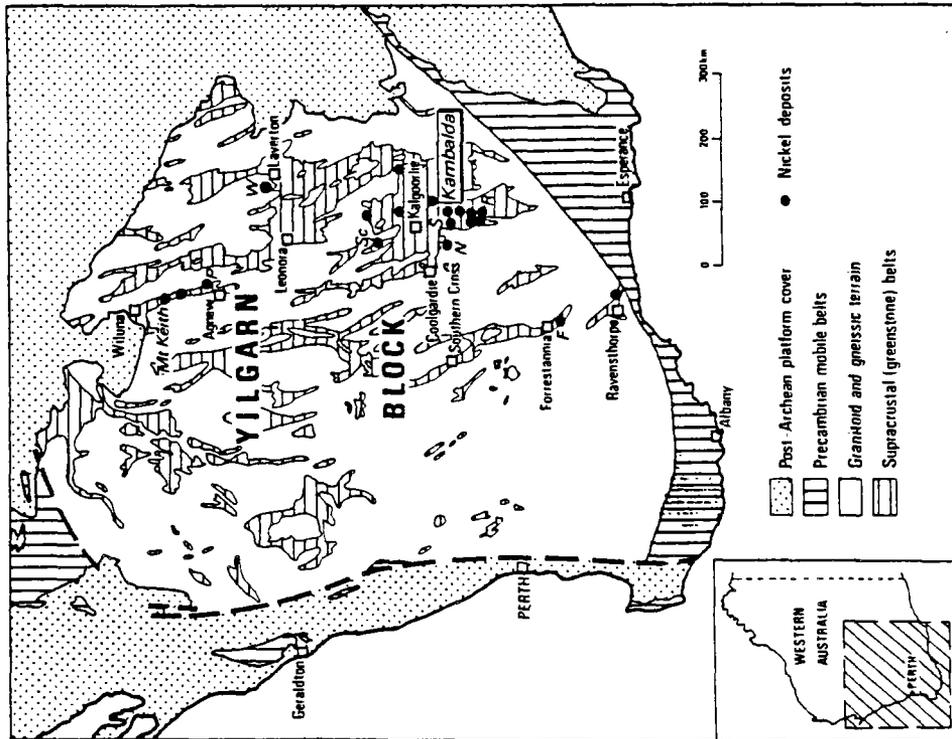


Fig. 23 - Generalized geological map of the Yilgarn Block of Western Australia showing the greenstone belts and the location of the principal nickel sulfide deposits. Those mentioned in text include Kambalda, Forresterama (F), Nepean (N), Redross (R), Scotia (Sc), Spargoville (S), and Windarra (W). (d'après Gresham J.J. and Loftus Hill J.D. (1981)

	Ni wt%	Cu	Co	S	Pt ppb	Pd	Os	Ir	Rh	Ru	Au	Ag
Ni ores*	2.96	0.22	0.07	§ 8.09	326	425	110†	60†	(50)‡	220†	339	1170§
Recalculated to 100% sulphides**	14.45	1.10	0.32	39.95	1630	2104	537††	293††	(240)‡	1074††	1721	5710††
High-grade Ni matte‡‡	72.9	5.6	0.5	19.6	4200	10 900	—	—	1200	4100	5700	24 200

* Tonnage-weighted average of six major oreshoots. From Ross and Keays,⁹ Table 1, except where indicated.
† Data from Keays and Davison.¹⁰
‡ Estimated from levels in Ni matte, assuming 100% recovery.
§ Average of 180 monthly composites of carted ores, 1976–81.
** From Ross and Keays,⁹ except where indicated.
†† Recalculated with Ni correction factor.
‡‡ Ni, Cu, Co and S averages of 3 monthly composites, July–September, 1981; Pt, Pd, Au and Ag data averages of 135 matte shipments 1975–81; Rh and Ru averages of 26 matte shipments, 1975–77 (analyses by K.N.S.).

Tabl. 16 - Composition du minerai et des mattes nickélifères de Kambalda (Australie) (d'après Hudson D.R. et al., 1984)

On dénombre plus de 20 gisements, d'importance inégale, dispersés autour du dôme felsique de Kambalda (fig. 24).

Les amas sulfurés sont localisés à la base de la série komatiitique d'âge archéen (3200 Ma), directement au-dessus ou à proximité d'une série de basaltes tholéitiques (fig. 25).

3.5.2. Les principaux gisements

Les principaux gisements se présentent en lentilles de 25 à 200 m de puissance et longues de plusieurs centaines de mètres.

Trois groupes principaux de gisements (tableau 17) ont été identifiés d'après la position paléogéographique bien spécifique (fig. 26) des amas minéralisés.

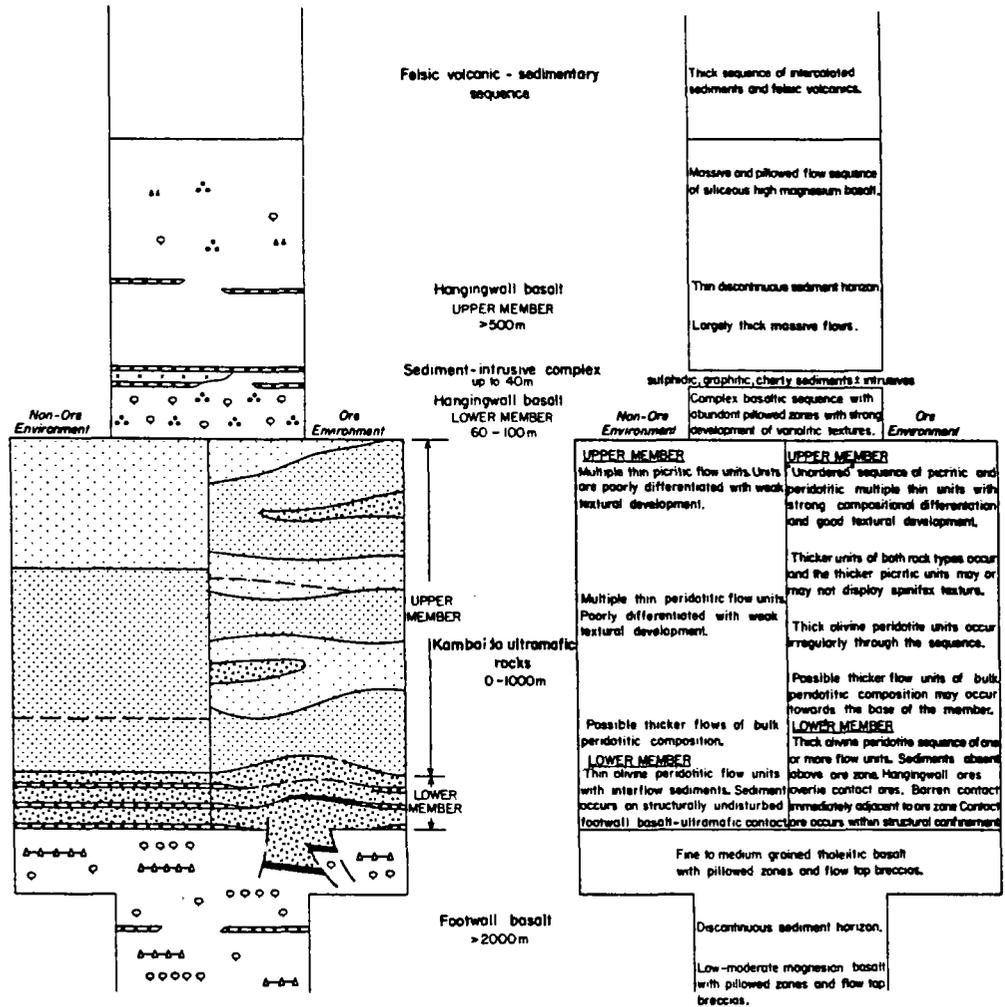


Fig. 25 - Principaux caractères de la série lithostratigraphique porteuse des minéralisations à Ni-Cu (PGE) du district de Kambalda (Australie) (d'après Gresham J.J. and Loftus Hill G.D. 1981)

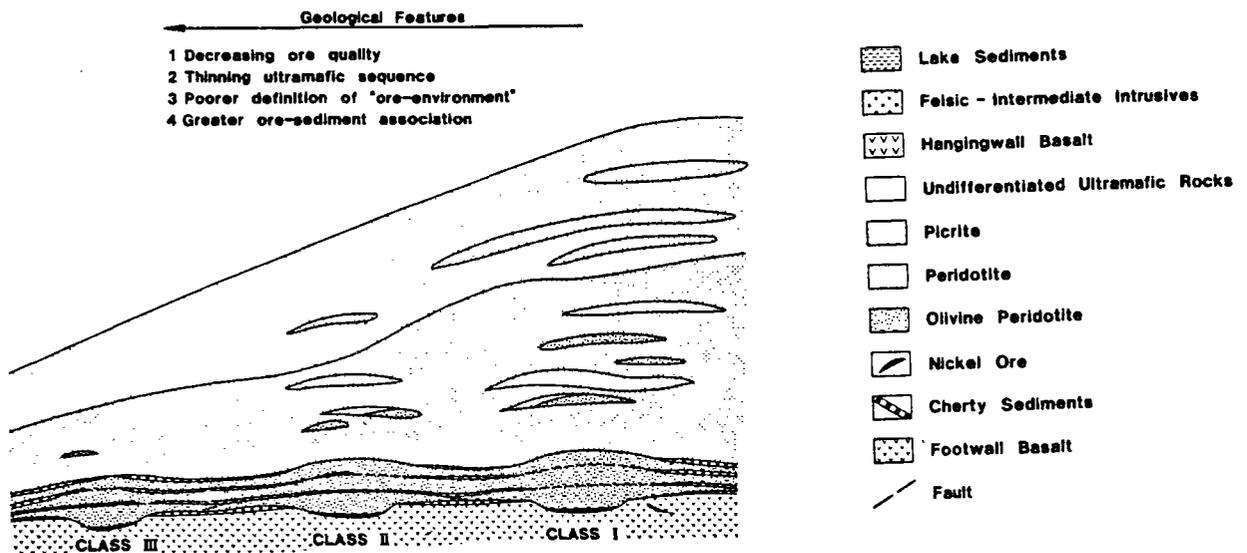


Fig. 26 - Localisation paléogéographique des sites de dépôts des minéralisations à Ni-Cu (PGE) dans le district de Kambalda (Australie) (d'après Gresham J.J., 1986)

Feature Shoots	Class I Juan, Otter, Durkin, Durkin North, Gibb, Long, Victor	Class II Lunnon	Class III Wroth, Gellatly, Gordon, McMahon, Loreto, Ken, Fisher, Hunt	Feature Shoots	Class I Juan, Otter, Durkin, Durkin North, Gibb, Long, Victor	Class II Lunnon	Class III Wroth, Gellatly, Gordon, McMahon, Loreto, Ken, Fisher, Hunt
% of total Kambalda Dome ore tonnes	59.4	19.1	21.5	Ore-confining features	Most contact ores occur within well-defined troughs or embayments, many with strongly re-entrant structures. Morphology is highly variable, but generally the trough floor is several metres below the barren flanks	Almost all contact ore occurs within the main Lunnon trough although low grade ore does occur on the west flank in places and associated with sediments on the east flank. The trough has been strongly modified by post-depositional faulting and these structures appear to terminate the hangingwall ores	Almost all contact ores occur in troughs and embayments of variable morphology. Definition of structural confinement is generally not as well developed as in the Class I and II deposits and mineralisation may occur as irregular concentrations along a broadly defined structural embayment. Hangingwall ores spatially related to contact ores, but association not as clearly defined as Class II deposits
% of total Kambalda Dome Ni metal tonnes	67.8	15.6	16.6				
Average Ni grade%	4.71	3.37	3.22				
% tonnage as contact ore	92.6	50.4	56.4				
% tonnage as hangingwall ore	3.3	42.5	38.2				
% tonnage as offset ore	4.1	7.1	5.4				
% Ni metal as contact ore	95.6	64.1	62.6				
% Ni metal as hangingwall ore	1.3	29.5	31.4				
% Ni metal as offset ore	3.1	6.4	6.0				
Ore body and ore characteristics	Almost all ore occurs as contact ore with the minor hangingwall occurrences comprising blebby ores within the high-magnesium basal flow units. Juan, Durkin and Long are the major shoots and individual ore surfaces within these ore bodies may contain 1 million tonnes of high-grade ore. Otter, Durkin, Victor, Gibb and parts of Juan comprise high tenor ores whereas Long and the greater part of Juan are moderate tenor (i.e. massive sulphides 10% - 16% Ni)	Ore tonnage almost equally distributed between contact and hangingwall ore and each occurs as extensive, once essentially continuous, ore surfaces. Contact ores are low tenor, but substantially higher grade than the high tenor hangingwall ores. The contact ores at the north end of the ore body are overlain by a thick zone of low-grade (<1% Ni) disseminated sulphides. The intensity of contact mineralisation diminishes from north to south. The hangingwall ores directly overlie the contact ore. Minor hangingwall ore occurs associated with the third flow unit	Contact ore surfaces can be moderate to high grade, but individual ore surfaces seldom exceed 250000 tonnes. Tenor of contact ores is highly variable and may be higher or lower than associated hangingwall ores. Hangingwall ore may be associated with the second or third flow units	Stratigraphic features	Ore associated with thick (50 - 100 m) high-magnesium basal flows with thin, fractionated, flow tops. No contact sediments within normal ore environment and interflow sediments generally absent above the troughs. Strongly unordered upper member with individual flow units displaying strong textural development and compositional differentiation	Contact ore associated with thick (30 - 80 m) flow that thins to the south. Basal flow has thick, strongly fractionated flow top. No contact sediments occur on the flanks up to the ore-confining structures. Hangingwall ore associated with 30 - 50 m thick flow also with thick spinifex-textured picritic flow top. Hangingwall ores commonly associated at margins with interflow sediments	Contact ores associated with thick basal flows. Contact sediments generally absent from major troughs, but some sediment-associated contact ore occurs at Ken shoot. Hangingwall ores associated with thick flows and commonly associated with sediments

Tabl. 17 - Principaux caractères des trois classes de gisements du district de Kambalda (Western Australia) (d'après Gresham J.J., 1986)

- Les gisements de "classe 1", situés à la base de la première coulée de komatiites au contact avec les basaltes du mur, occupent des dépressions longilignes en forme de sillons limités par des failles.
- Les gisements de "classe 2" occupent des dépressions situées dans les 2ème et 3ème coulées de komatiites au-dessus du contact avec les basaltes.
- Les gisements de "classe 3" sont localisés au sommet des coulées et associés aux intercalations de sédiments intercoulées.

Les lentilles ou horizons minéralisés montrent une zonalité verticale : à la base, la minéralisation est massive et comprend plus de 80 % de sulfures, au-dessus la teneur en sulfures diminue de 80 à 40 % ; enfin, la partie sommitale n'en contient plus que de 10 à 40 %. L'assemblage minéralogique est dominé par les sulfures pyrrhotite, pentlandite, pyrite avec, en moindre importance, chalcopryrite, magnétite, ferrochromite, et plus rarement millérite.

Les minéraux les plus abondants du groupe du platine sont la sperrylite (Pt As_2) et la sudburyite (Pd Sb) essentiellement. Egalement mais dans une moindre mesure, la monchéite $\text{Pt, Pd, Ni (Te, Bi)}_2$ et le palladoarsenide $\text{Pd}_2 (\text{As, Sb})$.

Les teneurs sont faibles avec une prédominance du palladium par rapport aux autres éléments (tableau 16) reflétant surtout le caractère nickélicifère de la minéralisation ($\text{Ni} > \text{Cu}$). Toutefois, le palladium ainsi que l'or ont des teneurs plus élevées dans les stringers à cuivre du mur.

Recalculées par rapport aux pourcentages des sulfures, les teneurs en Pd et Ir varient dans le même sens que celles en Ni. Les éléments Pt, Ni, Cu et Au sont plus abondants dans les sulfures disséminés formant la matrice que dans les sulfures des niveaux de minerai massif. A l'inverse, l'iridium est plus abondant dans le minerai massif sans variation notable des teneurs entre les différents sulfures pentlandite, pyrrhotite et pyrite. A Kambalda, les zones altérées riches en talc, carbonates et serpentine ne montrent pas de variations significatives des teneurs en PGE et Ni. Les rapports Pd/Ni et Se/Ni restent constants entre les roches saines et les roches altérées.

On n'observe aucune concentration particulière dans les niveaux sédimentaires intercoulés de 1 à 10 m de puissance, très abondants dans les parties basales de la série komatiitique. Les petits niveaux de sulfures de 5 à 15 mm de puissance, interstratifiés dans les niveaux sédimentaires donnent des teneurs en S, Pb, Zn, Fe, Cu et Au sans PGE notables (10 ppb).

3.5.3. L'origine

L'origine des amas sulfurés à Ni-Cu et PGE est à rechercher dans les phénomènes de ségrégation magmatique antérieurs à la mise en place des coulées de komatiites (ségrégation d'un liquide sulfuré du bain silicaté). L'absence de concentration à fortes teneurs en PGE est liée à l'absence de remobilisations hydrothermales contemporaines ou postérieures à la mise en place de la minéralisation.

3.6. LES PLACERS

Dans les placers, le platine est le principal PGE récupéré. Il dérive généralement des ensembles mafiques-ultramafiques très faiblement minéralisés : complexes alaskéens (tableau 18) et complexes ophiolitiques.

Le platine contenu dans ces ensembles est enrichi dans les produits de décomposition et peut donner naissance à des placers économiques dont la teneur de coupure est de l'ordre de 0,1 à 0,3 g/m³.

De tels gisements ont produit dans le passé des tonnages importants représentant environ 40 % de la production totale. Actuellement, ils ne fournissent plus que 2 à 3 % de l'approvisionnement mondial. Les réserves mondiales de platine des placers restent faibles ; elles se situent autour de 100 à 150 t.

La présence d'or très fréquente dans les sables platinifères, constitue un facteur valorisant ; elle s'explique surtout par son association avec les alliages Os-Ir.

Principaux placers.

a) En Oural. Le platine est récupéré dans des placers exploités aussi pour l'or comme sous-produit.

LOCALITY	AGE	GEOLOGY	MINERALIZATION	REFERENCES
Yakobi Island, S.E.Alaska	Tr- Cr	composite stock of norite en-veloped by gabbro,qtz.diorite	trough-shaped body of dissem. ptl,cp,po above norite base 66 Tt Ni/0.33% 44 Tt Cu/0.21%	Kennedy and Walton (1946)
Klukwan,n.of Haines, S.E.Alaska	Cr ₂	5x1.6 km stock of magnetite hornbl.pyroxenite, intruded gabbro-diorite	15-20% Ti-magnetite uniform dissem. in pyroxenite, local segreg.of massive magnetite 70 Mt Fe/14% 375 t Pt/0.75 ppm	Taylor and Noble (1969)
Union Bay, S.E.Alaska	Cr- T ₁	dunite,peridotite,oliv.pyroxenite,hornbl.pyrox.,gabbro zoned intrusion	large mass of magnetite-hornbl pyroxenite, uniform texture; aver. 18.03% Fe, 1.36% TiO ₂	as above
Duke Island, S.E.Alaska	Cr- T ₁	two separate intrusions; dunite or perid.core enveloped by pyroxenite,intr.to gabbro	concordant layers of segregated magnetite in pyroxenite, 10-60% Fe	as above
Salt Chuck Intrusion Kasaan Penn.,S.E. Alaska	Cr- T ₁	small pyroxenite body with minor gabbro and diorite emplac. into S metamorphics	dissem.and veinl.of bornite, cp,nat.Cu,palladium in pyroxenite; 2.4 Tt Cu 280 kg Pd	Wolff and Heiner (1971)
Brady Glacier, S.E.Alaska	T ₁	layered gabbro intrusion emplaced into MZ metamorphics has an olivine,pyroxene,chromite cumulate near base	po,ptl,cp,dissem.to massive in troctolite cumulate and along contacts; 500 Tt Ni/0.5% 300 Tt Cu/0.3%, 18 t Pt met.	Himmelberg and Loney (1981)
Aiken L.-McConnell Cr.area, British Columbia	Tr	about 10 small,zoned dunite, wehrlite,pyroxenite,hornblendite,gabbro intrusions	ilmenite segreg.pods in gabbro (Axelgold); magnetite dissem. in pyroxenite	Irvine (1974)
Hope,130 km E. of Vancouver, British Columbia	Cr ₂	3.2x1.6 km irregular zoned peridotite,pyroxenite,hornblendite body envel.by diorite and norite,in metamorphics	po,ptl,cp,disseminations to massive pipes in peridotite, sulphide masses on contact of pyroxenite and peridotite	Clark (1969) McTaggart (1971)
Tulameen complex, British Columbia	Tr ₃	zoned small intrusion; dunite core envel.by olivine and hornbl.pyroxenite,gabbro	Pt in dunite,highest value 0.225 ppm assoc.with chromite; small Au and Pt placers	McTaggart (1971)
Kochkanar Complex, Isovsk area, the Urals, USSR	S ₃	110 km ² laccolithic pluton, dunite,perid.,oliv.pyrox., oliv.gabbro,gabbro,norite, intruded into amphibolites	dissem. Ti-magnetite in olivine magnet.pyroxenite, 6 Bt Fe/16.64%; Pt,Pd dissem.in pyroxenite,Fe ore,placers; minimum 500 t Pt metals	Reshit'ko (1967)
Gusevogorsk, adjac. to Kochkanar,Urals, USSR	S ₃	like Kochkanar	coarse to fine Ti-magnetite segreg.,lenses,sheets; small quant. of nat.Au in magnetitite unevenly distributed Pt	Razin (1974)
Nizhnyi Tagil in- trusion, the Urals USSR	S ₃ - D ₁	dunite,pyroxenite,gabbro, empl.into Or-S metavolcanics	pockets,lenses,veinlets of Pt alloys in dunite, accumulated in placers; min. 259 t Pt	Razin (1974) Rundkvist,ed., (1978)
Volkovskoe deposit, part of Tagil intr. the Urals, USSR	S ₃ - D ₁	n.n.w. elong.gabbro, gabbrodiorite,diorite,quartz dior. layered intrusion	3 km long ore zone, 200 lens-like bodies of dissem.born.,cp overlapping with layered Ti-magnetite,in pyrox.gabbro about 600 Tt Cu/0.85%,300 t Pd	as above Samonov and Pozharisky (1974)
Chocó Province, Colombia	MZ- CZ	small serpentized ultra-mafic - mafic bodies	poor bedrock outcrop; 75 t Pt plus produced from placers	Putzer (1976)

Tabl. 18 - Principaux placers nourris par les complexes alaskéens en Alaska, en Oural et en Colombie (d'après Laznicka P., 1985)

Le principal district minéralisé est celui de Nyzhny-Tagilsk (10 x 3 km). Les alluvions à chromite et platine sur le versant ouest de l'Oural dérivent de l'altération des massifs basiques-ultrabasiques différenciés de type alaskéen (dunite à diorite quartzique) interstratifiés dans des formations de schistes micacés, grès et quartzites dévoniens. Les zones s'étendent sur plus de 200 km ; celle de l'Iss est productive sur 50 km. Les terrasses de 150 à 200 m de large sont exploitées sur 2 à 5 m d'épaisseur ; dans certains cas, on exploite aussi le bedrock altéré.

Les teneurs, jadis de 5 à 100 g/t, sont actuellement de 2 à 5 g/t et la composition du minerai est surtout à Pt dominant, souvent associé à la chromite :

Pt : 83 %	Rh : 0,59 %
Cs : 1,8 %	Pd : 0,26 %
Ir : 1,91 %	

Dans l'Oural, une dizaine d'autres massifs platinifères ont été recensés. Les réserves ne sont pas connues ; elles se situent à un niveau très inférieur à celui du district de Norils'k.

b) En Sibérie. Les placers de la Wiluy sont situés sur le bord oriental des trapps au Nord-Ouest desquels se trouve le district de Norils'k-Talnakh. Depuis 1915, on exploite les langues alluviales qui se reforment tous les 2 ou 3 ans et qui doivent leur minéralisation au démantèlement de conglomérats jurassiques.

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0,10 à 0,22 g/t pour le platine et aussi pour l'or. La composition du concentré diffère du type Oural avec des teneurs en Os, Rh et Ru plus fortes. Il est aussi très différent du gisement de Norils'k. Cependant l'importance économique de ce gisement est minime ; les pourcentages relatifs des différents PGE sont les suivants :

Pt : 65,43 %	Rh : 3,90 %
Os : 10,70 %	Ru : 2,32 %
Ir : 0,40 %	Pd : 0,82 %

Quant à son origine, on peut sans doute la rechercher dans les trapps basaltiques de Sibérie.

c) **En Alaska.** Exploités de 1934 à 1966, les placers les plus importants se situent dans la région de Goodnews Bay. La découverte fortuite d'une pépite de platine par un esquimau, à l'embouchure d'une rivière, est à l'origine de l'exploitation de ce gisement. Les prospecteurs recherchaient surtout l'or; ils n'avaient jamais porté la moindre attention aux grains gris acier à éclat métallique.

Les placers de Goodnews Bay sont liés aux intrusions basiques-ultrabasiqes de la fin du Mésozoïque et début du Tertiaire mises en place dans les volcano-sédiments du Paléozoïque tardif très plissé.

Parmi les roches basiques-ultrabasiqes, on distingue à Red Mountain des dunités altérées à 25 % en serpentinites, des pyroxénites à olivine formant la chaîne au Sud-Ouest de Susie Mountain ; des granites variés forment la chaîne au Sud-Est des sources de Small River.

Les concentrations s'opèrent dans les rivières Salmon et Platinum et leurs tributaires. Les remaniements sont nombreux et sont dus pour la plupart aux glaciations.

Les teneurs sont de l'ordre de 0,55 g/t Pt ; la composition est variée. L'alliage le plus commun est à Pt-Os ; des teneurs en Ir et Os ont été trouvées respectivement de 41,06 et 8,61 %.

La production de la société exploitante, la Goodnews Bay Mining Co, est faible mais régulière, de l'ordre de 250 à 300 kg par an.

On ne connaît pas de façon précise le montant des réserves originelles ; le tonnage récupéré serait environ de 15 t de platine.

d) **En Colombie.** Le platine a été découvert au 17ème siècle dans des placers de Tihiribi Choco déjà en exploitation pour l'or. Situés non loin du Pacifique sur le versant occidental des Andes à la latitude de Bogota, ces placers sont répartis

sur 15 000 km² entre les affluents de deux rivières coulant en sens opposé. Trois types de formations minéralisées y sont exploités :

- les sables noirs des alluvions actuelles des rivières,
- les conglomérats des terrasses anciennes,
- la croûte calcaire ou "caliche" qui se forme sur les terrasses.

Le platine alluvionnaire est associé à l'or dans la proportion de 1 à 3. La granulométrie est fine (de 0,1 à 0,2 mm). Les pépites sont rares ; on en signale une de 900 g et une deuxième de 520 g. C'est à Choco que la plus grosse masse de platine brut du monde (11 641 g) a été trouvée ; elle est conservée à Madrid. Le platine brut de Choco est un alliage de Pt à 84-88 %. Sa composition type est la suivante :

Pt : 86,2 %	Pd : 0,5 %
Ir : 0,85 %	Au : 1,0 %
Os : 0,95 %	Fe : 7,8 %
Rh : 1,4 %	Cu : 0,6 %

Certains placers contiennent du platine plus riche en osmiridium (alliage d'osmium et d'iridium). Les teneurs sont faibles de l'ordre de 0,215 - 0,18 g/Au/m³ et 0,095 - 0,070 g Pt/m³.

Quant aux réserves, aucune statistique n'est fournie dans la littérature.

L'origine du platine est mal connue. D'après sa composition chimique, il s'apparente au type Oural et proviendrait de dunites et/ou gabbros, d'un complexe alaskéen (tableau 18) ou peut-être d'une série ophiolitique de l'arrière-pays andin, d'âge mésozoïque ou paléozoïque. Certains grains de platine contiennent de la chromite et sont toujours associés à des galets de roches mafiques-ultramafiques (diabase, dunites, pyroxénolites, gabbros, ...).

e) En Ethiopie. Le seul gisement important est celui de Yubdo situé dans la région de Walléga. C'est en 1924 que des indices de Pt dans des sables et graviers sont signalés dans la partie centrale du bassin de la rivière Birbir et dans quelques vallées adjacentes au Nil blanc (Baro River et Sobat River).

Les renseignements, que l'on possède sur Yubdo, montrent qu'il correspond en fait à deux types de gisement à PGE et Au :

- des concentrations liées à une paléoaltération,
- des placers alluviaux.

Les premières concentrations ont été reprises dans les placers qui ne renferment qu'une faible part des platinoïdes.

Les gisements d'altération sont antérieurs au métamorphisme de la série antécambrienne ; ils sont situés à la surface d'une intrusion mafique à ultramafique différenciée faisant partie d'un alignement qui se développe vers le Soudan en direction du Complexe d'Hamissana. Cette intrusion est recouverte par des formations volcaniques du groupe de Tsaliet.

Les minéralisations associées à la paléosurface proviennent d'une dunité qui a subi plusieurs phases d'altération de type latéritique (birbérite) au cours desquelles les PGE ont été concentrés.

Les tonnages extraits dans les deux types de gisement depuis le début, en 1932 et jusqu'en 1962-63, date semble-t-il de la fermeture des mines et puits, sont très imprécis : de l'ordre de 230 à 250 kg par an (statistiques de 1938) ; les teneurs des minerais sont apparemment faibles, presque toujours inférieures à 0,5 g/m³.

Les réserves, selon E. Dahlstrom (1947), pour l'ensemble du district de Yubdo sont évaluées à 3605 kg de Pt, 191 kg de Ir, 16 kg d'Os, 6 kg de Pd, 58 kg de Rh et 306 kg d'or pour un volume de minerai de l'ordre de 24,5 millions de mètres cubes.

3.7. BILAN SUR LES GISEMENTS EN EXPLOITATION

Les gisements produisant des PGE, actuellement en exploitation, appartiennent à deux grandes familles :

- les gisements détritiques (placers),
- les gisements primaires (en roches).

Les premiers ne représentent qu'un faible pourcentage de la production mondiale (quelques pourcents seulement). Ce sont principalement les placers de l'Oural (d'où il a tout de même été extrait 1500 t Pt d'après P. Laznicka, 1985), de Colombie (Choco) et d'Ethiopie (Yubdo), auxquels il faut adjoindre les paléoplacers aurifères du Rand (R.S.A.) qui contiennent de l'osmium et de l'iridium. En Afrique de l'Ouest, la Sierra Leone est le seul pays qui a produit des PGE (173 kg de 1929 à 1957).

Les seconds, les gisements en roches, fournissent donc la quasi-totalité des PGE dont nous avons besoin. Ils sont peu nombreux ; le Bushveld (RSA), Norils'k Talnak et Pechenga (URSS), Sudbury et Thompson (Canada), Kambalda (Australie) et Jinchuan (Chine).

Ils présentent plusieurs caractères communs :

- ils sont principalement associés à des roches mafiques ou ultramafiques anciennes, d'âge protérozoïque ou même archéen ; Norils'k-Talnakh, dans les trapps sibériens triasiques, est l'exception ;

- ils sont liés à de profonds accidents de l'écorce terrestre : rift africain, accident nord-ouest de la plate-forme sibérienne ;

- dans les gisements, les PGE sont unis étroitement entre eux (alliages simples de métaux) et avec les métaux pour lesquels ils présentent le plus d'affinités : Cu, Ni (sulfures), Cr (oxydes). Rappelons que parmi les PGE, Pt et Pd sont les deux éléments les plus répandus (Pt + Pd représentent 85 à 98 % des PGE, quelque soit le type de gisement).

Mais ils peuvent être différenciés par leurs teneurs :

- Les gisements riches (> 10 g/t PGE) exploités pour PGE, avec Ni, Cu, Cr comme sous-produits, sont exceptionnels car ils se limitent à un seul cas, même s'il est de taille, puisqu'il s'agit du Bushveld avec les horizons du Merensky Reef, de l'UG2 et du Plat Reef.

Leurs caractéristiques sont les suivantes : horizon platinifère (0,80 m en moyenne) qui s'étend sur 230 km, installé dans une série de norites qui appartient au complexe du Bushveld, énorme corps stratiforme ultramafique à mafique (2000 Ma) de plusieurs kilomètres d'épaisseur. Le gisement du Stillwater, en cours de développement, appartient également à ce type.

- Les gisements pauvres (≤ 10 g/t PGE) à Ni-Cu où les PGE sont récupérés comme sous-produits. Ils sont toujours en liaison avec de grands complexes basiques stratifiés, d'âge précambrien (Sudbury) à triasique (Norils'k).

- Les gisements très pauvres (< 1 g/t PGE) dans des ceintures archéennes à ultrabasites de type komatiitique. Les gisements de nickel sulfuré de Kambalda en Western Australia appartiennent à ce type.

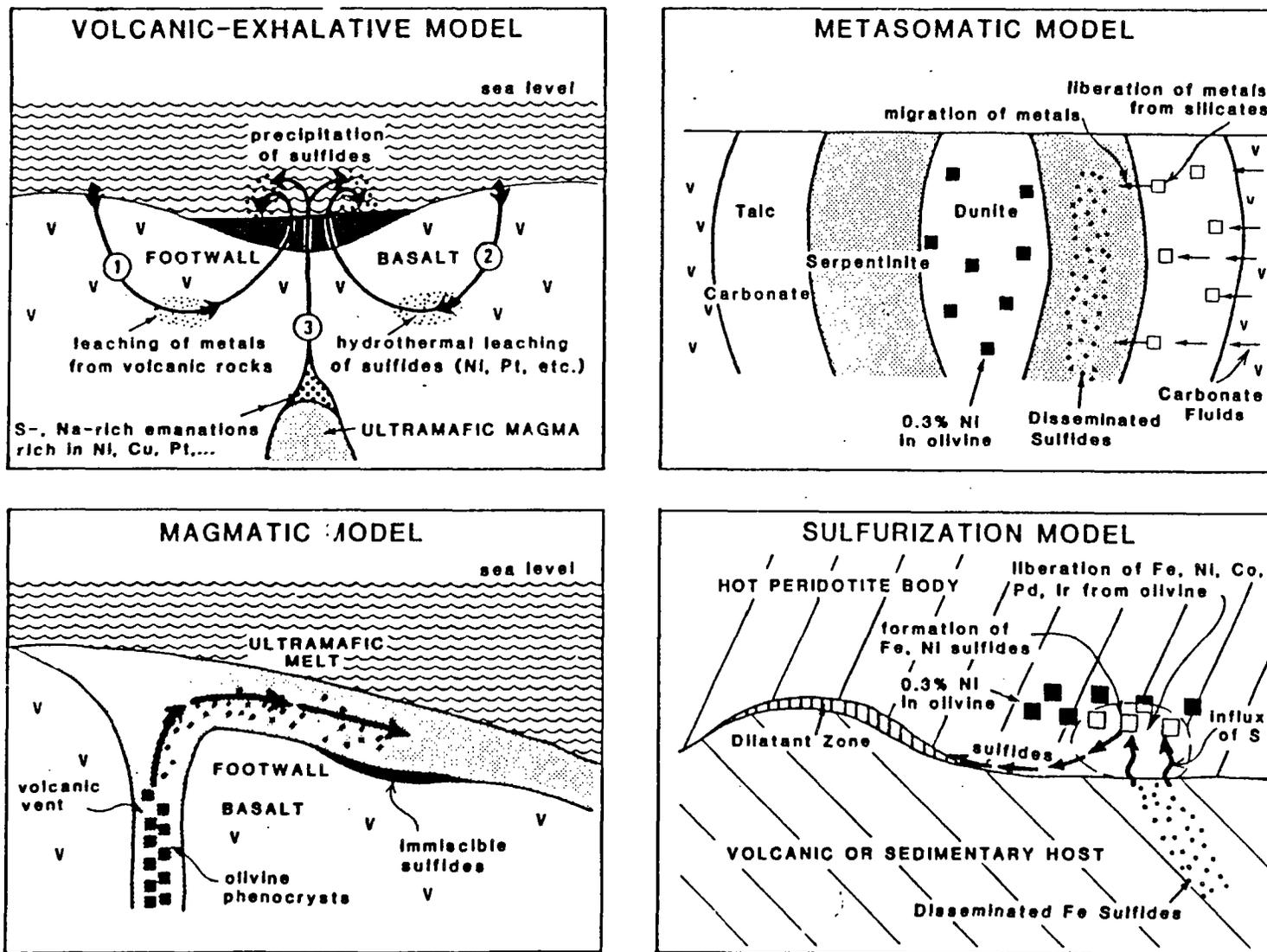


Fig. 27 - Modèle génétique de dépôt des minéralisations de Ni sulfurés associées aux volcanites péridotiques (d'après Keays R.R., Nickel E.H., Groves D.I. and Mc Goldrick P.J., 1982)

4 - METHODES SPECIFIQUES POUR LA PROSPECTION DES GISEMENTS PRIMAIRES DE PGE

La recherche des PGE primaires doit nécessairement s'orienter vers les ensembles ultramafiques à mafiques où des processus métallogéniques ont permis la concentration de ces éléments. Ces concentrations peuvent être :

- magmatiques par cumulation de phases au cours de la cristallisation du magma,
- hydrothermales par suite d'un enrichissement dans le liquide résiduel en fin de cristallisation,
- de remobilisation secondaire à partir de minéralisations initiales disséminées.

Selon R.R. Keays et al. (1982), d'autres processus métallogéniques peuvent être invoqués, en particulier ceux à l'origine des minéralisations de nickel sulfuré ; processus exhalatifs, métasomatiques et de sulfuration. Comparés avec le modèle magmatique, ces processus sont explicités par des schémas simplifiés dans la figure 27.

Selon le cadre géodynamique où ils se sont développés, les ensembles ultramafiques à mafiques présentent des potentialités métallifères différentes. La classification simplifiée que l'on propose tient compte de cette caractéristique (tableau 19). Elle est inspirée de la classification de A.J. Naldrett et al. (1976) (tableau 11) où nous avons seulement gardé les ensembles ultramafiques à mafiques porteurs de PGE.

Nous avons distingué deux environnements principaux :

- En zone stable, en particulier dans les vieux cratons archéens qui sont les sites privilégiés de mise en place des grands complexes stratiformes ;

Tabl. 19 - Classification des principaux gisements de PGE en fonction du cadre géodynamique des ensembles ultramafiques et mafiques porteurs

LES GISEMENTS DE PGE											
LES GITES PRIMAIRES										PLACERS	
LIES AUX ROCHES MAFIQUES ET ULTRAMAFIQUES										DIVERS	
EN ZONE STABLE (LMI)	EN ZONE INSTABLE										
	mise en place synvolcanique					mise en place synorogénique					
	RIFT	ASSOCIES A DES GREENSTONES BELTS				INTRUSIONS CIR- CONSCRITES	COMPLEXES OPHIOLITIQUES		TYPE ALASKEEN	KUPFERSCHIEF- FER	LUBIN POLOGNE
		KOMATIITES Sulfures Ni	Sills différenciés	Intrusions Dunites (Ni comag.)	Complexes annulaires différenciés		Min. chromifère	Min. sulfurées			
NORILSK URSS	KAMBALDA AUSTRALIE	CAPE SMITH UNGAVA CANADA	AGNEW AUSTRALIE	LAC DES ILES CANADA	RANA NORVEGE	NOUVELLE CALEDONIE	PEVKOS CHYPRE	OURAL TULAMEEN CANADA	ARMENIE URSS	YUBDO ETHIOPIE	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
BUSHWELD RSA STILLWATER USA										GOODNEWS - BAY ALASKA	
										NIZNI- TAGIL URSS	
										CHOCO COLOMBIE	
										WITWATERS- RAND RSA	

- en zone instable où les mises en place possibles peuvent être :
 - . synvolcaniques dans les zones de rift ou dans les zones de flexures des marges actives à l'origine du développement des greenstone belts ; dans le premier cas, les complexes ultramafiques à mafiques sont des sills différenciés, dans le second cas, ce sont les premiers empilements volcaniques komatiitiques, les sills de gabbros différenciés, les complexes annulaires et les intrusions dunitiques ;
 - . syntectoniques soit dans les zones de subduction, lieu de mise en place des complexes ophiolitiques, ou dans les zones orogéniques, sites où se sont développées les intrusions circonscrites du type alaskéen.

Les critères susceptibles d'être utilisés pour caractériser les ensembles ultramafiques et mafiques minéralisés vont dépendre de la typologie proposée.

Dans les chapitres suivants, nous passerons en revue les principaux types de gisements en exploitation et ceux en cours de prospection, avec pour objectif de dresser, pour chacun d'entre eux, une liste des critères de sélection et des guides de recherche actuellement connus.

5 - PRINCIPAUX CARACTERES DES COMPLEXES ULTRAMAFIQUES A MAFIQUES STRATIFORMES DIFFERENCIES

L'étude des complexes du Bushveld et du Stillwater va permettre de hiérarchiser les principaux critères de sélection des cibles. Ces critères se situent à plusieurs niveaux. La plupart de ces informations ont été acquises lors de discussions avec Z. Johan de DAM/GIS.

5.1. - CRITERES D'IDENTIFICATION DES COMPLEXES

Ils concernent principalement :

- leur localisation dans des zones stables soit des cratons ou des domaines continentaux exclusivement d'âge archéen ;
- leurs grandes dimensions pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres ;
- leur présentation sous forme d'entités bien circonscrites de type lopolite sans relation immédiate avec les formations encaissantes ;
- l'absence de coulées basaltiques ou de volcanisme co-magmatique dans l'environnement proche à plus lointain ;
- la présence dans les roches où ils se sont mis en place de formations sédimentaires avec des horizons graphiteux. Le carbone peut être à l'origine du graphite et d'espèces carbonées en phases fluides identifiées dans les niveaux enrichis en PGE ;
- leur organisation interne faite d'une succession de formations définissant des séquences répétitives complétées ou avortées se regroupant en cycle ;
- le caractère cumulatif des principales formations marqué par l'automorphie des minéraux consolidés dans une matrice de même composition minéralogique mais de plus petite taille ;
- la disposition planaire des minéraux donnant une fabrique d'apposition sans déformation ;
- l'aspect lité et continu avec "graded bedding" (texture gravitaire) des principales formations étant un élément très distinctif ;
- leur composition pétrographique évolutive s'inscrivant dans une suite pétrologique différenciée allant des dunites jusqu'aux anorthosites ;

- l'abondance des formations cumulatives riches en plagioclases que sont les anorthosites. Il convient à ce niveau de distinguer le type d'intrusion en cours de reconnaissance en examinant la composition du plagioclase :
 - . An supérieure à 60 % môle et pouvant approcher 80 % môle An pour les intrusions stratifiées à PGE ;
 - . An inférieure à 60 % môle An dans les intrusions stratifiées anorthositiques à oxydes ferrotitanées mais sans PGE ;
 - . An 10 à An 50 des suites anorthositiques appartenant aux ensembles charnockitiques dépourvus de minéralisations sulfurées polymétalliques (Ni, Cu et PGE).

5.2. - CRITERES DE POSITION DANS LA SUITE PETROLOGIQUE

Ces critères sont définis par rapport à la position bien spécifique des niveaux platinifères dans la suite pétrologique qui, pour l'ensemble du complexe, peut atteindre plusieurs milliers de mètres de puissance.

Le choix des cibles d'intérêt minier sera orienté vers les zones potentielles susceptibles de renfermer les niveaux minéralisés. Le problème qui se pose est donc la reconnaissance précise de la position de ces zones, dans la colonne lithostratigraphique si ces dernières se situent au-dessus ou au-dessous des niveaux minéralisés.

Les zones retenues doivent en priorité se situer dans une tranche lithostratigraphique restreinte en épaisseur (100 à 200 m) et qui englobe la zone critique.

5.3. - PRINCIPAUX CARACTERES D'IDENTIFICATION DE LA ZONE CRITIQUE

(fig. 28)

Ils concernent principalement :

- sa position lithostratigraphique entre les unités cycliques sous-jacentes constituées de cumulats à orthopyroxène et olivine et un sommet

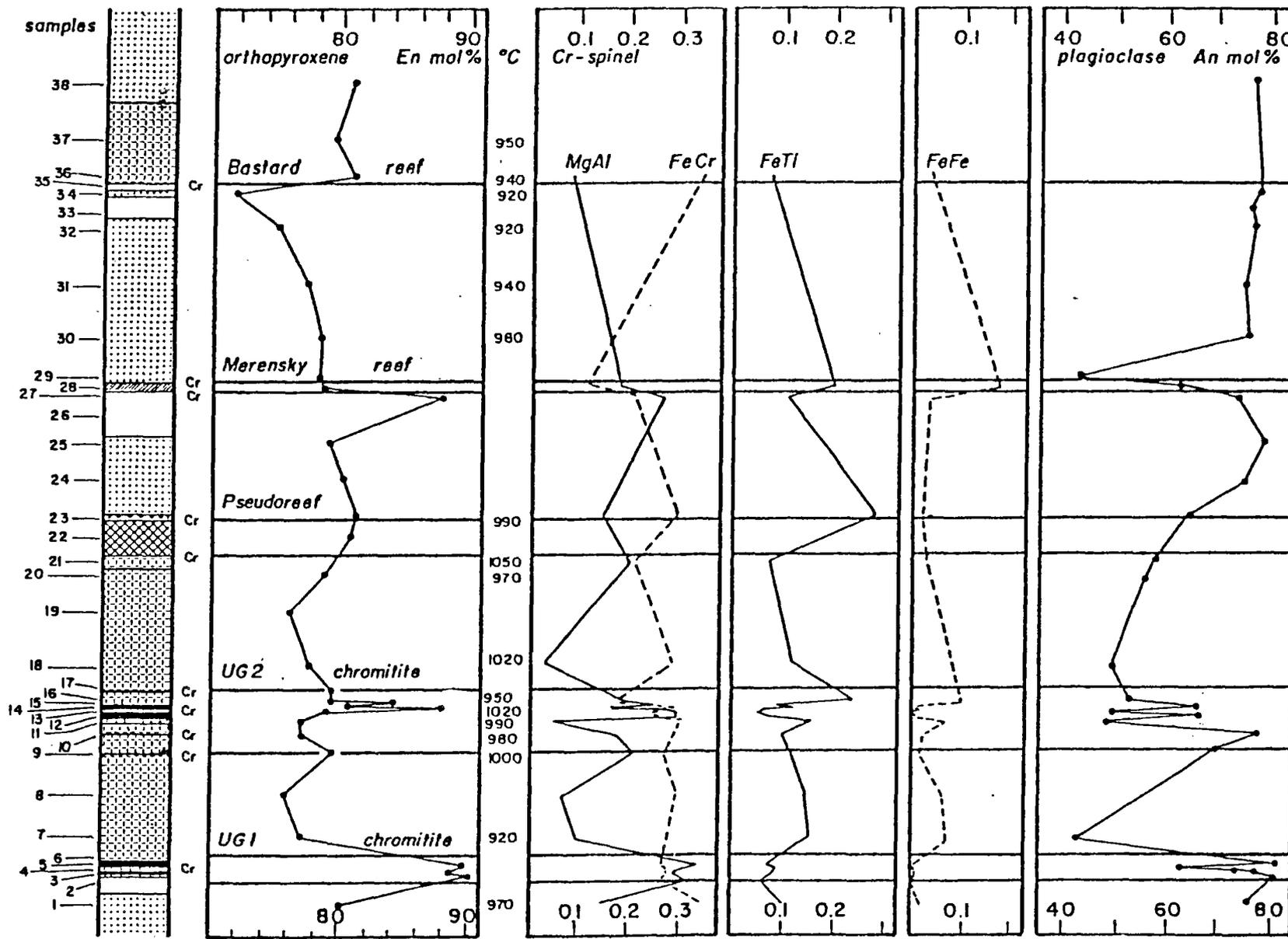


Fig. 28 - Variation de la composition chimique de l'orthopyroxène, du spinelle chromifère et du plagioclase dans la partie supérieure de la "zone critique" du complexe du Bushveld (d'après Johan Z., 1986)

- constitué de gabbros-norites et d'anorthosites ; ces derniers correspondent à la première apparition du plagioclase cumulatif ; la zone critique apparaît alors comme une zone de transition ;
- sa composition marquée par des formations stratifiées ultramafiques à mafiques différenciées avec olivine, olivine-bronzite, bronzite-orthopyroxène ; ces formations sont dans la zone critique organisées en séquences répétitives, rapides, plus ou moins complètes et de puissance de 100 à 200 m ;
 - la fréquence de pegmatoïdes plus ou moins développés sur toute la zone ;
 - la présence de couches de chromitite à la base ;
 - la présence de spinelle chromifère dans toutes les roches de la zone critique de même que dans les formations inférieures. Le spinelle chromifère disparaît au sommet de la zone critique ;
 - la présence en intercumulus de phlogopite riches en chlore (Cl \sim 1 %), d'apatite (chloro-apatite pure) riche en REE, et de minéraux accessoires comme la beidellite (Zr O₂) et d'oxydes complexes de zirconium, de titane et de terres rares.

Du point de vue métallogénique, on distingue deux pôles différents dans la zone critique :

- l'un situé à la base correspond aux niveaux de chromite avec PGE en sous-produit Cu et Ni ;
- l'autre, situé au sommet, est représenté par les minéralisations sulfurées à PGE avec en sous-produit Cu, Ni, Ag et Au.

5.3.1. Principaux caractères d'identification des minéralisations à PGE associées aux niveaux de chromite

Les principaux critères d'identification sont surtout lithologiques et chimico-minéralogiques :

- les roches encaissantes, composées de dunites, harzburgites, pyroxénites, anorthosites, montrent des textures de cumulats et renferment des pegmatoïdes ;
- l'altération localement importante des roches hôtes : la serpentinisation peut être très prononcée ;

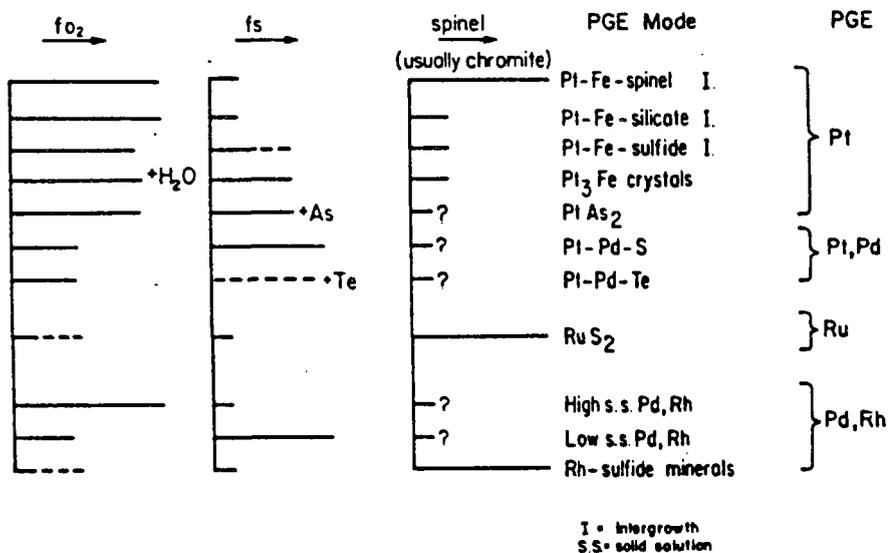
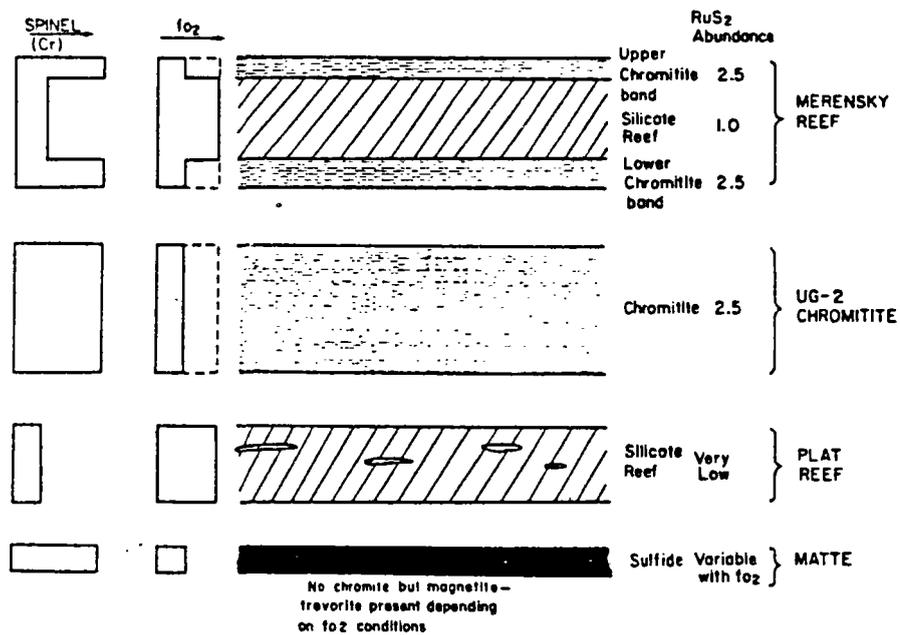


Fig. 29 - Séquence verticale d'apparition des minéraux de PGE dans la zone critique entre les niveaux à chromite UG2 et les niveaux sulfurés Merensky Reef et Platreef dans le complexe du Bushveld (d'après Kinloch, E.D., 1982)

- la composition caractéristique de la chromite avec des rapports Cr/Al, de fortes teneurs en Ti et un rapport Mg/Fe faible ; ces chromites sont facilement identifiables en batée et se distinguent sans difficulté des chromites provenant des complexes ophiolitiques (chap. 11) ;
- la présence, en inclusions dans la chromite de minéraux de PGE, surtout de laurite (fig. 29), de très faible taille (quelques microns) ; comme dans les complexes ophiolitiques, la laurite (RuS_2) est le sulfure de PGE le plus commun ; ainsi en prospection alluvionnaire et/ou éluvionnaire, les concentrés de sulfures et de chromite donnent des signatures géochimiques bien spécifiques avec des teneurs anormales en PGE ;
- la présence d'anomalies magnétiques et gravimétriques positives.

5.3.2. Principaux critères d'identification des minéralisations sulfurées à PGE

Comme dans le cas précédent la sélection des zones favorables est surtout orientée par des critères pétrographiques et minéralogiques.

Dans le cas où la base du complexe est conservée, on recherchera en priorité le deuxième niveau à cumulats ultramafiques à olivine situé juste au-dessus des chromitites. L'apparition de ce niveau indique la base de la séquence pétrographique porteuse des minéralisations sulfurées à PGE :

- Les niveaux économiques en PGE (Merensky Reef au Bushveld ou J.M. Reef du Stillwater) sont associés à un niveau de sulfures (2 à 5 % de sulfures), de métaux de base avec des teneurs en Ni élevées. Ces niveaux ont des puissances faibles (quelques dizaines de centimètres).
- Les roches hôtes sont riches en plagioclases ; ce sont des troctolites, des norites, des anorthosites...
 - . Dans le Stillwater, la composition pétrographique du J.M. Reef varie latéralement des troctolites jusqu'aux anorthosites. Cette composition ne peut être un critère d'identification immédiat d'autant plus qu'elle est identique à celle des roches encaissantes, à l'exception d'une teneur en sulfures ne dépassant pas 5 % en volume.
 - . Dans le Bushveld, le repérage du Merensky Reef est plus aisé par la fréquence plus importante qu'au Stillwater des faciès pegmatitoïdes et porphyroïdes de la pyroxénite feldspathique. Les principaux minéraux, pyroxène, biotite-phlogopite et hornblende sont en gros cristaux millimétriques à pluri-centimétriques ;

- La présence de structures indiquant des perturbations dans les processus de sédimentation magmatique : slumps, figures de charge ou d'abrasion, cavités de remaniement (pot holes) à forte concentration de volatils interprétés comme des griffons dont l'influence latérale se fait sentir sur de grandes distances (fig. 30). On observe une zonalité dans la distribution des minéraux de PGE.
- La présence d'un petit niveau continu de chromite massive de quelques centimètres d'épaisseur à la base du Merensky Reef : c'est un critère de reconnaissance ; ce petit niveau se compose de chromite avec comme minéraux accessoires biotite-phlogopite, graphite et quelques plages de sulfures de PGE.
- Les minéraux à sulfures se situent, après la réapparition des horizons à olivine présents, à la base du complexe (Basal Zone) et dans les parties inférieures de la zone critique à proximité des chromitites enrichies en PGE.
- Le premier niveau de sulfures, est le seul qui contient les PGE ; les niveaux supérieurs, lorsqu'ils existent, sont stériles.
- La présence de graphite dans le niveau à haute potentialité en PGE en tant que phase accessoire signalant des conditions réductrices très poussées.
- La présence de minéraux hydroxylés, riches en éléments volatils F, Cl, B (biotite-phlogopite, hornblende, tourmaline, quartz...). Lorsque les fluides peuvent être étudiés, ils sont caractérisés par une abondance de CH_4 , CO_2 et N_2 . Ces données révèlent le caractère hydraté du liquide magmatique, lequel se confirme dans la minéralogie des PGE par la présence de nombreux éléments volatils Bi, Te, Sb...
- La présence de chromite accessoire disséminée dans la matrice des niveaux à olivine cumulative pouvant donner des teneurs élevées en PGE.
- Les variations cryptiques importantes de la composition des oxydes et des silicates (fig. 29) annoncent la proximité des niveaux minéralisés. C'est ainsi que l'on note :
 - . une augmentation de la fraction enstatite (MgSiO_3) d'environ 10 % môle dans la composition de l'orthopyroxène ;
 - . les teneurs en Fe^{+3} du spinelle qui augmentent à proximité ou au sein du niveau à sulfures (voir ann. 2 pour la minéralogie des spinelles) ;
 - . un abaissement de la teneur en An du plagioclase : elle chute de 80 à 50 et même 40 % môle An.

- La composition des niveaux (reefs) à PGE avec comme minéraux principaux :
 - . des sulfures de Pt et Ni (braggite) tellures de Pt et Pd (Merenskyite, monchéite, kotulskites). Ces phases sont très fragiles et de ce fait, elles sont très rares dans les alluvions associées ;
 - . des arséniures complexes de PGE tels que la sperrylite, minéral très résistant à l'altération qui devient prépondérant en batée.

L'apparition des PGE dans les divers niveaux de chromite et de sulfures, s'effectue dans un ordre reflétant les variations de fO_2 et de fS_2 , mais aussi de la température(1) et des propriétés physico-chimiques des éléments concernés (fig. 30). Cet ordre d'apparition est similaire à celui observé dans les complexes ophiolitiques (travaux GIS 1985-86).

5.3.3. - Principaux caractères des pipes de dunites

Rappelons que dans la partie est du Bushveld des pipes dunitiques (hor-tonolite) d'environ 100 m de diamètre recoupant une partie de la zone critique (fig. 30) sont enrichis en PGE.

On remarque une très forte activité de volatils qui se manifestent par la présence de Hg, Sn, Sb, Bi, Te, Se.

L'influence de ces pipes se fait sentir latéralement affectant la distribution et la composition des principales phases (fig. 30d).

Quoique ce type de gisement ne soit pas connu ailleurs qu'au Bushveld, il ne faut pas l'oublier lors de la prospection.

(1) Les températures de formation des niveaux à chromite se situent entre 1050 et 900°C et celles des horizons sulfurés entre 800 et 700°C (voir fig. 57) (comm. Z. Johan, 1986).

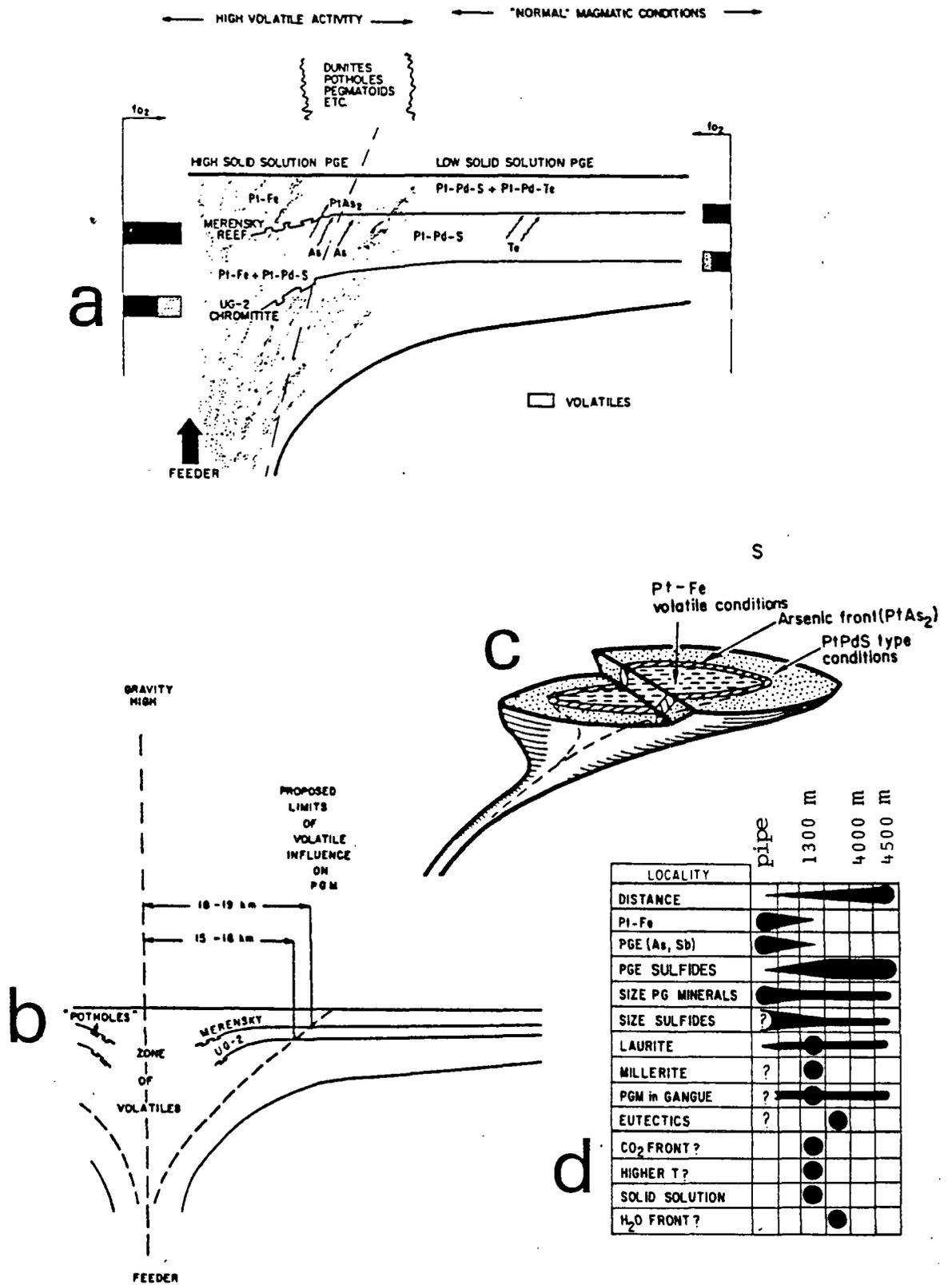


Fig. 30- Evolution latérale de la distribution des PGE autour des zones de remaniements (pot holes) (a,b,c) (d'après Kinloch E.D. 1982) et autour des pipes dunitiques (d) (d'après Peyer L.W., 1982)

6 - PRINCIPAUX CARACTERES DES MINERALISATIONS A PGE ASSOCIEES A DES ZONES DE RIFT

6.1. - CARACTERISTIQUES GENERALES

Les niveaux porteurs sont des sills de gabbros différenciés de 300 à 350 m de puissance s'étalant sur 5 à 12 km. Leur composition va des troctolites aux gabbros-norites. Ces sills se sont mis en place à la faveur de grandes failles profondes jalonnant un fossé d'effondrement au sein d'un vaste plateau basaltique de tendance tholéitique (fig. 31).

6.2. - CARACTERES FAVORABLES

Dans les roches encaissantes, ils se marquent par :

- la nature picritique et sub-alkaline des basaltes comagmatiques de l'environnement volcanique immédiat ;
- la tendance évaporitique des séries sédimentaires au mur des sills. La présence du gypse ou de l'anhydrite comme source externe du soufre favorise le dépôt de la minéralisation sulfurée.

Dans le sill, ils se distinguent par :

- la nature différenciée, soulignant une température de mise en place assez élevée, qui a permis le développement d'un litage, d'une zone de trempe en périphérie, d'un métamorphisme de contact (skarns dans les roches carbonatées, et cornéennes dans les shales) et d'une zone d'altération par suite de circulations hydrothermales ;
- l'altération bien développée à la base des sills se marque surtout par la présence de chlorite, de biotite, de scapolite, d'albite...

La minéralisation, toujours concentrée à la base des sills, se présente :

- en grains finement disséminés ;
- en niveaux pluri-décimétriques plus ou moins lenticulaires composés de sulfures massifs ;
- en ciment de brèches ;
- en remplissage de fractures anastomosées formant des stockwerks situés à la partie inférieure des sills et qui s'enracinent dans les formations du mur.

Elle est surtout sulfurée avec pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite, et comme minéraux accessoires, cubanite, millérite, vallériite, pyrite, bornite, gersdorffite.

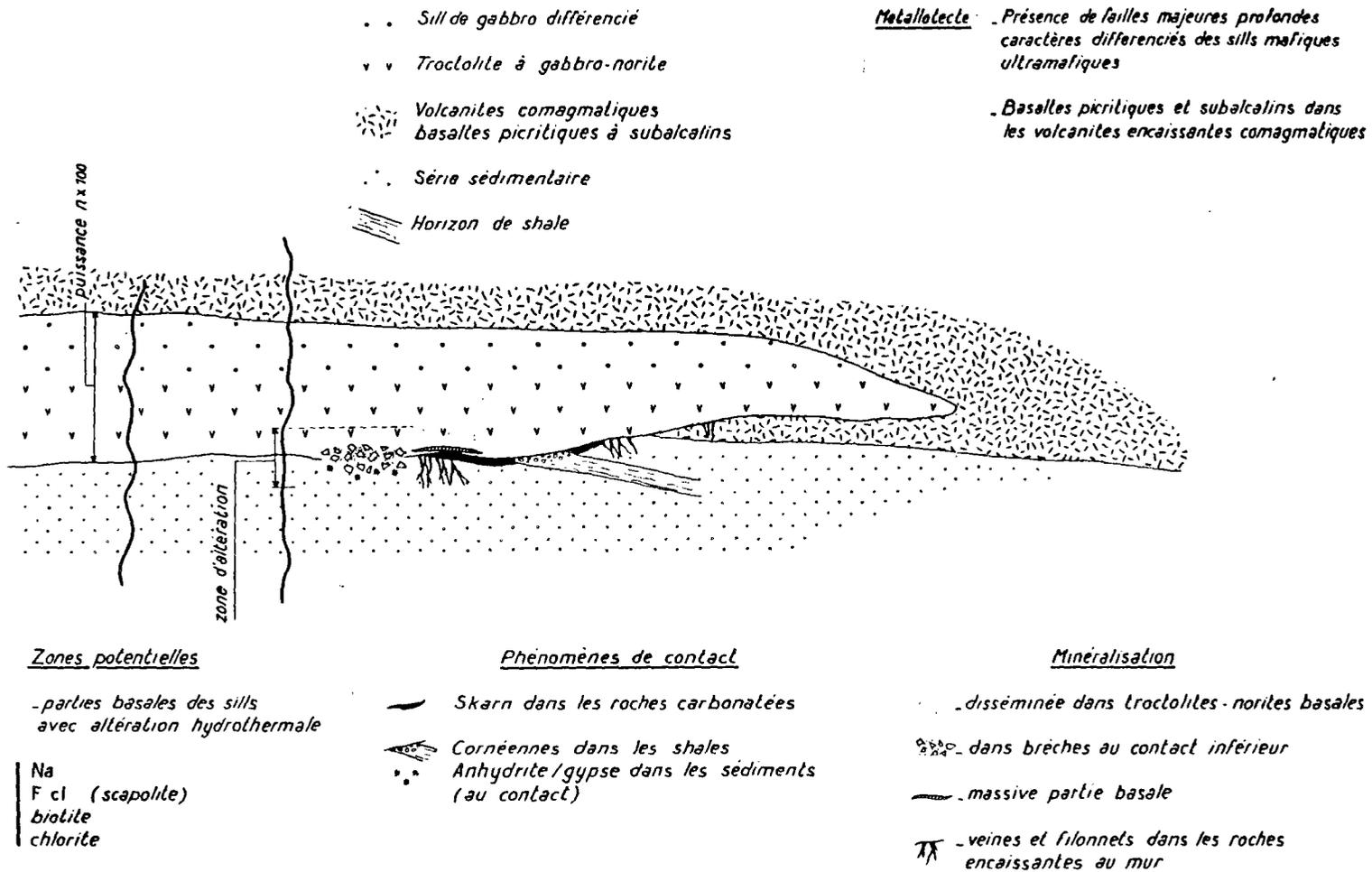


Fig. 31 - Schéma géologique des ensembles ultramafiques à mafiques (troctolite à gabbro-norite) associés à des zones de rift (type Noril'sk) : position des principales minéralisations.

Les minéraux platinifères les plus fréquents sont représentés par la spherulite, la coopérite, des tellurures, des arséniures et des alliages complexes.

Les teneurs montrent une prédominance du palladium sur le platine ainsi que sur les autres PGE. Les rapports Pd + Pt/Ni sont de l'ordre de 1/500.

Quoique ce type de gisement soit uniquement connu dans les trapps de la plate-forme sibérienne, l'étude et la hiérarchisation des principaux contrôles de la minéralisation supposent l'existence de sites minéralisés semblables dans des contextes similaires dans d'autres régions du monde : plateaux basaltiques du Deccan (Inde), de Parana au Brésil...(fig. 32).

Dans ce type de contexte l'attention sera portée sur :

- les bassins, ou les dépressions comblées par des coulées basaltiques avec des sills de gabbros différenciés ;
- les accidents majeurs jalonnés par des intrusions, des dykes ou des sills ayant une extension latérale hecto- à plurikilométrique et une puissance de plusieurs centaines de mètres ;
- les structures synclinales des sills différenciés, en particulier les zones basales et les parties terminales coincées sous la couverture. Ces zones constituent, dans le district de Norils'k-Talnakh, les principaux pièges des minéralisations (comm. orale, A.J. Naldrett, 1986).

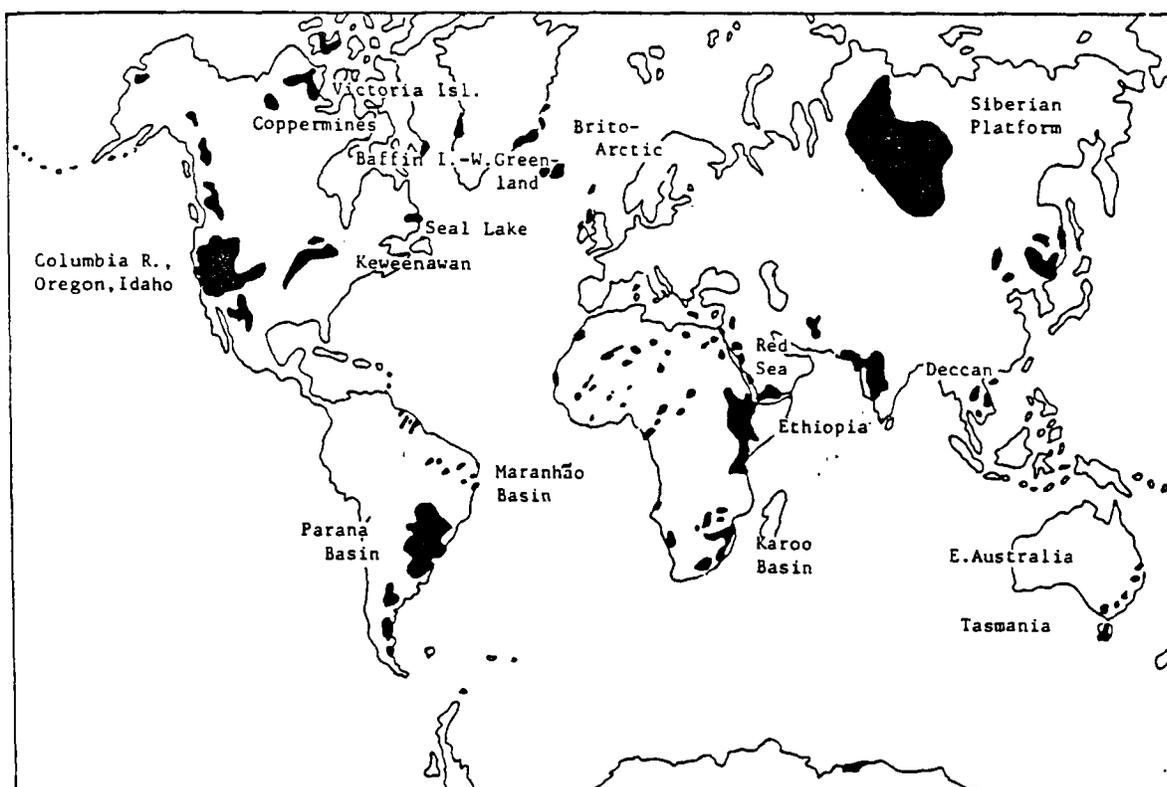


Fig. 32 - Répartition mondiale des principaux "Plateaux Basalts".

7 - LES MINÉRALISATIONS A PGE ASSOCIÉES A DES GREENSTONE BELTS

Au moins quatre types principaux de gisements sulfurés peuvent être distingués (fig. 33) :

- PGE avec amas Ni-Cu des ensembles komatiitiques,
- PGE avec amas Ni-Cu associés à des sills ultramafiques différenciés,
- PGE avec Ni-Cu associés à des intrusions de dunites,
- PGE associés aux complexes annulaires.

7.1. - LES GISEMENTS DE Ni-Cu ET PGE DES ENSEMBLES KOMATIITIQUES

Dans les **greenstone belts** archéennes, ces minéralisations se situent toutes, sans exception, dans les premiers termes de l'empilement volcanique, constitués de coulées et de sills ultramafiques de type komatiite (ann. 3). Des intercalations inter-coulées de schistes graphiteux, de grauwackes, de tufs et de formations volcaniques clastiques peuvent être localement minéralisées:

- les sites de dépôts les plus favorables sont à la base des séquences comblant de petites dépressions souvent limitées par des failles ;
- les coulées ont une puissance totale de 700 à 1000 m, leur extension latérale peut atteindre plusieurs kilomètres ;
- dans bien des cas, il existe une relation spatiale entre les minéralisations à Ni-Cu et les formations du toit ; la plupart du temps ce sont des BIF pouvant être riches en or.

La principale caractéristique pétrographique est la présence d'olivine agencée en texture spinifex, ou en cumulats ; les pillow lavas sont fréquents.

Les volcanites komatiitiques sont très riches en MgO avec des teneurs supérieures à 30 % mais appauvries en CaO, FeO, Al₂O₃ et TiO₂. Elles sont souvent associées à des basaltes tholéiitiques riches en fer (magnétite).

La minéralisation est constituée de sulfures : pyrrhotite, pentlandite, chalcopryrite et pyrite et des minéraux de PGE en sous-produits (sperrylite, monchéite, sudburyite...). La zonalité donne un minerai massif situé à la base avec des teneurs très faibles en Pt, Pd et Au par rapport au minerai disséminé à sulfures interstitiels.

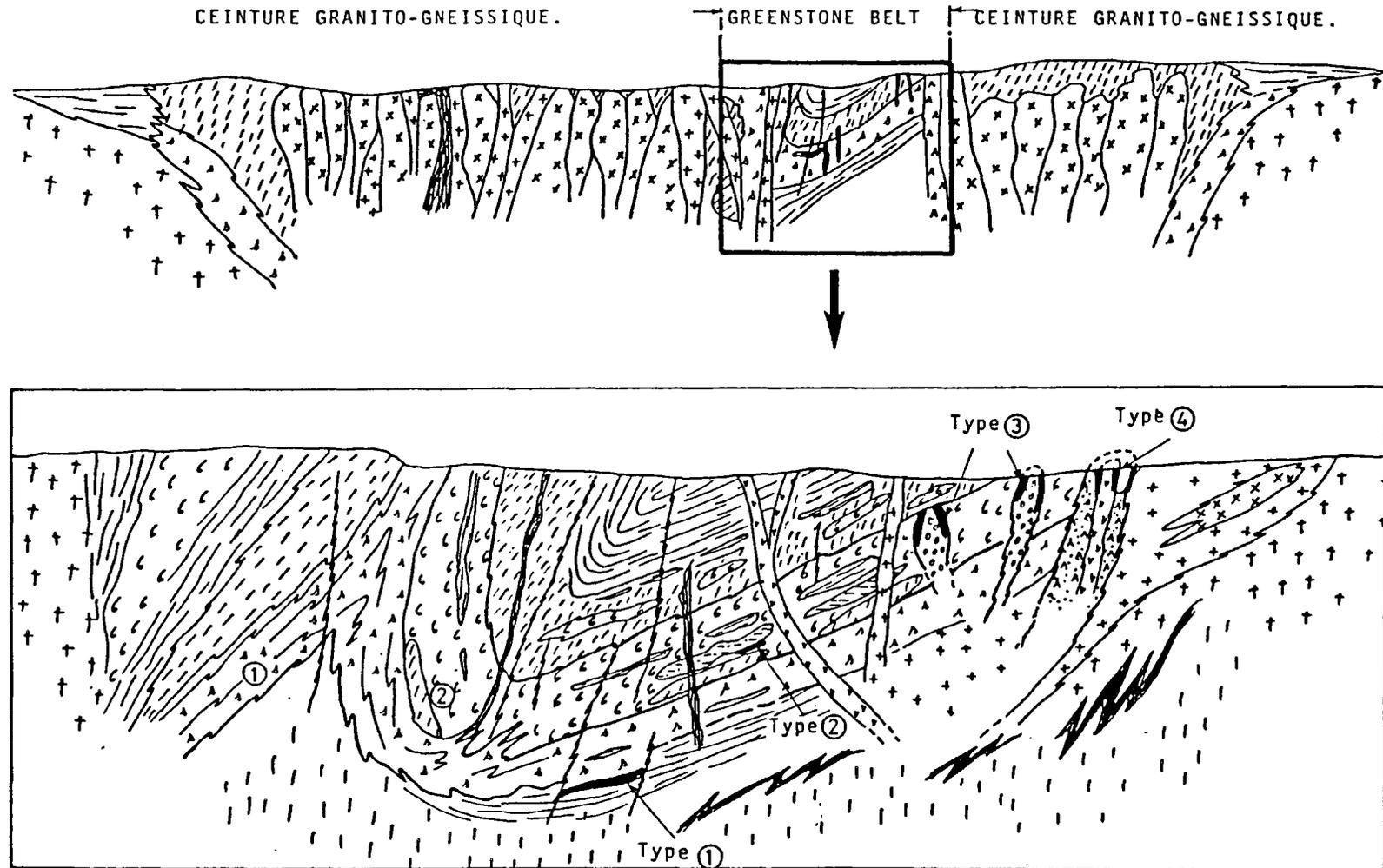


Fig.33 - Coupe schématique d'une greenstone belt et localisation des principales minéralisations à PGE.

LEGENDE Fig. 33 -

	Granite potassique
	Granite, Trondhémite
	Granite indifférencié
	Dykes Diorite 1 Dolérites 2
	Sills de gabbros Différenciés 1 Indifférenciés 2
	Intrusions dunitiques
	Complexes annulaires tholéiitiques.
	Séries sédimentaires indifférenciées (Conglomérats à black shales)
	Séries volcaniques à volcano-sédimentaires acides
	Volcanites intermédiaires à basiques
	Volcanites tholéiitiques et komatiitiques
	Croûte, manteau
	Accidents (shear-zones)
	Minéralisations à PGE.

TYPES DE MINÉRALISATION

- | | |
|---|------------------------------------|
| ① | Associés aux komatiites |
| ② | Associés aux sills différenciés |
| ③ | Associés aux intrusions dunitiques |
| ④ | Associés aux complexes annulaires |

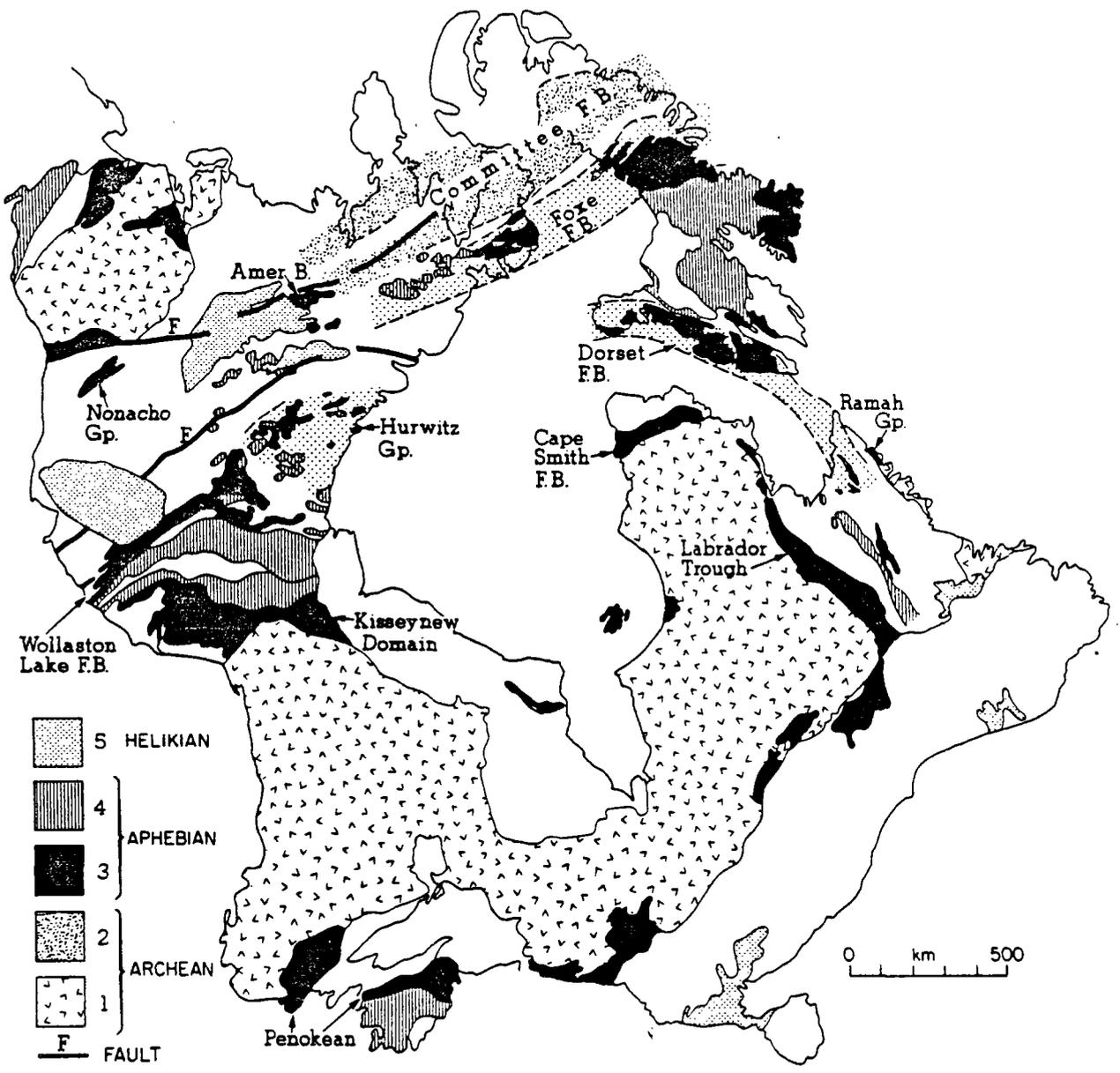


Fig. 34 -

Map of Canadian Shield showing distribution of principal belts of supracrustal and granitic rocks within and bordering Proterozoic structural provinces (based mainly on Bell (1970), Jackson and Taylor (1972) and Fig. 5). 1 = Archean cratons, 2 = Archean belt of supracrustal rocks, 3 = Aphebian supracrustal rocks (superposed dot pattern outlines proposed former extent of the respective belt), 4 = Aphebian belt of granitic rocks, 5 = Helikian supracrustal rocks. B = Belt; F.B. = Fold belt; Gp. = Group. Two major fault systems in the western Churchill Province that parallel major lithotectonic belts are illustrated to demonstrate the possible contribution of faulting to crustal evolution; the faults segmented the crust into blocks that could have acted independently. Southwestern section of southern fault is formed by the Virgin River-Black Lake Shear Zone. Other faults have been omitted in the interest of clarity. (d'après Thomas M.D. and Gibb R.A., 1985)

Les plus fortes teneurs en PGE se situent dans les veines et fractures parcourant les basaltes du mur. Les PGE, Os, Ir, Ru et Rh sont dans leur ensemble en inclusions dans les sulfures, surtout la pentlandite.

. Les principaux contrôles des minéralisations Ni, Cu et PGE dans les greenstone belts archéennes sont surtout lithostratigraphiques ; ce sont :

- les premières coulées de komatiites ayant plus de 10 m de puissance ; ces formations sont facilement repérables donnant de fortes anomalies aéromagnétiques ;
 - la structure spinifex bien développée qui permet d'établir avec précision la séquence de dépôt ;
 - la présence de failles actives pendant le volcanisme qui provoque des perturbations latérales et verticales dans l'empilement des diverses unités : la minéralisation est toujours située à la base des coulées comblant de petites dépressions jalonnées de failles ;
 - la nature des formations du toit qui sont le plus souvent des shales et des roches à carbonates ferrifères traduisant sans doute une origine hydrothermale ;
 - la présence d'une auréole d'altération (serpentine, chlorite...) proche à plus lointaine des zones minéralisées ; elle signale une activité hydrothermale minéralisatrice ;
 - le développement de gossans plus ou moins importants avec un contenu en Pd allant de 15 à 30 ppb et en Ir de 5 à 10 ppb sans teneurs en Ni et Cu significatives ;
- Kambalda (Yilgarn Block-Western Australia) est un exemple de ce type, d'âge archéen.

Dans les greenstone belts protérozoïques, les différences que l'on peut retenir tiennent pour une bonne part à leur cadre : bordure de marges continentales actives, ou zones de sutures intracratoniques fonctionnant en zones mobiles. Ces ceintures sont très étirées, souvent disloquées et fortement tectonisées. Comme exemples, citons celles ceinturant le craton archéen du bouclier canadien : ceintures du Cape Smith, le Labrador Trough, la Penokean belt et le Kiseynew Domain (fig. 34), les ceintures birrimiennes d'Afrique de l'Ouest, les ceintures de Karnataka en Inde...

Les gisements sont en amas et lentilles effilochés et remobilisés lors des déformations. Par rapport aux gisements du même type des greenstone belts archéennes, les gisements sont relativement moins importants avec des teneurs moins élevées.

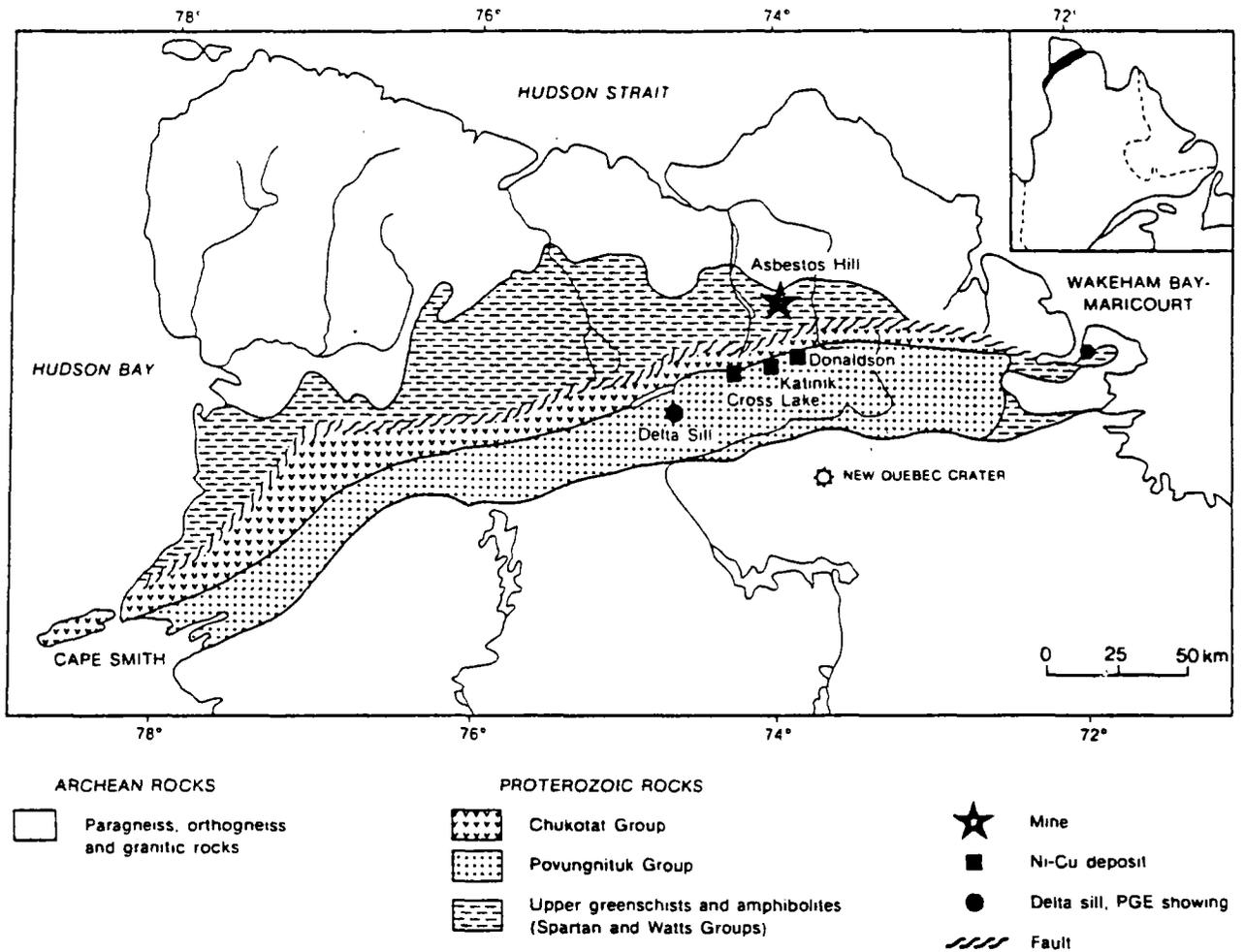


Fig. 35 - Ceinture du Cape Smith (Nouveau Québec) montrant la localisation des principaux prospectes à Ni-Cu et PGE (d'après Clark Th., Belanger M. et Giovenazzo D., 1986)

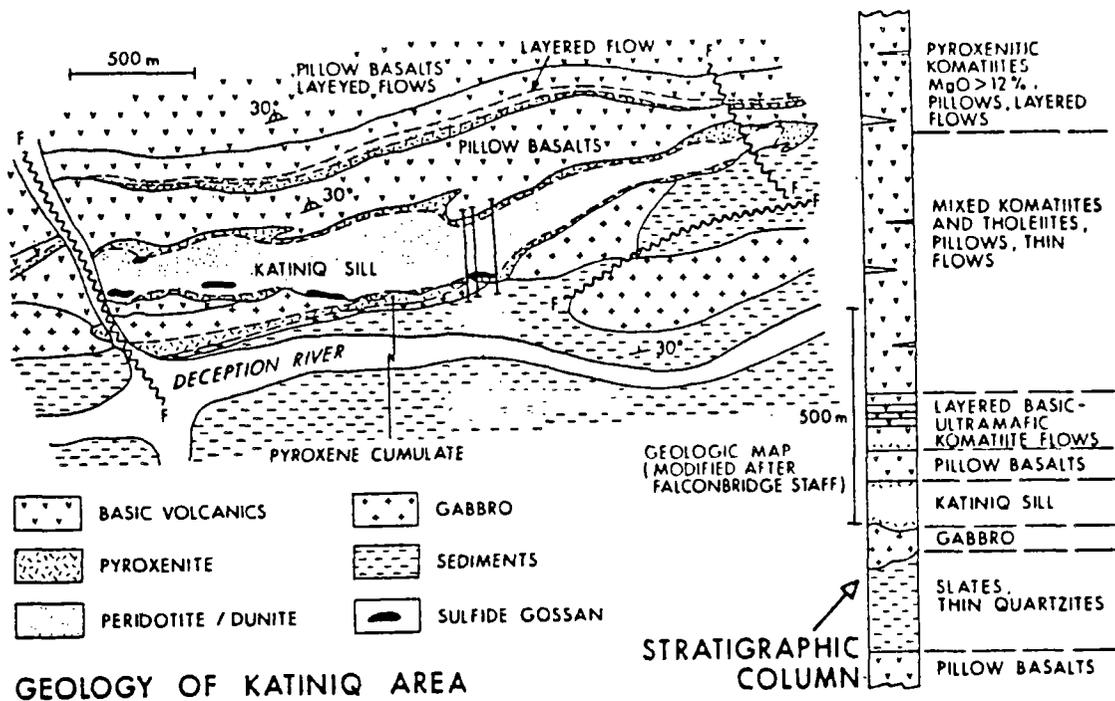


Fig. 36 - Carte géologique et suite lithostratigraphique de la région de Katiniq (Falconbridge Nickel Mines Staff)

. Les guides de recherche sont également lithostratigraphiques et pour une partie structuraux :

- les premières coulées de komatiites et/ou volcanites riches en MgO, situées à la base des premiers empilements volcano-sédimentaires des greenstone belts ;
- les horizons de schistes graphiteux et leurs équivalents latéraux : BIF, cherts à magnétite, carbonates d'origine exhalative en position inter-coulées signalant un arrêt du volcanisme et une mise en place des phénomènes hydrothermaux.

Ces unités interstratifiées et très déformées peuvent être dispersées dans les terrains granito-gneissiques formant le socle adjacent.

7.2. - LES GISEMENTS DE Ni-Cu ASSOCIES AUX SILLS ULTRAMAFIQUES DIFFÉRENCIES

Ce sont des corps bien individualisés qui sont interstratifiés à pénéconcordants dans les empilements de volcanites et de formations sédimentaires à volcano-sédimentaires. Ils sont bien différenciés ; leur composition dans l'ensemble va des péridotites aux gabbros anorthosites. Leur puissance est importante, atteignant 700 à 1000 m, et leur extension latérale de plusieurs kilomètres est souvent perturbée par la tectonique.

La minéralisation est généralement concentrée dans les parties basales, dans les termes les plus mafiques. Sa composition est sulfurée (pyrrhotite, pentlandite et chalcopirite) avec aussi magnétite et chromite. Les rapports Ni/Cu oscillent entre 1,6 et 2,5.

Comme PGE, le platine est prédominant avec des rapports Pt/Pt + Pd autour de 0,3 à 0,4. Les PGE se présentent sous forme de sulfures et/ou de sulfosels en fines inclusions dans les sulfures de métaux de base et les silicates.

Nous allons prendre référence sur des régions en cours de reconnaissance et qui possèdent des indices et/ou des gisements prometteurs pour préciser les principaux guides de recherche.

La ceinture Cape Smith - Wakehan Bay

Cette ceinture située au Nord du Québec se présente comme un segment de 380 km de longueur sur 50 à 90 km de largeur, orienté E-W (fig. 35). Son âge est

aphébie et elle se rattache à la province structurale de Churchill. Elle est composée de plusieurs séries volcaniques, volcano-sédimentaires, sédimentaires et de nombreux ensembles intrusifs. Ces derniers sont des sills ultramafiques à mafiques assez différenciés.

Sur l'ensemble de la ceinture, quatre groupes ont été définis :

- groupe Povungnituk formé de volcanites et de dépôts sédimentaires de tendance tholéitique contenant de nombreux sills ultramafiques à mafiques ;
- groupe Chukotat composé de basaltes et de sills ultramafiques de tendance komatiitique ;
- groupe Spartan rassemblant une séquence sédimentaire ;
- groupe Watts constitué de volcanites et d'un cortège d'intrusions important : gabbros à granite et sills ultramafiques à mafiques.

De nombreux gisements de Ni-Cu sulfurés y ont été découverts. Ils sont tous associés aux sills ultramafiques à mafiques injectés dans les groupes de Povungnituk et Chukotat.

Depuis 1950, les principaux gisements d'intérêt économique ont été reconnus au Nord de la ceinture dans le sill Katiniq-Donaldson-Cross Lake (fig. 36) à 1,6 % Ni et 0,8 % Cu (10 Mt), Donaldson West à 4,4 % Ni et 1,0 % Cu (2,6 Mt) et Katiniq 2 et 3 à 2,4 % Ni et 0,7 % Cu (10,2 Mt).

Comme à Norils'k-Talnakh, les principales concentrations métallifères occupent des dépressions situées à la base du sill directement au contact avec les roches sous-jacentes. Le sill est très altéré. Les péridotites et pyroxénites sont fortement serpentinisées avec aussi développement de chlorite et d'actinote.

Deux types de minéralisation ont été reconnues :

- l'une massive à plus disséminée avec sulfures en réseaux liée à la ségrégation magmatique ;
- l'autre en veines et lentilles avec carbonates résultant de remobilisation au cours du métamorphisme.

Les principaux sulfures identifiés sont pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrrite, pyrite, sphalérite, avec comme oxydes : chromite, magnétite-ilménite, titanomagnétite... et comme PGM, sudburyite, testibiopalladite, sperrylite, merenskyite.

L'abondance des PGE ne dépend pas de la teneur en sulfures mais plutôt du type de minerai et de son mode de formation :

- dans le minerai massif à pyrrhotine et pyrite dominante, à teneurs faibles en Ni-Cu, les PGE (Pt et Pd) sont les moins abondants ;
- dans le minerai à sulfures disséminés à texture en réseau, les teneurs en PGE sont les plus élevées : 2,96 g/t Pt et 3,62 g/t Pd ;
- dans les veines et filonnets à gangue carbonatée, la concentration des éléments Sb, Te, Au, Co, As et Pd (jusqu'à 20 g/t) est plus forte. Les teneurs en platine restent sensiblement les mêmes entre 2,5 et 3,5 g/t. Cette minéralisation illustre la présence de phénomènes hydrothermaux.

En dehors de ce district, des travaux de reconnaissance, orientés vers des cibles platine, sont dirigés tout particulièrement vers trois types de minéralisations :

- minéralisations importantes à Ni-Cu associées aux sills ultramafiques et mafiques différenciés des séries inférieures ; les teneurs escomptées sont de 3 à 5,5 g/t de Pt et de 2 à 3 g/t de Pd ; ce type semble le plus prometteur surtout dans les zones de remobilisation hydrothermales situées à la base des sills ;
- minéralisations polymétalliques de type Besshi associées aux séries volcano-sédimentaires mafiques ; les teneurs seraient plus faibles que précédemment, autour de 1 g/t de PGE total ;
- minéralisations polymétalliques de type amas sulfurés exhalatifs associées aux formations volcano-sédimentaires felsiques. Les teneurs sont les plus faibles autour de 0,5 g/t de PGE.

La zone la plus intéressante à ce jour, travaillée entre 1924 et 1980 par la société COMINCO, est le **Delta Sill**. C'est un ensemble différencié ultramafique à mafique injecté dans la série volcano-sédimentaire de Povungnituk. Il affleure dans la partie sud de la ceinture du Cap Smith sur quelque 6 km de longueur pour une largeur d'affleurement d'environ 500 m.

La partie basale est concentrée dans un niveau de 20 cm d'épaisseur interstratifié dans un horizon de pyroxénite à olivine individualisé dans un gabbro anorthositique.

L'abondance des sulfures est variable : elle atteint 80 % dans les parties basales et chute de 40 à 60 % au sommet du niveau minéralisé.

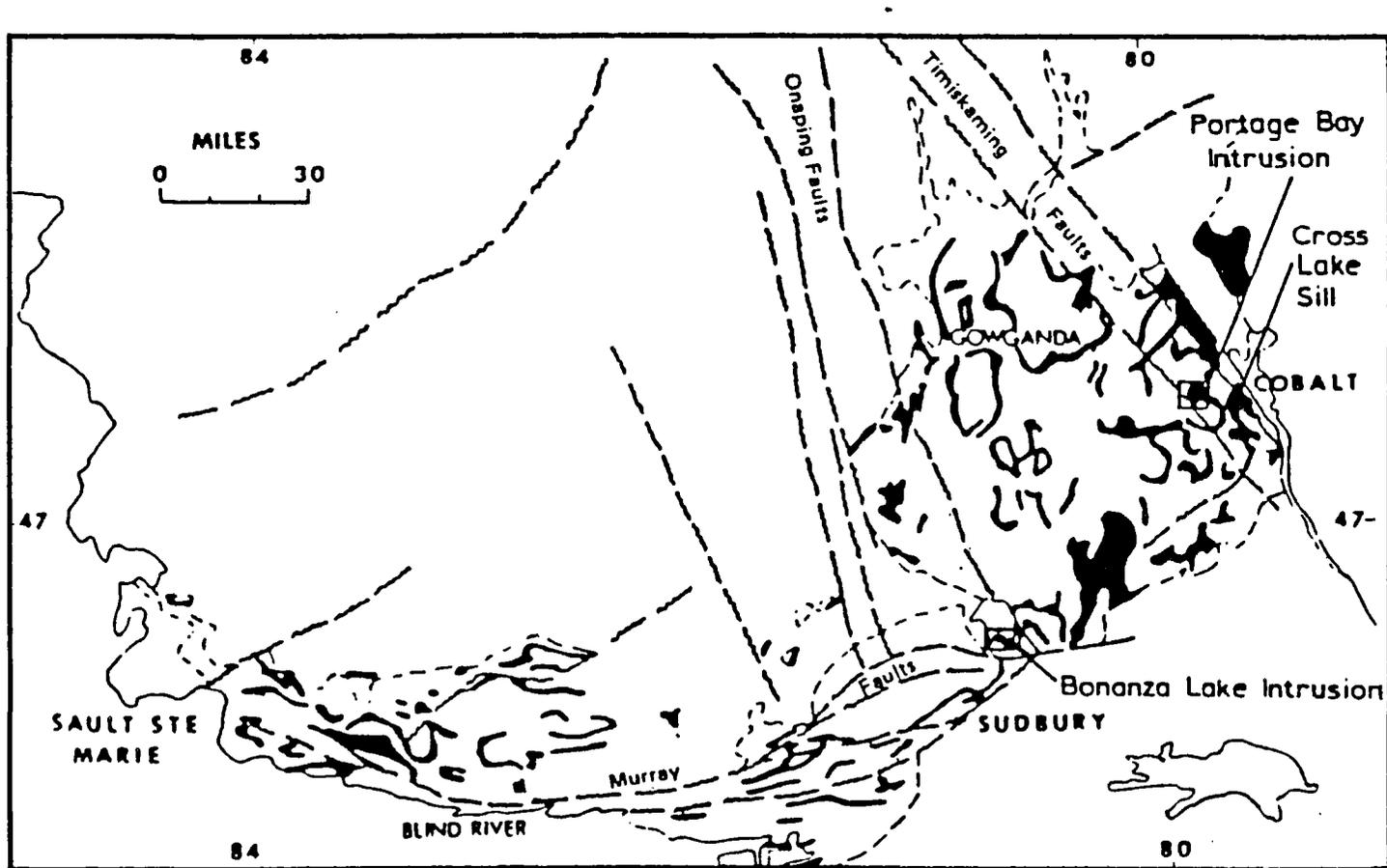


Fig. 37 - Zone d'extension du Nipissing Diabase en Ontario
(d'après Card K.D. and Pattison E.F., 1973)

Comme principaux sulfures identifiés, nous citerons : pyrrhotite, cobaltite, violarite, linnaeite, vallériite avec Cu natif, covellite, or natif, magnétite et ilménite.

Les teneurs en Ni oscillent entre 2,25 et 3,30 % celles en PGE sont pour Pt de 1,16 g/t avec des maxima à 5,3 g/t, pour Pd de 1,1 g/t à 2,5 g/t avec des valeurs atteignant 11 à 12 g/t. Aucun tonnage n'est donné.

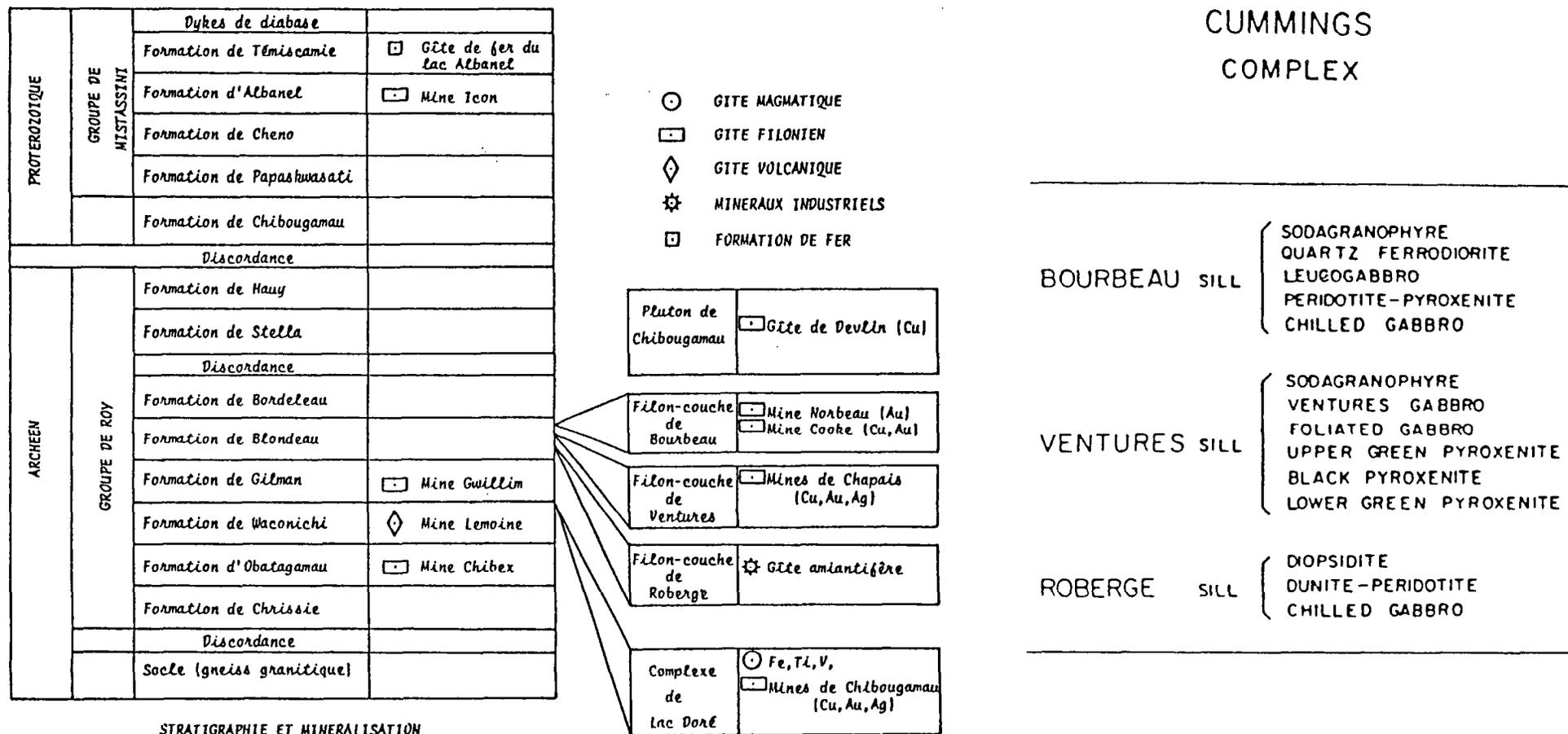
Un autre sill, le **South Delta Sill** travaillé aussi par COMINCO en 1980, montre des minéralisations à PGE. Il se présente comme une lentille de 10 m de puissance sur 130 m de longueur avec les mêmes caractères que le Delta Sill précédent. La section minéralisée plus épaisse (40 cm) donne des teneurs qui s'échelonnent entre 0,35 g/t et 11 g/t de Pt. Les teneurs en Pd sont plus faibles et se situent entre 0,45 et 2,32 g/t.

En Ontario, des études effectuées par le Service géologique sont en cours dans le but d'apprécier la potentialité en PGE de certains ensembles intrusifs. C'est le cas :

- du Nipissing Diabase (fig. 37), daté du Protérozoïque inférieur, qui est un ensemble de dykes jalonnant la zone instable située entre les volcanites du Keewatin et les séries sédimentaires huroniennes. Des ensembles intrusifs y sont associés ; c'est le cas de l'intrusion Portage Bay, située près de Cobalt et au Nord de Sudbury de l'intrusion ;
- du Bonanza complex. Ce sont des intrusions circulaires avec une composition et une organisation très proches des complexes annulaires que l'on développera dans un prochain chapitre.

Au Québec, des possibilités de minéralisations à PGE existent à la base de certains sills différenciés. C'est le cas du complexe Cumming à Chibougamau constitué de 3 sills différenciés allant des péridotites aux gabbros et diorites. Ces sills sont injectés successivement dans la série volcano-sédimentaire de Blondeau (tableau 20) ; leur puissance varie de 800 à 1000 m et leur origine respective est comagmatique à partir d'une chambre magmatique déjà bien stratifiée avant l'expulsion du magma.

Les guides de recherche découlent du modèle géologique de mise en place des sills. Appliqué aux sills de Katinip au Nouveau Québec, le schéma serait pour S.J. Barnes et al. (1982) de type gravitaire (fig. 38). Les sulfures précipitent très tôt à partir du liquide sulfuré immiscible et vont se déposer à la base du sill dans de petites



STRATIGRAPHIE ET MINERALISATION

Tabl. 20 - Succession lithostratigraphique de la région de Chibougamau au Québec, Canada (d'après Allard G.O., 1984)

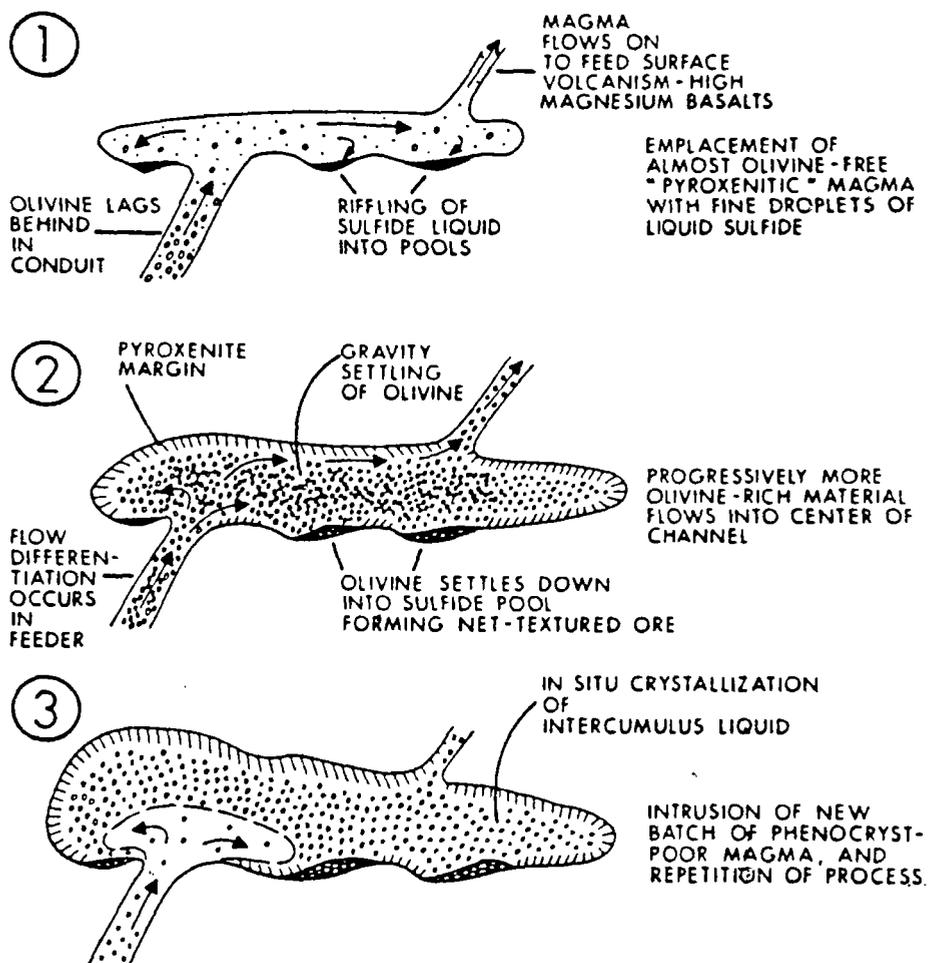


Fig. 38 - Schéma géologique de mise en place des sills de Katiniq (d'après Barnes S.J., Coats C.J.A. et Naldrett A.J., 1982)

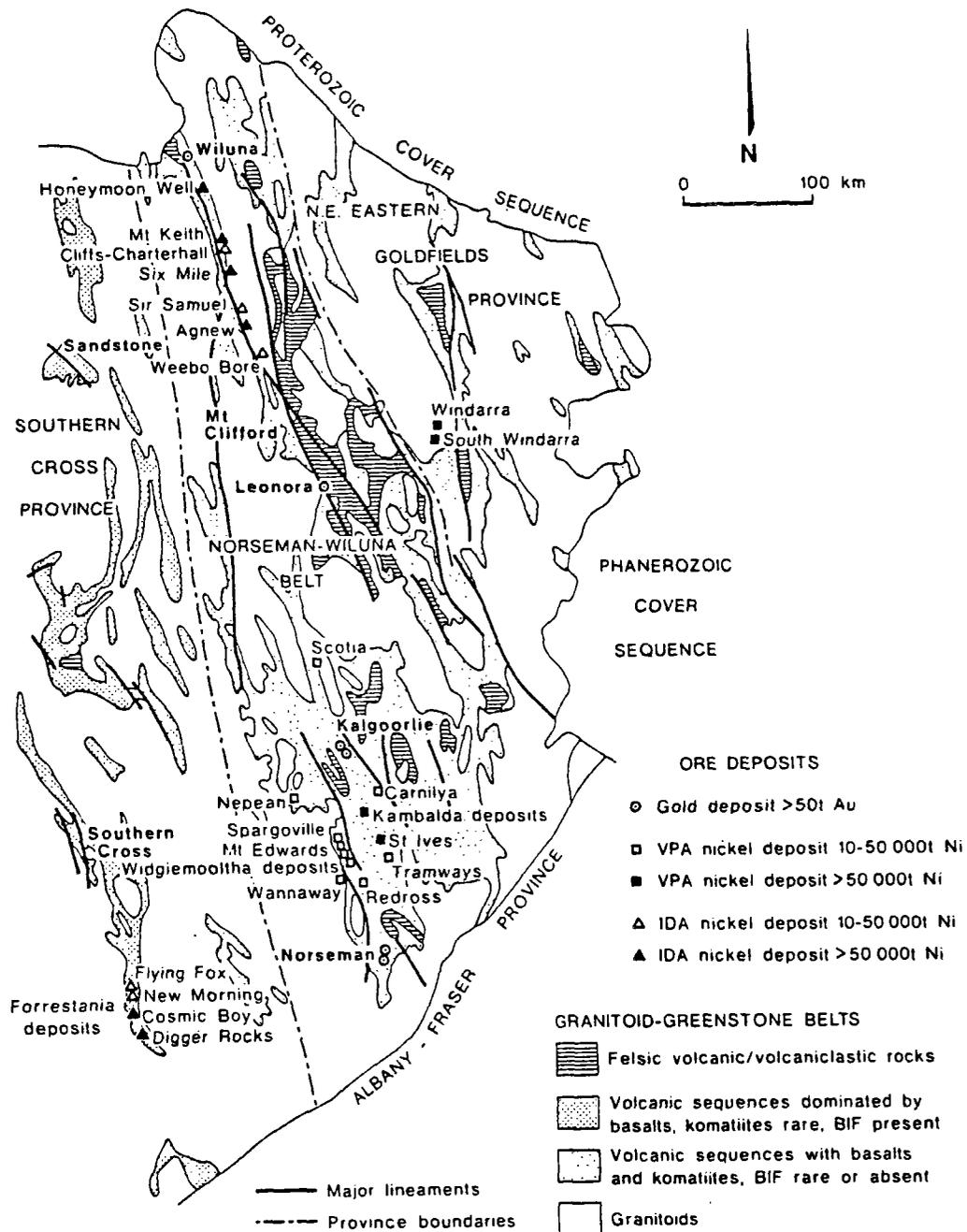


Fig. 39-

Solid geology of eastern part of the Yilgarn Block illustrating setting of major nickel deposits in terms of lithofacies, structure and major tectonic subdivisions of granitoid-greenstone terrains. Base map adapted from 1:1 000 000 map of Geological Survey of Western Australia (d'après Groves D.I., Leshner C.M. and Gee R.D., 1982)

dépressions pièges. Ce modèle de mise en place, sans tenir compte de l'origine du soufre, serait analogue à celui des auteurs russes pour les gisements de Noril'sk.

La prospection sera, en priorité, orientée vers la base des sills. On recherchera surtout les structures hydrothermalisées qui peuvent donner des minéralisations remobilisées à PGE dominants.

7.3. - LES GISEMENTS DE Ni-Cu ASSOCIES A DES INTRUSIONS DUNITIQUES DE FAIBLES DIMENSIONS

Ces intrusions sont co-magmatiques des volcanites qu'elles recoupent. Elle se sont mises en place à tous les stades du développement de la greenstone belt, depuis l'épisode ultramafique jusqu'au stade felsique et plus sédimentaire.

Latéralement, ces intrusions peuvent évoluer en lentilles subconcordantes de 500 à 1000 m de longueur et plus de 500 à 1000 m de puissance maximale. Le cas échéant, un début de différenciation magmatitique peut être observé.

Leur composition komatiitique qui, variant des dunites aux pyroxénites, est faite pour l'essentiel d'assemblages de forstérite à texture polygonale à mosaïque avec des intercumulats de pyroxènes, de sulfures et d'oxydes.

La minéralisation se localise le plus souvent en bordure inférieure de l'intrusion ; elle se présente sous diverses formes :

- en amas massifs donnant des lentilles oblongues ;
- en ciment soudant des brèches monogéniques à éléments de dunite-péridotite ;
- en interstices formant matrice autour des grains de forstérite. Dans ce cas la minéralisation est plus disséminée.

Plusieurs gisements de Ni-Cu avec PGE en sous-produit appartiennent à ce type (tableau 17), en particulier ceux situés en Western Australia (fig. 39) dans la Eastern Goldfield Province. Les intrusions de dunite, auxquelles sont associées les minéralisations de nickel, jalonnent un important linéament.

Au Canada, de nombreuses intrusions de ce type sont aussi très fréquentes.

Il ne s'agit plus exactement de gisements à PGE dominant, les teneurs sont trop faibles et les PGE récupérés sont surtout des sous-produits.

Deposit type and setting	Host rocks	Sulphide ores	Examples	Tectonic province
<i>Intrusive dunite-associated deposits</i> Narrow fold belts with major faults that parallel dunite lenses	Subconcordant lenses 0.5–10 km long, 50–1100 m thick of komatiitic dunite* (45–51%MgO) some with less magnesian margins. Country rocks variable, komatiite flow sequences commonly in hanging-wall	Lenticular shoots of massive, matrix and breccia ore near margin, disseminated ore above and in lens cores, Ni/Cu = 19–70+, Ni/Co = 30–70	Agnew, Mount Keith–Betheno, Six Mile, Goliath, Cliffs–Charterhall Honeymoon Well, Sir Samuel, Forrestania Group (Cosmic Boy, Digger Rocks, Flying Fox, New Morning, Mt Hope)	Northeastern margin of Norseman–Wiluna Belt, Eastern Goldfields Province Southeastern part of Southern Cross Province
<i>Volcanic peridotite-associated deposits</i> Base of stratigraphically low, thick komatiite piles, commonly exposed around granitoid-cored domes	Altered flows 25–75 m thick and several hundred metres long of cumulate komatiite (36–45%MgO) at or near base of komatiitic volcanic pile. Mineralized flows differentiated and olivine-enriched. Commonly basalt footwall and flanking sulphidic sediments	Lenticular shoots of massive, matrix and disseminated ores at base of flow and confined to embayments or troughs in footwall. Ni/Cu = 7–19, Ni/Co = 40–60	Kambalda deposits, St Ives–Tramways deposits, Carnilya deposits, Widgiemooltha deposits, Spargoville deposits, Mt Edwards, Nepean, Scotia Windarra–South Windarra Trough Well Ruth Well	Central part of southern Norseman–Wiluna Belt, Eastern Goldfields Province Northeastern, Eastern Goldfields Province Southern Cross Province West Pilbara Block
<i>Gabbroid-associated deposits</i> Variable occurrence	Layered or composite igneous complexes of gabbro-norite, pyroxenite and peridotite, generally less than 100 km ² in original area	Layer or pipe-like bodies of mainly disseminated ore. Ni/Cu < 7, Ni/Co ca 25	Carr Boyd Mt Sholl, Radio Hill Sally Malay	Norseman–Wiluna Belt West Pilbara Block Halls Creek Province, Kimberley Block
<i>Layered sedimentary-associated deposits</i> Variable occurrence	Banded sulphidic metasediment up to a few metres thick or tens of metres thick in ultramafic, mafic or mafic–felsic sequences	Thin layers of disseminated sulphides with variable Ni/Cu, Ni/Co	Sherlock Bay Relatively minor shoots at Kambalda (e.g. Jan Shoot) Small shoots at Windarra	West Pilbara Block Norseman–Wiluna Belt Northeastern Eastern Goldfields Province
<i>Vein-type arsenical deposits</i>	Associated with faulted or strongly deformed host rocks, country rocks include carbonated ultramafics	Quartz–carbonate–Fe sulphide–Ni arsenide–gold veinlets	Mount Martin (isolated occurrences at Kambalda) Bamboo	Southern, central part of Norseman–Wiluna Belt East Pilbara Block

* Nomenclature of ultramafic rocks of komatiitic affinity from Groves and Lesher.³

Tabl. 21 – Classification des gisements de nickel en Western Australia (d'après Groves D.I., Lesher C.M. et Gee R.D., 1982)

Comme exemples, nous citerons le gisement d'Agnew (Australie) et celui de Dumont au Québec.

a) Le gisement d'Agnew (Australie) (fig. 39), situé au Nord de la Norseman Wiluma belt, est associé à un corps de dunite appartenant au Perseverance Block. Du point de vue stratigraphique, cette intrusion de dunite est située au-dessus des volcanites komatiitiques de Kambalda (tableau 21 et fig. 40).

Affectée par le métamorphisme régional au niveau de l'épizone, la minéralisation soit en amas massif, soit disséminée, est dans son ensemble localisée sur la bordure ouest de l'intrusion.

Les teneurs en Ni sont élevées entre 2 et 6 % ; celles en PGE relativement faibles oscillent autour de 100 à 150 ppb avec une prédominance du platine sur le palladium.

b) Le gisement de Dumont au Québec, d'âge archéen est situé dans la greenstone belt de l'Abitibi de la Province du Supérieur du bouclier canadien. L'intrusion de Dumont est un complexe intrusif différencié à partir d'un magma initial de composition komatiitique. Latéralement, il devient concordant pour devenir un véritable sill.

Il se compose de plusieurs zones :

- à la base, une zone ultramafique avec péridotite et dunite et au sommet une zone mafique à gabbros ;
- associée à un niveau de dunite bien stratifié composé pour l'essentiel d'olivine avec des intercumulats de chromite et de clinopyroxène, la minéralisation est en interstices formant matrice entre les grains d'olivine.

Comme principaux sulfures, on peut citer : pentlandite, awaruite, heazlewoodite avec magnétite, et cuivre natif.

Les teneurs en Ni sont faibles en général, toujours inférieures à 0,8 %. Celles en PGE sont inférieures à 1,0 g/t.

Malgré les faibles teneurs en Ni et surtout en PGE, les intrusions dunitiques sont des objectifs intéressants que l'on ne peut éliminer au premier abord. En effet, d'éventuelles minéralisations à PGE sont possibles dans les structures hydrothermalisées contemporaines ou postérieures à la mise en place des intrusions.

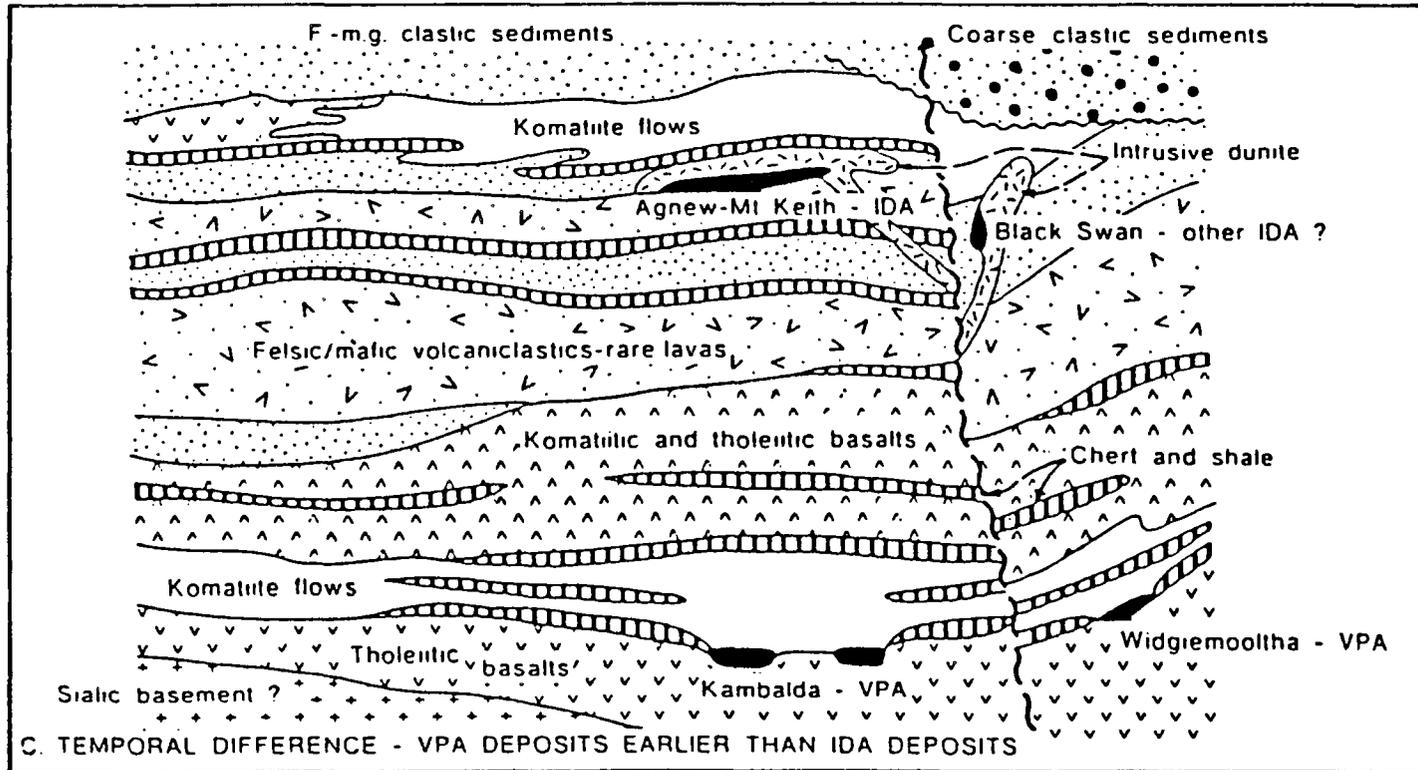


Fig. 40 -

Possible models for spatial separation of volcanic peridotite-associated and intrusive dunite-associated deposits in Norseman-Wiluna Belt: *A*, variation in degree of extension along length of the rift with komatiites erupted in rift valley and dunites intruded in longitudinally equivalent un rifted plateau; *B*, komatiites erupted in deep central part of rift and dunites intruded in marginal zones; *C*, komatiites erupted during initial stretching phase of rifting and dunites intruded during subsequent subsidence phase. Cross-section showing temporal relationship adapted from Marston and Groves⁴ (d'après Groves D.I., Leshner C.M. and Gee R.D., 1982)

Les exemples les plus significatifs du type de cible que l'on doit rechercher peut être illustré par deux exemples : l'intrusion du lac Sheen (Québec) et le gisement de New Rambler (USA).

a) L'intrusion du lac Sheen

Elle est située à une douzaine de kilomètres au Sud-Est de Belleterre au Temiscamingue (Québec). Ce prospect de la compagnie VIOR englobe une intrusion différenciée de péridotite à pyroxénite. Elle est fortement déformée et rétro-morphosée en raison de la proximité immédiate du front du Grenville. La minéralisation actuellement reconnue est associée à un dyke d'amphibolites de 300 m d'extension sur plusieurs mètres de puissance. Orienté E-W, ce dyke plus ou moins disloqué, recoupe l'intrusion de péridotite : des teneurs à PGE dominants sont très prometteuses ; elles oscillent entre 5 et 7 g/t avec un rapport de Pt/Pd de 1/1.

En cours d'évaluation, l'intérêt minier de ce prospect semble se confirmer (comm. person. J.M. Lulin, octobre 1986).

b) Le gisement de New Rambler

Cette ancienne mine est située aux USA, dans le district minier de Douglas Creek au Sud-Est du Wyoming près de la frontière avec le Colorado. Exploitée surtout pour le cuivre, son activité a cessé en 1918 à la suite d'un incendie.

Le gisement est dans une zone très tectonisée des montagnes de Medicine Bow sur l'un des nombreux accidents E-W qui découpent le massif montagneux.

Il s'agit d'une zone mylonitique très altérée de type shear-zone développée, lors de l'orogénie Laramides (1750 Ma), au contact de gneiss à biotite, épidote et plagioclases et d'un ensemble de gabbros et diorites qui pourraient appartenir à un complexe stratifié de tendance tholéitique et daté à 2410 Ma.

La minéralisation en lentilles plurimétriques est plus ou moins massive associée à des faciès de quartz et jaspe rubané. Elle se présente aussi en fines disséminations aux épontes dans les roches altérées à quartz-séricite-pyrite.

Trois paragenèses ont été reconnues, l'une à pyrite, magnétite et pyrrhotite avec comme minéraux accessoires chalcopryrite, les deux autres, l'une massive, l'autre disséminée, sont à chalcopryrite et pyrrhotite avec des minéraux de PGE riches en Te et Bi, principalement sperrylite à Rh, mérenskyite, kotulskite, michenérite...

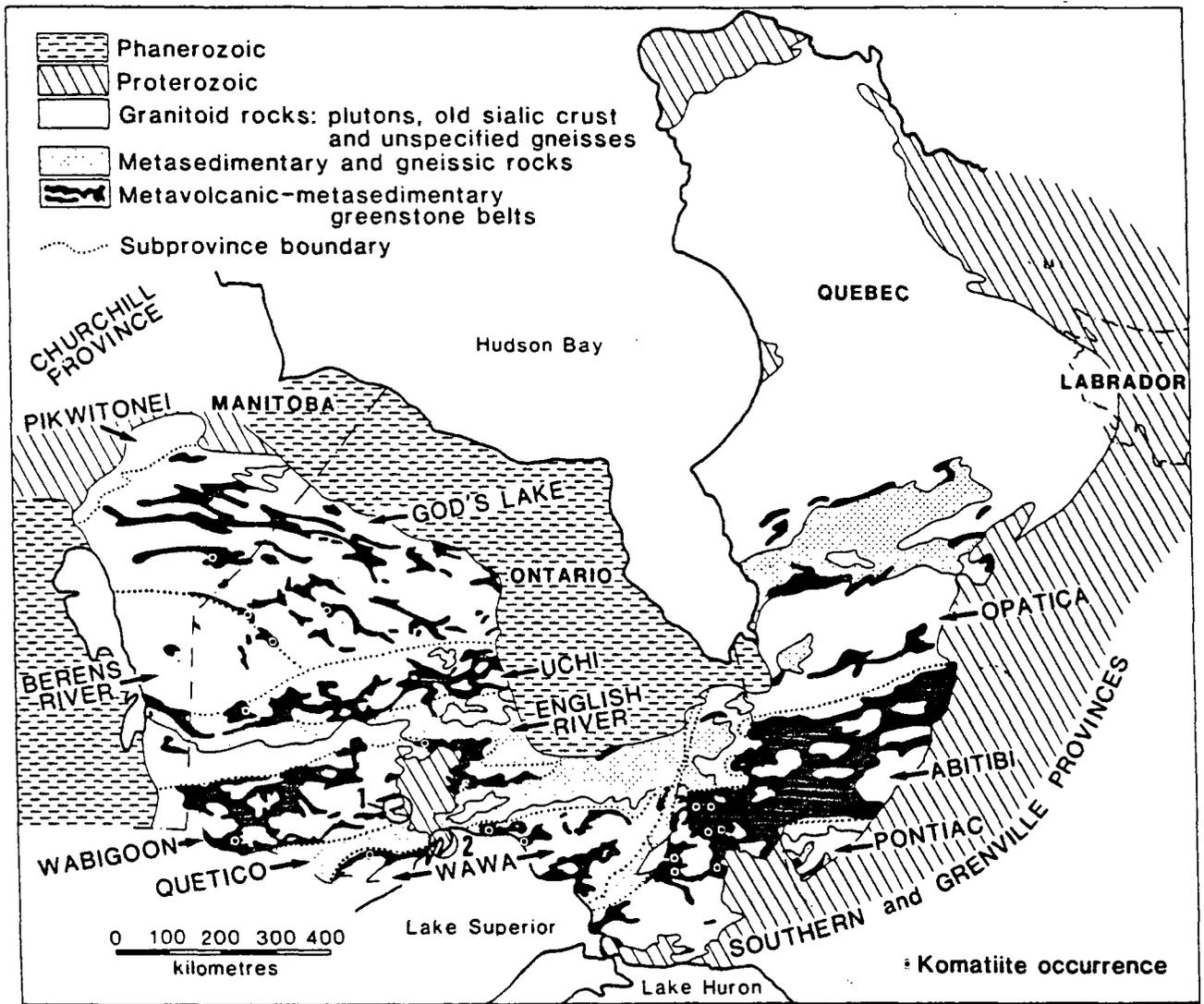


Fig. 41 - Sketch map of the Superior Province showing the location of known komatiite occurrences. Gods Lake is another name for the Sachigo Subprovince Localisation des complexes du (1) Lac des Iles et de (2) Coldwell (d'après Ayres L.D. and Thurston P.C., 1983)

Les études de stabilité indiquent une température de dépôt autour de 335°C. Les teneurs moyennes sont élevées 75 g/t de Pd et 4 g/t de Pt.

Cette minéralisation est interprétée par M.E. Mc Callum et al. (1976) comme étant d'origine hydrothermale par remobilisation et concentration d'un stock métal à Cu et PGE issu des roches mafiques encaissantes.

Les facteurs de concentration entre l'encaissant gabbroïque et la structure minéralisée sont de l'ordre de 7500 pour Pd et 400 pour Pt et probablement moindre de l'ordre de 100 pour les autres PGE en particulier Rh, Os et Ir.

A partir de ces exemples, de nouvelles cibles se dégagent dans les intrusions dunitiques mais aussi de façon générale sur tous les ensembles mafiques ultramafiques tectonisés. On recherchera :

- les zones cisillées (shear-zone) et/ou les zones de brèches très altérées par suite de circulations hydrothermales développées au contact de l'intrusion avec les roches encaissantes ou avec une autre intrusion antérieure. Dans ce dernier cas, la minéralisation se situe dans la zone bréchique développée entre les deux épisodes magmatiques ;
- les dykes et/ou filons d'amphibolites hydrothermalinisés (hornblende, biotite) de puissance métrique à plurimétrique pouvant être minéralisés en sulfures (pyrrhotite, pentlandite, pyrite). Ces dykes et/ou filons recoupent des intrusions ultramafiques rétro-morphosées (actinote, serpentine) et très déformées.

7.4. - LES GISEMENTS DE PGE ASSOCIES AUX COMPLEXES ANNULAIRES

Il s'agit d'ensembles ultramafiques à mafiques différenciés à disposition annulaire intrudant les volcanites des greenstone belts.

Ce type de gisement est relativement peu connu : leur découverte remonte à quelques années. Nous nous baserons sur deux exemples récemment découverts au Canada.

a) Le complexe du lac des Iles (Ontario-Canada)

D'âge archéen, le complexe du lac des Iles appartient à une série d'intrusions jalonnant le contact de la greenstone belt de Wabigoon et la ceinture granito-gneissique de Quetico (fig. 41). Ces intrusions souvent comagmatiques des volcanites se situent en périphérie des massifs de diorite (trondhjémite). Leur mise en place se situe en relais de grands accidents pérennes ayant joué de l'Archéen au Protérozoïque (Front de Kapuskasing, le Mid-Continent Gravity, le Front du Grenville, la faille Nipigon).

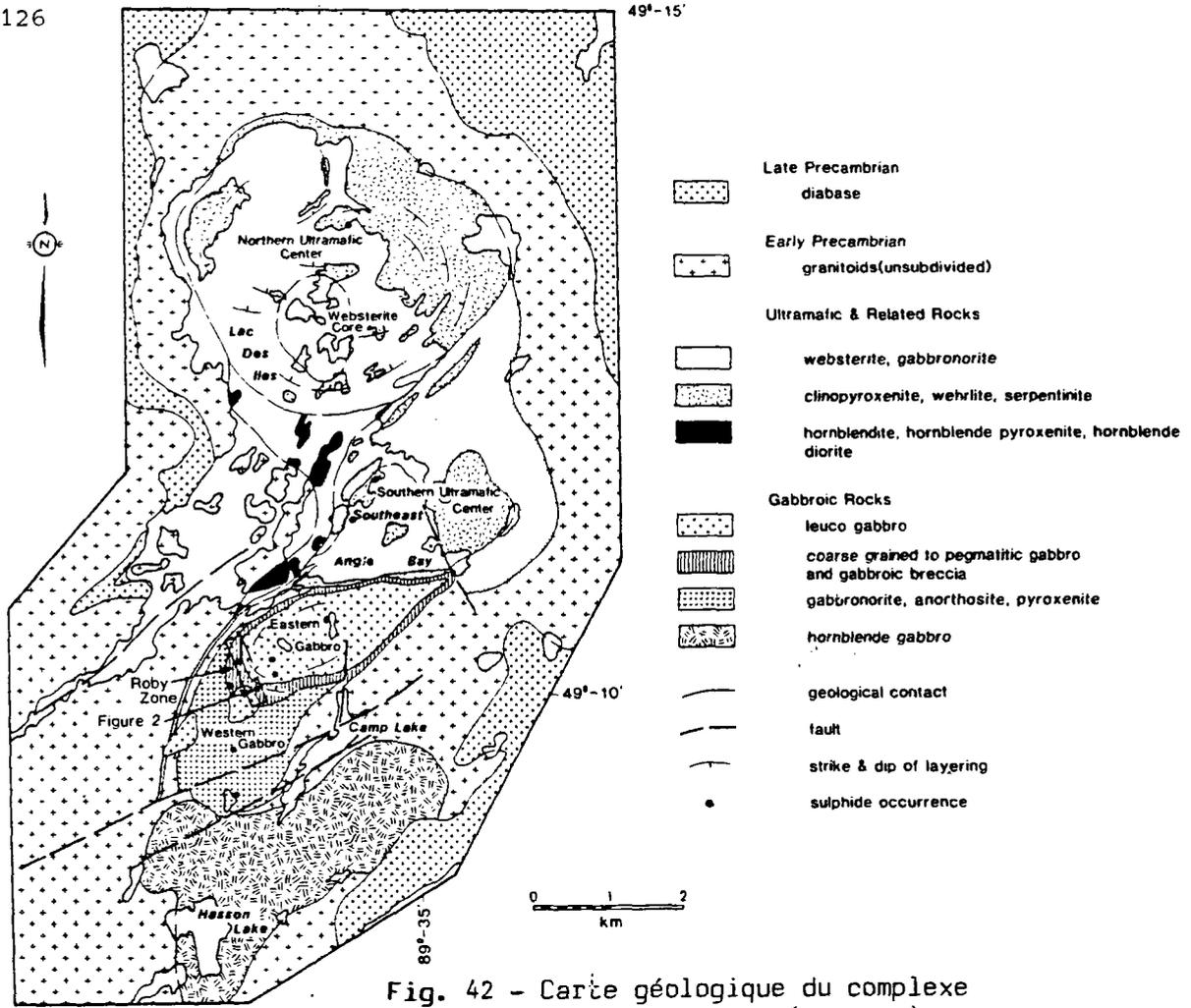


Fig. 42 - Carte géologique du complexe du Lac des Iles (Ontario) (d'après Sutcliffe R.H. and Sweeney J.M., 1985)

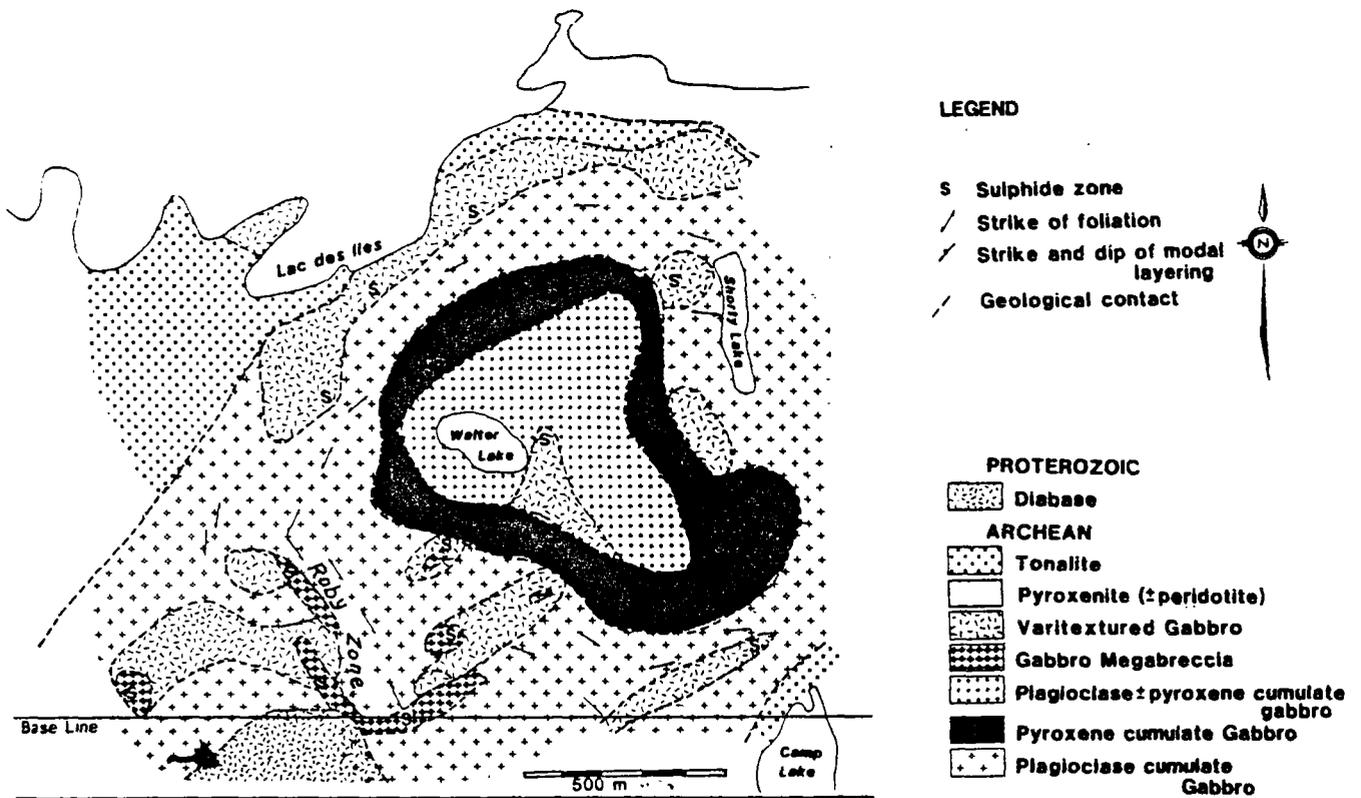


Fig. 43 - Carte géologique de la Roby Zone du complexe du Lac des Iles (d'après Mc Donald A.J., 1985)

Situé sur le flanc Est d'un des massifs granito-gneissiques de type tonalite, le complexe du lac des Iles appartient à une suite de complexes mafiques-ultramafiques jalonnant la bordure de ce massif. Il se compose de plusieurs ensembles (fig. 42) :

- . celui du Nord de forme circulaire est centré sur le lac des Iles. Il est constitué par deux intrusions successives co-axiales d'ensembles différenciés allant des péridotites, pyroxénites aux webstérites ;
- . celui du Sud (fig. 43), de forme elliptique, se compose d'une zone centrale de wehrlite avec en bordure une zone de webstérite plus ou moins différenciée en gabbro-norite. Le contact sud avec le socle granito-gneissique s'effectue par une zone bréchique complexe à éléments variés : hornblendite, pyroxénite à hornblende consolidés par une matrice plus felsique de diorite à hornblende. Dans la partie ouest, cette zone de brèche devient très grossière et l'on note l'apparition de lentilles de pegmatites à composition de gabbro et de nombreux dykes d'amphibolite et de diorite (fig. 44). Cette zone correspond à la Roby zone.

Deux minéralisations à PGE et métaux de base Cu-Ni ont été reconnues, l'une finement disséminée dans les cumulats mafiques (péridotites, pyroxénites...), l'autre est surtout concentrée dans la zone bréchique, les sulfures étant pour la plupart localisés dans les pegmatites par suite de remobilisations développées lors de la mise en place du complexe au contact des roches encaissantes. Ce processus implique une phase fluide ayant provoqué l'altération des silicates primaires, la formation des pegmatites, et le dépôt d'une minéralisation sulfurée polymétallique (Ni, Cu, Pb, Zn...) et PGE (Pt et Pd) à cachet hydrothermal. Cette minéralisation apparaît comme la remobilisation d'une préconcentration finement disséminée dans les cumulats mafiques du complexe annulaire.

La Roby zone, de 2 km de largeur sur 15 m de puissance moyenne, a été reconnue par Texas Gulf Canada sur la partie sud-ouest (comm. orale, A.J. Naldrett, 1986). Elle correspond à la zone bréchifiée développée au contact de l'intrusion et les roches encaissantes. Premier amas à PGE d'intérêt économique au Canada, elle constitue un type de gisement nouveau très intéressant.

Les principaux sulfures sont chalcopyrite, pyrrotite, pentlandite et pyrite avec comme minéraux accessoires : millérite, violarite, sphalérite, galène et clausthalite.

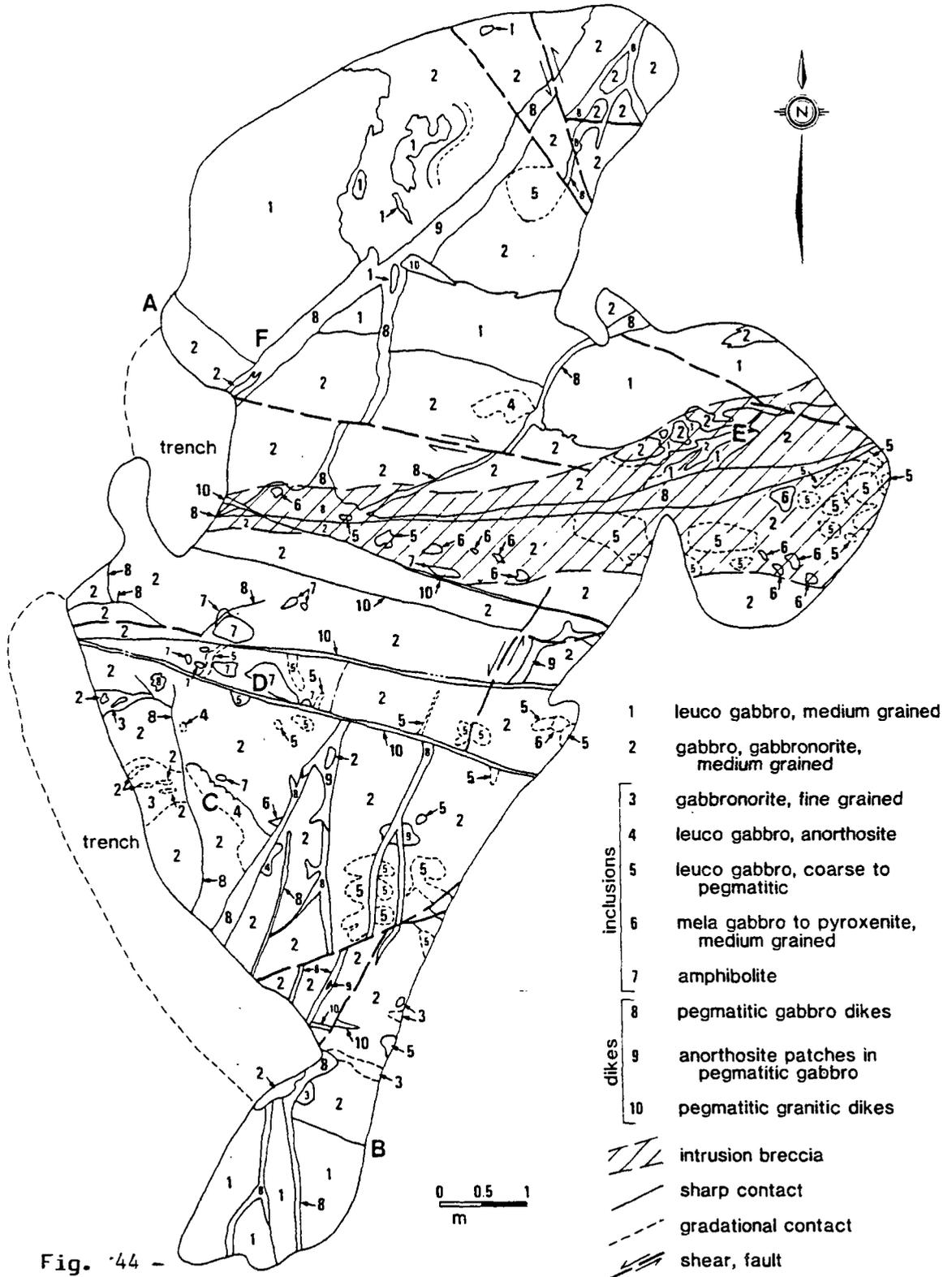


Fig. 44 -

Outcrop map showing typical relationships between gabbroic phases in the Roby Zone. Phase contacts at locations A and B are interpreted to be primary igneous layers. Leucogabbro inclusions at C have cusped surfaces suggesting the inclusion was not solidified at time of incorporation. Other inclusions, such as location D, are more angular and appear to have been solid. Intermixing of gabbronorite and leucogabbro occurs at E. An intrusion breccia zone, indicated by diagonal pattern, crosscuts the igneous layering. Pegmatitic gabbro dikes core the intrusion breccia and also disrupt the layering as at location F. Field observation indicates that sulphide mineralization is associated with the pegmatitic gabbro dikes and gabbronorite.

(d'après Sutcliffe R.H. and Sweeney, J.M., 1985)

Les principaux sulfures de PGE sont braggite, vysotskite, kotulskite, isomertieite, mérenskyite, sperrylite, monchéite, stillwaterite, palladoarsenide et un minéral de formule Pd_5As_2 .

Les teneurs annoncées sont élevées (10 à 15 g/t de Pd et 3 à 4 g/t de Pt) (fig. 45).

Enfin, rappelons que le complexe du lac des Iles, reconnu depuis plus de 10 ans, est dans une phase d'exploration très intense.

Dans la province de l'Ontario, d'autres complexes à structure annulaire, sensiblement identiques sont en cours d'études comme sujet de thèse à l'Université de Toronto. Les analyses de PGE donnent des teneurs très intéressantes, c'est le cas :

- du complexe de **Montcalm au Nord-Ouest de Timmins** où des tonnages de 45 Mt de minerai à 2,5 % Ni et 0,5-0,7 % Cu ont été mis en évidence ;
- du complexe de **Big Trout Lake au Nord-Ouest de l'Ontario**. La zone la plus intéressante pour des minéralisations sulfurées avec PGE se situe dans une zone de brèches développées au contact entre l'ensemble basal ultramafique stratifié (péridotite) et l'ensemble sommital anorthosique.

b) Le complexe de Coldwell (Ontario, Canada)

D'âge protérozoïque (1,1 Ma) intrudant les formations métasédimentaires et métavolcaniques archéennes de la province du Supérieur, le complexe de Coldwell est constitué par trois suites d'intrusions différenciées de gabbros à syénites se présentant sous forme de "ring dykes" et de "cone sheets" (fig. 46).

L'ensemble montre une double affinité : tholéitique pour les formations mafiques, et alcaline pour les termes felsiques.

Deux horizons minéralisés sont séparés par un niveau de ferrogabbros à ferrodiorites riches en magnétite titanifère. La minéralisation se présente en petites lentilles souvent pegmatitiques de composition de gabbros à olivine et biotite, ces unités sont encaissées dans des monzodiorites, des diorites, des gabbros à olivine.

Les sulfures de PGE, surtout Pt, Pd et Rh, d'après R. Dahl et D.H. Watkinson (1986), sont concentrés dans les pegmatites potassiques avec feldspaths et surtout biotite.

Les teneurs sont assez faibles : environ 2 g/t de PGE (avec Pd supérieur à Pt) et 1 à 2 g/t Au, le tonnage estimé est de 47 Mt.

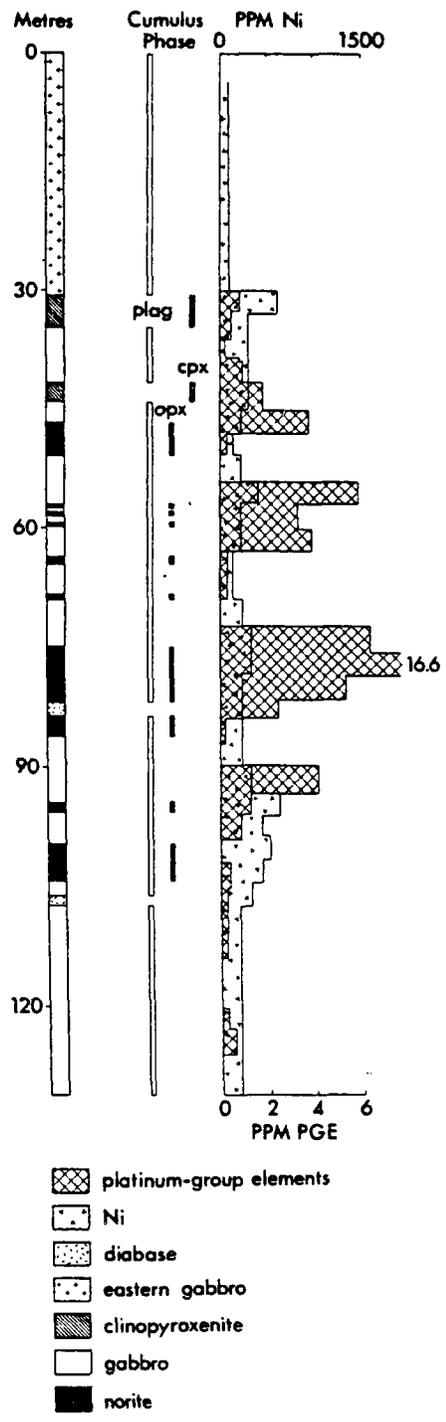


Fig. 45 -

Variations des teneurs en Ni et PGE dans un sondage recoupant la Roby Zone et les formations encaissantes du complexe du Lac des Iles (d'après Watkinson D.H. and Dunning G., 1979)

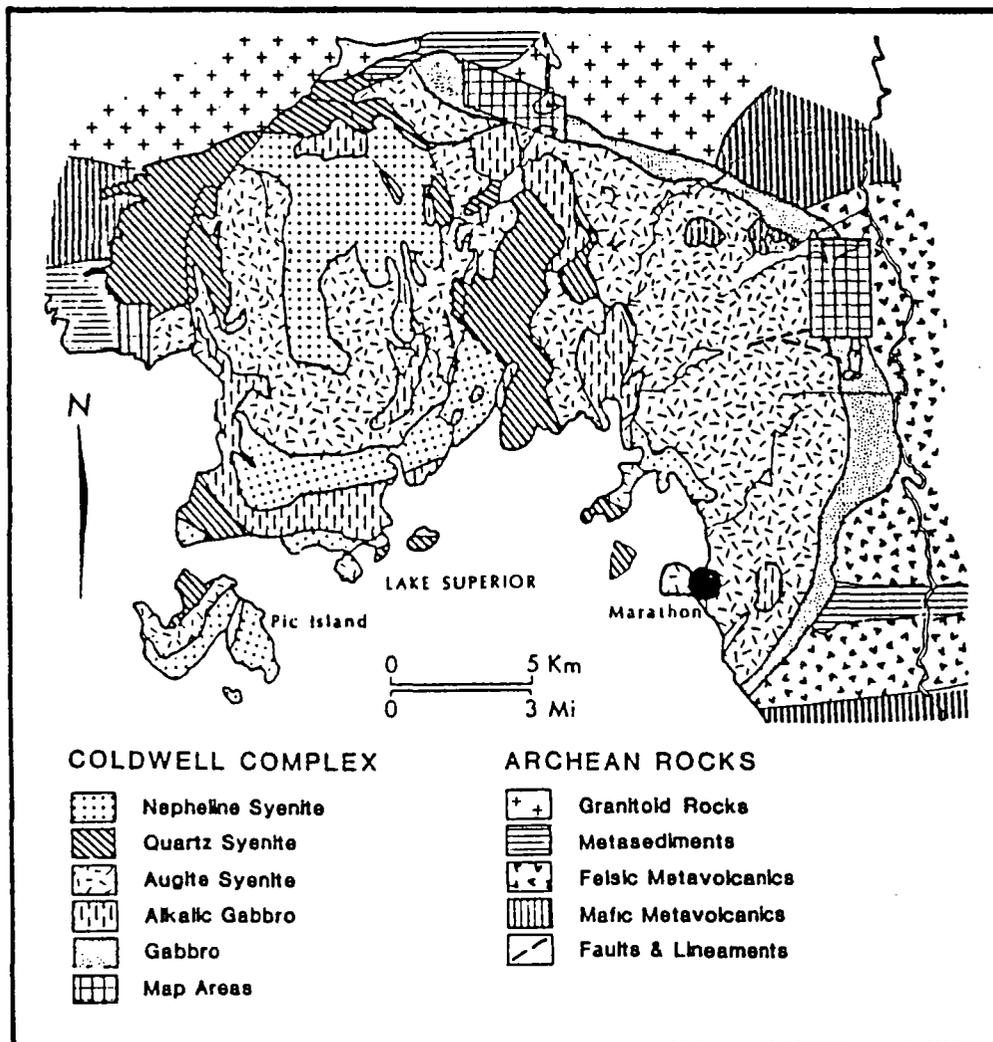


Fig. 46 -

Carte géologique simplifiée du complexe de Coldwell en Ontario
(d'après Watkinson D.H., Wittaker P.J. and Jones P. L., 1983)

Plusieurs critères permettent de préciser la potentialité métallifère à PGE des complexes intrusifs associés aux greenstone belts. Ils concernent :

- leur localisation au sein de la greenstone belt, souvent à leur contact avec les ensembles ou les ceintures granito-gneissiques encaissants ;
- leur association en chapelet en bordure de massifs granitiques (tonalite) ;
- leur mise en place, soit au croisement de grands accidents pérennes ayant joué de l'Archéen au Protérozoïque, soit sur des accidents secondaires transverses ;
- leur disposition annulaire formée d'intrusions successives co-axiales ou déplacées latéralement ;
- leur caractère différencié des principales formations ultramafiques à mafiques montrant une tendance géochimique de nature tholéitique ; ce caractère souligne une même origine comagmatique avec les volcanites ultramafiques de la greenstone belt ;
- le développement de zones de brèches hydrothermales au contact des roches encaissantes, qui peuvent correspondre au substratum granito-gneissique ou à des formations intrusives antérieures ;
- la nature des pièges : zones bréchiques hydrothermalisées et lentilles de pegmatites riches en amphiboles. La plupart des minéraux de PGE coexistent avec les sulfures et silicates secondaires d'altération hydrothermale. Dans certains cas, les pyroxènes et les plagioclases ne sont pas complètement altérés.

Les gisements mis en évidence aux complexes du Lac des Iles et de Coldwell (Canada) soulignent l'importance des phénomènes hydrothermaux à l'origine des minéralisations sulfurées à PGE. Ces phénomènes permettent de construire un modèle métallogénique qui devra servir de référence pour la prospection des PGE dans les diverses zones d'action du BRGM.

8 - LES GISEMENTS DE Ni-Cu LIES AUX INSTRUSIONS CIRCONSCRITES DEFORMEES

8.1. PRINCIPAUX CARACTERES D'IDENTIFICATION

Il s'agit d'intrusions de petite taille (environ 10 km de diamètre) très déformées en raison de leur mise en place syntectonique en zone instable. Leur composition (surtout norites avec péridotites, pyroxénites et troctolites) montre une différenciation magmatique assez prononcée. Localement, cette disposition ressemble grosso-modo à celle des complexes stratiformes du type Bushveld.

Dans certains cas, les similitudes avec les complexes annulaires précédents sont très frappantes.

Les appareils peuvent contenir des minéralisations intéressantes à Cu-Ni avec comme sous-produits Co et PGE. Elles sont le plus souvent piégées dans les formations ultramafiques au contact de l'intrusion avec les roches encaissantes souvent composées de shales pyriteux.

Les teneurs sont faibles 0,3 à 1,0 % Ni, 0,4 % Cu et 0,13 % Co ; celles en PGE ne sont pas données, on les estime entre 1 et 2 g/t. Ces gisements donnent des tonnages de minerai de 10 à 50 Mt.

8.2. TYPE DE GISEMENT ASSOCIE

Les exemples sont peu nombreux ; on relève les gisements des districts de Rana et Kvikne en Norvège et celui de Moxie dans l'Etat du Maine aux Etats Unis.

Le gisement de Bruvann. Associé à l'intrusion de Rana va nous servir de référence pour l'élaboration des principaux guides de recherche.

L'intrusion de Rana située au Nord de la Norvège (fig. 47) se présente sous la forme d'un complexe annulaire recoupant des formations gneissiques très déformées par au moins trois phases de plissement. La mise en place de l'intrusion se situe avec la dernière phase de plis de l'orogénie calédonienne.

Le massif a la forme d'un cône renversé dont l'axe s'enfonce légèrement vers le Nord-Ouest. Il comprend une zone de norite avec des lits et des lentilles de péridotites et de pyroxénites disposés autour d'un noyau de norite à quartz. Les structures primaires sont très déformées par les plissements et autres chevauchements calédoniens. De nombreux lambeaux de gneiss pélitiques à calc-silicates et des schistes noirs sont englobés dans les formations magmatiques.

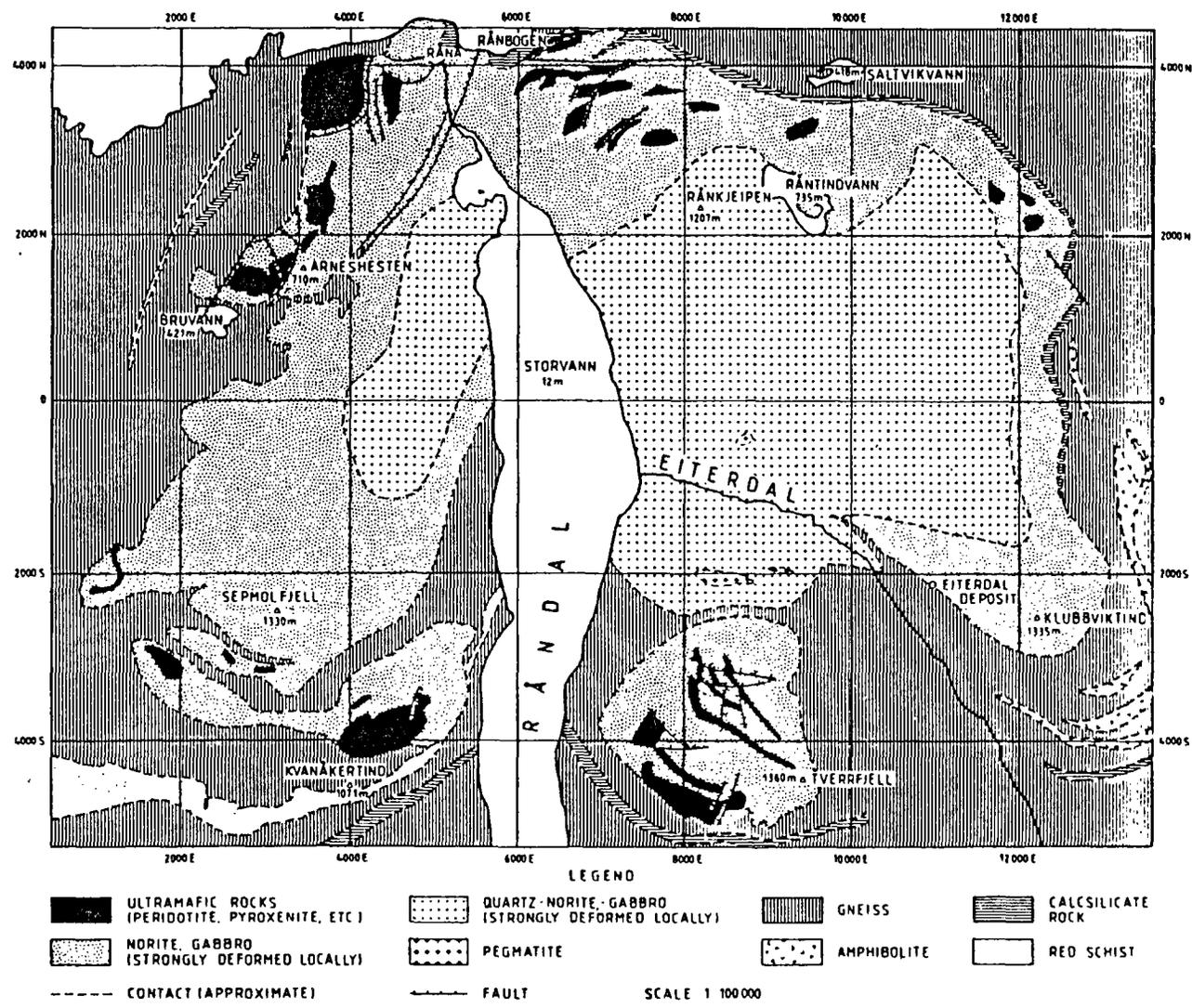
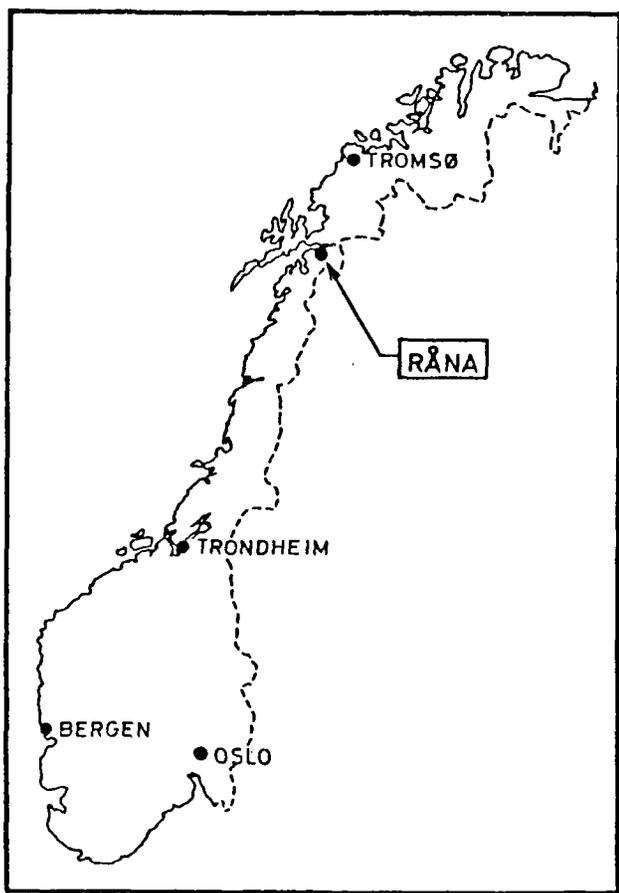


Fig. 47 - Localisation du complexe ultramafique à mafique de Rana en Norvège et carte géologique simplifiée de ce complexe (d'après Boyd R. and Mathiesen C.O., 1979)

Le seul gisement connu est Bruvann en Norvège (43,6 Mt à 0,33 % Ni, 0,08 % Cu et 0,015 % Co avec PGE).

Les minéralisations sont associées à des corps de péridotites avec pyroxènes ; les principaux sulfures sont : pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite et pyrite. Ils se présentent sous forme disséminée ou en amas massifs ; ces derniers sont fréquents dans les zones déformées par suite de remobilisation.

Ce type de complexe très déformé en raison d'une mise en place syntectonique est une cible favorable pour les minéralisations à Ni-Cu et PGE (1 g/t).

Les principaux contrôles relèvent surtout de la nature de l'environnement où ils se sont mis en place, c'est-à-dire :

- du cadre géostructural principalement sur des accidents majeurs développés dans les ceintures métamorphiques, les greenstone belts ou les ceintures mobiles ;
- de l'intensité des déformations compliquant l'allure des intrusions et/ou la succession lithostratigraphique.

Dans ces intrusions, on recherchera les principales structures hydrothermalisées pouvant être des pièges à des minéralisations remobilisées à PGE dominants.

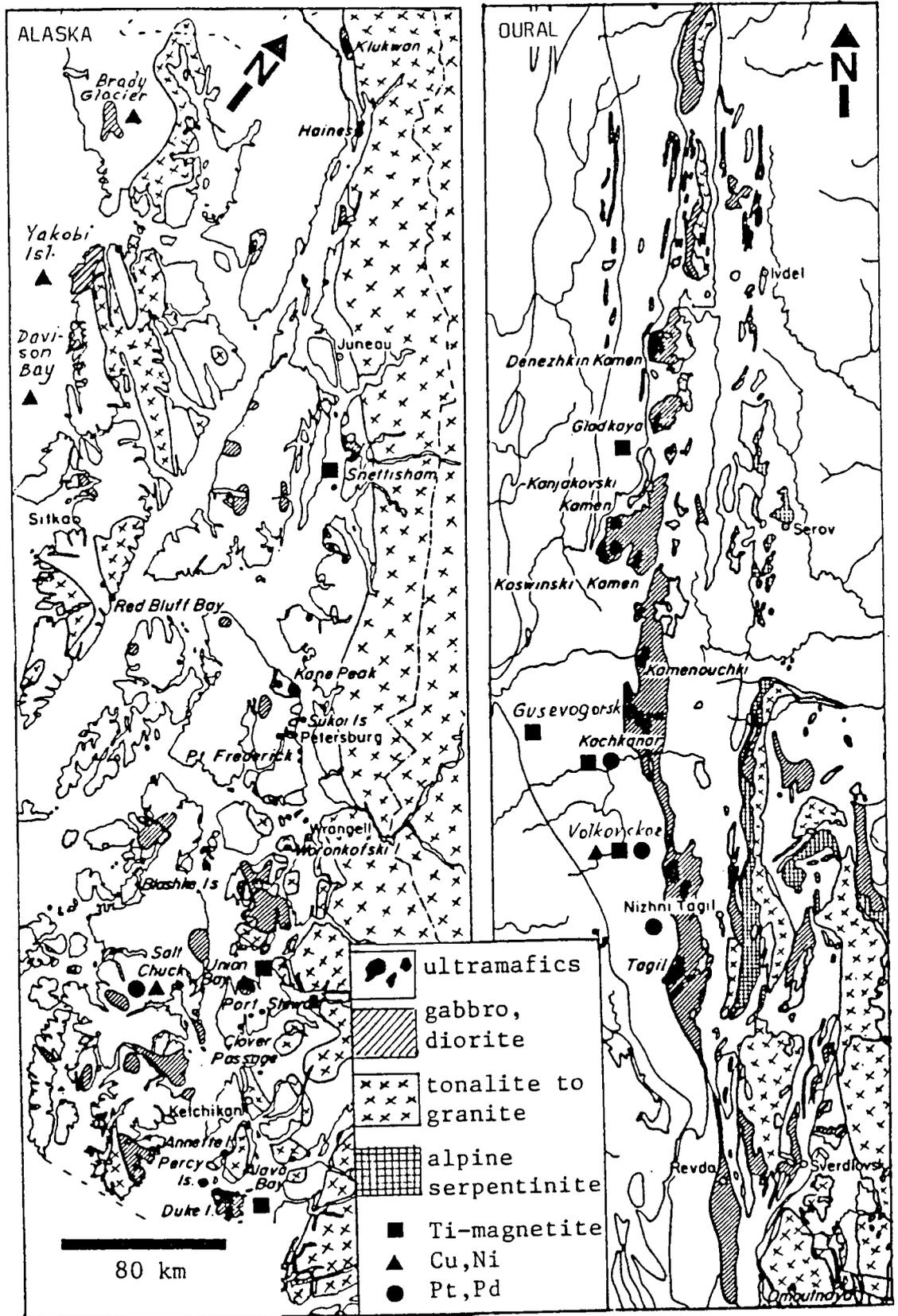


Fig. 48 -

Carte de répartition des complexes alaskéens en Alaska et en Oural (d'après Laznicka P., 1985)

9 - LES COMPLEXES DE TYPE ALASKEEN

9.1. PRINCIPAUX CARACTERES D'IDENTIFICATION

Selon A.J. Naldrett et L.J. Cabri (1976), les complexes alaskéens localisés essentiellement dans les ceintures orogéniques du Paléozoïque au Mésozoïque se caractérisent par une suite pétrologique et géochimique de forte pression d'eau marquée par l'abondance d'amphiboles et une charge en K_2O très élevée signalant une affinité magmatique alcaline. Ces suites sont assimilables aux séries des arcs insulaires.

Les complexes alaskéens se présentent en structures annulaires avec quelquefois une succession de mise en place qui pourrait être inverse (tableau 22)

Le complexe de référence étudié par T.N. Irvine (1974) est celui de **Duke Island** en **Alaska** (fig. 48). Son âge est alpin et il est constitué d'une séquence ultramafique à mafique associant des dunites, des wehrlites, des clinopyroxénites à olivine, des clinopyroxénites à hornblende et magnétite et une suite de gabbros. Cette séquence intrude un ensemble gabbroïque à tendance tholéïtique riche en amphiboles. De plus, il est recoupé par des roches pegmatoïdes à hornblende et plagioclase (fig. 49).

9.2. LES PRINCIPALES MINERALISATIONS ASSOCIEES AUX COMPLEXES ALASKEENS

Apparentés aux complexes stratiformes ultramafiques à mafiques de l'Archéen, les complexes alaskéens peuvent donner deux types de minéralisation :

- l'une à magnétite titanifère (avec vanadium et PGE) se présente en niveaux ou en amas massifs dans les formations ultramafiques à mafiques : wehrlites, pyroxénites ou gabbros ;
- l'autre à sulfures de Ni avec PGE en sous-produit dans les horizons ou amas de chromite.

La minéralisation composée de sulfures (pentlandite, heazlewoodite (Ni_3S_2), pyrrhotite), or natif et des alliages Fe, Pt, Os-Ir est directement associée à la chromite et à la magnétite. Elle présente le même habitus que celle associée aux pods de chromite des complexes ophiolitiques.

Les teneurs sont faibles (≤ 100 ppb de PGE au total) et aucune concentration notable d'intérêt économique n'a, à ce jour, été découverte.

LOCALITY	AGE	GEOLOGY	MINERALIZATION	REFERENCES
Yakobi Island, S.E. Alaska	Tr-Cr	composite stock of norite enveloped by gabbro,qtz.diorite	trough-shaped body of dissem. ptl,cp,po above norite base 66 Tt Ni/0.33% 44 Tt Cu/0.21%	Kennedy and Walton (1946)
Klukwan,n.of Haines, S.E. Alaska	Cr ₂	5x1.6 km stock of magnetite hornbl.pyroxenite intruded gabbro-diorite	15-20% Ti-magnetite uniform dissem. in pyroxenite, local segreg.of massive magnetite 70 Mt Fe/14% 375 t Pt/0.75 ppm	Taylor and Noble (1969)
Union Bay, S.E. Alaska	Cr-T ₁	dunite,peridotite,oliv.pyroxenite,hornbl.pyrox.,gabbro zoned intrusion	large mass of magnetite-hornbl pyroxenite, uniform texture; aver. 18.03% Fe, 1.36% TiO ₂	as above
Duke Island, S.E. Alaska	Cr-T ₁	two separate intrusions; dunite or perid.core enveloped by pyroxenite,intr.to gabbro	concordant layers of segregated magnetite in pyroxenite, 10-60% Fe	as above
Salt Chuck Intrusion Kasaan Penn., S.E. Alaska	Cr-T ₁	small pyroxenite body with minor gabbro and diorite emplac. into S metamorphics	dissem.and veinl.of bornite, cp,nat.Cu,palladium in pyroxenite; 2.4 Tt Cu 280 kg Pd	Wolff and Heiner (1971)
Brady Glacier, S.E. Alaska	T ₁	layered gabbro intrusion emplaced into MZ metamorphics has an olivine,pyroxene,chromite cumulate near base	po,ptl,cp,dissem.to massive in troctolite cumulate and along contacts; 500 Tt Ni/0.5% 300 Tt Cu/0.3%, 18 t Pt met.	Himmelberg and Loney (1981)
Aiken L.-McConnell Cr.area, British Columbia	Tr	about 10 small,zoned dunite, wehrlite,pyroxenite,hornblendite,gabbro intrusions	ilmenite segreg.pods in gabbro (Axelgold); magnetite dissem. in pyroxenite	Irvine (1974)
Hope, 130 km E. of Vancouver, British Columbia	Cr ₂	3.2x1.6 km irregular zoned peridotite,pyroxenite,hornblendite body envel.by diorite and norite,in metamorphics	po,ptl,cp,disseminations to massive pipes in peridotite, sulphide masses on contact of pyroxenite and peridotite	Clark (1969) McTaggart (1971)
Tulameen complex, British Columbia	Tr ₃	zoned small intrusion; dunite core envel.by olivine and hornbl.pyroxenite,gabbro	Pt in dunite,highest value 0.225 ppm assoc.with chromite; small Au and Pt placers	McTaggart (1971)
Kochkanar Complex, Isovsk area, the Urals, USSR	S ₃	110 km ² laccolithic pluton, dunite,perid.,oliv.pyrox., oliv.gabbro,gabbro,norite, intruded into amphibolites	dissem. Ti-magnetite in olivine magnet.pyroxenite, 6 Bt Fe/16.64%; Pt,Pd dissem.in pyroxenite,Fe ore,placers; minimum 500 t Pt metals	Reshit'ko (1967)
Gusevogorsk, adjac. to Kochkanar,Urals, USSR	S ₃	like Kochkanar	coarse to fine Ti-magnetite segreg.,lenses,sheets; small quant. of nat.Au in magnetitite unevenly distributed Pt	Razin (1974)
Nizhnyi Tagil intrusion, the Urals USSR	S ₃ -D ₁	dunite,pyroxenite,gabbro, empl.into Or-S metavolcanics	pockets,lenses,veinlets of Pt alloys in dunite, accumulated in placers; min. 259 t Pt	Razin (1974) Rundkvist,ed., (1978)
Volkovskoe deposit, part of Tagil intr. the Urals, USSR	S ₃ -D ₁	n.n.w. elong.gabbro, gabbrodiorite,diorite,quartz dior. layered intrusion	3 km long ore zone, 200 lens-like bodies of dissem.born.,cp overlapping with layered Ti-magnetite,in pyrox.gabbro about 600 Tt Cu/0.85%,300 t Pd	as above Samonov and Pozharisky (1974)
Choco Province, Colombia	MZ-CZ	small serpentinized ultramafic - mafic bodies	poor bedrock outcrop; 75 t Pt plus produced from placers	Putzer (1976)

Tabl. 22 - Caractère des gisements de type alaskéen (d'après Laznicka P., 1985)

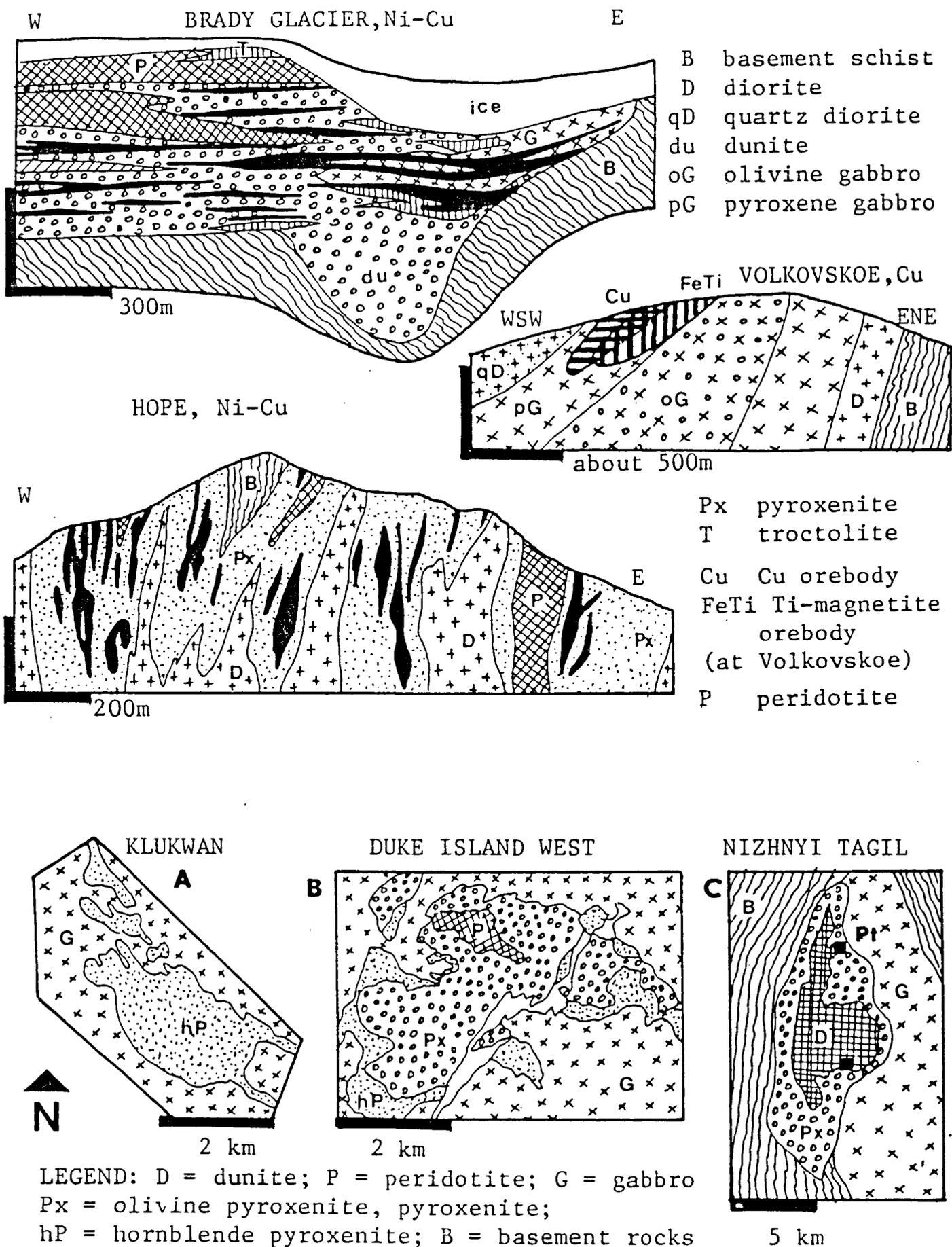


Fig. 49 - Cartes et coupes simplifiées de quelques gisements de type alaskéen : en Alaska : Duke Island West, Brady Glacier, Hope et Klukwan ; en Oural : Volkovskoe et Nizhnyi Tagil (d'après Laznicka P., 1985).

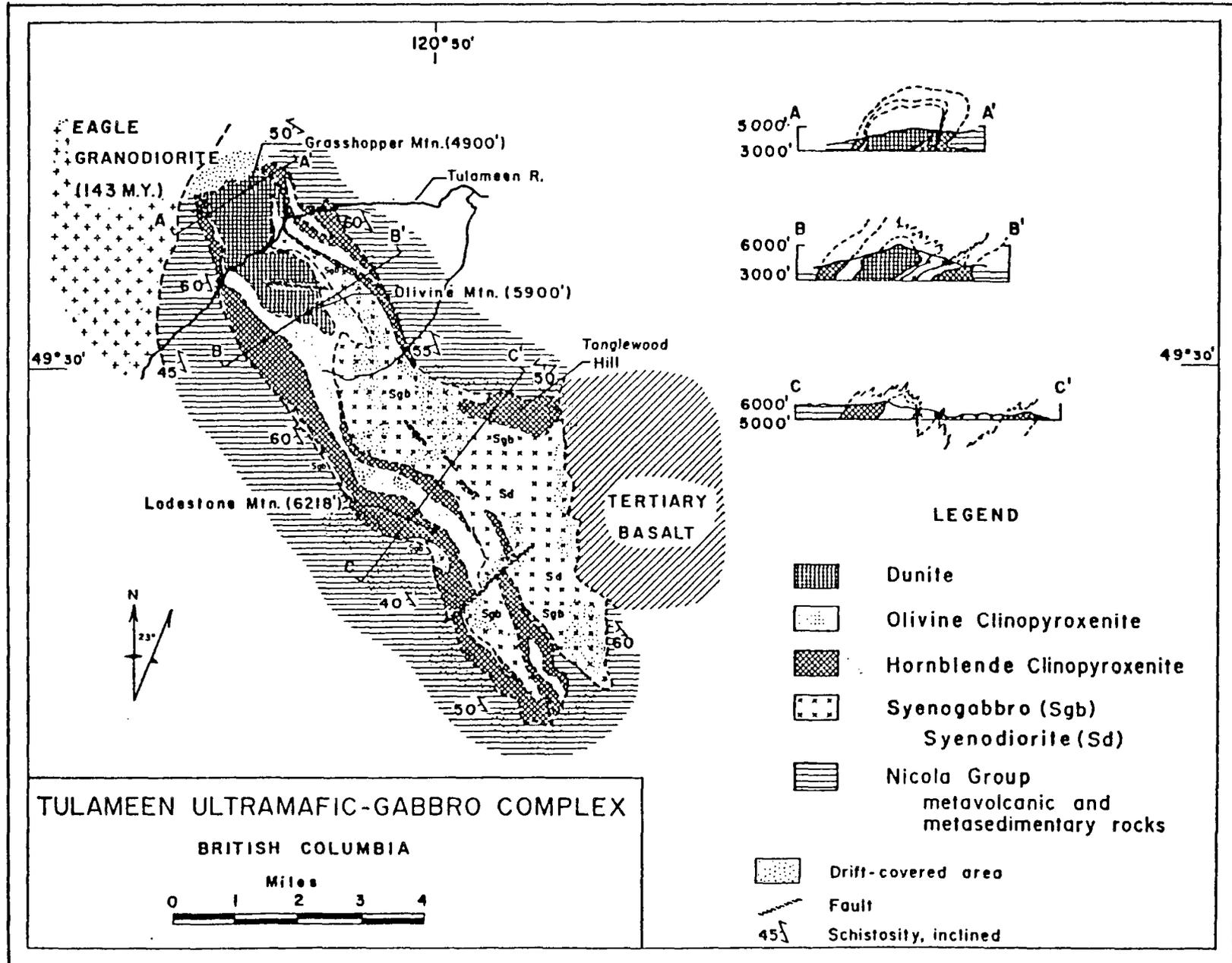


Fig. 50 - Géologie simplifiée du complexe de Tulaméen en Colombie Britannique, (d'après Findlay D.C., 1969)

En URSS, dans la partie centrale de l'Oural (fig. 51), quelque 20 complexes zonés associant successivement dunites, péridotites et plusieurs ensembles de gabbros forment un linéament subméridien sur environ 600 km.

Dans ces complexes, la potentialité métallifère est marquée par de nombreuses minéralisations qui peuvent être :

- chromite : dans les dunites et péridotites ;
- platine : enrichi dans certains horizons de dunite et péridotite ;
- magnétite à Ti + V dans les pyroxénites ;
- sulfures Ni-Cu en concentrations disparates au contact de "formations hybrides" ;
- sulfures Cu avec Pd dans de nombreuses formations de distribution ubiquiste.

En ce qui concerne les PGE, deux types de gisements ont été reconnus par les auteurs russes :

- type Tagil où les minerais de PGE (Pt, platinoïdes et alliages avec Fe et alliages Os-Ir) sont finement disséminés dans les dunites, principalement dans les zones à chrome à texture pegmatitique identique à celles du Bushveld et dans les pipes profonds ;
- type Kachkanaer associé aux massifs où les pyroxénites prédominent. Les PGE se présentent en alliages Pt-Pd disséminés dans les pyroxénites et werhlites ou en sulfures de Pt-Pd dans les pyroxénites à diallage et les pyroxénites riches en magnétite.

En Alaska et en Colombie britannique, on dénombre de nombreux complexes alaskéens dont quelques-uns ont donné des placers ayant fait l'objet d'une intense exploitation. Aucune minéralisation primaire économique n'a été reconnue à ce jour.

Comme exemple, nous prendrons le complexe de Tulameen en Colombie Britannique (fig. 44) dont les études sont les plus récentes.

Le complexe de Tulameen (Canada)

Situé à 200 km à l'Est de Vancouver (Colombie britannique) dans la partie est de la "Coast and Cascade belt", le complexe de Tulameen couvre une superficie de quelque 60 km² (fig. 50). Son âge est du Trias supérieur ; il recoupe les formations volcaniques et sédimentaires du Trias moyen (Nicola group) et il est recouvert par les ultimes dépôts du Trias terminal (Princeton group).

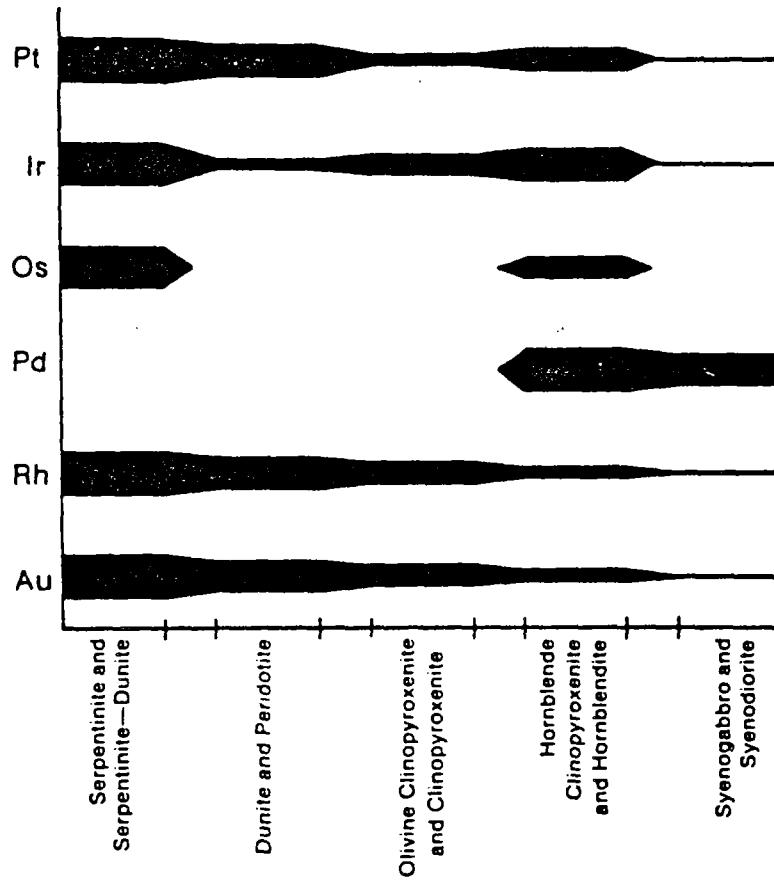


Fig. 51 - Relative abundances of the noble metals in the Tula-meen Complex according to lithology. Chromite-rich samples have been excluded. (d'après St Louis R.M., Nesbitt B.E. and Morton R.D., 1985)

Par sa présentation sous forme de complexe annulaire et sa composition marquée par l'absence d'orthopyroxènes et de plagioclases dans les termes ultramafiques et par une composition de l'olivine proche du pôle forstérite, le complexe de Tulameen se rapproche très nettement du type alaskéen.

Il est constitué de deux ensembles distincts dont les caractères semblent indiquer une même origine magmatique :

- un premier ensemble ultramafique à tendance tholéitique composé de dunites, pyroxénites à clinopyroxènes et olivine, pyroxénites à olivine ;
- un second ensemble gabbroïque avec gabbros à olivine, norites et diorites, forme une suite potassique sous-saturée en silice de tendance alcaline ;

Les principales formations ultramafiques différenciées se présentent en zones concentriques autour d'un noyau central de dunites ; les termes felsiques forment les auréoles externes du complexe.

Les sulfures sont uniformément répartis dans toutes les roches du complexe. Ce sont :

- pentlandite et violarite en interstices des nodules et schlieren de chromite développés dans les zones serpentinisées ;
- chalcopryrite, pyrrhotite et pyrite en concentrations plus importantes dans les pyroxénites à hornblende, les roches felsiques et surtout les dykes d'amphibolites.

Les PGE sont principalement associés aux roches à chromite. Ils se présentent :

- en inclusions dans les grains de chromite ; les minéraux de PGE en particulier sperrylite et irarsite et d'autres plus ou moins complexes avec As, Sb et Fe et des alliages Fe-Pt ont été identifiés ;
- en plages automorphes à subautomorphes (sperrylite, irarsite) dans les interstices des grains de chromite.

Dans les dunites, les pyroxénites à hornblende et les dykes d'amphibolites, des teneurs en PGE ont été mises en évidence : Pd est prédominant. Les meilleures teneurs se situent dans les dunites (fig. 51).

Dans le complexe de Tulameen, les concentrations en PGE sont faibles, inférieures le plus souvent à 1000 ppb. Quelques échantillons isolés ont donné des teneurs allant jusqu'à 7,35 g/t. Les zones les plus prometteuses sont les ségrégations de chromite massive et les schlieren.

Signalons aussi que les zones serpentinisées montrent un enrichissement significatif en PGE soulignant ainsi la faculté de remobilisation des PGE. Cette observation souligne la potentialité de minéralisations hydrothermales remobilisées.

Rappelons que les placers voisins, alimentés par le complexe de Tulameen, ont été très exploités pour le platine ce qui dénote très nettement cette potentialité métallifère des complexes alaskéens.

9.3. LES COMPLEXES ALASKEENS : SOURCE DE MINÉRALISATIONS À PGE

A travers le monde, les complexes alaskéens sont actuellement très prospectés pour les PGE. Relativement fréquents dans les zones d'intervention du BRGM, ils constituent selon Z. Johan (1986) des cibles de recherche de première importance pour des minéralisations à PGE.

Tant au point de vue géochimique que métallogénique, ils ne sont pas connus. La distribution et le mode d'expression des minéralisations ne sont pas encore définis.

Les seules minéralisations à PGE connues qui leur sont associées sont des placers dans lesquels on remarque la présence systématique d'or, et la prépondérance des alliages de Pt sur les autres phases minérales. Ces alliages sont fortement magnétiques et peuvent donc être séparés pour une rapide identification.

La sélection des zones favorables dans le ou les complexes retenus devra être effectuée après une première étude régionale incluant les données géologiques disponibles, les résultats de géophysique et de télédétection.

On focalisera les premiers travaux vers :

- le repérage des faciès (dunites) et des structures favorables bien développées en bordure du complexe au contact avec les roches encaissantes ; ces structures peuvent être des conduits aux solutions hydrothermales et être des pièges pour des minéralisations à PGE avec des teneurs intéressantes ;

- l'identification des minéralisations :
 - . chromite en amas massifs ou les schlieren plus ou moins disloqués où les PGE sont en fines inclusions soit dans la chromite ou dans les silicates ; ces faciès donnent, selon les auteurs russes, des teneurs en PGE cent fois plus élevées que celles des niveaux à chromite dissiminée ;
 - . des concentrations d'oxydes ferro-titanés souvent présentes dans les wehrlites, pyroxénites et autres gabbros à clinopyroxènes ;
- l'étude des zones serpentinisées riches en sulfures pouvant contenir des PGE à des teneurs élevées.

A l'état actuel de nos connaissances, il est difficile de proposer une stratégie de prospection pour ce type de minéralisations.

Les études en cours mettent en évidence la disposition annulaire assez systématique avec des dunites au centre et en bordure des pyroxénites et des gabbros à amphiboles et phlogopite.

La présence de faciès à phlogopite peut être assimilée à des phénomènes de remobilisations hydrothermales.

Les travaux en cours au GIS ont pour but :

- de caractériser les complexes alaskéens tant du point de vue pétrographique que géochimique afin de se doter d'outils d'identification rapide sur le terrain ;
- de préciser la distribution des PGE dans la suite ultramafique à mafique des complexes ;
- d'approfondir les données concernant les PGM et les minéraux satellites (spinelles et minéraux accessoires) pouvant être aisément reconnus dans les premières phases de la prospection.

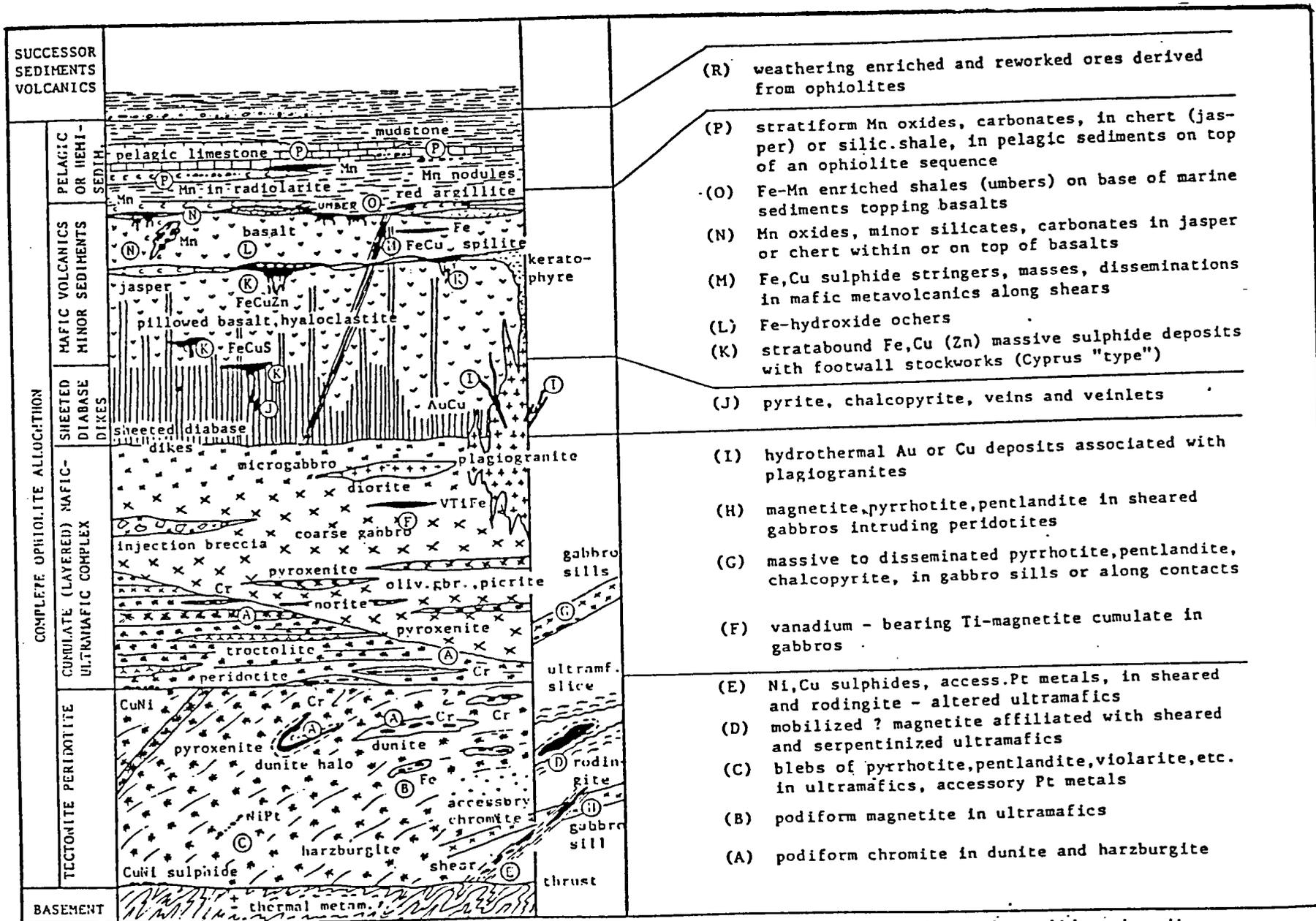


Fig. 52 - Succession lithostratigraphique simplifiée d'une série ophiolitique type et position des diverses minéralisations associées (d'après Laznicka P., 1985)

10 - LES COMPLEXES OPHIOLITIQUES

10.1. - PLACE DES MINERALISATIONS A PGE DANS LA SUITE OPHIOLITIQUE

Dans la typologie générale donnée par G. Pouit (1984) des minéralisations associées aux complexes ophiolitiques, on peut schématiquement distinguer deux types principaux de concentrations de PGE (fig. 52) :

- dans le premier cas, les PGE, sous forme de sulfures, sulfoarséniures, tellures et alliages complexes sont associés à des minéralisations à Cu-Ni-Co formées de pyrrhotite, pyrite, pentlandite, violarite ; ils se présentent en :
 - . filonnets dans la partie sommitale de la séquence gabbroïque au sommet du complexe ultramafique ;
 - . mouchetures disséminées dans les formations péridotiques cumulatives de la section ultramafique ;
 - . placage dans les zones de cisaillement affectant la "tectonite péridotite" (rodingite) et la section ultramafique supérieure ;
- dans le deuxième cas, les PGE sous forme de sulfures, de sulfoarséniures et surtout d'alliages sont associés aux minéralisations chromifères ; les principaux minéraux (PGM) montrent un habitus différent et sont souvent :
 - . en auréole massive, en grains finement disséminés avec magnétite et chromite autour des pods de chromite présents sur l'ensemble de la section ultramafique à mafique ;
 - . en fragments anguleux dans les pods de chromite.

10.2. - LES PGE ASSOCIES AUX MINERALISATIONS CHROMIFERES

La recherche en sujet amont de concentrations de PGE, associées aux minéralisations chromifères des complexes ophiolitiques, a été très intense ces dernières années. Parmi les ensembles ophiolitiques inventoriés, nous pouvons citer :

- en Grèce, les complexes de Vourimos et d'Othris (gisement de Tsangli).
- en Oman, le complexe de Samail ;
- en Orégon (USA), les complexes de Joséphine Péridotite et d'Onion Mountain ;
- en Nouvelle-Calédonie dans les massifs du Sud et dans le massif de Trebaghi.

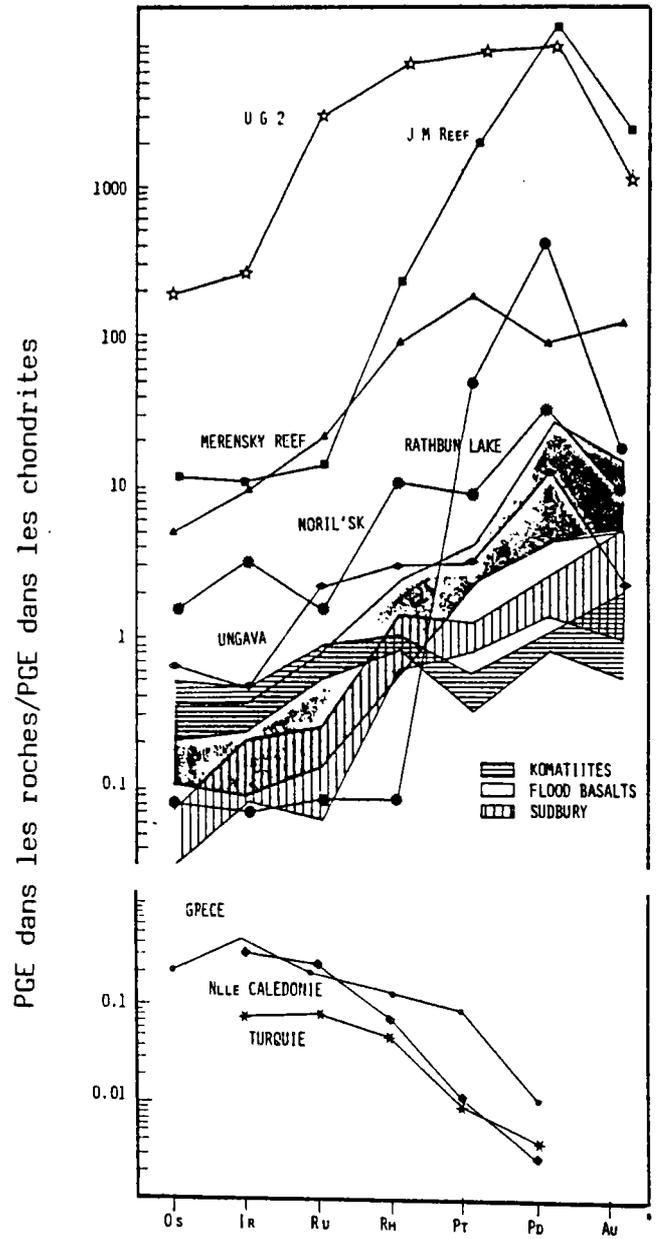


Fig. 53 - Teneurs en PGE des principaux gisements normalisés par rapport à celles des chondrites

De l'étude bibliographique et en particulier des travaux du GIS, nous retiendrons que les concentrations à PGE peuvent être associées à deux types de minéralisations chromifères :

- dans les chromitites associées aux harzburgites,
- dans la chromite disséminée dans les dunites localisées dans la séquence mantellique au sein des harzburgites.

Dans les deux cas, les minéralisations à PGE montrent des caractères sensiblement analogues :

- ils forment des sulfures, de Ru, Ir et Os ou des alliages Os-Ir-Ru (ruthéniridosmine), les plus communs forment des solutions solides laurite-erlichmanite ;
- la taille des minéraux à PGE est très petite, généralement inférieure à 10 μ ; ces minéraux se présentent généralement en inclusions dans la chromite (massive ou disséminée) et dans les silicates ou dans les interstices autour des grains de chromite ;
- les teneurs sont faibles généralement pour chaque élément ($<$ à 100 ppb) ; les éléments les plus prépondérants sont Os, Ru et Ir par rapport à Pd et Pt et en ajoutant Rh, les teneurs des PGE peuvent être localement identiques à celles des niveaux économiques des complexes stratiformes du Bushveld ou du Stillwater (fig. 53) ;
- l'abondance des trois éléments Os, Ir et Ru indique une formation rapide des sulfures de PGE dans un intervalle de température très restreint se situant entre 1050 et 900°C (fig. 54).

10.3. - LES PGE ASSOCIES AUX MINERALISATIONS SULFUREES

Les minéralisations sulfurées à PGE, développées dans les parties basales des complexes ophiolitiques, sont relativement peu développées. On les signale dans les gisements de Trebaghi en Nouvelle-Calédonie, dans ceux de Vourinos en Grèce et du Troodos à Chypre.

La minéralisation est finement disséminée ou en veines.

Les premiers sulfures de métaux de base à se former se présentent en inclusions (10 μ) dans la chromite massive. Ils sont d'abord enrichis en Rh et éventuellement en Pt et Pd, et apparaissent à des températures plus faibles entre 750 et 700°C

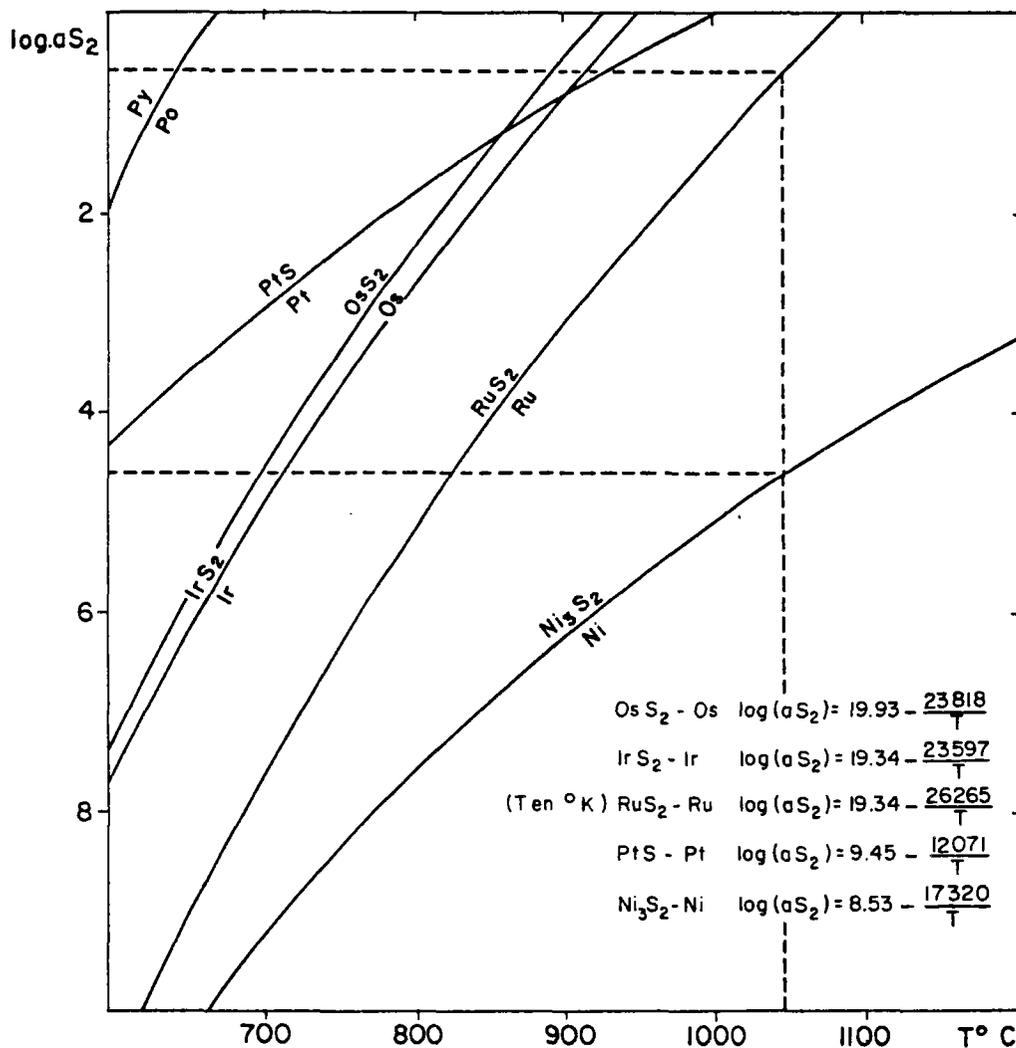


Fig. 54 - Courbes de sulfuration des PGE en fonction de la température et de l'activité du soufre.
 Par comparaison, les courbes de Ni₃S₂, (heazlewoodite) et de l'équilibre pyrite (Py)-pyrrhotite (Po) sont indiquées.
 La température des chromitites ophiolitiques est estimée à 1050°C (d'après Johan Z., 1986)

(fig. 54), sous forme de solutions solides à partir de la pentlandite, pour donner des sulfo-arséniures complexes.

A cette température, les sulfures de Pt et de Pd peuvent aussi se former directement. Les principaux sulfures identifiés sont troilite, vallériite, manchérite, chalcopyrite et pentlandite avec comme accessoires, molybdénite, sphalérite, gersdorffite, cobaltite, chromite, magnétite, ilménite, graphite, or...

Les teneurs en PGE sont faibles, le plus souvent inférieures à 50 ppb pour chacun des éléments Pt, Pd et Rh.

Dans le gisement d'Akoye aux Philippines et dans les anciens gisements du complexe ophiolitique calédonien de l'île d'Unst (Iles Shetland) en Ecosse, des teneurs économiques en PGE (plusieurs ppm, jusqu'à 15 ppm) ont été mises en évidence. Dans ce dernier, les chromites, jadis exploitées dans les harzburgites, présentent deux types de minéralisation à PGE qui peuvent relancer l'intérêt des complexes ophiolitiques pour les PGE :

- dans le premier cas (Harold's Grave), la minéralisation comprend la laurite (Ru Sr) accompagnée d'alliages d'osmium, d'iridium et de rhodium ;
- dans le second cas (Cliff), la minéralisation est très variée avec sperrylite ($PtAs_2$), stibiopalladinite (Pd_7Sb_2), potérite (PdHg) et d'autres sulfo-arséniures, d'autres PGE, accompagnés de cuivre et or (plusieurs ppm) natifs et de sulfures et arséniures de Ni et Cu. Les alliages et sulfures semblent précoces et associés ou inclus dans la chromite ; les arséniures et antimoniures sont tardifs et intersticiels aux grains de chromite. Cette dernière minéralisation est tout à fait inhabituelle dans les chromites ophiolitiques ; elle contient Pt et Pd à des teneurs importantes de 10 à 15 g/t. Sa découverte ouvre de nouvelles perspectives pour des minéralisations primaires importantes associées aux complexes ophiolitiques.

Aux Iles Shetland, les deux types de minéralisation à PGE sont réunis dans un même ensemble ophiolitique.

Le contenu en PGE, lié aux amas de chromite, est enrichi en Os, Ir et Ru mais il est fortement déprimé en Pt et Pd. Pour les minéralisations sulfurées, la distribution est inverse, les teneurs en Pt et Pd sont élevées mais faibles en Os, Ir et Ru. Comme autres éléments accompagnateurs, on peut citer Ni, Cu, As, Sb et Au. Ces éléments signent très nettement une influence hydrothermale.

10.4. - METHODES D'APPROCHE POUR LA RECHERCHE DE MINERALISATIONS A PGE DANS LES COMPLEXES OPHIOLITIQUES

En raison du niveau des teneurs assez faible mais qui est pour Os, Ir et Au du même ordre ou supérieur à celui mis en évidence au Bushveld, les PGE dans les ophiolites en phase primaire restent un sous-produit assez marginal.

Si l'intérêt des complexes ophiolitiques réside dans les dépôts détritiques comme les placers où les teneurs en PGE sont plus élevées par suite d'enrichissements mécaniques et chimiques, ils peuvent donner des minéralisations primaires à PGE de valeur économique (gisement d'Akoye aux Philippines).

Des études relativement amont sont donc nécessaires pour confirmer la présence de ce type de minéralisation et dégager des cibles d'intérêt minier.

L'examen de la potentialité en PGE dans les complexes ophiolitiques devra s'orienter vers deux formes de minéralisation :

- les amas de chromite,
- les minéralisations sulfurées.

a) Les amas de chromite dans la séquence péridotique. La sélection des zones se fera à partir des données :

- géochimiques (en sols ou en alluvions) marquées par de fortes teneurs en Cr, Ni, Co, Mg ; signalons que dans les alluvions, les minéraux de PGE sont très rares et la plupart des sulfures n'ont pas résisté aux processus d'altération ; de petite taille ($< 10 \mu$) et en inclusions dans la chromite et dans les silicates, les détections visuelles en fond de batée des minéraux de PGE sont pour ainsi dire impossibles ;
- géophysiques mettant en évidence de fortes anomalies magnétiques non corrélées géographiquement avec les zones de serpentinisation pouvant donner des anomalies magnétiques (abondance de fer venant de la déstabilisation des minéraux ferromagnésiens) ;
- pétrographiques précisant une lithologie favorable avec dunites, harzburgites, pyroxénites avec ortho- et clinopyroxènes ;
- cartographiques spécifiant la répartition des principales formations et amas minéralisés, leur disposition (déformation) et la nature des pièges possibles (lentilles stratiformes, zones de cisaillement...).

b) Les minéralisations sulfurées dans la séquence des cumulats ultramafiques. Les secteurs retenus seront sélectionnés à partir des données :

- géochimiques ; on s'intéressera en priorité aux superpositions d'anomalies Ni et Cu indicatrices de sulfures, souvent platinifères mais il faudra aussi rechercher des superpositions multi-élémentaires à Ni-Cu-Cr-As-Sb-Au dans des zones réputées chromifères ;
- géophysiques ;
- lithostratigraphiques permettant de situer les dernières masses de dunites au-dessus de la séquence péridotique basale ;
- pétrographiques en vue de repérer :
 - . dans la zone des cumulats, à olivine et pyroxène, d'éventuelles concentrations de sulfures d'origine magmatique (gouttelettes de sulfures immiscibles) ;
 - . dans les zones altérées (serpentine, chlorite, carbonates, silice...), des restes de lentilles pénéconcordantes par rapport au litage de sulfures primaires, massifs ou plus ou moins disséminés, des amas disloqués, des veines, filonnets, shear-zones... pouvant être des remobilisations hydrothermales subséquentes.

10.5. - CONCLUSIONS

L'exploitation de la chromite des complexes ophiolitiques est faite pour son utilisation comme produit réfractaire ; la récupération des PGE contenus dans le minerai est impossible compte tenu des prix de revient trop élevés. Si la destination de ce minerai s'oriente vers l'industrie chimique, la récupération des PGE pourrait être envisagée et s'intégrer sans difficulté dans le cycle de traitement.

Dans les amas de chromites, les PGE que l'on peut escompter récupérer sont surtout Os, Ir, Ru et Rh, avec une teneur globale analogue à celle des niveaux riches des complexes stratifiés (UG2 du Bushveld).

Dans les minéralisations sulfurées à Ni-Cu des complexes ophiolitiques, les PGE intéressants sont surtout Pt et Pd avec Au. Les teneurs peuvent être parfois importantes (10 à 15 g/t).

En conclusion, des études plus détaillées sont donc nécessaires pour suivre le comportement géochimique des PGE au sein des complexes ophiolitiques. Les travaux en cours au GIS sur ce thème seraient d'une grande utilité pour orienter le choix des cibles de recherche minière dans d'autres districts.

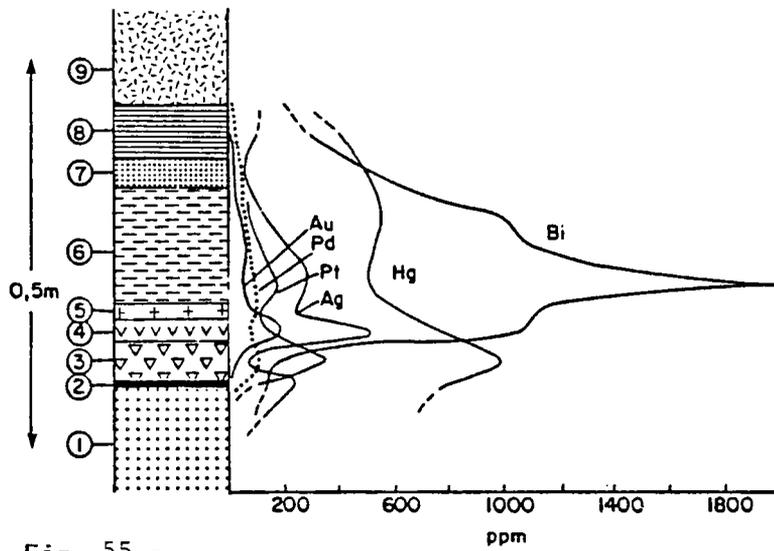


Fig. 55 -

Cross section of the noble metal-bearing area. 1 = white sandstone; 2 = shale beneath boundary dolomite; 3 = boundary dolomite; 4 = noble metal-bearing shale; 5 = thucholite shale; 6 = pitchy shale; 7 = clay shale with digenite; 8 = dolomitic shale; 9 = dolomite. (d'après Kucha H., 1982)

11 - AUTRES GISEMENTS POSSIBLES DE PGE : LES KUPFERSCHIEFER

Dans les gisements Kupferschiefer de Pologne, des districts de Lubin et de Polkowice, des quantités appréciables de PGE, en particulier Pd et Pt, sont récupérées.

Le niveau Kupferschiefer atteint une puissance maximale d'environ 2,85 m et se compose d'une succession de niveaux centimétriques à métriques de grès, de shales riches en matière organique, de shales dolomitiques et de dolomies argileuses.

Les PGE (Pt et Pd) sont répartis dans quatre formations principales (fig. 55).

a) Les shales cuprifères (Pitchy shale). Très minéralisés en Co, Ni, Ag, Mo, Au, ce niveau de 0 à 20 cm de puissance constitue la base du Kupferschiefer. Les éléments Pd et Pt se situent entre 10 et 20 ppm et Au entre 10 et 30 ppm. Ils sont surtout associés à la matière organique.

b) Les shales à lentilles de phosphate. Surtout présents dans le district de Polkowice, les shales sont localement riches en lentilles de phosphate ferrifère (Fe CaPO_4). Ces lentilles sont minéralisées en chalcopyrite (variété mooihokite, haycockite) et clausthalite (Pb Se) et de Pd et Pt en inclusions ou en association avec Au et Ag. Les teneurs en Pd et Pt sont de l'ordre de 30 ppm, celles en Au de 50 ppm.

c) Les calcaires organiques. De très bonnes teneurs en Pt (700 ppm), Pd (400 ppm) mais aussi en Au (1100 ppm) et Se (1000 ppm) ont été identifiées dans les particules de kérogène des passées de calcaires organiques du shale minéralisé (fig. 55).

Les teneurs moyennes de ces passées sont de l'ordre de 30 ppm Pt, 60 ppm Pd et 110 ppm Au. Elles sont les plus élevées du niveau Kupferschiefer en général. Le palladium se présente à l'état natif ou sous forme de sabolevskite tandis que le platine est directement associé à l'or.

Dans les shales minéralisés à Pb, Ag, Hg et Cu situés en bordure des horizons cuprifères (problème de zonalité Cu-Pb-Zn), le Pt est absent. Les concentrations en Pd sont de 20 ppm et en Au de 5 à 60 ppm ; elles se localisent à la base des niveaux minéralisés.

d) **Les shales à métaux nobles.** Sur quelque 10 cm de puissance, de très fortes concentrations en PGE et éléments associés ont été identifiées dans cette formation, en relation avec la présence de matière organique (tucholite). Cet horizon se caractérise d'autre part, par de faibles teneurs en cuivre, des traces de carbonates, un faible contenu en matière organique et l'absence de sulfures organiques. Il contient quelques lentilles de phosphates carbonatés et des borates magnésiens.

Les teneurs s'échelonnent respectivement jusqu'à 3000 ppm pour l'or, de 10 à 370 ppm pour Pt, 10 à 120 ppm pour Pd, 100 à 2000 ppm pour Bi, 200 à 1500 ppm pour Hg, 10 à 5780 ppm pour Ag, 260 à 4800 ppm pour Mo, 10 à 5200 ppm pour V, 40 à 4000 ppm pour Ni et 60 à 17500 ppm pour Co.

La minéralogie est assez complexe ; citons covellite, digénite avec une phase Pd-As-electrum, castaingite, Cu, Mo, S₃, MoS₂, wittichénite, rammelsbergite, safflorite, cobaltite, gersdorsffite, smaltite, chloantite.

Conclusions

Ces données sont générales, on ne connaît pas leur répartition à l'échelle du gisement. Le tonnage de PGE récupéré reste très faible ; ce type de gisement pour les platinoïdes est très marginal.

CONCLUSIONS GENERALES

PRINCIPAUX RESULTATS DE CETTE ETUDE DOCUMENTAIRE

Dans la nature, les six éléments du groupe du platine sont peu abondants. Métaux rares, lourds, de prix élevés, ils sont très recherchés par l'industrie en raison de leurs propriétés particulières : points de fusion et d'ébullition élevés, inaltérabilité aux acides, bonne conductibilité thermique, électrique et pouvoir catalytique élevé même à très haute température.

Ils ont un comportement géochimique analogue à celui des éléments métalliques avec lesquels ils présentent le plus d'affinité (Fe, Co, Ni, Cr, Cu), pour former des sulfures ou sulfosels complexes. Ils se présentent aussi à l'état natif ou sous forme d'alliage.

Associés aux roches mafiques-ultramafiques, les minéraux des PGE ne cristallisent pas tous en même temps à partir du magma. Leur apparition s'échelonne sur un intervalle de température assez long. Les sulfures d'osmium et d'iridium sont les premiers à se former vers 1050-1100°C, ceux du platine et du palladium n'apparaissant que vers 700 à 800°C. Les paragenèses sont nombreuses ; elles conduisent à distinguer deux types de minéralisation.

Dans les complexes stratifiés ultramafiques à mafiques, ces deux types de concentration sont présents à des niveaux différents dans la colonne lithostratigraphique.

La première minéralisation apparaît au sommet de la zone ultramafique dans les dunites. Elle est associée à l'un des derniers niveaux de chromite. Elle comprend des sulfures d'Os, Ir et Ru qui se forment avant la chromite ; les autres éléments Pt, Pd et Rh sont englobés en solution solide ou en fines inclusions dans les autres minéraux (chromites, sulfures et/ou silicates). L'origine de la minéralisation est liée aux phénomènes de ségrégation magmatique.

La seconde minéralisation à PGE plus tardive se place dans les premiers horizons de gabbros-norites. Elle est associée à une paragenèse sulfurée à métaux de base Ni-Cu (pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite). Sa composition, où prédominent les sulfures, sulfosels et alliages de Pt et Pd avec Os, Ir et Rh en moindre abondance que dans le cas précédent, est très complexe.

De même origine que la précédente minéralisation, elle montre des évidences de remobilisations hydrothermales.

Cette observation et les études des inclusions fluides de certains minéraux indiquent très clairement que les PGE sont solubles en solution. De ce fait, ils peuvent être transportés par les fluides hydrothermaux et donner alors des concentrations en dehors de leur site initial de dépôt.

Dans certains gisements à PGE, où les processus hydrothermaux ont été très intenses, la minéralisation résulte de remobilisations à partir de préconcentrations à faible teneur.

Selon le cadre géodynamique de mise en place, nous avons distingué deux types d'ensembles ultramafiques à mafiques minéralisés.

Les ensembles en zone stable renfermant les minéralisations primaires économiques

- **Au Bushveld**, les deux minéralisations à PGE sont bien représentées par les niveaux de l'UG2 et du Merensky Reef :

. L'UG2 est le premier niveau à PGE associé au dernier niveau de chromite à la base de la zone critique. Sa puissance varie de 0,5 à 2,5 m et les teneurs de 3,0 g/t à 10,0 g/t sont à Pt, Pd, Rh, Ru, Ir et Os. Les réserves sont considérables et estimées à plus de 5,5 milliards de tonnes.

. Le Merensky Reef au sommet de la zone critique (20 à 300 m au-dessus de l'UG2) montre une puissance de 0,8 à 1,10 m. Les teneurs de 5,0 g/t à 10,1 g/t sont à Pt, Pd, Rh et Ru. Les réserves sont de l'ordre de 3,3 milliards de tonnes.

- **Au Stillwater**, seule la minéralisation sulfurée à Pt et Pd dominants du J.M. Reef présente un intérêt économique. C'est un niveau continu de 2 m de puissance qui s'étend sur l'ensemble du complexe (50 km). De composition variable (norite, troctolite), il montre un contenu en sulfures de Ni-Cu de 2 à 3 % et des teneurs en Pt et Pd de 10 à 25 g/t (32 g/t maximum) avec un rapport Pt/Pd de 1/3,5.

L'exploitation (Joint Venture entre Lac Minerals, Chevron Resources et Manville Corporation) prévue pour la fin de 1987 au rythme de 4500 t/jour de minerai doit donner une production annuelle de 750 kg de platine et 2,250 t de palladium. Les réserves totales sont estimées à 7000 t de Pt.

Comme dans le Bushveld pour l'UG2, l'un des niveaux de chromite en dessous du J.M. Reef accuse également de faibles teneurs en PGE.

Les ensembles en zones instables

Ces ensembles renferment des gisements primaires nouveaux liés à des phases de remobilisations hydrothermales de niveaux préconcentrés.

Dans les greenstone belts

- **Les sills ultramafiques différenciés.** Les éléments, surtout Pt et Pd, sont des co-produits du Ni et Cu. Les minéralisations sulfurées occupent des dépressions à la base des sills ultramafiques différenciés très altérés dont la mise en place est contemporaine des volcanites.

Des remobilisations hydrothermales locales (veines à carbonates et sulfures Cu-Ni et PGE) montrent des enrichissements en Pt et Pd.

- **Les complexes annulaires.** Les minéralisations sont à PGE dominants, surtout Pt et Pd, et sont rassemblées dans la zone de contact bréchifiée et hydrothermalisée du complexe avec les formations encaissantes.

Reconnu au Canada dans le complexe du Lac des Îles, ce type de minéralisation provient de remobilisations hydrothermales d'une préconcentration très dispersée dans les roches ultramafiques du complexe.

Plus faible en volume (40 à 50 Mt) que les gisements des complexes stratiformes du Bushveld ou du Stillwater, ce type de gisement donne des teneurs moyennes, de l'ordre de 10 à 15 g/t de Pd et 3 à 4 g/t de Pt avec 1 à 3 g/t d'or.

La découverte de ce nouveau type de concentrations suscite un intérêt croissant pour les très nombreux complexes annulaires associés aux greenstone belts archéennes ou protérozoïques. Ainsi, au Canada et en Australie, les complexes annulaires font l'objet d'intenses travaux de prospection.

- **Les intrusions de péridotites-dunites.** La minéralisation à PGE seuls, résulte là-aussi de phénomènes de remobilisations hydrothermales. Les pièges peuvent être de type shear-zone ou dykes.

. Au Lac Sheen (Québec), le métallotecte principal est constitué d'un dyke d'amphibolites hydrothermalisées recoupant une intrusion de péridotite très tectonisée par le front du Grenville situé plus au Sud. La minéralisation donne des teneurs de 5 à 7 g/t de Pt et Pd.

- Dans le gisement de New Rambler (USA), le métallotecte est une shear-zone développée au contact de gneiss et d'un ensemble de gabros et diorites (complexe stratiforme ?). Les éléments Pt et surtout Pd (4 à 74 g/t) sont liés à une minéralisation cuprifère. L'origine de ce gisement est hydrothermale en liaison avec le développement d'un accident majeur.

Dans les complexes ophiolitiques

Deux types de concentrations sont observés, mais les teneurs sont en général très faibles ; celle associée aux chromitites montre la prépondérance d'Os, Ir et Ru sur Pt, Pd et Rh, et donne des teneurs inférieures à 100 ppb.

Une autre, de nature sulfurée, montre des teneurs plus élevées en PGE et Au. Ainsi, les découvertes récentes aux îles Shetland (âge calédonien) et aux Philippines (gisement d'Akoje d'âge tertiaire) ouvrent de nouvelles perspectives pour ce type de minéralisations PGE primaires ; cependant, dans l'état actuel des connaissances, il ne peut être retenu comme prioritaire.

Les ensembles en domaine intracratonique

Associés aux Plateaux Basaltes, les sills ultramafiques différenciés, donnent des teneurs en PGE, principalement le palladium, co-produits de minéralisations sulfurées à Ni-Cu.

Bien représenté à Noril'sk (URSS), ce type de gisements se présente en amas massifs, en minéralisations disséminées ou en stockwerks à la base des sills hydrothermalisés.

La minéralisation d'origine magmatique se localise dans la partie inférieure des sills, souvent dans de petites dépressions. Son mode de dépôt est gravitaire et localement il est relayé par des remobilisations hydrothermales qui donnent les veines et filonnets sécants.

Les ensembles des ceintures orogéniques du Paléozoïque au Mésozoïque

Des indices à PGE sont décrits dans les complexes alaskéens, mais, malheureusement, aucune concentration économique n'a été reconnue à ce jour.

Cependant, la potentialité métallifère ne peut être repérée à priori, si l'on se réfère aux nombreux et importants placers alimentés par ces complexes.

QUELQUES RECOMMANDATIONS

En raison de l'importance des données géologiques (minéralogiques, pétrographiques et pétrologiques) et minières acquises ces dernières années, la recherche de gisements à PGE dominants devra être guidée par une approche typologique en vue de résoudre les quatre principaux problèmes posés :

- les types de gisements à rechercher en priorité,
- les guides de prospection spécifiques à employer,
- les zones les plus favorables à sélectionner,
- les méthodes à mettre en oeuvre.

Compte tenu du niveau d'expérience du BRGM en matière de prospection des PGE, on se bornera à donner quelques orientations très générales :

Types de gisements à rechercher

La recherche de gisements à PGE doit s'orienter de préférence vers deux types de cibles :

- les cibles stratiformes, surtout d'origine magmatique qui donnent des gisements à fort tonnage avec des teneurs moyennes comprises entre 5 et 8 g/t de PGE ; elles comportent deux types de minéralisation, l'une associée aux chromites, l'autre sulfurée, séparée par un intervalle plurimétrique stérile ;
- les cibles d'origine hydrothermale structurées sur des accidents majeurs (shear-zones), au sein ou en périphérie d'appareils intrusifs situés dans les greenstone belts (archéennes à protérozoïques). Ce sont particulièrement :
 - . les zones cisailées (shear-zone), les zones de brèches très altérées par suite de circulations hydrothermales développées au contact d'intrusions avec les roches encaissantes (série volcanique à volcano-sédimentaire ou intrusion antérieure). Ces intrusions de tendance tholéitique avec un enracinement profond peuvent être des complexes annulaires, des corps dunitiques, des massifs de gabbros...
 - . les dykes et/ou filons hydrothermalisés recoupant des intrusions ultramafiques rétomorphosées et très déformées.

- . les couloirs de cisaillement (shear-zone) de très grande puissance (jusqu'à 1500 m), recoupant ou limitant à leur bordure les complexes ultramafiques à mafiques. La minéralisation surtout à PGE soluble (Pt et Pd avec Rh) avec métaux de base (Ni-Cu) et Au se concentre en remplissage de fractures de tension. Elle forme des colonnes bien développées au point d'intersection des accidents transverses.

Les cibles hydrothermales correspondent à des gisements plus petits (30 à 50 Mt), les teneurs y sont par contre plus élevées (10 à 15 g/t et plus de PGE, principalement Pd et Pt).

Principaux guides de recherche

Ils diffèrent suivant le type de gisement prospecté.

a) Les gisements des complexes stratiformes

Les minéralisations sont entièrement intégrées dans le cycle d'évolution magmatique ; les guides de recherche seront surtout d'ordre pétrologique et pétrographique.

L'objectif essentiel est la reconnaissance de la zone critique : zone de transition qui s'intercale entre la base du complexe, formée de cumulats à olivine et orthopyroxène, et la partie sommitale constituée de gabbros-norites et anorthosites.

Au sein de la zone critique, le repérage des niveaux chromifères et sulfurés à PGE fait surtout appel aux techniques de prospection minéralogique et géochimique.

b) Les gisements associés à des phénomènes hydrothermaux

Pour ce type de gisement, les renseignements concernant les guides de prospection sont très fragmentaires. Ils dépendent du site de dépôt (zone de contact, couloir de cisaillement, shear-zone) mais surtout de l'importance des phénomènes hydrothermaux.

Sous l'action des déformations tectoniques en liaison avec le métamorphisme, les phénomènes hydrothermaux ont altéré les roches ultramafiques et mafiques (carbonatation, silicification avec sulfures). L'altération progressive depuis la roche encaissante vers le coeur des zones déformées et minéralisées donne des faciès du type listvénite.

Le tableau ci-dessous illustre les principales étapes de l'altération et donne les plus importants minéraux diagnostiques.

**Tableau 23 - Suite des associations minéralogiques
depuis la roche fraîche de départ jusqu'aux roches les plus transformées
lors des processus d'altération hydrothermale**

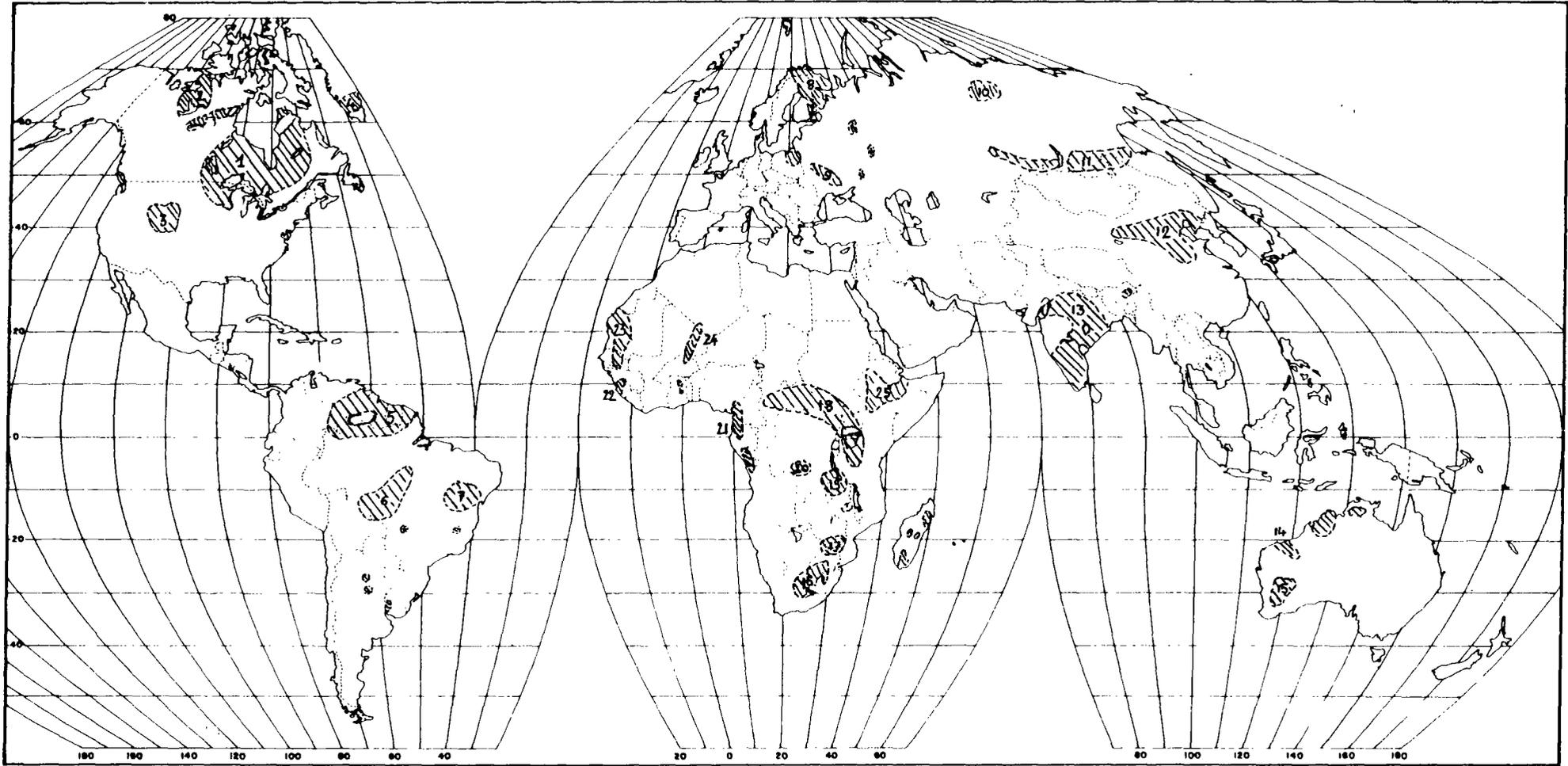
Roche de départ	Ultramafique	Mafique	Felsique
Shear-zone	MgO > CaO Serpentine	Chlorite	Chlorite
	Serpentine Carbonates	Chlorite Carbonates	Carbonates Chlorite et Silice
	CaO < MgO Listvénite	Listvénite	
Coeur	Quartz et Sulfures	Quartz et Sulfures	Quartz et Sulfures

Dans les listvénites des séquences ultramafiques, les principaux minéraux sont des carbonates magnésiens, brucite, serpentine, talc, magnésite et quartz. Dans les séquences mafiques, ce sont surtout des phyllosilicates : chlorite, actinote, mariposite, fuschite avec quartz et carbonates ferrifères. Ces derniers minéraux (quartz et carbonates) forment des filons ou des veines alignés dans la schistosité. Ils peuvent être minéralisés en sulfures (pyrite, chalcopryrite, pentlandite) et or.

Localement, des phénomènes de propylitisation, donnant des assemblages à quartz, séricite et sulfures (pyrite), peuvent se développer au voisinage (éponges) des concentrations sulfurées à PGE.

Un des paramètres permettant d'appréhender l'intensité des phénomènes hydrothermaux est le lessivage des éléments réputés immobiles comme Zr et Ti, lesquels se retrouvent dans des phases néoformées (zircon et rutile). Ces éléments complètent la liste des éléments diagnostiques.

Fig.56 - Principales provinces archéennes.



- 1-Lac Supérieur, 2- Slave, 3- Wyoming, 4- Atlantique Nord, 5-Guyanes, 6- Guaporé, 7- Sao Francisco, 8- Presqu'île de Kola, 9- Ukraine, 10- Anabar, 11- Aldan, 12- Chine, 13- Inde, 14- Pilbara, 15- Yilgarn, 16- Kaapvaal, 17- Zimbabwe, 18- Afrique centrale, 19- Zambie, 20- Kasai, 21- Cameroun, 22- Liberia, 23- Mauritanie, 24- Ouzalién, 25- Ethiopie. (d'après Kent C. CONDIE, 1981)

En zone oxydée de surface, on recherchera les oxydés de cuivre: malachite, anthérite ($\text{Cu}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$), brochantite ($\text{Cu}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_2$), cuprite et chrysocolle. Les teneurs en PGE ont généralement tendance à augmenter : celles en Pt avec un facteur de concentration voisin de 2, celle en Rh avec un facteur proche de 10 ; par contre les teneurs en Pd diminuent très nettement (gisement de New Rambler aux USA).

Zones les plus favorables

Elles se situent à priori dans les provinces archéennes et protérozoïques (fig. 56 et 57).

Les méthodes à mettre en oeuvre

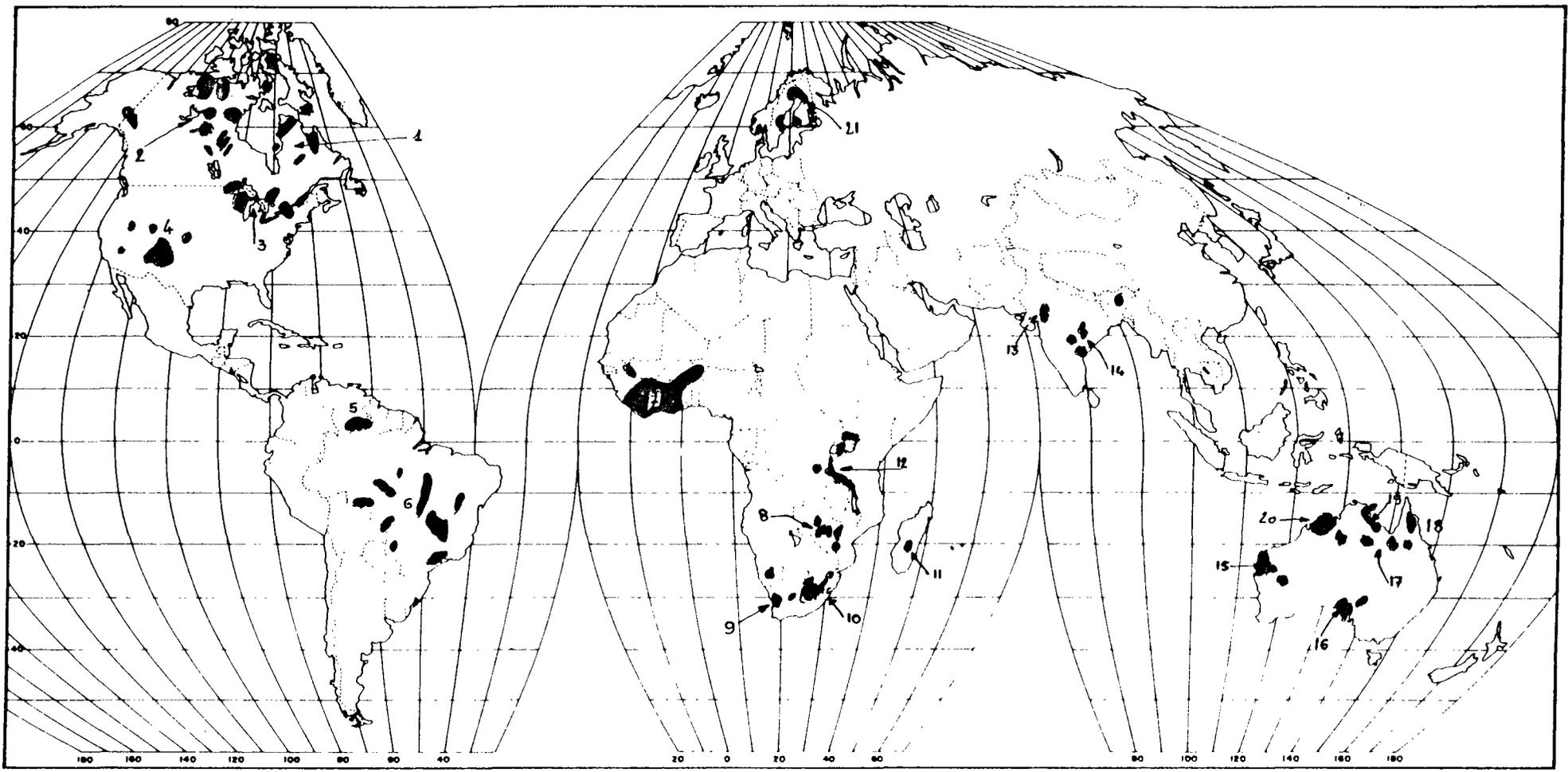
Les premiers travaux auront pour objectif de sélectionner à l'intérieur de ces provinces les secteurs à prospector et de préciser le type de cible possible.

Ils comporteront :

- un réexamen de la documentation devant conduire à une appréciation d'ensemble du cadre géologique (complexe stratiforme dans les zones stables, greenstone belts, complexe ophiolitique, complexe alaskéen dans les zones orogéniques...);
- lorsqu'il s'agira de zones où le BRGM a effectué dans le passé des travaux de prospection générale, réexamen des matériaux conservés (concentrés de batée, sections polies...) dans la perspective d'une recherche d'indices de PGE ;
- des études de télédétection (photographies aériennes, images SPOT) dans le but de préciser le type de complexes, son étendue géographique et sa structuration. On repèrera les éventuels chapeaux de fer, les accidents transverses, les structures en bordure ou en contact avec l'encaissant ;
- l'identification, sur le terrain, des zones et prospects favorables à l'existence de minéralisations à PGE ;

Ces travaux comprendront :

- des compléments de cartographie : la cartographie géologique existante sera complétée par des études détaillées d'affleurements et des études structurales ; des coupes en continu seront effectuées dans les zones à forte densité d'affleurements (entaille naturelle du réseau hydrographique, falaises, escarpements rocheux...) :



1-Croteau et Ailliik group, Wakeham Bay, Mistassini Group, Muford Group, Circum Ungava géosyncline. 2-East Arm Graben, NW Baffin, Kaminak Basin, Wollaston Lake, Great Bear batholith, Snow Lake, Flin Flon, Lynn Lake, Coronation géosyncline, Dubawnt Group, Athabasca and Carswell formations. 3- Grenville Supergroup, Penokean successions, Huronian Supergroup, Animikie Group. 4- Snowy Range Supergroup, SW USA, Pahump Group, Uinta Mountains Group. 5- Caico Group. 6- Minas Series. 7- Birrimien-Tarkwaien. 8- Frontier-Gaizeri Groups, Lomagundi-Piriwiri Groups, Muva System et Plateau Series, Deweras Group, Umkondo Group. 9- Orange River Group. 10- Ventersdorp Supergroup, Soutpansberg Trough, Waterberg Supergroup, Matsap Group. 11- Cipolin-quartzite serie. 12- Ukinga Group, Buganda-Toro Supergroups, Ruzizian-Ubendian Groups, Kibaran-Burundian Groups, Karagwe- Ankolean Groups. 13- Aravalli-Delhi System. 14- Cuddapah Supergroup, Kaladgi Series, Pakhal Series. 15- Mount Bruce Supergroup, Nalheru Supergroup. 16- Gawler Platform Succession. 17- Warramunga Group, Lawn Hill Platform Succession, Tewinga Group, Mount Isa Succession. 18- Etheridge Geosyncline Succession. 19- Mac Arthur Basin sequence. 20- Halls Creek Group; Birrindudu Basin succession, Kimberley Basin succession. 21- Jotnian Successions, Svecofennian greenstone belts, Leptite Successions, Telemark region.

Fig. 57 - Principales greenstone belts protérozoïques

Protérozoïque inférieur et moyen
 Protérozoïque terminal

- . dans les complexes stratiformes, on s'attachera à établir la succession pétrographique et pétrologique avec repérage de la zone critique (niveaux à chromite, niveaux sulfurés, niveaux à olivine...) et la localisation des niveaux platinifères ;
- . dans les contextes favorables à la présence de minéralisations hydrothermales, l'accent sera porté sur la cartographie des accidents et des altérations dans la zone de contact entre les complexes basiques et leur encaissant.
- la lithogéochimie : campagne de prélèvements tests (coupes et suivi latéral des niveaux porteurs ou zones d'altération pour analyses PGE et Au, avec complément d'analyses ICP multi-éléments) ;
- des campagnes géochimiques : stream-sédiments et sols, avec analyses des échantillons pour PGE (Pt et Pd), Au et ICP multi-éléments. Les concentrés de fond de batée seront stockés pour une identification des minéraux dans les échantillons positifs à l'analyse géochimique.

BIBLIOGRAPHIE

DOCUMENTS BRGMDocuments imprimés

AUGET T. (1985) - Platinum-group mineral inclusions in ophiolitic chromitite from the Vourinos complex, Greece. *Canad. Mineral.* vol. 23, p.163-171.

BOULADON J., BERTUCAT M., JOURDE J., HENRY B. (1972) - Les minéralisations sulfurées en Ni-Cu du système d'Andriamena (2700-2800 Ma) à Madagascar, 24 th IGC. Section 4.

HENRY B. (1986) - Le Bushveld : monstre sacré. Note de lecture. *Chron. rech. min.*, n° 482.

PICOT P., JOHAN Z. (1977) - Atlas des minéraux métalliques. *Mém. BRGM*, n° 90, 400 p., nombreuses ph. coul.

Documents dactylographiés

AUGET T., JOHAN Z. (1986) - Complexe basique et ultrabasique d'Andriamena (Madagascar). Note DAM/GIS, 4 p., 1 fig.

BACHE J.J. (1980) - Un monstre minier platinifère et aurifère ; le complexe igné du Bushveld (RAS) - Note GMX n° 597, 5 p., 3 fig.

BOULADON J. (1968) - Le platine et son groupe. *Éléments de géologie prévisionnelle*. Rapp. BRGM - 68 SGL 157 GIT, 16 p.

BOULADON J., SARCIA J.A. (1969) - Le platine et le palladium. Rapport BRGM (département de Géologie) réalisé pour le Ministère des armées, 56 p.

BOURNAT G., CABROL B., JOURDE G. (1985) - Minéraux de la mine de platine (platinoïde ou PGM). In : Plan direction d'actions pour la mise en valeur des ressources du sol et sous-sol de Madagascar. p.225-241.

CHEVREMONT P. (1982) - Possibilités de minéralisations en éléments du groupe du platine au sein des complexes ultramafiques-mafiques d'Arabie. Note BRGM, SGN/GEO, 54 p.

CHEVREMONT P. (1985) - Prospection géochimique en roches des éléments du groupe du platine dans la partie NW du bouclier arabe. Mise en évidence d'un indice de platine plus palladium au sein du complexe de Wadi Kamal. Rapp. SGN 85 GEO EP 65.

GAUTSCH J.P. (1984) - C.R. de la séance du 25.IV.84 du Conseil de la Recherche minière consacrée au platine et platinoïdes.

GRAMONT (de) X. (1985) - Recherche de platinoïdes en Oman. Note GMX, n° 1185, 2 p.

HENRY B. (1973) - Lynn lake (Manitoba - Canada). Fiche typologique GMX, n° 38.

HENRY B. (1984) - Le platine en Ethiopie. Note GMX, n° 1101, 3 p.

HENRY B., CHEVREMONT Ph. (1984) - Les métaux de la mine de platine. Où les chercher ? Note GMX, n° 1044, 11 p.

JAUJOU M. (1984) - Le marché du platine et des métaux associés, 51 p., nbreux tabl.

JAUJOU M. (1985) - Le marché du platine (Etude réalisée pour le compte de l'Observatoire des matières premières). 75 p., nbreux tabl.

JOHAN Z. (1985) - Programmation scientifique 1986 - Métallogénie des roches basiques et ultrabasiques. Minéralisations liées aux ophiotites. Projet RM 14, 15 p.

JOHAN Z. (1986) - Programmation scientifique 1986. Métallogenèse des roches basiques et ultrabasiques. Minéralisations liées aux roches basiques. Projet RM 15, 13 p.

LEGENDRE O. (1982) - Minéralogie et géochimie des platinoïdes dans les chromitites ophiolitiques. Thèse, Université Paris VI, 171 p.

NOEL Y. (1984)- Le platine en Ethiopie. 6 p. inédites, fig.

NOEL Y. (1984) - Le gisement de platine de Yubdo Province de Wolléga-Ethiopie. 17 p. manuscrites, fig.

ROSSELO G. (1964) - Le platine. 31 p.

SUSTRAC G. (1981) - Rapport de tournée en Afrique du Sud. Rapp. 82 RDM 003 AF, 319 p.

ZANONE L. (1976) - Empress (Rhodésie). Fiche typologique GMX, n° 43.

X. (1984) - L'analyse du platine et des platinoïdes. Note MGA, n° 42.

DOCUMENTS EXTERNES

ALAPIETI T., PIIRAINEN T. (1983) - Cu-Ni-PGE mineralization in the marginal series of the Early Proterozoic Killismaa layered igneous complex, northeast Finland. Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks. Third nickel sulphide field conference, Perth, Western Australia. IMM.

ALLEN C.C. (1960) - Les métaux du groupe du platine. Rapport minier n° 3. Division des Ressources minérales, Ministère des mines et des relevés techniques. Ottawa.

AYRES L.D., THURSTON P.C. (1985) - Archean supracrustal sequences in the Canadian shield : an overview. p.343-380 in GAC special paper 28 : Evolution of Archean supracrustal sequences edit : L.D. Ayres, P.C. Thurston, K.D. Card and W. Weber.

BARNES S.J., COATS C.J.A., NALDRETT A.J. (1982) - Petrogenesis of a proterozoic nickel-sulfide-komatiite association : The katinig sill, Ungava Quebec. *Econ. geol.*, vol. 77, p.413-429.

BARNES J.S., NALDRETT A.J. (1985) - Geochemistry of the J.M. (Howland) reef of the Stillwater complex, Minneapolis Adit Area. I. Sulfide Chemistry and Sulfide-Olivine Equilibrium. *Econ. Geol.*, vol. 80, p.627-645.

BASTURK N. (1984) - Concentration en dosage du platine par spectrométrie d'absorption atomique et contribution à la géochimie du platine dans les roches ultramafiques. Thèse n° 1655. Université de Genève.

BEAMISH F.E., Mc BRYDE W.A.E., BAREFOOT R.R. (1954) - The platinum metals. In : *Rare metals handbook*. chap. 15, p.291-328.

BOUDREAU A.E., Mc CALLUM I.S. (1986) - Investigations of the Stillwater complex : III The picket Pin Pt/Pd deposit. *Econ. Geol.*, vol. 81, n° 8, p.1953-1975.

BOURRELIER P.H. (1985) - Minerais et métaux. L'approvisionnement dans la conjoncture actuelle. *Total Information*, n° 2, p.27-35.

BRYNARD H.J., VILLIERS J.P.R. (de), VILJOEN E.A. (1976) - A mineralogical investigation of the Merensky Reef at the Western Platinum mine, near Marikana, South Africa. *Econ. Geol.*, vol. 71, p.1299-1307.

CABRI L.J. (1972) - The mineralogy of the platinum-group elements. *Minerals Sci. Enging.*, vol. 4, n° 3, p.3-23.

CABRI L.J. (1981) - Platinum group elements : Mineralogy, Geology, Recovery. *CIM Special vol.* n° 23.

CAMPBELL I.H., NALDRETT A.J., BARNES S.J. (1983) - A model for the origin of the platinum rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater complexes. *J. Petr.*, vol. 24, part. 2, p.133-165.

CARD K.D., PATTISON E.F. (1973) - Nipissing-diabase of the southern province, Ontario. *Geol. Assoc. Canada, spec. paper.*, n° 12, p.7-30.

CHRISTIAN J.M. (1985) - Platinum and palladium. Varied response to economic expansion. *Eng. Mining J. (E & MJ)*, March 1985, p.62-64.

CLARK W.E. (1969) - Giant Mascot Mines Ltd., geology and ore control. *Western Miner.*, n° 42, p.40-46.

CLARKE A.M., POTAPOFF P. (1959) - Geology of Mc Kim Mine ; an abstract. *Can. Min. J.*, vol. 80, n° 4, p.82.

CLARK Th., BELANGER D., GIOVENAZZO D. (1986) - Precious metals in New Quebec. Part. C. Platinum-group element (PGE) mineralization in the Cape Smith Belt. Conference PDA Toronto. Gouvernement du Québec. Ministère de l'Energie et des Ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale.

CONN H.K. (1979) - The Johns-Manville platinum-palladium prospect, Stillwater complex, Montana USA. *Can. Min.*, vol. 17, p.463-468.

CONROD D.M., NALDRETT A.J. (1983) - Petrology, geochemistry, isotopic studies and platinum-group element potential of the Nipissing Diabase. *Geosci. Research. Grant Program 230 Summary of Research. 1982-1983. Ontario Geol. Surv. Miscel.*, paper 113, p.206-222.

CROCKET J.H. (1979) - Platinum-Group Elements in mafic and ultramafic rocks : a survey. *Canad. Miner.*, vol. 17, p.391-402.

DAHL R., WATKINSON D.H. (1986) - Structural control of podiform chromite in Bay of islands ophiolite, Springer Hill area, Newfoundland. *Geol. Surv. of Canada*, paper 86C1B, p.757-766.

DAHLSTROM E. (1947) - Report on the Yubdo platinum mines, Wollega. Addis Ababa in Jelenc D.A. (1966) *Mineral occurrences of Ethiopia*. Published by the Ministry of Mines, Addis Ababa, 721 p.

DELIAC E. (1983) - Présentation de l'exploitation des mines de métaux précieux en Afrique du Sud. *Ind. Miner.*, vol. 65, n° 8/9.

DILLON LEITCH H.C.H., WATKINSON D.H., COATS C.J.A. (1986) - Distribution of platinum-group elements in the Donaldson West deposit, Cape Smith Belt, Quebec. *Econ. Geol.*, vol. 81, p.1147-1158.

DISTLER V.V., GENKIN A.D., DYUZHNIKOV O.A. (1986) - Sulfide petrology and genesis of copper-nickel ore deposits, p.110-123. In : *Special Publ. n° 4, Soc. Geol. Appl. Miner. Dept. : Geology and metallogeny of copper deposits. Proceedings of the copper symposium 27th international congress. Moscow, 1984.*

DOBIN D.A., BATUEV B.N., MITENKOV G.A., IZOITKO V.M. (1971) - Atlas porod i rud noril'skikh medno-nikekevykh mestorozhdenii. Nedra, Leningrad, 560 p.

FINDLAY D.C. (1969) - Origin of the Tulameen ultramafic gabbro complex. *Southern British Columbia, Canadian J. Earth. Sci.*, vol. 6, p.399-425.

FOOSE M.P., ECONOMOU M., PANAYIOTOU A. (1985) - Compositional and mineralogic constraints on the genesis of ophiolite hosted nickel mineralization in the Pevkos Area Limassol Forest, Cyprus. *Mineral Deposita*, vol. 20, n° 4, p.234-240.

FORD R.J. (1985) - Platinum-group minerals in Tasmania. *Econ. Geol.*, vol. 76, p.498-504.

GAIN S.B., MOSTERT A.B. (1982) - The geological setting of the platinoid and base metal sulfide mineralization in the Plat reef of the Bushveld complex on Drenthe, north of Potgietersrus. *Econ. Geol.*, vol. 77, p.1395-1404.

GRESHAM J.J. (1986) - Depositional environments of volcanic peridotite-associated nickel sulphide deposits with special reference to the Kambalda Dome. p.63-90. In : *Special publ., n° 4, Soc. Geol. Appl. Miner. Dept. : Geology and metallogeny of copper deposits : Proceedings of the copper symposium 27th international geological congress. Moscow, 1984.*

HIEMSTRA S.A. (1985) - The distribution of some platinum-group elements in the UG-2 Chromitite Layer of the Bushveld Complex. *Econ. Geol.*, vol. 80, p.944-957.

HUDSON D.R., DONALDSON M.J. (1984) - Mineralogy of platinum group elements in the Kambalda nickel deposits, Western Australia. In : Sulfide deposits in mafic and ultramafic rocks. Third nickel sulfide field conference, Perth, Western Australia. IMM.

IRVINE T.N. (1967) - The Duke Island ultramafic complex, southeastern Alaska. In : P.J. Wyllie, ed., *Ultramafic and related Rocks*. Wiley, New York, p.84-97.

IRVINE T.N. (1974) - Ultramafic and gabbroic rocks in the Aiken Lake and Mc Connell Creek map-areas, British Columbia. *Geol. Surv. Canada*, paper 74-1A, p.149-152.

IRVINE T.N., KEITH D.W., TODD S.G. (1983) - The J.M. platinum-palladium reef of the Stillwater Complex, Montana : II origin by double diffusive convective magma mixing and implications for the Bushveld Complex. *Econ. Geol.*, vol. 78, p.1287-1334.

KEAYS R.R., NICKEL E.H., GROVES D.I., Mc GOLDRICH P.J. (1982) - Iridium and palladium as discriminants of volcanic-exhalative, hydrothermal and magmatic nickel sulfide mineralization. *Econ. Geol.*, vol. 77, n° 6, p.1535-1547.

KINLOCH E.D. (1982) - Regional Trends in the Platinum-Group Mineralogy of the Critical zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Econ. Geol.*, vol. 77, p.1328-1347.

LAMBERT D.D., SIMMONS E.C. (1983) - Platinum-Group Element ore-forming process in mafic layered intrusions : geochemical evidence from the Stillwater Complex, Montana. *Mining Engineering*, 1291 p.

LAZNICKA P. (1985) - Empirical metallogeny. Vol. 1 Phanerozoic environments, associations and deposits, 2 vol., 1758 p. Ed. Elsevier.

LESHER C.M., GROVES D.I. (1986) - Controls on the formation of komatiite. Associated nickel-copper sulfide deposits. p.43-62. In : Special Publ., n°4, *Soc. Geol. Appl. Miner. Dept. : Geology and metallogeny of copper deposits*. Proceedings of the copper symposium 27th international geological congress. Moscow, 1984.

MAGAK'YAN I.G. (1968) - Ore deposits. *Int. Geol. Rev.*, n° 10, 202 p.

Mc CALLUM I.S., RAEDEKE L.D., MATHEZ E.A. (1980) - Investigation of the Stillwater complex. Part I : Stratigraphy and structure of the banded zone. *Amer. J. Sci.*, vol. 280.A, p.59-87.

Mc DONALD A.J. (1985) - The Lac des Iles platinum-group metals deposit, Thunder Bay District, Ontario, Ontario geological Survey. *Miscellaneous paper* 127, p.235-241.

Mc TAGGART K.C. (1971) - On the origin of ultramafic rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, n° 82, p.23-42.

MARSTON R.J., GROVES D.I., HUDSON D.R., ROSS J.R. (1981) - Nickel sulfide deposits in Western Australia : a review. *Econ. Geol.*, vol. 76, p.1330-1363.

MOHAMMED-TOURET L., TOURET J. (1977) - Les laves ultrabasiques des ceintures vertes archéennes et leur métamorphisme. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. XIX, n° 5, p.971-977.

MOREL S.W. (1979) - The geology and mineral resources of Sierra Leone. *Econ. Geol.*, vol. 74, n° 7, p.1563-1576.

MOUNIER J. (1983) - Un métal très précieux : le platine. *Ind. minér.*, vol. 65, n° 8-9, août-septembre 1983.

NALDRETT A.J. (1979) - Nickel-sulfide and platinum-group element deposits. *Canad. Miner.*, vol. 17, part. 2, p.143-514.

NALDRETT A.J. (1981) - Nickel sulfide deposits : classification composition and genesis. *Econ. Geol.*, 75th Anniversary Volume, p.628-685.

NALDRETT A.J. (1986) - Geochemistry of the Sudbury Igneous Complex : a model for the complex and its ores, p.91-110. In : Special publ., n° 4, *Soc. Geol. Appl. Miner. Dept. : Geology and metallogeny of copper deposits. Proceedings of the copper symposium 27th international geological congress. Moscow, 1984.*

NALDRETT A.J., CABRI L.J. (1976) - Ultramafic and related mafic rocks : their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfide and platinum group elements. *Econ. Geol.*, vol. 71, p.1131-1158.

NALDRETT A.J., INNES D.G., SOWA J., GORTON M.P. (1982) - Compositional variations within and between five Sudbury ore deposits. *Econ. Geol.*, vol. 77, p.1519-1534.

NALDRETT A.J., KULLERUD G. (1967) - A study of the Stratchcona mine and its bearing on the origin of the nickel-copper ores of the Sudbury District. *J. Petr.*, vol. 8, p.453-531.

OVERBEECK P.W., LOO J.P., DUNNE R.L. (1984) - The development of a concentration procedure for the platinum-group metals and chromite from the UG-2 reef in the Bushveld Complex. *Symp. in the recovery of precious metals, Reno, Nevada. conf. Monogr. paper XVIII, 27 p.*

OWEN D.L., COATS C.J.A. (1984) - Faclonbridge and East Mines, p.371-377. In : spec. vol. *The geology and ore deposits of the Sudbury structure. Ontario Geol. Surv.*, p.603.

PAGE N.J., ENGIN T., SINGER D.A., HAFFTY J. (1984). Distribution of platinum group elements in the Bati Kef chromite deposit, Guleman-Elazig area, Eastern Turkey. *Econ. Geol.*, vol. 79, p.177-184.

PAGE N.J., ZIENTEK M.L., CZAMANSKE G.K., FOOSE M.P. (1985) - Sulfide mineralization in the stillwater complex and underlying rocks. *US Geol. Surv. Sp publ. 92, Edit. : G.K. Czamanske and M.L. Zientek : the Stillwater Complex, Montana : geology and guide, 394 p.*

PEREDERY W.V., MORRISON G.G. (1984) - Discussion of the origin of the Sudbury structure. p.491-511. In : Spec. vol. 1 : The geology and ore deposits of the Sudbury structure. Ontario geol. Surv., 603 p.

PIISPANEN R., TARKIAN M. (1984) - Cu-Ni-PGE mineralization at Rometölväs, Koillismaa layered Igneous Complex, Finland. Mineral Deposita, n° 10, p.105-111.

POUIT G. (1984) - Les minéralisations associées aux ophiolites : une tentative d'inventaire et de typologie évolutive appliquée à la recherche minière. Chron. rech. min., n° 477, p.55-62.

PUTZER H. (1976) - Metallogenetische Provinzen in Südamerika. Schweizerbart, Stuttgart, 299 p.

PYE E.G., NALDRETT A.J., GABLIN P.E. (1984) - The geology and ore deposits of the Sudbury structure. Ontario geol. Surv., Special vol. 1, 603 p., cartes couleurs.

RAZIN L.V. (1968) - Problem of the origin of platinum metallization of forsterite dunites. Internat. Geology Rev., vol. 13, p.776-788.

RAZIN L.V., KHOMENKO G.A. (1969) - Accumulation of osmium, ruthenium and the other platinum-group metals in chrome spinel in platinum bearing dunites. Geochemistry internat., vol. 6, p.546-557.

RAZIN L.V., KHVASTOVA V.P. (1965) - Concentration and distribution patterns of platinum group metals in ultrabasic and alkalic rocks. Akad. Nauk. URSS Doklady, vol. 162, p.207-210.

ROBSOND G.G., MATTHEY J. (1985) - Platinum 1985 - Interim review - Johnson Matthey Public Limited Compagny, 19 p.

RUNDKVIST D.V., ed. (1978) - Kriterii Prognoznoi Otsenki Territorii na Tverdye Poleznye Iskopaemye. Nedra, Leningrad, 607 p.

ST LOUIS R.M., NESBITT B.E., MORTON R.D. (1986) - Geochemistry of platinum-group elements in the Tulameen ultramafic complex, southern British Columbia. Econ., Geol., vol. 81, p.961-973.

SAMONOV I.Z., POZHARISKY I.F. (1974) - Deposits of copper. In : V.I. Smirnov, ed., Ore Deposits of the USSR, vol. 2, English transl., Pitman, London, p.106-181.

SOUCH B.E., PODOLSKY T., Geological Staff (1969) - The sulfide ores of Sudbury : Their particular relationship to a distinctive intrusion bearing species of the nickel irruptive : p.252-261 in Magmatic ore deposits, a symposium : édit. by H.D.B. Wilson, Econ. Geol. Monograph., 4, 366 p.

STOCKMAN H.W., HILVA P.F. (1984) - Platinum-group minerals in Alpine chromitites from Southwestern Oregon. Econ. Geol., vol. 79, p.491-503.

STUMPFL E.F. (1974) - The genesis of platinum deposits : Further thoughts. Minerals Sci. Eng., vol. 6, n° 3, p.120-141.

- SUTCLIFFE R.H., SWEENEY J.M. (1985) - Geology of the Lac des Iles Complex, district of Thunder Bay, summary of field work and other activities 1985, Ontario geol. Surv., Misc. pap. 126, p. 47.
- TALKINGTON R.W., WATKINSON D.H. (1984) - Trends in the distribution of the precious metals in the Lac des Iles Complex, northwestern, Ontario. Canad. Miner., vol. 22, p. 125-135.
- TARASOV A.V. (1968) - Structural control of copper and nickel mineralization in Noril'sk I deposit. Int. Geol. Rev., n° 12, p.933-941.
- TARASOV A.V. (1974) - Struktura yugo-zapadnoi chasti Talnakhskovo medno-nikelevovo mestorozhdeniya. Geol. Rud. Mestor., n° 2, p.29-41.
- TAYLOR H.P., Jr, NOBLE J.A. (1960) - origin of the ultramafic complexes in southeastern Alaska. 21st Int. Geol. Congr., Norden, Pt. 13, p. 175-187.
- THALHAMME O., STUMPFL E.F., PANAYOITOU A. (1986) - Postmagmatic, hydrothermal origin of sulphide and arsenide mineralization at Limassol Forest, Cyprus. Mineral Deposita, vol. 21, n° 2, p.95-105.
- THOMAS M.D., GIBB R.A. (1985) - Proterozoic Plate Subduction and Collision : Processes for reactivation at Archean Crust in the Churchill Province, in : Evolution of Archean Supracrustal sequences. Geol. Pap. Ass. of Canada, Spec. Pap. 28. p.263.
- TODD J.C. (1983) - Gold field assesses potential new PGM mines E & MJ. August 1983.
- TODD S.G., KEITH D.W., LE ROY L.W., SCHISSEL D.J., MANN E.L., IRVINE T.N. (1982) - The J.M. Reef platinum palladium reef of the Stillwater Complex Montana I stratigraphy and petrology. Econ. Geol., vol. 77, p.1454-1480.
- TURNER A.R., WOLFGRAM D., BARNES S.J. (1985) - Geology of the Stillwater country sector of the J.M. Reef, including the Minneapolis Adit. Us. Geol. Surv. Sp. publ. 92, Edit. GK Czamanske and M.L. Zientek. The stillwater complex, Montana : geology and guide, 394 p.
- VERMAAK C.F. (1976) - The Merensky reef. Thoughts on its environment and genesis. Econ. Geol., vol. 71, p.1270-1298.
- VERMAAK C.F. (1985) - The UG-2 layer South Africa's Slumbering Chromitite Giant. Chromium Review, n° 5, Nov. 1985, p.9-21.
- VERMAAK C.F., LEE C.A. (1981) - Bushveld and kindred complexes. In : D.R. Hunter edit : Precambrian of the southern Hemisphere. Elsevier, New York, p.599-618.
- WAGER L.R., BROWN G.M. (1967) - Layered igneous rocks. Edinburg Oliver and Boyd, 588 p.
- WATKINSON D.H., HAK J., MORTON P., JOHAN Z. (1978) - Merenskyite from the Shebandowan nickel-copper miner, Northwestern Ontario. Canad. Miner., vol. 16, p.659-663.

WATKINSON D.H., WHITTAKER P.J., JONES P.L. (1983) - Platinum Group Elements in the Eastern Gabbro, Coldwell Complex, Northwestern Ontario. Geoscience Research Grand Program, Summary of Research 1982-1983, Ontario geol. Surv., Misc. Pap. 113, p.183.

WILLEMSE J. (1969) - The geology of the Bushveld Complex, the largest repository of magmatic ore deposits in the world. In : Wilson H.D.B. (éd.) magmatic ore deposits. Econ. Geol. Monogr., 4, p.1-22.

WOLFF E.N., HEINER L.E. (1971) - Mineral resources of South-Eastern Alaska. Miner. Ind. Res. Lab. Rept. 28, college, 63 p.

X (1985) - The chromitites of the Stillwater Complex, Montana. Chromium Review, n° 4, p.9-13.

The geology and ore deposits of the Sudbury structure. Ontario geological Survey. Special Volume 1, 603 pages. Edit. Pye E.G., Naldrett A.J., Gablin P.E.

Preface, <i>E. G. Pye</i>	v
History and Regional Studies	
Chapter 1 History of Exploration and Development, of Geological Studies and Development of Geological Concepts, <i>P. E. Giblin</i>	3
Chapter 2 The Sudbury Structure: Its Regional Geological and Geophysical Setting, <i>K.D. Card, V.K. Gupta, P.H. McGrath, and F.S. Grant</i>	25
Chapter 3 The Regional Metallogenic Setting of Sudbury, <i>D.G. Innes and A.C. Colvine</i>	45
Chapter 4 General Geology of the Sudbury Area, <i>Burkhard O. Dressler</i>	57
Chapter 5 Structural Geology of the Sudbury Basin, <i>D.H. Rousell</i>	83
Chapter 6 The Effects of the Sudbury Event and the Intrusion of the Sudbury Igneous Complex on the Footwall Rocks of the Sudbury Structure, <i>Burkhard O. Dressler</i>	97
Whitewater Group	
Chapter 7 The Onaping Formation, <i>T.L. Muir and W.V. Peredery</i>	139
Chapter 8 Onwatin and Chelmsford Formations, <i>D.H. Rousell</i>	211
Chapter 9 Mineralization in the Whitewater Group, <i>D.H. Rousell</i>	219
Geology of the Sudbury Igneous Complex	
Introduction to the Geology of the Sudbury Igneous Complex, <i>A.J. Naldrett</i>	234
Chapter 10 The Main Mass of the Sudbury Igneous Complex, <i>A.J. Naldrett and R.H. Hewins</i>	235
Chapter 11 The Contact Sublayer of the Sudbury Igneous Complex, <i>A.J. Naldrett, R.H. Hewins, Burkhard O. Dressler, and B.V. Rao</i>	253
Chapter 12 Sudbury Quartz Diorite Offset Dikes, <i>R.W. Grant and A. Bite</i>	275
Mineral Deposits of the Sudbury Igneous Complex	
Ni-Cu Ores of the Sudbury Igneous Complex — Introduction, <i>A.J. Naldrett</i>	302
Chapter 13 Mineralogy and Composition of the Sudbury Ores, <i>A.J. Naldrett</i>	309
Chapter 14 Ore Deposits of the North Range, Onaping-Levack Area, Sudbury, <i>C.J.A. Coats and P. Snajdr</i>	327
Chapter 15 Ore Deposits of the Copper Cliff Offset, <i>L.B. Cochrane</i>	347
Chapter 16 Little Stobie Mine: A South Range Contact Deposit, <i>Gary C. Davis</i>	361
Chapter 17 Falconbridge and East Mines, <i>D.L. Owen and C.J.A. Coats</i>	371
Geophysics	
Chapter 18 Gravity and Magnetic Characteristics of the Sudbury Structure, <i>V.K. Gupta, F.S. Grant, and K.D. Card</i>	381
Chapter 19 Paleomagnetic Constraints on the Magmatic, Tectonic, and Metamorphic History of the Sudbury Basin Region, <i>W.A. Morris</i>	411
Geochronology	
Chapter 20 Precise U-Pb Zircon and Baddeleyite Ages for the Sudbury Area, <i>T.E. Krogh, D.W. Davis, and F. Corfu</i>	431

NICKEL SULPHIDE FIELD CONFERENCE (3 ; 1983 ; Perth ,
Western Australia) . - Proceedings / of 3e **Nickel**
sulphide field conference , Perth , 23-25 May , 1983 /
ed. D.L. Buchanan and M.J. Jones , IGCP projects 161
and 91 . - London : Institution fo mining and metallurgy
1984 . - 164 p. : ill. ; 30 cm.

ISBN: 0-900488-71-9

T.

Perth, 1983

Buchanan (D.L.). Ed.

Jones (M.J.). Ed.

Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks

*Proceedings of IGCP Projects 161 and 91, Third Nickel
Sulphide Field Conference, Perth, Western Australia,
23-25 May, 1982*

Edited by D. L. Buchanan and M. J. Jones

The Institution of Mining and Metallurgy

Contents	<i>Page</i>
Introduction	
D. L. Buchanan and M. J. Jones	v
Tectonic setting of the sulphide nickel deposits of the Western Australian Shield	
D. I. Groves, C. M. Lesher and R. D. Gee	1
Experimental study of phase relations at 600°C in a portion of the Fe–Ni–Cu–S system and its application to natural sulphide assemblages	
R. E. T. Hill	14
Geophysical exploration for nickel sulphide deposits in the Yilgarn Block, Western Australia	
D. F. Pridmore, J. H. Coggon, D. J. Esdale and F. W. Lindeman	22
Geochemical exploration for nickel sulphides in lateritic terrain in Western Australia	
B. H. Smith	35
Geological review of the Agnew nickel deposit, Western Australia	
L. G. Billington	43
Mineralogy of platinum group elements in the Kambalda nickel deposits, Western Australia	
D. R. Hudson and M. J. Donaldson	55
Metamorphically and hydrothermally mobilized Fe–Ni–Cu sulphides at Kambalda, Western Australia	
C. M. Lesher and R. R. Keays	62
Genesis of komatiite-associated nickel sulphide deposits at Kambalda, Western Australia: a distal volcanic model	
C. M. Lesher, N. T. Arndt and D. I. Groves	70
Nickeliferous sediments and sediment-associated nickel ores at Kambalda, Western Australia	
H. L. Paterson, M. J. Donaldson, R. N. Smith, M. F. Lenard, J. J. Gresham, D. J. Boyack and R. R. Keays	81
Windarra nickel deposits, Western Australia	
M. L. Schmulian	95
Sulphide–silicate reactions as a guide to Ni–Cu–Co mineralization in central Maine, U.S.A.	
J. F. H. Thompson and A. J. Naldrett	103
Nickel sulphide mineralization in the Lick Fork prospect, Virginia, U.S.A.	
W. Wrightson Jr. and K. C. Misra	114
Cu–Ni–PGE mineralization in the marginal series of the Early Proterozoic Koillismaa layered igneous complex, northeast Finland	
T. Alapieti and T. Piirainen	123
Ni–Cu sulphide deposits in Vietnam	
Le Thac Xinh and Nguyen Van Chu	132
Aspects of nickel metallogeny of Southern Africa	
E. C. I. Hammerbeck	135
Role of contamination in the precipitation of sulphides in the Platreef of the Bushveld Complex	
D. L. Buchanan and J. E. Rouse	141
Geology and mineralization at Trojan nickel mine, Zimbabwe	
L. R. Chimimba	147
Name index	157
Subject index	161

Cover photograph shows finely laminated nickeliferous sediment, Juan shoot, Kambalda, Western Australia

THE CANADIAN MINERALOGIST
Journal of the Mineralogical Association of Canada

Volume 17

May 1979

Number 2

Contents

Introduction	141
IGCP Project No. 161 and a proposed classification of Ni-Cu-PGE sulfide deposits	143
Acknowledgements	A.J. NALDRETT 145
The field characteristics and petrology of Archean and Proterozoic komatiites	
N.T. ARNDT, D. FRANCIS & A.J. HYNES	147
Komatiites: geochemistry and genesis	R.W. NESBITT, SHEN-SU SUN & PURVIS 165
Relationship of ultramafic amphibolites to metavolcanic rocks and serpentinites in the Thompson belt, Manitoba	W.V. PEREDERY 187
Les roches encaissantes de gisements sulfurés de nickel: pétrochimie des séries magmatiques hôtes	M. BESSON 201
Geological, geochemical and mineralogical features of sulfide-bearing ultramafic rocks in Finland	H. PAPUNEN, T.A. HÄKLI & H. IDMAN 217
A review of some recent concepts of the Bushveld complex, with particular reference to sulfide mineralization	G. VON GRUENEWALDT 233
The Sudbury sublayer	E.F. PATTISON 257
Copper mineralization in the footwall complex, Strathcona mine, Sudbury, Ontario	
M.K. ABEL, R. BUCHAN, C.J.A. COATS & M.E. PENSTONE	275
The nickel mineralization of the Råna mafic intrusion, Nordland, Norway	
R. BOYD & C.O. MATHIESEN	287
Sulfide mineralization in the Ransko gabbro-peridotite massif, Czechoslovakia	
Z. MÍŠAŘ	299
Geology of the Maskwa West nickel deposit, Manitoba	
C.J.A. COATS, H.R. STOCKFORD & R. BUCHAN	309

Continued on inside Back Cover

THE CANADIAN MINERALOGIST

- The relative roles of magmatic segregation, volcanic exhalation and regional metamorphism in the generation of volcanic-associated nickel ores of Western Australia
D.I. GROVES, F.M. BARRETT & K.G. MCQUEEN 319
- The association of some nickel sulfide deposits with komatiitic volcanism in Rhodesia
D.A.C. WILLIAMS 337
- The Dundonald deposit: an example of volcanic-type nickel-sulfide mineralization
J.E. MUIR & C.D.A. COMBA 351
- Physical constraints on the characteristics of nickel-sulfide ore in ultramafic lavas
T.M. USSelman, D.S. HODGE, A.J. NALDRETT & I.H. CAMPBELL 361
- Mobilization of ore-forming elements during alteration of dunites Mt. Keith-Betheno, Western Australia
D.I. GROVES & R.R. KEAYS 373
- Platinum-group elements in mafic and ultramafic rocks: a survey
J.H. CROCKET 391
- The composition of Ni-sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au
A.J. NALDRETT, E.L. HOFFMAN, A.H. GREEN, CHEN-LIN CHOU, S.R. NALDRETT & R.A. ALCOCK 403
- Precious metals in volcanic-type nickel sulfide deposits in Western Australia.
I. Relationship with the composition of the ores and their host rocks
J.R. ROSS & R.R. KEAYS 417
- The noble-metal content of ore in the Levack West and Little Stobie mines, Ontario
E.L. HOFFMAN, A.J. NALDRETT, R.A. ALCOCK & R.G.V. HANCOCK 437
- Geology and platinum-group mineralization, Lac-des-Iles complex, northwestern Ontario
D.H. WATKINSON & G. DUNNING 453
- The Johns-Manville platinum-palladium prospect, Stillwater complex, Montana, U.S.A.
H.K. CONN 463
- The role of collectors in the formation of the platinum deposits in the Bushveld complex
S.A. HIEMSTRA 469
- Solubility of sulfur and sulfide immiscibility in synthetic tholeiitic melts and their relevance to Bushveld-complex rocks
D.L. BUCHANAN & J. NOLAN 483
- Nickel activity in silicate liquids: some preliminary results
I.H. CAMPBELL, A.J. NALDRETT & P.L. ROEDER 495
- Computer simulation of the fractionation of olivine and sulfide from mafic and ultramafic magmas
J.M. DUKE 507

THE CANADIAN MINERALOGIST
Journal of the Mineralogical Association of Canada

Volume 22

February 1984

Part 1

Contents

Preface	O.R. ECKSTRAND & D.H. WATKINSON	1
The geology of the Thierry Cu-Ni mine, northwestern Ontario	G.C. PATTERSON & D.H. WATKINSON	3
Metamorphism and supergene alteration of Cu-Ni sulfides, Thierry mine, northwestern Ontario	G.C. PATTERSON & D.H. WATKINSON	13
The petrology and sulfide mineralization of the Partridge River troctolite, Duluth Complex, Minnesota	R.M. TYSON & L.L.Y. CHANG	23
Further interpretation of the Cu-Fe-Ni sulfide mineralization in the Duluth Complex, northeastern Minnesota	J.D. PASTERIS	39
The distribution of nickel and iron between olivine and magmatic sulfides in some natural assemblages	J.F.H. THOMPSON, S.J. BARNES & J.M. DUKE	55
Mafic and ultramafic inclusions in the sublayer of the Sudbury Igneous Complex	B.T. SCRIBBINS, D.R. RAE & A.J. NALDRETT	67
Metamorphism of the ultramafic rocks of the Thompson mine, Thompson Nickel Belt, northern Manitoba	A.D. PAKTUNÇ	77
Geology and petrogenesis of the Kanichee layered complex, Ontario	R.S. JAMES & D. HAWKE	93
Chemical variation in the Insizwa Complex, Transkei, and the nature of the parent magma	P.C. LIGHTFOOT & A. J. NALDRETT	111
Trends in the distribution of the precious metals in the Lac-des-Iles complex, northwestern Ontario	R.W. TALKINGTON & D.H. WATKINSON	125
Palladium, platinum, rhodium, ruthenium and iridium in peridotites and chromitites from ophiolite complexes in Newfoundland	N.J. PAGE & R.W. TALKINGTON	137
A model for the geochemistry of the platinum-group elements in magmatic sulfide deposits	I.H. CAMPBELL & S.J. BARNES	151
Genesis of chromitite from the Mitchell Range, central British Columbia	P.J. WHITTAKER & D.H. WATKINSON	161
Mineralogical and chemical variations in chrysotile veins and peridotite host-rocks from the Asbestos Belt of southern Quebec	E. COGULU & R. LAURENT	173
Deformation histories as recorded by serpentinites. I. Deformation prior to serpentization	F.J. WICKS	185
Deformation histories as recorded by serpentinites. II. Deformation during and after serpentization	F.J. WICKS	197
Deformation histories as recorded by serpentinites. III. Fracture patterns developed prior to serpentization	F.J. WICKS	205

Covered in Current Contents/Physical, Chemical & Earth Sciences,
Science Citation Index and Mineralogical Abstracts

Second Class Reg. No. 5742

ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 71 November 1976 N° 7

AN ISSUE DEVOTED TO PLATINUM-GROUP ELEMENTS

Introduction.....	<i>George A. Desborough and B. F. Leonard</i>	1129
Ultramafic and Related Mafic Rocks: Their Classification and Genesis with Special Reference to the Concentration of Nickel Sulfides and Platinum-Group Elements.....	<i>A. J. Naldrett and L. J. Cabri</i>	1131
The Mineralogy of the Platinum-Group Elements from Some Copper-Nickel Deposits of the Sudbury Area, Ontario.....	<i>Louis J. Cabri and J. H. Gilles Laflamme</i>	1159
Partition of Platinum, Palladium, Iridium, and Gold among Coexisting Minerals from the Deep Ore Zone, Strathcona Mine, Sudbury, Ontario.....	<i>Lindgren L. Chyi and James H. Crocket</i>	1196
Platinum-Group Minerals in the Hitura Nickel Deposit, Finland.....	<i>T. A. Häkli, E. Hänninen, Y. Vuorelainen, and Heikki Papunen</i>	1206
Palladium, Iridium, and Gold in the Ores and Host Rocks of Nickel Sulfide Deposits in Western Australia.....	<i>Reid R. Keays and R. M. Davison</i>	1214
Palladium and Iridium in the Evaluation of Nickel Gossans in Western Australia.....	<i>G. A. Travis, Reid R. Keays, and R. M. Davison</i>	1229
A Review of the Mineralogy of the Merensky Reef, with Specific Reference to New Data on the Precious Metal Mineralogy.....	<i>C. F. Vermaak and L. P. Hendriks</i>	1244
The Merensky Reef—Thoughts on its Environment and Genesis.....	<i>C. F. Vermaak</i>	1270
A Mineralogical Investigation of the Merensky Reef at the Western Platinum Mine, near Marikana, South Africa.....	<i>H. J. Brynard, J. P. R. de Villiers, and E. A. Viljoen</i>	1299
The Relative Importance of Sulfides, Spinel, and Platinoid Minerals as Carriers of Pt, Pd, Ir, and Au in the Merensky Reef at Western Platinum Limited, near Marikana, South Africa....	<i>James H. Crocket, Yuko Teruta, and Jeremy Garth</i>	1308
Sulfides in the Upper Zone of the Eastern Bushveld Complex.....	<i>Gerhard von Gruenewaldt</i>	1324
The Layered Sequence of the Potgietersrus Limb of the Bushveld Complex.....	<i>M. J. van der Merwe</i>	1337
Platinum Metals in the Stillwater Complex, Montana.....	<i>Norman J Page, J. J. Rowe, and Joseph Haffty</i>	1352
Geochemistry of Some Trace Elements in Mineral Separates from Rhum, Inner Hebrides, with Special Emphasis on Iridium.....	<i>R. Gijbels, P. Henderson, and J. Zels</i>	1364
Geologic and Genetic Features of Forsterite Dunites and their Platinum-Group Mineralization....	<i>L. V. Razin</i>	1371
Some Observations on Textures and Inclusions in Alluvial Platinoids.....	<i>C. A. Cousins and E. D. Kinloch</i>	1377
Mineralogy of Platinum-Group Minerals in the Witwatersrand, South Africa.....	<i>Clive E. Feather</i>	1399
Platinum Metals Associated with Hydrothermal Copper Ores of the New Rambler Mine, Medicine Bow Mountains, Wyoming.....	<i>M. E. McCallum, R. R. Loucks, R. R. Carlson, E. F. Cooley, and T. A. Doerge</i>	1429
Platinum Genesis: New Mineralogical Evidence.....	<i>E. F. Stumpfl and M. Tarkian</i>	1451
Phase Relations of Michenerite and Merenskyite in the Pd-Bi-Te System.....	<i>Eric Hoffman and W. H. MacLean</i>	1461
<i>Scientific Communications</i>		
Phase Relations in the Ternary Portions of the System Pt-Pd-Fe-As-S.....	<i>Brian J. Skinner, Frederick D. Luce, Julia A. Dill, David E. Ellis, Harry A. Hagan, Dale M. Lewis, Deborah A. Odell, Dimitri A. Sverjensky, and Neil Williams</i>	1469
Glossary of Platinum-Group Minerals.....	<i>Louis J. Cabri</i>	1476

ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 76 Septembre/Octobre 1981 N° 6

A SPECIAL ISSUE ON NICKEL DEPOSITS AND THEIR HOST ROCKS IN WESTERN AUSTRALIA

Preface	<i>D. I. Groves, D. R. Hudson, R. J. Marston, and J. R. Ross</i>	1289
The Nickel Sulfide Deposits of Western Australia in Global Perspective	<i>J. R. Ross and G. A. Travis</i>	1291
Nickel Sulfide Deposits in Western Australia: A Review	<i>R. J. Marston, D. I. Groves, D. R. Hudson, and J. R. Ross</i>	1330
A Broad-Scale Structural Characteristic of Major Nickel Sulfide Deposits of Western Australia	<i>E. S. T. O'Driscoll</i>	1364
The Geology of the Kambalda Nickel Field, Western Australia	<i>J. J. Gresham and G. D. Loftus-Hills</i>	1373
Volcanic-Associated Nickel Deposits from around the Widgiemooltha Dome, Western Australia	<i>K. G. McQueen</i>	1417
The Nature and Metamorphic History of the Wannaway Nickel Deposit, Western Australia	<i>K. G. McQueen</i>	1444
The Proximal Volcanic Environment of the Scotia Nickel Deposit	<i>M. L. Page and M. L. Schmulian</i>	1469
The Komatiite Nickel Sulfide Association at Scotia: A Petrochemical Investigation of the Ore Environment	<i>G. W. Stolz and R. W. Nesbitt</i>	1480
The Langmuir Volcanic Peridotite-Associated Nickel Deposits: Canadian Equivalents of the Western Australian Occurrences	<i>A. H. Green and A. J. Naldrett</i>	1503
The Nickel Sulfide Mineralization and Metamorphic Setting of the Forrestania Area, Western Australia	<i>David J. Porter and Keith G. McKay</i>	1524
The Honeymoon Well Nickel Sulfide Deposits, Western Australia	<i>M. J. Donaldson and G. J. Bromley</i>	1550
The Sally Malay Deposit: Gabbroid-Associated Nickel-Copper Sulfide Mineralization in the Halls Creek Mobile Zone, Western Australia	<i>J. R. Thornett</i>	1565
Ni-Cu Sulfides and Their Host Mafic-Ultramafic Rocks in the Mt. Sholl Intrusion, Pilbara Region, Western Australia	<i>Charter I. Mathison and Alan E. Marshall</i>	1581
Nickel-Copper Sulfide-Rich Proterozoic Dikes at Cowarna Rocks, Western Australia	<i>A. C. Purvis and P. G. Moeskops</i>	1597
The Nature of Sulfidic Metasediments at Kambalda and Their Broad Relationships with Associated Ultramafic Rocks and Nickel Ores	<i>O. A. Bavinton</i>	1606
The Chemical and Mineralogical Variations in the Nickel Mineralization Associated with the Kambalda Dome, Western Australia	<i>P. Woolrich, A. Cowden, and N. E. Giorgetta</i>	1629
Precious Metals in Volcanic Peridotite-Associated Nickel Sulfide Deposits in Western Australia. II: Distribution within the Ores and Host Rocks in Kambalda	<i>Reid R. Keays, James R. Ross, and Paul Woolrich</i>	1645
Sulfide Paragenesis and Sulfur Mobility in Fe-Ni-Cu Sulfide Ores at Lunnon and Juan Main Shoots, Kambalda. Textural and Sulfur Isotopic Evidence	<i>P. K. Seccombe, D. I. Groves, R. J. Marston, and F. M. Barrett</i>	1675
A Native Nickel-Heazlewoodite-Ferroan Trevorite Assemblage from Mount Clifford, Western Australia	<i>D. R. Hudson and G. A. Travis</i>	1686
Redistribution of Ore Elements during Serpentinization and Talc-Carbonate Alteration of Some Archean Dunites, Western Australia	<i>M. J. Donaldson</i>	1698
Geochemistry of Komatiites from Kambalda, Western Australia. I: Chalcophile Element Depletion—a Consequence of Sulfide Liquid Separation from Komatiitic Magmas	<i>C. M. Lesher, R. F. Lee, D. I. Groves, M. J. Bickle, and M. J. Donaldson</i>	1714
Controls of the Eruption of Mafic and Ultramafic Lavas, Ruth Well Ni-Cu Prospect, West Pilbara	<i>E. G. Nisbet and G. A. Chinner</i>	1729
Mineralogy and Geochemistry of the Weathering of the Disseminated Nickel Sulfide Deposit at Mt. Keith, Western Australia	<i>C. R. M. Butt and E. H. Nickel</i>	1736
Precious and Volatile Metals in the Perseverance Nickel Deposit Gossan: Implications for Exploration in Weathered Terrains	<i>Peter J. McGoldrick and Reid R. Keays</i>	1752
Variations in Gossan Geochemistry at the Perseverance Nickel Sulfide Deposit, Western Australia: A Descriptive and Experimental Study	<i>M. R. Thornber, P. D. Allchurch, and E. H. Nickel</i>	1764
Geology, Mineralogy, and Chemistry of Lateritic Nickel-Cobalt Deposits near Kalgoorlie, Western Australia	<i>M. Elias, M. J. Donaldson, and N. Giorgetta</i>	1775
<i>Reviews</i>		
Geophysical Case Study of the Woodlawn Orebody, New South Wales, Australia (R. J. Whiteley, ed.)	<i>Michael L. Oristaglio</i>	1784
The Ore Minerals and Their Intergrowths, 2nd Edition (English translation) (Paul Ramdohr)	<i>H. L. Barnes</i>	1785
Geology and Geochemistry of Manganese. Vol. I, Mineralogy, Chemistry, Methods; Vol. II, Manganese Deposits on Continents; Vol. III, Manganese Deposits on the Bottom of Recent Basins (I. M. Varentsov and G. Grasselly, eds.)	<i>B. J. S.</i>	1786
Manganese Deposits (Supriya Roy)	<i>Ronald K. Sorem</i>	1787
Fluid Inclusions: Application to Petrology (L. S. Hollister and M. L. Crawford, eds.)	<i>Frederick J. Sawkins</i>	1788
Principles of Applied Geophysics, 3rd Edition (D. S. Parasnis)	<i>Michael L. Oristaglio</i>	1788
Applications of Thermodynamics in the Study of Mineral Deposits: Geological Survey of Canada Paper 80-28 (E. Froese)	<i>David A. Crerar</i>	1789
Books Received	<i>Brendan Caulfield, Paul Merewether, and Kevin Shelton</i>	1790
Interesting Papers in Other Journals		1794
Society of Economic Geologists		1814
Erratum		1816

ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 77 September/October 1982 Nº 6

A FURTHER ISSUE DEVOTED TO THE PLATINUM-GROUP ELEMENTS

Preface	<i>Gerhard von Gruenewaldt</i>	1283
Noble Metals in the Marginal Rocks of the Bushveld Complex	<i>Martin R. Sharpe</i>	1286
Nickel, Copper, and Platinum Mineralization in the Lower Zone of the Bushveld Complex, South of Potgietersrus	<i>Larry J. Hulbert and Gerhard von Gruenewaldt</i>	1296
The Upper Critical Zone of the Eastern Bushveld Complex—Precursor of the Merensky Reef	<i>Eugene N. Cameron</i>	1307
Regional Trends in the Platinum-Group Mineralogy of the Critical Zone of the Bushveld Complex, South Africa	<i>E. D. Kinloch</i>	1328
The Platinum-Group Chemistry and Mineralogy of the UG-2 Chromitite Layer of the Bushveld Complex	<i>Christian H. McLaren and Johan P. R. De Villiers</i>	1348
A Contribution on the Platinum-Group Mineralogy of the Merensky Reef at the Rustenburg Platinum Mine	<i>Gordon A. Kingston and Bothina T. El-Dosuky</i>	1367
The Platinum-Group Mineralogy of the Merensky Reef at the Impala Platinum Mines, Bophuthatswana	<i>A. B. Mostert, P. K. Hofmeyr, and G. A. Potgieter</i>	1385
The Geological Setting of the Platinoid and Base Metal Sulfide Mineralization in the Platreef of the Bushveld Complex in Drenthe, North of Potgietersrus	<i>S. B. Gain and A. B. Mostert</i>	1395
Comparison of Platinum, Palladium, and Rhodium Distributions in Some Layered Intrusions with Special Reference to the Late Differentiates (Upper Zone) of the Bushveld Complex, South Africa	<i>Norman J. Page, Gerhard von Gruenewaldt, Joseph Haffty, and Philip J. Aruscavage</i>	1405
The Platiniferous Dunite Pipes of the Eastern Bushveld	<i>E. F. Stumpfl and J. C. Rucklidge</i>	1419
The Influence of the Driekop Dunite Pipe on the Platinum-Group Mineralogy of the UG-2 Chromitite in its Vicinity	<i>W. Peyerl</i>	1432
The Petrogenesis of a Platiniferous Dunite Pipe in the Bushveld Complex: Infiltration Metasomatism by a Chloride Solution	<i>Craig M. Schiffrics</i>	1439
The J-M Platinum-Palladium Reef of the Stillwater Complex, Montana: I. Stratigraphy and Petrology	<i>S. G. Todd, D. W. Keith, L. W. Le Roy, D. J. Schissel, E. L. Mann, and T. N. Irvine</i>	1454
Investigations of the Howland Reef of the Stillwater Complex, Minneapolis Adit Area: Stratigraphy, Structure, and Mineralization	<i>C. Bou, D. Wolfgram, A. Turner, S. Barnes, J. Evans, M. Zdepski, and A. Boudreau</i>	1481
An Intrinsic Oxygen Fugacity Study of Platinum-Carbon Associations in Layered Intrusions	<i>W. C. Elliott, D. E. Grandstaff, G. C. Ulmer, T. Buntin, and D. P. Gold</i>	1493
Isomertseite and Other Platinum-Group Minerals from the Konttijarvi Layered Mafic Intrusion, Northern Finland	<i>Y. Vuorelainen, T. A. Häkli, E. Hänninen, H. Papunen, J. Remo, and R. Törnroos</i>	1511
Compositional Variations within and between Five Sudbury Ore Deposits	<i>A. J. Naldrett, D. G. Innes, J. Sowa, and M. P. Gorton</i>	1519
Iridium and Palladium as Discriminants of Volcanic-Exhalative, Hydrothermal, and Magmatic Nickel Sulfide Mineralization	<i>Reid R. Keays, E. H. Nickel, D. I. Groves, and Peter J. McGoldrick</i>	1535
Platinum and Palladium in the Ivrea-Verbano Basic Complex, Western Alps, Italy	<i>A. Ferrario, G. Garuti, and G. P. Sighinolfi</i>	1548
Noble Metals in Thetford Mines Ophiolites, Quebec, Canada: Part I. Distribution of Gold, Iridium, Platinum, and Palladium in the Ultramafic and Gabbroic Rocks	<i>I. O. Oshin and J. H. Crockett</i>	1556
Palladium, Platinum, Rhodium, Ruthenium, and Iridium in Chromitites from the Massif du Sud and Tiébaghi Massif, New Caledonia	<i>Norman J. Page, Daniel Cassard, and Joseph Haffty</i>	1571
Platinum-Group Metals in the Zechstein Copper Deposits, Poland	<i>H. Kucha</i>	1578
The Distribution of Gold and Platinum in Bituminous Coal	<i>Lindgren L. Chyi</i>	1592
<i>Reviews</i>		
The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington (Peter W. Lipman and Donal R. Mullineaux, eds.)	<i>Richard E. Stoiber</i>	1598
Proterozoic Basins of Canada (F. H. A. Campbell, ed.)	<i>Paul Karl Link</i>	1598
Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere (H. D. Holland and M. Schidlowski, eds.)	<i>J. P. N. Badham</i>	1599
River Basin Planning: Theory and Practice (Suranjit K. Saha and Christopher J. Barrow, eds.)	<i>Jean M. Bahr</i>	1600
Books Received	<i>Brendan Caulfield, Paul Merewether, and Kevin Shelton</i>	1601
<i>Interesting Papers in Other Journals</i>		1604
<i>Society of Economic Geologists</i>		1611

ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 80 June/July 1985 No 4

A SPECIAL ISSUE DEVOTED TO THE BUSHVELD COMPLEX

The Bushveld Complex: Introduction and Review	C. Von Gruenewaldt, Martin R. Sharpe, and C. J. Hatton	803
Field Relations and Strontium Isotope Systematics of the Marginal Rocks of the Eastern Bushveld Complex	R. E. Harmer and Martin R. Sharpe	813
The Platinum-Group Element and Gold Contents of the Marginal Rocks and Sills of the Bushveld Complex	G. Davies and M. Tredoux	838
Ultramafic Sills beneath the Eastern Bushveld Complex: Mobilized Suspensions of Early Lower Zone Cumulates in a Parental Magma with Boninitic Affinities	Martin R. Sharpe and L. J. Hulbert	849
Textural and Compositional Features of Chromite in the Lower and Critical Zones of the Bushveld Complex South of Potgietersrus	L. J. Hulbert and C. Von Gruenewaldt	872
The Chromites of the Bushveld Complex in the Nietverdiend Area	Johann P. Engelbrecht	896
Chromite from the Swartkop Chrome Mine—An Estimate of the Effects of Subsolidus Reequilibration	Christopher J. Hatton and Gerhard Von Gruenewaldt	911
The Geologic Setting of the Platiniferous UG-2 Chromitite Layer on the Farm Maandagshoek, Eastern Bushveld Complex	S. B. Gain	925
The Distribution of Some Platinum-Group Elements in the UG-2 Chromitite Layer of the Bushveld Complex	S. A. Hiemstra	944
The Mineralogy, Petrology, and Origin of the Merensky Cyclic Unit in the Western Bushveld Complex	F. J. Kruger and J. S. Marsh	958
A Pilot Study of Geochemical and Redox Relationships between Potholes and Adjacent Normal Merensky Reef of the Bushveld Complex	Thomas J. Buntin, David E. Grandstaff, Gene C. Ulmer, and David P. Gold	975
Interaction of Floor Rocks with the Platreef on Overysel, Potgietersrus, Northern Transvaal	R. Grant Cawthorn, J. M. Barton, Jr., and M. J. Viljoen	988
Implication of Vertical and Lateral Compositional Variations across the Pyroxene Marker and its Associated Rocks in the Upper Part of the Main Zone in the Eastern Bushveld Complex	D. D. Klemm, S. Ketterer, F. Reichhardt, J. Steindl, and K. Weber-Diefenbach	1007
Incompatible Trace Element Behavior in the Bushveld Complex	R. Grant Cawthorn and T. S. McCarthy	1016
Contrasted Mineralogy and Textural Relationships in the Uppermost Titaniferous Magnetite Layers of the Bushveld Complex in the Bierkraal Area North of Rustenburg	Ivan M. Reynolds	1027
Exsolution Features in Titanomagnetites from Massive Magnetite Layers and Their Host Rocks of the Upper Zone, Eastern Bushveld Complex	G. Von Gruenewaldt, D. D. Klemm, J. Henckel, and R. M. Dehm	1049
Mineral Layering in the Bushveld Complex: Implications of Cr Abundances in Magnetite from Closely Spaced Magnetite and Intervening Silicate-Rich Layers	T. S. McCarthy, R. G. Cawthorn, C. J. Wright, and J. R. Mclver	1062
The Geochemistry of Titanomagnetite in Magnetite Layers and Their Host Rocks of the Eastern Bushveld Complex	D. D. Klemm, J. Henckel, R. Dehm, and G. Von Gruenewaldt	1075
The Nature and Origin of Titaniferous Magnetite-Rich Layers in the Upper Zone of the Bushveld Complex: A Review and Synthesis	Ivan M. Reynolds	1089
The Distribution and Main Geologic Features of Discordant Bodies of Iron-Rich Ultramafic Pegmatite in the Bushveld Complex	Morris J. Viljoen and Roger N. Scoon	1109
The Bushveld Metamorphic Aureole in the Potgietersrus Area: Evidence for a Two-Stage Metamorphic Event	J. Nell	1129
Geochemical Evolution of the Rooiberg Silicic Lavas in the Loskop Dam Area, Southeastern Bushveld	David Twist	1153
Genetic Aspects of the Granophyric Rocks of the Bushveld Complex	F. Walraven	1166
Volcanogenic Fluorite-Hematite Deposits and Associated Pyroclastic Rock Suite at Vergenoeg, Bushveld Complex	I. T. Crocker	1181
Geochemical Distribution Patterns Surrounding Tin-Bearing Pipes and the Origin of the Mineralizing Fluids at the Zaaiplaats Tin Mine, Potgietersrus District	G. Von Gruenewaldt and J. H. Strydom	1201
Reviews		
Archaeo- and Proterozoic Basins of the Pilbara, Western Australia. Evolution and Mineralization Potential (J. R. Muhling, D. I. Groves, and T. S. Blake, eds.)	Cornelis Klein	1212
Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems (Reviews in Economic Geology, Volume 1, J. M. Robertson, Series Editor) (R. W. Henley, A. H. Truesdell, P. B. Barton, Jr., and J. A. Whitney)	Cyrus W. Field	1212
The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans (Heinrich D. Holland)	Kenneth A. Eriksson	1213
Books Received	Paul Dixon, Craig Johnson, and Michael Palin	1214
Interesting Papers in Other Journals		1218
Society of Economic Geologists		1224
Announcements		1225

ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 81 August 1986 N° 5

A THIRD ISSUE DEVOTED TO PLATINUM DEPOSITS

Preface	Louis J. Cabri	1045
The System Pd-Co-S at 1,000°, 800°, 600°, and 400°C	S. Karup-Møller and E. Makovicky	1049
Cryptic Variations within Chromitites of the Upper Critical Zone, Northwestern Bushveld Complex	H. V. Eales and I. M. Reynolds	1056
Platinum-Group Element-Chromitite Associations in the Bushveld Complex	G. Von Gruenewaldt, C. J. Hatton, R. K. W. Merkle, and S. B. Gain	1067
The Distribution of Chalcophile and Platinum-Group Elements in the UG-2 Chromitite Layer of the Bushveld Complex	S. A. Hiemstra	1080
Platinum-Group Element Abundances in the Lower and the Lower Critical Zones of the Eastern Bushveld Complex	C. A. Lee and M. Tredoux	1087
The Role of Contamination in the Evolution of the Platreef of the Bushveld Complex	J. M. Barton, Jr., R. Grant Cawthorn, and J. White	1096
The Upper Critical Zone of the Bushveld Complex and the Origin of Merensky-type Ores	A. J. Naldrett, E. C. Gasparri, S. J. Barnes, G. Von Gruenewaldt, and M. R. Sharpe	1105
A Fluid Dynamic Model for the Potholes of the Merensky Reef	I. H. Campbell	1118
Stratigraphy, Petrology, and Platinum-Group Element Mineralization of the Early Proterozoic Penikat Layered Intrusion, Northern Finland	T. T. Alapieti and J. J. Lahtinen	1126
Platinum-Group Elements in the Upper Central Layered Zone of the Fox River Sill, Northeastern Manitoba	R. F. J. Scoates and O. R. Eckstrand	1137
Distribution of Platinum-Group Elements in the Donaldson West Deposit, Cape Smith Belt, Quebec	H. C. H. Dillon-Leitch, D. H. Watkinson, and C. J. A. Coats	1147
Cryptic Compositional Variation in Laurite and Enclosing Chromite from the Bird River Sill, Manitoba	Daniel Ohnenstetter, David H. Watkinson, Peter C. Jones, and Raymond Talkington	1159
Palladium, Platinum, and Rhodium Contents of Rocks near the Lower Margin of the Stillwater Complex, Montana	Michael L. Zientek, Michael P. Foose, and Leung Mei	1169
Platinum-Group Minerals in Chromite Seams of the Stillwater Complex, Montana	Raymond W. Talkington and Bruce R. Lipin	1179
A Three-Dimensional View of Mineralization in the Stillwater J-M Reef	L. D. Raedeke and R. W. Vian	1187
Phase Compositions and Cryptic Variation in a 2.2-Km Section of the Windimurra Layered Gabbroic Intrusion, Yilgarn Block, Western Australia—a Comparison with the Stillwater Complex	J. Parks and R. E. T. Hill	1196
Associations of Platinum-Group Minerals of the Noril'sk Copper-Nickel Sulfide Ores	A. D. Genkin and T. L. Evstigneeva	1203
Mineralogy of Melonite-Group and Other Tellurides from the Ivrea-Verbano Basic Complex, Western Italian Alps	G. Garuti and R. Rinaldi	1213
Platinum-Group Minerals from the Kambalda Nickel Deposits, Western Australia	D. R. Hudson	1218
Platinum-Group Elements and Gold in the Komatiite-Hosted Fe-Ni-Cu Sulfide Deposits at Kambalda, Western Australia	A. Cowden, M. J. Donaldson, A. J. Naldrett, and I. H. Campbell	1226
Platinum-Group Elements in Svecokarelian Nickel-Copper Deposits, Finland	Heikki Papunen	1236
Platinum-Group Element Distribution in Komatiitic and Tholeiitic Volcanic Rocks from Munro Township, Ontario	J. H. Crocket and William E. MacRae	1242
Platinum-Group Element Geochemistry of Zoned Ultramafic Intrusive Suites, Klamath Mountains, California and Oregon	Floyd Gray, Norman J. Page, Carl A. Carlson, Steven A. Wilson, and Robert R. Carlson	1252
Platinum-Group Element Resources in Podiform Chromitites from California and Oregon	Norman J. Page, Donald A. Singer, Barry C. Moring, Carl A. Carlson, Johnnie M. McDade, and Stephen A. Wilson	1261
Platinum-Group Element Mineralization in a Hydrothermal Cu-Ni Sulfide Occurrence, Rathbun Lake, Northeastern Ontario	William F. Rowell and Alan D. Edgar	1272
The Development of Platinum-Group Minerals in Laterites	John F. W. Bowles	1278
<i>Reviews</i>		
Geologic Evolution of the United States Atlantic Margin (C. Wylie Poag, ed.)	Jacob E. Gair	1286
Alkaline Ring Complexes in Africa. Proceedings of the International Conference on Alkaline Ring Complexes, Zaria, Nigeria, 6-10 December, 1983 (R. Black and P. Bowden, guest eds.)	Kevin Burke	1287
Submarine Fans and Related Turbidite Systems (A. H. Bouma, W. R. Normark, and N. E. Barnes, eds.)	William C. Barnes	1288
Mount Etna: The Anatomy of a Volcano (D. K. Chester, A. M. Duncan, J. E. Guest, and C. R. J. Kilburn)	B. J. S.	1288
Books Received	Paul Dixon, Craig Johnson, and Michael Palin	1289
<i>Interesting Papers in Other Journals</i>		1292
<i>Society of Economic Geologists</i>		1298
<i>Full and Associate Membership Forms</i>		1301

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1 - Gîtes de PGE (Platinum Group Elements) dans le monde
- Fig. 2 - Carte géologique du Bushveld d'après Willemse (1969)
- Fig. 3 - Carte géologique de la partie est du Bushveld (d'après Vermaak and Lee, 1984)
- Fig. 4 - Carte géologique de la partie ouest du Bushveld (d'après Vermaak and Lee, 1981)
- Fig. 5 - Comparaison lithostratigraphique entre des complexes du Bushveld et du Stillwater.
- Fig. 6 - Succession lithostratigraphique du Merensky Reef à la mine de Rustenburg (Rustenburg Section) d'après Willemse (1969) Vermaak (1976).
- Fig. 7 - Coupe simplifiée du Plat Reef d'après Gain and Mostert (1982).
- Fig. 8 - Carte géologique du complexe de Stillwater d'après Todd et al. (1982).
- Fig. 9 - Lithostratigraphie de la zone rubanée du complexe de Stillwater. Position du J.M. Reef (Dead Tree-Contact Mountain Section) d'après Leroy (1985), modifiée d'après Todd et al. (1982) et Irvine et al. (1983).
- Fig. 10 - Coupe du complexe de Stillwater dans la région de Mountain View, en bordure nord du dôme de Beartooth, d'après Turner and al. (1985).
- Fig. 11 - Log stratigraphique du complexe de Stillwater montrant la localisation des diverses minéralisations (sulfures PGE et chromites) et les teneurs correspondantes (1) = Ni + Cu ; (2) = Pt + Pd ; (3) = roches contenant plus de 50 % de sulfures visibles (d'après Page et al., (1985).
- Fig. 12 - Comparaison des colonnes stratigraphiques des complexes du Bushveld et du Stillwater (d'après Campbell et al. 1983).
- Fig. 13 - Géologie du complexe de Sudbury d'après Naldrett (1986).
- Fig. 14 - Coupe simplifiée des 4 principaux types de gisements du complexe de Sudbury.
- 14a- Mine de Murray, d'après Souch et al. (1969).
- 14b- Mine du Strathcona, d'après Naldrett et Kullerud (1967).
- 14c- Mine de Froot, d'après Souch et al. (1969).
- 14d- Mine de McKim, d'après Clarke and Potapoff (1959).
- Fig. 15 - Schéma de la mise en place du complexe intrusif de Sudbury d'après Perédery Morrison (1984).
- Fig. 16 - Cadre géotectonique de la Sibérie Centrale, d'après Maksimov et Rudkevich (1974) pris dans Naldrett (1981).
- Fig. 17 - Carte géologique simplifiée de la région de Norils'k-Talnakh, d'après Akad.Nauk S.S.S.R. "Sulfidnye medno-nickelevye rudy Norils'kikh meslorozhdenii", Nauka, Moscow, 1981 pris dans Laznicka (1985).
- Fig. 18 - Principales minéralisations associées aux plateaux basaltiques de la plate-forme sibérienne, d'après Laznicka (1985).
- Fig. 19 - Coupe de l'intrusion mafique différenciée de Norils'k d'après Dobin et al. (1971) in Laznicka (1985).
- Fig. 20 - Coupe détaillée du gisement Ni-Cu (Partie nord de la zone sud-ouest du gisement), d'après Tarasov (1974) in Laznicka (1985).
- Fig. 21 - Répartition de la minéralisation dans le complexe intrusif de Talnakh d'après Distler and al. (1986).
- Fig. 22 - Modèle génétique de mise en place des minéralisations Ni-Cu de la région de Norils'k, d'après Distler V.V. et al. (1986).

- Fig. 23 - Carte géologique du Yilgarn Block en Western Australia (Australie), d'après Gresham et Loftus Hill (1981).
- Fig. 24 - Répartition des principaux gisements autour du dôme de Kambalda (Australie), d'après Gresham et Loftus Hill (1981).
- Fig. 25 - Principaux caractères de la série lithostratigraphique porteuse des minéralisations à Ni-Cu (PGE) du district de Kambalda (Australie), d'après Gresham et Loftus Hill (1981).
- Fig. 26 - Localisation paléogéographique des sites de dépôts des minéralisations à Ni-Cu PGE dans le district de Kambalda (Australie), d'après Gresham (1986).
- Fig. 27 - Modèle génétique de dépôt des minéralisations de Ni sulfurés associés aux volcanites péridotiques, d'après Keays, Nickel, Groves et Mc Goldrick (1982).
- Fig. 28 - Variation de la composition chimique de l'orthopyroxène, du spinelle chromifère et du plagioclase dans la partie supérieure de la "zone critique" du complexe du Bushveld d'après Johan (1986).
- Fig. 29 - Séquence verticale d'apparition des minéraux de PGE dans la zone critique entre les niveaux à chromite (UG2) et les niveaux sulfurés (Merensky Reef, Plat Reef) dans le complexe du Bushveld d'après Kinloch (1982).
- Fig. 30 - Evolution latérale de la distribution des PGE autour des zones de remaniements (pot holes) (a,b,c) d'après Kinloch (1982) et autour des pipes dunitiques d'après Peyer (1982).
- Fig. 31 - Schéma géologique des ensembles ultramafiques à mafiques (troctolite à gabbro-norite) associés à des zones de rift (type Noril'sk) : position des principales minéralisations.
- Fig. 32 - Répartition mondiale des principaux "Plateaux Basalts".
- Fig. 33 - Coupe schématique d'une greenstone belt et localisation des principales minéralisations à PGE.
- Fig. 34 - Principales ceintures protérozoïques au tour du bouclier canadien, d'après Thomas et Gibb (1985).
- Fig. 35 - Ceinture du Cape Smith (Nouveau Québec) montrant la localisation des principaux prospectifs à Ni-Cu et PGE d'après Clark, Belanger et Giovenazzo (1986).
- Fig. 36 - Carte géologique et suite lithostratigraphique de la région de Katiniq (Falconbridge Nickel Mines Staff).
- Fig. 37 - Zone d'extension du Nipissing Diabase en Ontario (Canada) d'après Card and Pattison (1973).
- Fig. 38 - Schéma géologique de mise en place des sills de Katiniq d'après Barnes, Coats et Naldrett (1982).
- Fig. 39 - Carte géologique de la "Eastern Gold field Province en Western Australia". d'après Groves, Leshner and Gee (1982).
- Fig. 40 - Position lithostratigraphique des gisements de Ni dans la ceinture de Norseman Wiluma en Western Australia, d'après Groves, Leshner and Gee (1982).
- Fig. 41 - Carte géologique simplifiée du bouclier canadien : localisation des complexes du Lac des Iles et de Coldwell, d'après Ayres and Thurston (1983).
- Fig. 42 - Carte géologique du complexe du Lac des Iles (Ontario) d'après Sutcliffe and Sweeney (1985).
- Fig. 43 - Carte géologique de la Roby zone du complexe du Lac des Iles d'après Mac Donald, 1985.
- Fig. 44 - Levé d'un affleurement de la Roby zone du complexe du Lac des Iles montrant la complexité lithologique et les relations entre les diverses unités d'après Sutcliffe and Sweeney (1985).
- Fig. 45 - Variation des teneurs en Ni et PGE dans un sondage recoupant la Roby zone et les formations encaissantes du complexe du Lac des Iles, d'après Watkinson and Dunning (1979).
- Fig. 46 - Carte géologique simplifiée du complexe de Coldwell en Ontario, d'après Watkinson, Whittaker and Jones (1983).

- Fig. 47 - Localisation du complexe ultramafique à mafique de Rana en Norvège et carte géologique simplifiée de ce complexe, d'après Boyd and Mathiesen (1979).
- Fig. 48 - Carte de répartition des complexes alaskéens en Alaska (USA) et en Oural (URSS), d'après Laznicka (1985).
- Fig. 49 - Cartes et coupes simplifiées de quelques gisements de type alaskéen (en Alaska : Duke Island West, Brady Glacier, Hope et Klukwan ; en Oural : Volkovskoe et Nizhnyi Tagil), d'après Laznicka (1985).
- Fig. 50 - Géologie simplifiée du complexe de Tulameen en Colombie Britannique (Canada) d'après Findlay (1969).
- Fig. 51 - Répartition des PGE et de l'or dans les divers types de roches du complexe de Tulameen, d'après St-Louis, Nesbitt and Morton (1986).
- Fig. 52 - Succession lithostratigraphique simplifiée d'une série ophiolitique type et position des diverses minéralisations associées, d'après Laznicka (1985).
- Fig. 53 - Teneurs en PGE des principaux gisements normalisés par rapport à celles des chondrites.
- Fig. 54 - Courbes de sulfuration des PGE en fonction de la température et de l'activité du soufre. Par comparaison, les courbes de Ni_3S_2 (heazlewodite) et de l'équilibre pyrite (Py), pyrrhotite (Po) sont indiquées. La température de formation des chromites ophiolitiques est estimée à 1050°C, d'après Johan (1986).
- Fig. 55 - Coupe du niveau Kupferschiefer dans le district de Lubin, d'après Kucha (1982).
- Fig. 56 - Principales provinces archéennes, d'après Condie (1981).
- Fig. 57 - Principales greenstone belts protérozoïques.

LISTE DES TABLEAUX

- Tabl. 1 - Tableau périodique des éléments : position des six métaux du groupe du platine.
- Tabl. 2 - Propriétés des métaux précieux (PGE + Au + Ag), d'après le comptoir Lyon Alemand Louyot (1986).
- Tabl. 3 - Moyennes annuelles des prix "Dealers" aux USA pour les six métaux du groupe du platine (en \$/Oz).
- Tabl. 4 - Prix maximum des éléments Pt, Pd, Rh et Ir en dollars US par once troy.
- Tabl. 5 - Evolution comparée des prix du platine et de l'or en dollars US par once troy entre 1944 et 1986.
- Tabl. 6 - Répartition par pays de la production de platinoïdes entre 1954 et 1984.
- Tabl. 7 - Production par pays des platinoïdes entre 1980 et 1984.
- Tabl. 8 - Classement des productions par valeur (en millions de dollars courants).
- Tabl. 9 - Tonnage de PGE produits pour l'Afrique du Sud, l'URSS et le reste du monde.
- Tabl. 10 - Statistique d'exploitation des principales mines d'Afrique du Sud (d'après Bache, 1980).
- Tabl. 11 - Classification des complexes mafiques et ultramafiques associés (d'après Naldrett et Cabri, 1976).
- Tabl. 12 - Classification des gisements de PGE (d'après Henry et Chèvremont, 1974).
- Tabl. 13 - Principales teneurs en PGE, Au, Ni, Cu dans les horizons UG2 et Merensky Reef du complexe de Bushveld, d'après Overbeek et al. (1984).
- Tabl. 14 - Evolution des teneurs en métaux de base et PGE dans quelques gisements du complexe de Sudbury, d'après Naldrett et al. (1984).
- Tabl. 15 - Concentrations des métaux dans le gisement de Falconbridge, d'après Owen and Coats (1984).
- Tabl. 16 - Composition du minerai et des mattes nickélicifères de Kambalda (Australie) (d'après Hudson et al., 1984).
- Tabl. 17 - Principaux caractères des trois classes de gisements du district de Kambalda (Western Australia) (d'après Gresham, 1986).
- Tabl. 18 - Principaux placers nourris par les complexes alaskéens en Alaska, en Oural et en Colombie, d'après Laznicka (1985).
- Tabl. 19 - Classification des principaux gisements à PGE (minerais primaires ou sous-produits) en fonction du cadre géodynamique des ensembles ultramafiques et mafiques porteurs.
- Tabl. 20 - Succession lithostratigraphique de la région de Chibougamau (Québec), d'après Allard (1984).
- Tabl. 21 - Classification des principaux gisements de nickel en Western Australia, d'après Groves, Leshner et Gee (1982).
- Tabl. 22 - Principaux caractères des gisements du type alaskéen, d'après Laznicka (1985).
- Tabl. 23 - Suite des associations minéralogiques depuis la roche fraîche de départ jusqu'aux roches les plus transformées lors des processus d'altération hydrothermales.

ANNEXE 1

MINERALOGIE DES PGE

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
ISO FERROPLATINUM	$\sim(\text{Pt, Ir, Os, Ru, Rh})_3\text{Fe, Ni, Cu, Sb}$ Pt > other Pt group; Fe > other metals.	$\sim\text{Pt}_3\text{Fe}$	Primitive cubic	Defined as primitive cubic alloy with composition near Pt_3Fe .
ISOMERTIEITE	$(\text{Pd, Cu})_5(\text{Sb, As})_2$ Sb > As	?	Cubic $Fd\bar{3}m$	Synthesis data may be helpful.
KOTULSKITE	$(\text{Pd, Ni})(\text{Te, Bi, Sb, Pb})$ Pd > Ni; Te > Bi, Sb, Pb	PdTe	Hexagonal $P6_3/mmc$	
LAURITE	$(\text{Ru, Ir, Os})\text{S}_2$ Ru > Ir, Os	RuS_2	Cubic $Pa\bar{3}$	
MALANITE*	$(\text{Cu, Pt, Ir, Pd, Fe, Ni})\text{S}_2$ Cu, Pt, Ir major	?	Cubic	Single-crystal and synthetic data necessary. May be related to synthetic CuS_2 .
MERENSKYITE	$(\text{Pd, Pt, Ni})(\text{Te, Bi, Sb})_2$ Pd > Pt, Ni; Te > Bi, Sb	PdTe_2	Trigonal $P\bar{3}1$	
MERTIEITE	$\sim(\text{Pd, Cu})_5(\text{Sb, As})_2$ Pd > Cu; Sb > As = Group I Sb > As = Group II	?	Pseudohexagonal possibly monoclinic	Re-analysis of Group II mertieite gave $\text{Pd}_8(\text{Sb, As})_3$ stoichiometry and rhombohedral symmetry.
MICHENERITE	$(\text{Pd, Pt, Ni})(\text{Bi, Sb})\text{Te}$ Pd > Pt, Ni; Bi > Sb	PdBiTe	Cubic $P2_13$	
MONCHEITE	$(\text{Pt, Pd, Ni})(\text{Te, Bi, Sb})$ Pt > Pd, Ni; Te > Bi, Sb	PtTe_2	Hexagonal $P\bar{3}m1$	
NIGGLIITE	$(\text{Pt, Pd})(\text{Sn, Bi, Te})$ Pt > Pd; Sn > Bi, Te	PtSn	Hexagonal $P6_3/mmc$	
OOSTERBOSCHITE	$(\text{Pd, Cu})_7\text{Se}_5$ Pd > Cu	?	Orthorhombic	No known synthetic equivalent.
OSARSITE	$(\text{Os, Ru, Ni, Ir, Pd, Pt, Rh})\text{AsS}$ Os > other metals	OsAsS	Monoclinic	

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
OSMIRIDIUM	$\text{Ir, Os, Ru, Pt, Pd, Rh, Fe, Cu, Ni}$ Ir, Os major	Ir, Os	Cubic $Fm\bar{3}m$	Redefined as cubic (Ir, Os) alloys with no single other element > 10 at.% of total, and where $\text{Ir} < 80$ at.% of (Ir+Os).
OSMIUM	$\text{Os, Ir, Ru, Pt, Pd, Rh, Fe, Cu, Ni}$ Os major	Os	Hexagonal $P6_3/mmc$	Redefined as hexagonal alloys with > 80 at.% Os.
PALLADIUM	$\text{Pd, Pb, Rh, Pt, Os, Ir}$ Pd > other metals	Pd	Cubic $Fm\bar{3}m$	
PALLADOARSENIDE	$(\text{Pd, Pt, Au, Cu})_2(\text{As, Sb, Te})$ Pd > Pt, Au, Cu; As > Sb, Te	Pd_2As	Monoclinic	
PAOLOVITE	$(\text{Pd, Pt})_2\text{Sn}$ Pd > Pt	Pd_2Sn	Orthorhombic	
PLATINIRIDIUM	$\text{Ir, Pt, Os, Ru, Fe, Cu, Ni}$ Ir, Pt > other metals	Ir, Pt Ir 50-80 at.% of Ir+Pt	Cubic	
PLATINUM	Pt, Pd, Ir etc. Pt > other metals	Pt Pt > 80 at.%	Cubic $Fm\bar{3}m$	Ferrous platinum = fcc. Pt with up to 20 at.% Fe.
PLUMBOPALLADINITE	$(\text{Pd, Ag})_3(\text{Pb, Bi, Sn, Cu, Sb})_2$ Pd > Ag; Pb > other elements	Pd_3Pb_2	Hexagonal	Synthetic Pd_3Pb_2 shows a range of composition.
POLARITE	$\text{Pd}(\text{Bi, Pb})$ Bi > Pb	PdBi	Orthorhombic	
POTARITE	PdHg	PdHg	Tetragonal $P4/mmm$	
RHODIUM	Rh, Pt Rh > Pt	Rh	Cubic	
RUSTENBURGITE	$(\text{Pt, Pd})_3\text{Sn}$ Pt > Pd	Pt_3Sn	Cubic $Fm\bar{3}m$	Disordered due to strain.

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
ARSENOPALLADINITE	$Pd_5(As,Sb)_2$?	Triclinic	Recently redefined with Sb as an essential constituent.
ATHENEITE	$(Pd,Hg,Au,Cu)_3(As,Sb)$ Pd,Hg,As major	$(Pd,Hg)_3As?$	Hexagonal $P6/mmm$	Mineral as defined suggests Hg essential constituent. Synthesis would be useful.
ATOKITE	$(Pd,Pt)_3Sn$ Pd>Pt	Pd_3Sn	Cubic $Fm\bar{3}m$	Disordered due to strain.
BITEPLAPALLADITE*	$(Pt,Pd)(Te,Bi)_2$ Pt>Pd;Te>Bi	?	Hexagonal	Unnecessary name for moncheite.
BITEPLATINITE*	$(Pd,Pt,Ni)(Te,Bi)_2$?	Hexagonal	Unnecessary name for merenskyite.
BORISHANSKIITE	$(Pd,Ag)_{1+x}(As,Pb)_2$ As>Pb	$Pd_{1+x}(As,Pb)_2?$	Orthorhombic	Very similar to polarite. Single-crystal data and synthesis desirable.
BOROVSKITE	$(Pd,Pt,Ni)_{1.5}(Sb,Bi)_{0.5}Te_{2.00}$ Pd>Pt,Ni;Sb>Bi	Pd_3SbTe_4	Cubic	
<u>BRAGGITE</u>	$(Pt,Pd,Ni)S$ Pt>Pd>Ni	$(Pt,Ni)_{6-x}Pd_{2+x}S_3?$	Tetragonal $P4_2/m$	Isostructural with PdS.
CHENGBOLITE*	$(Pt,Pd)Te_2$ Pt>Pd	$PtTe_2$	Hexagonal	Unnecessary name for moncheite.
COOPERITE	$(Pt,Pd,Ni)S$ Pt>Pd,Ni	PtS	Tetragonal $P4_2/mmc$	
DAOMANITE*	$(Cu,Pt)_2AsS_2$ Cu>Pt	?	Orthorhombic	
DAYINGITE*	$Cu(Co,Pt)_2S_4$ Co>Pt	?	Cubic $Fm\bar{3}m$	
ERLICHMANITE	$(Os,Ir,Rh,Ru,Pd)S_2$ Os>other Pt group	OsS_2	Cubic $P2_3$	Replaces "roseite".

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
FENGLUANITE*	$(Pd,Pt)_3(As,Sb)$ Pd>Pt,As>Sb Pt-Fe	Pd_3As	Orthorhombic	Unnecessary name for antimonial guanglinite.
Ferro platinum FROODITE	$(Pd,Pt)(Bi,Te)_2$ Pd>Pt;Bi>Te	$PdBi_2$	Monoclinic $C2/m$	
<u>GEVERSITE</u>	$Pt(Sb,As,Bi)_2$ Sb>As,Bi	$PtSb_2$	Cubic $P2_3$	
GUANGLINITE*	Pd_3As	Pd_3As	Orthorhombic	Single-crystal work necessary. Synthetic Pd_3As reported to be tetragonal.
HEXASTIBIOPALLADITE*	$PdSb$	$PdSb$	Hexagonal	Unnecessary name for sudburyite.
HEXATESTIBIOPAN- ICKELITE*	$(Ni,Pd)_2(Sb,Bi)Te$ Ni>Pd;Sb>Bi	?	Hexagonal	Single-crystal and synthesis data necessary.
HOLLINGWORTHITE	$(Rh,Ru,Pt,Pd,Co,Ni)AsS$ Rh>other Pt group	$RhAsS$	Cubic $P2_3$	
HONGSHIITE*	$PtCuAs$?	Hexagonal	Single-crystal and synthesis data necessary.
INSIZWAITE	$(Pt,Pd,Ni)(Bi,Te,Sb,Sn)_2$ Pt>Pd,Ni;Bi>Te,Sb,Sn	$PtBi_2$	Cubic $P2_3$	
IRARSITE	$(Ir,Ru,Rh,Pt,Pd,Os,Ni,Co)AsS$ Ir>other metals	$IrAsS$	Cubic $P2_3$	
IRIDARSENITE	$(Ir,Ru,Os,Rh,Pt,Cu)(As,S)_2$ Ir>other metals	$IrAs_2$	Monoclinic	
<u>IRIDIUM</u>	Ir,Os,Ru,Pt,Pd,Rh,Fe,Ni Ir major	Ir	Cubic $Fm\bar{3}m$	Redefined as cubic alloys with ≥ 80 at. % Ir.
IRIDOSMINE	$Os,Ir,Ru,Pt,Pd,Rh,Fe,Cu,Ni$ Os,Ir major	Os,Ir	Hexagonal $P6_3/mmm$	Redefined as hexagonal (Os,Ir) alloys with no single other element >10 at. % of total, and where Os <80 at. % of (Os+Ir).

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
RUTHENARSENITE	(Ru,Ni,Rh,Ir,Pd,Os)As	RuAs	Orthorhombic	
RUTHENIRIDOSMINE	Ru,Os,Ir,Pt,Pd,Rh,Fe,Cu,Ni Ru,Os,Ir major	Ru,Os,Ir	Hexagonal $P6_3/mmc$	Redefined as hexagonal (Os,Ir,Ru) alloys where Os <80 at.% of (Os+Ir+Ru) and Ru is 10 to 80 at.% of (Os+Ir+Ru), also where no single other element >10 at.% of total.
RUTHENIUM	Ru,Ir,Rh,Pt,Os,Pd,Fe Ru major	Ru	Hexagonal $P6_3/mmc$	Redefined for hexagonal alloys with ≥ 80 at.% Ru.
RUTHENOSMIRIDIUM	Ir,Os,Ru,Pt,Pd,Rh,Fe,Ni Ir,Os,Ru major	Ir,Os,Ru	Cubic $Fm\bar{3}m$	Redefined as cubic (Ir,Os,Ru) alloys, where Ir <80 at.% of (Ir+Os+Ru) and Ru >10 at.% of (Ir+Os+Ru), also with no single other element >10 at.% of total.
<u>SPERRYLITE</u>	(Pt,Rh,Ir)(As,Sb,S) ₂ Pt>Rh,Ir;As>Sb,S	PtAs ₂	Cubic Pa $\bar{3}$	
STANNOPALLADINITE	(Pd,Cu) ₃ Sn ₂ Pd>Cu	\sim Pd ₃ Sn ₂	Hexagonal	
<u>STIBIOPALLADINITE</u>	(Pd,Cu) ₅ (Sb,As,Sn) ₂ Pd>Cu;Sb>As,Sn	Pd ₅ Sb ₂ ?	Hexagonal	May be Pd ₅ Sb ₂ -.
STILLWATERITE	Pd ₉ (As,Sb,Te,Sn,Bi) ₃ As>Sb,Te,Sn,Bi	Pd ₉ As ₃	Hexagonal	
<u>STUMPFILITE</u>	Pt(Sb,Bi) Sb>Bi	PtSb	Hexagonal	
SUDBURYITE	(Pd,Ni)(Sb,Bi,Te,As) Pd>Ni;Sb>Bi,Te,As	PdSb	Hexagonal	
TELARGPALITE	(Pd,Ag,Pb,Bi) _{4+x} (Te,Se) Pd,Ag>Pb,Bi;Te>Se	?	Primitive cubic	Single-crystal data and synthesis necessary.

<u>Mineral</u>	<u>General Composition</u>	<u>End-member</u>	<u>Symmetry</u>	<u>Remarks</u>
TEMAGAMITE	Pd ₃ Hg(Te,Bi,Sb) ₃ Te>Bi,Sb	Pd ₃ HgTe ₃	Orthorhombic	Single crystal data necessary.
TESTIBIOPALLADITE*	(Pd,Ni)(Sb,Bi)Te Pd>Ni;Sb>Bi	PdSbTe	Cubic	Antimony analogue of michenerite.
TETRAFERROPLATINUM	Pt,Fe,Ir,Cu,Ni,Sb Pt>Fe>Ir,Cu,Ni,Sb	\sim PtFe	Tetragonal	Redefined for tetragonal alloys near PtFe composition.
TULAMEENITE	(Pt,Ir) ₂ (Fe,Cu,Ni,Sb) Pt>Ir;Fe>Cu>Ni,Sb	Pt ₂ FeCu	Tetragonal	
VINCENTITE	(Pd,Pt) ₃ (As,Sb,Te) Pd>Pt;As:(Sb+Te) \approx 1:1	?	?	Single crystal and synthesis data necessary.
VYSOTSKITE	(Pd,Ni,Pt) ₅ Pd>Ni,Pt	Pd ₅	Tetragonal $P4_2/m$	
XINGZHONGITE*	(Ir,Cu,Rh,Pb,Os,Pt,Fe) ₅ Ir,Cu,Rh major	?	Cubic or pseudocubic	Synthesis data would be useful.
YANZHONGITE*	Pd(Te,Bi) Te>Bi	PdTe	Hexagonal	Unnecessary name for kotulskite.
YENSHANITE*	(Pd,Pt,Ni) ₅ Pd>Pt,Ni	Pd ₅	Tetragonal	Unnecessary name for vysotskite.
YIXUNITE*	Pt _{1.0} In _{0.86}	PtIn?	Cubic $Fm\bar{3}m$	PtIn has not been reported in the Pt-In system.
ZVYACINSEVITE	(Pd,Pt,Au)(Pb,Sn) Pd>Pt,Au;Pb>Sn	Pd ₃ Sn	Cubic $Fm\bar{3}m$	

ANNEXE 2

**LES SERIES KOMATIITIQUES
PRINCIPAUX CARACTERES D'IDENTIFICATION**

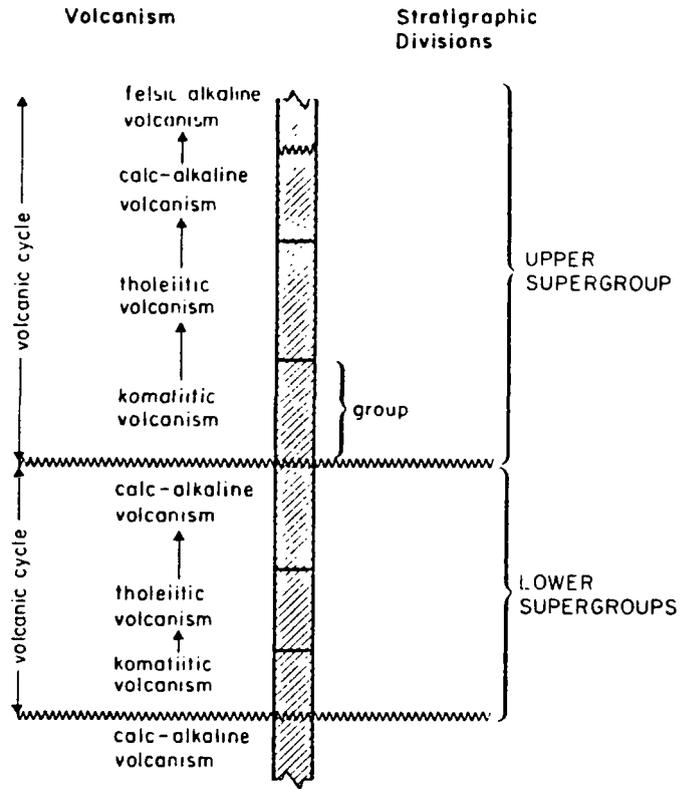
Critères de reconnaissances des laves komatiitiques dans les ensembles volcaniques.

Features indicating volcanic origin	Chilled flow tops, polyhedral jointing, well-developed spinifex texture, pillows, fragmental structures (tuffs and breccias). Rapid-cooling textures, abundant glass.
Features indicating ultramafic composition	A predominance of olivine and pyroxene in a once-glassy groundmass, MgO > 18% (anhydrous basis). This value corresponds roughly to 20–35% modal olivine, 15–30% normative olivine, and 65–70% normative mafic minerals.

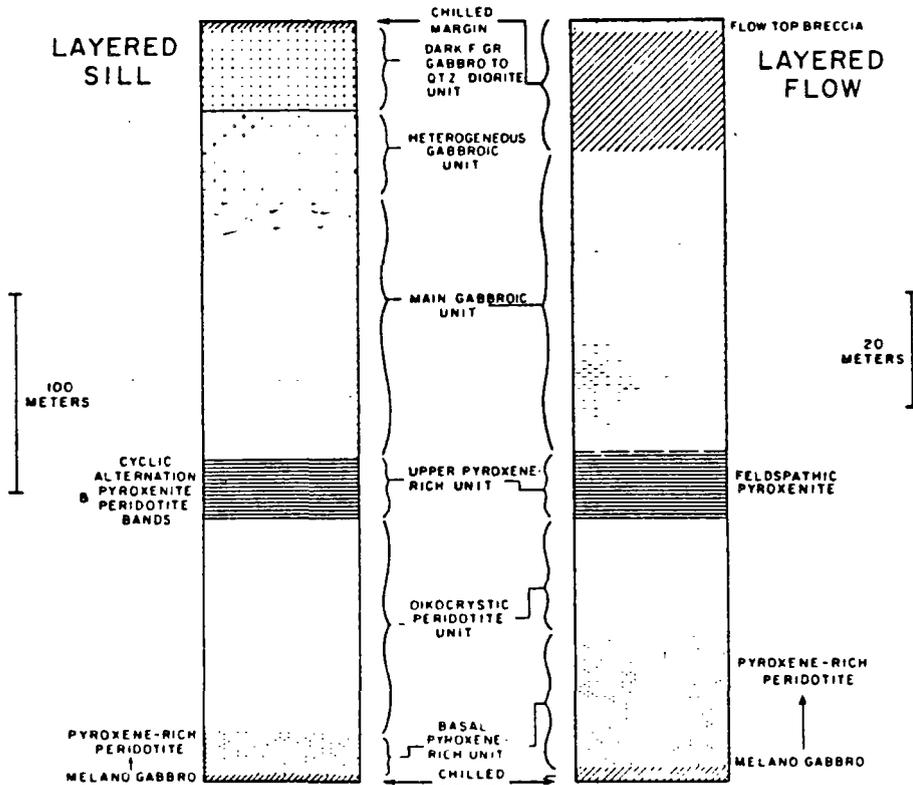
Caractères des laves komatiitiques

Geological	Spatial associations with komatiite; ideally within volcanic sequences within which the lava compositions change progressively from ultramafic to mafic.
Petrographic	Most characteristic are spinifex textures: the olivine type in lavas with MgO between 18 and about 12%, and the pyroxene type in lavas with MgO between 18 and 9%. Olivine porphyritic textures do occur, but in certain cases a linkage between lavas with this texture and komatiite is difficult to verify. Basalts with MgO < 10% have few diagnostic features. Highly magnesian pigeonite (Arndt & Fleet 1979) and unusually sodic plagioclase (Binns <i>et al.</i> , this volume, Ch. 9) are possibly diagnostic.
Chemical	High Mg, Ni, Cr; low alkalis, TiO ₂ , Fe:Mg; high SiO ₂ at given MgO; CaO:Al ₂ O ₃ > 0.8–1.0. All of these features are characteristic but not necessarily diagnostic.

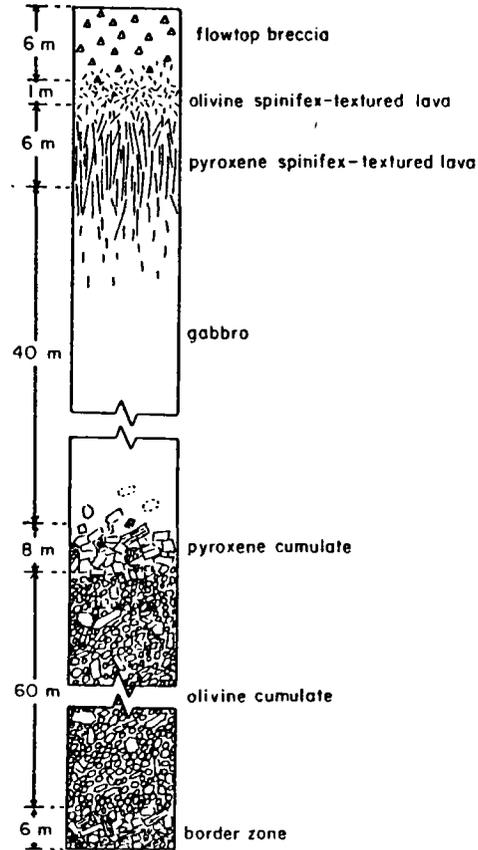
Position des komatiites dans la pile volcanique.
(exemple de l'Abitibi, Canada)



Coupe simplifiée d'un sill et d'une coulée stratifiée.
d'après D.M. Francis et A.J. Hynes (1979)

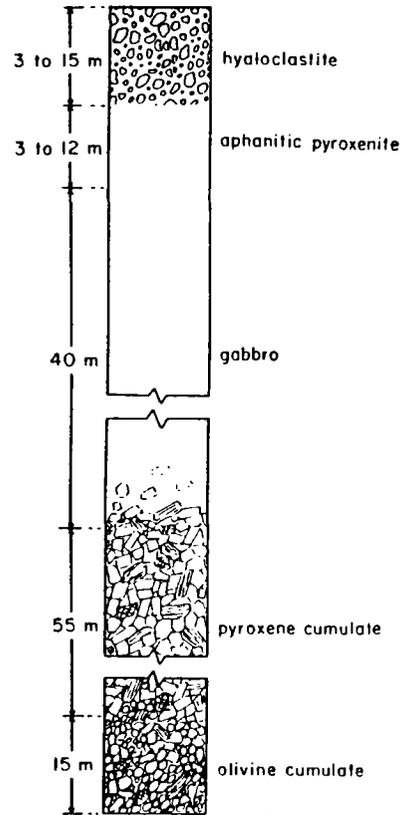


Evolution texturale entre une coulée pyroxénitique, tholéiitique et komatiitique
d'après N.T. Arndt et al. (1977)



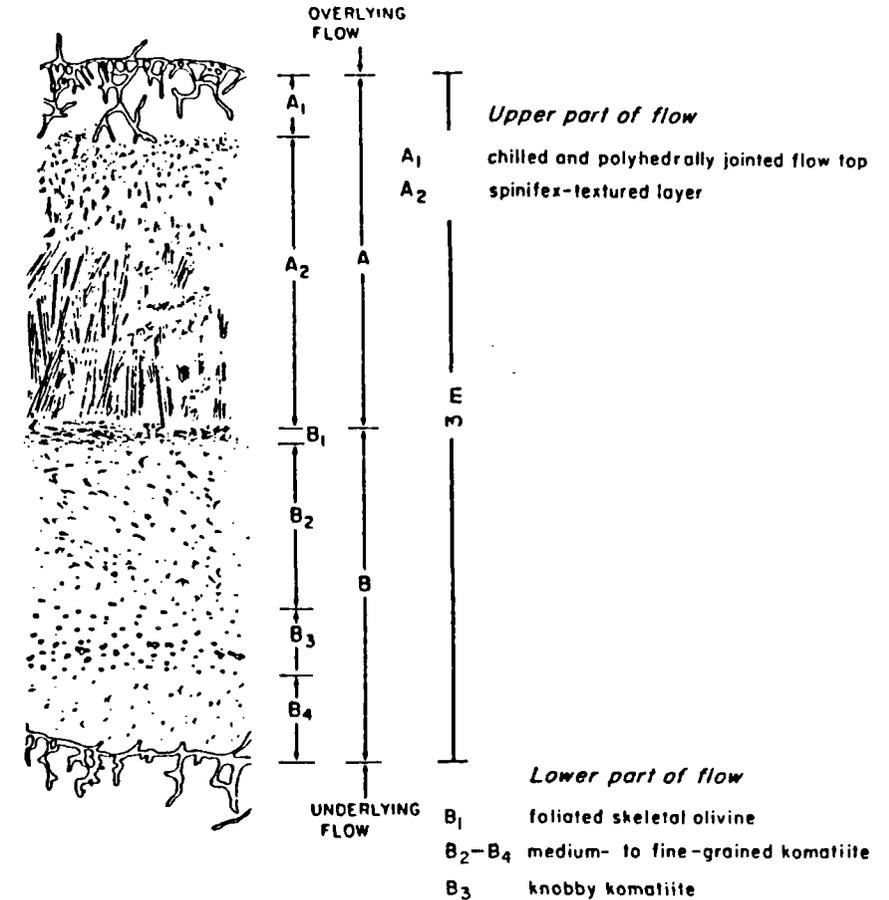
Coulée pyroxénitique

Textural variation in 'pyroxenitic' flow, Munro Township. (Reproduced from Arndt *et al.* 1977.)



Coulée tholéiitique

Textural variation in tholeiitic flow, Munro Township. (Reproduced from Arndt *et al.* 1977.)



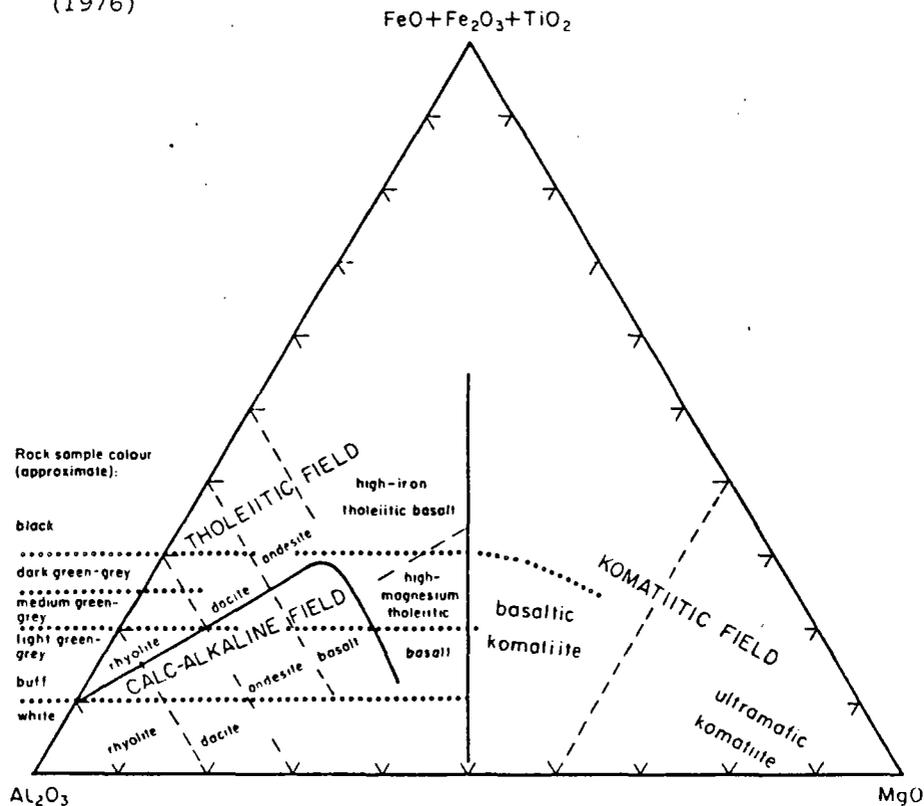
coulée komatiitique

Cross section of the komatiite flow studied in this work (reproduced from Fig. 7 of Arndt *et al.* 1977). The flow ranges in thickness from 2.5-3.0 m, and the sample localities are shown on the left.

Composition minéralogique et texture des séries komatiitiques d'après B. Auvray et al. (1982)

	<i>Texture and structure</i>	<i>Mineralogical compositions</i>	<i>MgO content</i>
'komatiites' with serpentine	coarse-grained texture	antigorite + chrysotile + magnetite + olivine Fo ₉₆ (residual)	MgO > 30%
	cumulate texture pillow lavas (rare)	antigorite + lizardite + brucite + magnetite antigorite + magnetite Cr + ilmenite + magnesite + dolomite	
komatiites with tremolite	schistose rocks (soapstone)	antigorite + talc + magnetite Cr + ilmenite ± magnesite + dolomite ± breunnerite ± pennine ± clinocllore	30% > MgO > 18%
		'serpentine' + diopside (residual) + tremolite + magnetite Cr ± calcite	
	spinifex-textured rocks	tremolite + Mg chlorite + talc ± opaques ± carbonate ± pennine	
komatiitic basalts	pillow lavas (rare) tuffs	tremolite + Mg chlorite + magnetite + ilmenite + olivine (Fo ₇₀)	18% > MgO > 12%
	massive rocks with porphyro- blastic olivines	tremolite + anthophyllite + fe dolomite + clino- chllore + opaques (ilmenite, magnetite Cr, pyrite, chalcopyrite)	
	intersertal divergent texture pyroclastic textures pillow lavas	actinolite + plagioclase (albite-oligoclase) + epidotes ± chlorite ± biotite ± quartz tremolite + epidotes + chlorites (pillows)	
	coarse-grained textures	actinolite + plagioclase (albite-oligoclase) ± epidote ± chlorite ± biotite ± quartz.	
	doleritic (interstitial) textures	Hornblende + plagioclase (oligoclase-andesine) ± chlorite ± epidote ± biotite ± actinolite ± garnet	MgO < 12%
	microlitic textures		

Diagramme de Jensen (FeO + Fe₂O₃ + TiO₂ - MgO - Al₂O₃) permettant de suivre l'évolution chimique des suites volcaniques d'après Jensen L.S. (1976)



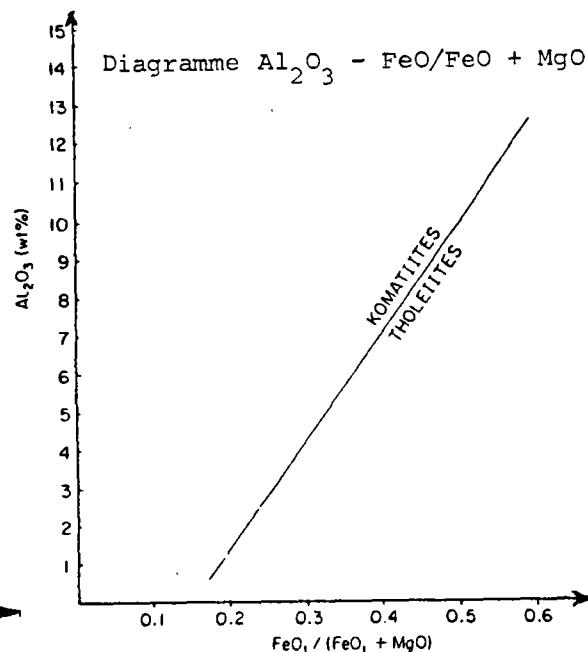
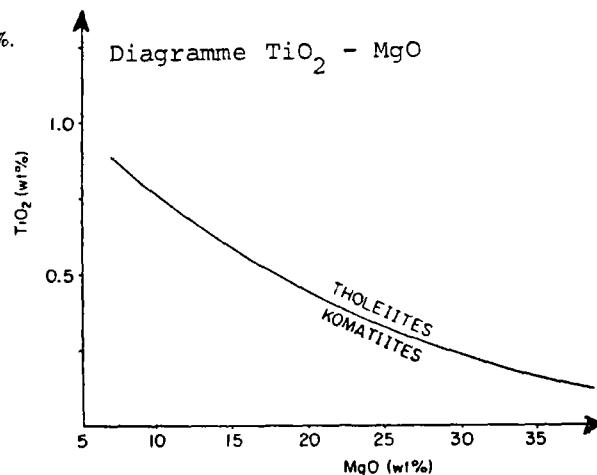
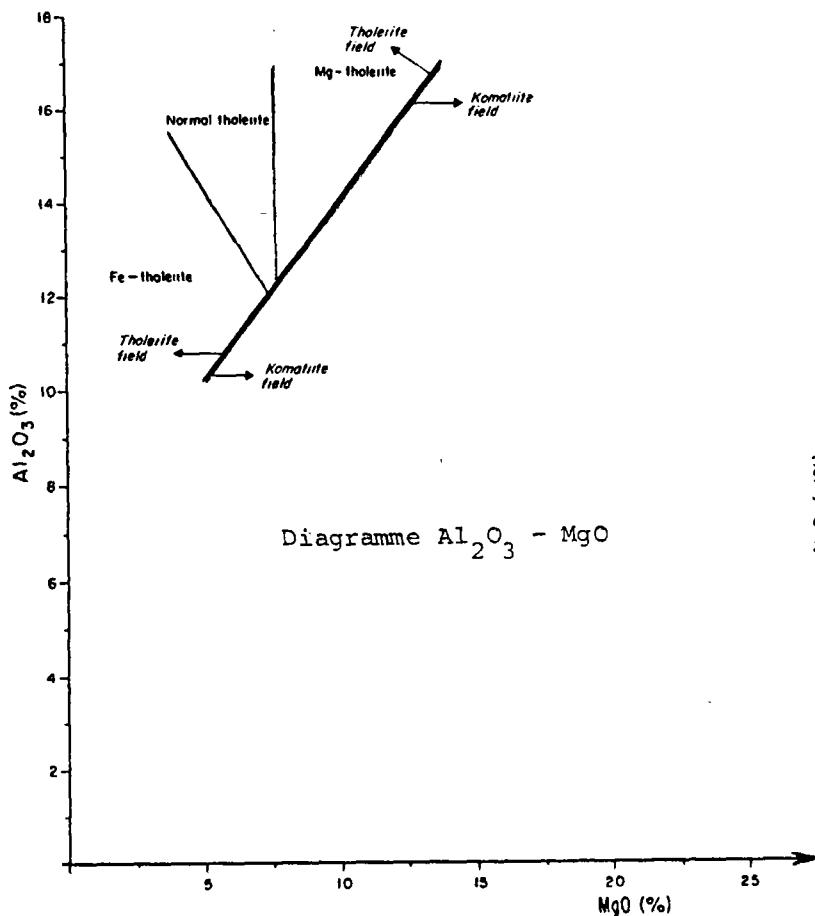
Quelques analyses de roches à MgO élevé : komatiites, serpentinites et tholéiites.

Average compositions (anhydrous) of the main rock types in the Suomussalmi, Kuhmo and Tipasjarvi greenstone belts. Analyst F. Vidal, Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles, Université de Rennes. All major oxides were analysed by the XRF method except for MgO and Na₂O, which were determined by the atomic absorption method. Total iron is reported as Fe₂O₃. To calculate average compositions, each analysis has been first recalculated to 100% anhydrous with FeO* as total iron; then the average is calculated.

	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	42.73	42.40	44.44	46.79	47.34	49.13	50.61	50.58
Al ₂ O ₃	2.14	2.49	3.54	7.87	7.75	10.99	14.82	13.06
FeO*	10.56	10.44	12.91	10.54	10.76	11.53	11.07	14.74
MnO	0.16	0.10	0.24	0.17	0.18	0.23	0.22	0.26
MgO	43.53	42.57	34.32	26.04	25.80	14.98	8.31	6.58
CaO	0.61	1.72	4.27	7.73	7.60	10.99	11.70	9.34
Na ₂ O	—	0.10	—	0.32	0.09	1.23	2.14	2.84
K ₂ O	—	0.02	0.06	0.03	0.04	0.18	0.25	0.51
TiO ₂	0.11	0.13	0.22	0.40	0.37	0.65	0.78	1.91
P ₂ O ₅	0.04	0.02	0.05	0.08	0.08	0.09	0.11	0.18
n =	19	10	10	17	3	16	48	24

n, Number of analyses.

- (1) Serpentine (cumulate) with MgO > 40%.
- (2) 'Soapstones'.
- (3) Komatiites with serpentine (cumulate) with 30% < MgO < 40%.
- (4) Komatiites (18% < MgO < 30%).
- (5) Komatiites with spinifex texture.
- (6) Komatiitic basalts (12% < MgO < 18%).
- (7) Komatiitic basalts (MgO < 12%).
- (8) Tholeiites.



Principales paragenèses diagnostiques dans les séries volcaniques ultramafiques à felsiques en fonction de l'intensité du métamorphisme (exemple des laves de l'Abitibi) (d'après Jolly W.T., 1982).

Facies Zone	Prennite-Pumpellyite		Greenschist		Hb	Amphibolite		Mg-Amph	OPx
	Pr-Pu	Pu-Ep	Act	Bio		Gt	CPx		
Quartz									
Carbonate									
Chlorite									
Albite									
Hematite									
Illite-Smectite									
Chrysotile-Lizardite									
Sphene									
Hydrogarnet									
Sericite									
Talc									
Brucite									
Prennite									
Pumpellyite									
Antigorite									
Epidote									
Actinolite-Tremolite									
Stilpnomelane									
Biotite									
Ca-feldspar				An 15	35	75			
Magnetite									
Hornblende									
Olivine									
Almandite									
Diopside									
Cumingtonite									
Enstatite									
Relic Minerals:									
Plagioclase									
Olivine									
Clinopyroxene									

ACF Assemblages
 Class
 Mg / Mg + Si

Rhyolite Dacite Andesite Basalt Basalt Mafic Basalt Komatiite Accumulates Assemblages

0 5 15 25 35 40 45 55 70

Quartz										
Calcite										Magnetite
Chlorite										Talc & Chlorite
										Chlorite
										Talc
										Chrysotile-Lizardite
Illite-Smectite-Vermiculite										Brucite
										Illite
										Brucite
Prennite										
Pumpellyite										
										Antigorite
Actinolite										Actinolite Tremolite
										Tremolite
Stilpnomelane										
Biotite										
Hornblende										Hornblende
Almandite										
Diopside										Diopside
										Olivine
										Cumingtonite
										Anthophyllite
Enstatite										Enstatite

Evolution des paragenèses dans la suite volcanique komatiites à rhyolites en fonction du rapport Mg/Mg + Si.

Principaux minéraux d'altération des basaltes komatiitiques
et des komatiites d'après Ludden J.N. and Gélinas L. (1982).

<i>Primary mineralogy</i>	<i>Pseudomorphs; mineral composition</i>
<i>komatiitic basalt</i>	
olivine	chlorite-actinolite chlorite-quartz-tremolite chlorite-tremolite quartz albite-chlorite carbonate-chlorite
clinopyroxene	actinolite ± clinopyroxene actinolite-chlorite
orthopyroxene	bastite, chlorite
plagioclase	albite
groundmass	albite-clinozoisite chlorite-opaque minerals ± (albite-epidote)
vein minerals	chlorite-calcite-actinolite ± (albite-epidote)
accessory minerals	chlorite, tremolite-epidote, calcite ilmenite, leucoxene, spinel, apatite
<i>komatiites</i>	
olivine	serpentine serpentine-magnetite serpentine-chlorite-magnetite
clinopyroxene	actinolite actinolite-chlorite
groundmass	chlorite-magnetite serpentine-talc-magnetite
vein minerals	magnetite

Schéma de mise en place des minéralisations sulfurées
à la base des coulées de komatiites d'après Naldrett A.J.
and Campbell I.H. (1982).

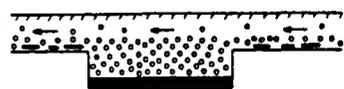
- (1) Advancing flow with suspended olivine phenocrysts and sulphides near base.



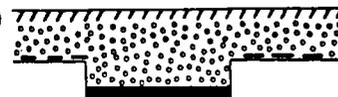
- (2) Sulphides riffled out and start to chill. Some olivine phenocrysts riffled out.



- (3) Flow thickens. Olivine phenocrysts and minor sulphides accumulate near base of flow outside depression.



- (4) Movement stops. Limited fractional crystallization of extreme top of flow. Development of spinifex zone.



Flow thickens. Olivine phenocrysts and minor sulphides accumulate near base of flow outside depression.

Movement stops. Limited fractional crystallization of extreme top of flow. Development of spinifex zone.

Références bibliographiques prises dans :

KOMATIITES

Edited by

N.T.Arndt and E.G.Nisbet

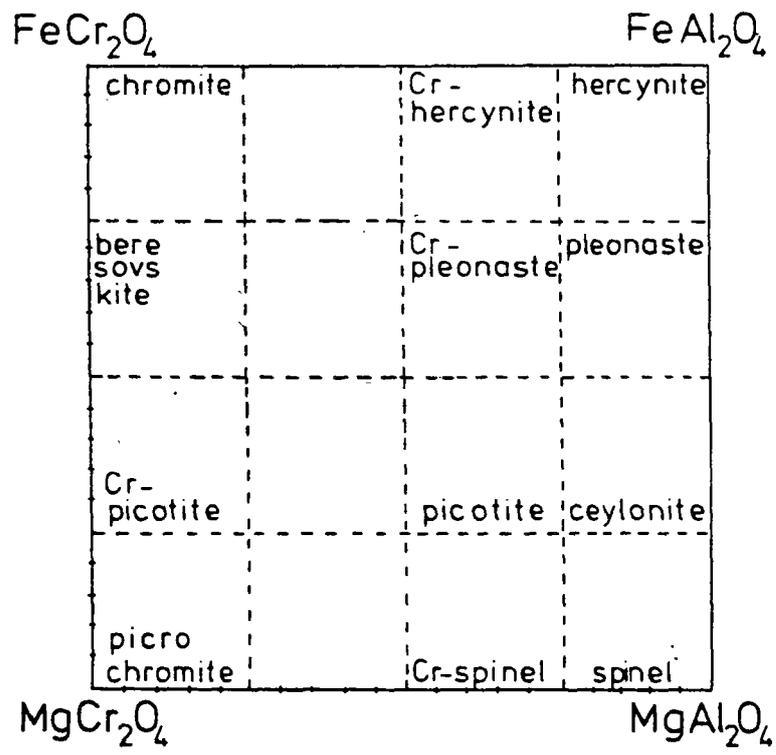
*Max-Planck-Institut
für Chemie, Mainz*

*University of Saskatchewan
Saskatoon*

London
GEORGE ALLEN & UNWIN
Boston Sydney

ANNEXE 3

PRINCIPAUX SPINELLES



Solid solution of $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$ partly with Fe^{3+} , Ti (after WINCHELL in DONATH 1962 op. cit.). Dots: Middle Devonian detrital Cr-Al spinels.