

MINÉRALOGIE DES ÉLÉMENTS DU GROUPE DU PLATINE DANS LES CHROMITITES DE L'OPHIOLITE DE THETFORD MINES, QUÉBEC

LUC CORRIVAUX

Département des Sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec H3C 3P8

J.H. GILLES LAFLAMME

Centre Canadien de la Technologie des Minéraux et de l'Énergie (CANMET),
555, rue Booth, Ottawa, Ontario K1A 0G1

SOMMAIRE

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB) d'échantillons provenant de six gîtes de chromite du canton de Coleraine, dans la région de Thetford Mines (Québec), a mené à l'identification d'une vingtaine de minéraux du groupe du platine (MGP), dont: laurite, isoferroplatine, awaruite platinifère, (Ni,Pt)₃Fe, une série d'alliages de Pt-Pd-Cu-Fe et Cu-Ni-Fe-Pt-Pd complexes, cabriite Pd₂SnCu, un alliage Ru-Os-Ir, un minéral inconnu ayant la formule chimique probable RhNiAs, et un autre phase inconnue qui serait l'équivalent rhodifère de la cabriite. Tous ces minéraux mesurent 20 µm de diamètre ou moins. Deux paragenèses minérales importantes sont identifiées. Il y a d'abord un assemblage de minéraux qui inclut surtout des sulfures à Ru-Os-Ir, englobés dans la chromite, et qui sont probablement d'origine magmatique. Une série de minéraux xénomorphes, de granulométrie plus grossière, sont présents surtout dans la serpentine et la magnétite. Ce groupe, qui inclut des alliages à rhodium, platine et palladium ainsi que quelques arséniures, témoigne de l'altération des minéraux primaires associée à la serpentisation des roches ultramafiques du complexe ophiolitique de Thetford Mines.

Mots-clés: ophiolite, Thetford Mines, minéraux du groupe du platine, chromite platinifère, cabriite, awaruite platinifère, Québec.

ABSTRACT

An investigation of samples from six occurrences of chromite in the Thetford Mines area, Quebec, by scanning electron microscopy has led to the identification of twenty or so platinum-group minerals (PGM), among which are laurite, isoferroplatinum, platinum-bearing awaruite (Ni,Pt)₃Fe, a series of complex Pt-Pd-Cu-Fe and Cu-Ni-Fe-Pt-Pd alloys, cabriite Pd₂SnCu, Ru-Os-Ir alloy, and an unknown mineral having RhNiAs as its likely formula, and another unknown that is likely the Rh equivalent of cabriite. In all cases, the grains are at most 20 µm across. We have identified two important associations of the PGM. The first includes the Ru-Os-Ir-bearing sulfides, occluded in chromite and likely of magmatic origin. The second consists of the anhydrous phases, typically of coarser grain-size, which are mainly located in serpentine and magnetite: Rh-, Pt- and Pd-bearing alloys, and a number of arsenides. The

second group results from the alteration of primary phases, which accompanied the serpentisation of the ultramafic members of the Thetford Mines ophiolitic complex.

(Translated by the editor)

Keywords: ophiolite, Thetford Mines, platinum-group minerals, platinum-bearing chromite, cabriite, platinum-bearing awaruite, Quebec.

INTRODUCTION

Traditionnellement, les ophiolites dans leur ensemble n'ont jamais été reconnus pour leur potentiel en éléments du groupe du platine. Selon Oshin et Crockett (1982), qui ont fait une étude géochimique et pétrologique détaillée de la répartition des éléments du groupe du platine (EGP) dans l'ophiolite de Thetford Mines, cette absence de potentiel ne pourrait être qu'apparente, comme tend à le prouver la présence de platine dans les graviers aurifères, près de certaines ophiolites comme en Oural ou en Beauce (Logan 1864).

A plusieurs endroits dans le monde, les roches ultramafiques et, en particulier, les chromites des complexes ophiolitiques ont été l'objet d'une recherche pour les EGP. Citons par exemple les travaux de Stockman et Hlava (1984), de Page *et al.* (1986), de Talkington (1986), de Johan (1986), de Prichard *et al.* (1986) et de Nilsson (1989). Les premières descriptions précises d'une minéralisation en platine-palladium dans les chromites d'une ophiolite nous proviennent de Neary *et al.* (1984) et de Gunn *et al.* (1985), pour l'ophiolite de Shetland.

Les complexes ophiolitiques de Thetford Mines et d'Asbestos ne sont pas en reste puisqu'à partir de 1986, la plupart des anciennes exploitations de chromite de l'Estrie et de la Beauce, dans le sud du Québec, ont fait l'objet d'une série d'analyses chimiques qui ont révélé, dans certains cas, de fortes anomalies positives en EGP (Gauthier et Trottier 1987, Gauthier *et al.* 1988). L'objectif principal de la présente étude est justement de tenter de mieux reconnaître ces anomalies et de les expliquer des points de vue

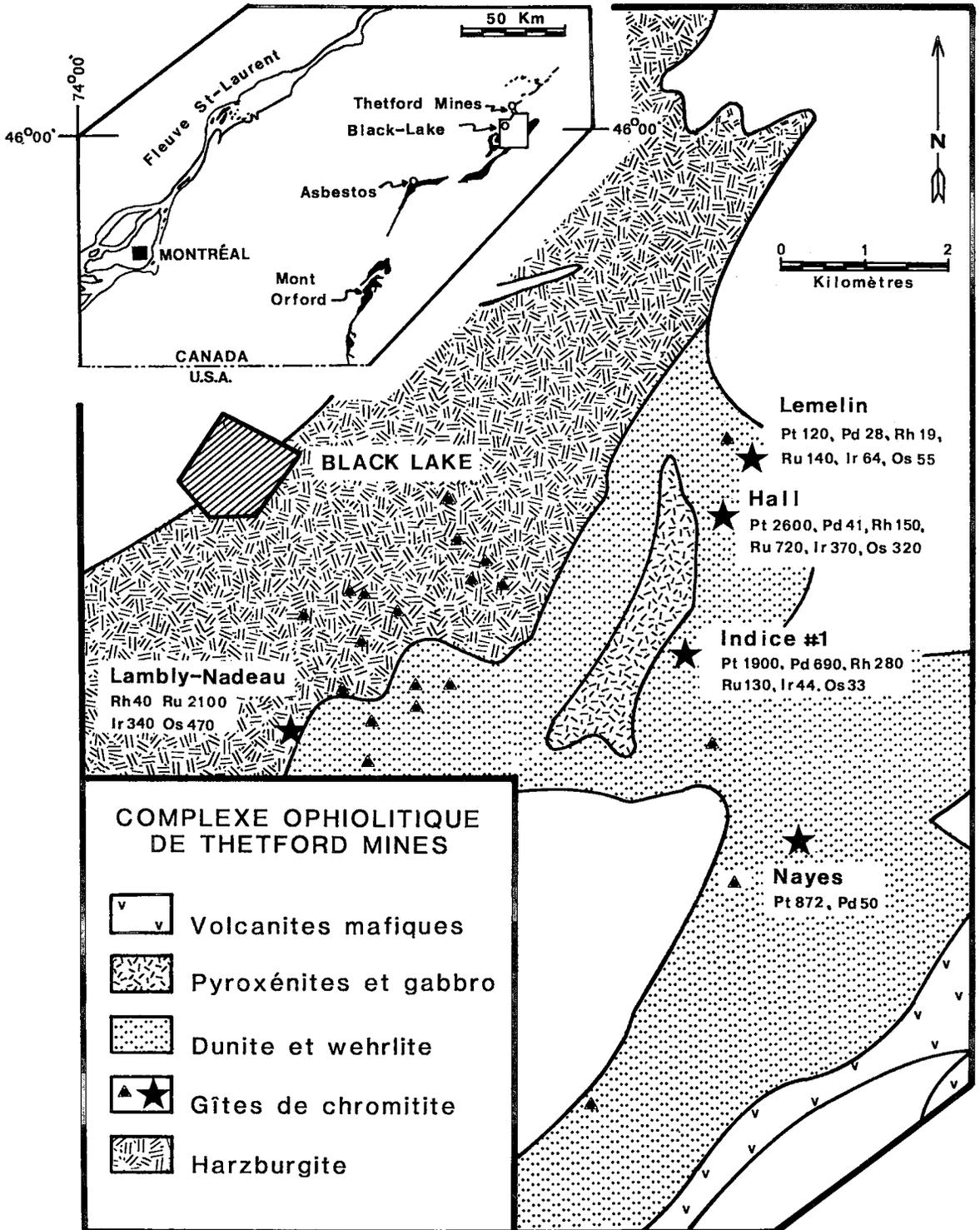


FIG. 1. Localisation géographique et géologique du complexe ophiolitique de Thetford Mines et des gîtes de chromite Hall, Lemelin, Lambly-Nadeau, Naves et de l'indice #1 (Finneth). Les concentrations moyennes des éléments du groupe du platine dans chaque gîte sont tirées de Gauthier *et al.* (1988). Le fond géologique est tiré de St-Julien et Slivitsky (1985).

géochimique, pétrologique et minéralogique.

TECHNIQUES

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le complexe ophiolitique alpin de Thetford Mines, mis en place sur le continent lors de l'orogénèse taconique (Bird et Dewey 1970, St-Julien et Hubert 1975), constitue la partie la mieux préservée des lambeaux de croûte océanique qui longent une zone étroite appelée ligne de suture Brompton - Baie Verte (Williams et St-Julien 1978, 1982). Cette ligne, qui suit les Appalaches québécoises dans une direction SO-NE (Fig. 1), vers l'île de Terre-Neuve, constitue la zone de rencontre entre l'ancienne croûte océanique et la croûte continentale qui aurait été formée lors de la fermeture de l'océan Iapétus ou proto-atlantique à l'Ordovicien inférieur.

L'ophiolite de Thetford Mines, qui est étroitement associée à des séquences d'arcs insulaires (Laurent 1977, Laurent et Kaçira 1987), est un excellent exemple d'un complexe ultramafique, vestige de la croûte océanique et du manteau qui n'a été démembré que partiellement lors de son obduction sur le continent. La séquence stratigraphique y est en bonne partie préservée. Celle-ci commence à la base par un épais niveau de péridotite (ou harzburgite tectonique), qui est un résidu du manteau, surmonté d'une séquence à cumulats, du gabbro, des dykes de diabase, de basalte à coussinets et, finalement, d'une couche de sédiments marins (Laurent 1977, Coleman 1977).

Les gîtes et indices de chromite sont associés exclusivement à la séquence ultramafique (Fig. 1). La chromitite, en lits ou en amas irréguliers, est présente soit dans la harzburgite tectonique, soit à la base de la séquence à cumulats. La plupart des indices découverts sont situés très près de la limite entre ces deux unités lithologiques (Kaçira 1971, Laurent et Kaçira 1987). Dans tous les cas, cependant, la dunite serpentinisée englobe la chromitite, qui n'est jamais en contact direct avec la péridotite (Denis 1932, Kaçira 1971).

Cinq gîtes de chromite sur les trente-deux étudiés par Gauthier *et al.* (1988) ont indiqué des fortes valeurs en *EGP* à l'activation neutronique (Gauthier *et al.* 1990). Quatre de ceux-ci ont indiqué des anomalies qui ne correspondent pas à ce qui est généralement observé dans les chromitites d'une ophiolite, reconnues surtout pour leur contenu en Os-Ir-Ru (Page *et al.* 1982, Prichard *et al.* 1986), mais absolument pas en platine-palladium (Cabri et Naldrett 1984, Barnes *et al.* 1985, Page *et al.* 1986, Nilsson 1989). Ces gîtes, tous situés stratigraphiquement dans la dunite de la séquence à cumulats (Fig. 1), sont les gîtes Hall, Lemelin, l'indice Naves et l'indice #1 (Fineth). L'indice Lambly-Nadeau, situé dans la péridotite, a indiqué de fortes valeurs en Ru, Os et Ir, mais des teneurs en dessous des limites de détection pour le Pt et le Pd (10 ppm).

L'identification des minéraux du groupe de la platine (*MGP*) dans le complexe ophiolitique de Thetford Mines a été réalisée au Centre Canadien de la Technologie des Minéraux et de l'Énergie (CANMET), à Ottawa. Vingt-sept lames minces ou sections polies ont été d'abord examinées au microscope optique, puis au microscope électronique à balayage. Onze de celles-ci proviennent de la mine Hall et cinq, de la mine Lemelin.

Les analyses chimiques ont été exécutées par spectrométrie de dispersion de l'énergie (SDE), sur une microsonde JEOL 733 utilisée à 20 kV, avec un courant de 10 nA. Les raies et standards suivants ont été utilisés: PtM α , PdL α , RuL α , RhL α , IrM α , OsM α , FeK α , NiK α , CuK α , SbL α , SnL α (métaux), SK α (pyrite). Nous avons adopté cette méthode parce que les analyses chimiques réalisées au moyen de la microsonde électronique en utilisant les techniques normales étaient pratiquement impossibles à cause de la petite taille (généralement < 5 μ m) de la majorité des grains à analyser. Les résultats obtenus ont été corrigés en utilisant le programme ZAF de Tracor Northern, Version 12. Ces résultats sont reportés sur les Tableaux 1 et 2, sous forme de pourcentages pondéraux. Les tirets signifient que l'analyse de l'élément visé a donné des résultats en dessous des limites de détection de l'appareil. Le total apparaissant sur les tableaux a été normalisé à 100% lorsqu'il était inférieur à 98%, vu la très petite taille de la majorité des grains visés.

Le contenu des Tableaux 3, 4 et 5 a, comme référence, le résultat de 97 analyses chimiques exécutées par SDE. Trente de celles-ci sont présentées sur les Tableaux 1 et 2. Pour consulter l'ensemble des analyses, le lecteur pourra se référer à Corrivaux (1990).

RÉSULTATS OBTENUS

Vingt-deux phases minérales contenant ou pouvant contenir des *EGP* ont été identifiées. La formule chimique calculée de certains minéraux que nous avons identifiés optiquement ne correspond pas à celle de phases minérales connues et répertoriées dans la littérature. Étant donné que nos critères d'identification sont insuffisants pour une identification ultérieure plus complète, nous avons donné à ceux-ci le nom d'inconnu accompagné d'un numéro. Par exemple, le minéral inconnu #5 correspond dans la présente étude à un minéral non identifié ayant la formule chimique probable Rh₂SnCu.

DESCRIPTIONS MINÉRALOGIQUES

Laurite (Ru,Os,Ir)S₂

De tous les *MGP*, c'est la laurite (Figs. 2E, 3, 4F

TABLEAU 1. COMPOSITION (en % poids) DES SULFURES ET ARSENIURES

Anal.	Ru	Os	Ir	Rh	Pt	Pd	Cu	Fe	Ni	S	As	Sb	Total
Laurite (Ru,Os,Ir)₂S₂													
8A	28.6	30.3	7.9	1.3	-	-	-	-	-	31.2	-	-	99.3
8B	34.9	21.1	8.1	1.7	-	-	-	-	-	32.9	-	-	98.7
20	53.2	4.1	3.1	1.8	-	-	-	-	-	37.9	-	-	100
24	32.1	24.2	10.5	0.8	-	-	-	-	-	32.4	-	-	100
70	54.4	3.7	1.9	1.7	-	-	-	-	-	38.3	-	-	100
Bowiéite (Rh,Ir,Pt)₂S₃													
3	6.0	1.8	30.2	24.5	5.5	5.4	0.3	1.0	-	25.2	-	-	100
Cuproiridsite (Cu,Fe)(Ir,Pt,Rh)₂S₄													
13	-	-	32.5	8.5	23.2	-	9.9	3.0	-	22.9	-	-	100
Cuprorhodsite (Cu,Fe)(Rh,Pt,Ir)₂S₄													
10	-	-	19.4	33.0	7.1	-	6.6	5.0	1.9	27.0	-	-	100
Cooperite PtS													
18	-	-	-	-	82.4	1.5	-	-	1.0	14.1	-	-	99.0
Inconnu #1 (Ni,Fe,Ir,Cu,Rh,Pt)S													
28	-	-	22.4	7.6	12.7	-	6.3	6.8	17.6	26.6	-	-	100
Inconnu #2 (Cu,Fe,Ni)(Pt,Ir,Rh)₂S₄ (?)													
29	-	-	21.4	4.7	36.5	-	11.8	1.4	1.4	23.6	-	-	100.8
Inconnu #3 RhNiAs													
108A	-	-	-	42.3	-	-	-	2.2	24.3	-	30.9	-	99.7
109A	-	-	-	42.5	-	-	-	1.0	24.5	-	32.0	-	100
21	-	-	-	42.1	0.5	0.2	-	2.3	25.7	-	29.2	-	100
Inconnu #4 (Ru,Os,Fe,Rh,Ir,Ni)₃As													
121	52.0	10.6	7.5	4.3	-	-	0.5	3.1	2.1	-	17.8	2.1	100
8A	(Ru ₅₈ Os ₃₃ Ir ₀₈ Rh ₀₂)1.01S _{1.99} , 15 µm, au centre du grain, Mine Hall.												
8B	(Ru ₆₇ Os ₂₂ Ir ₀₈ Rh ₀₃)1.00S _{2.00} , même grain que précédemment, à la bordure.												
20	(Ru ₈₉ Os ₀₄ Ir ₀₃ Rh ₀₃) ₉₉ S _{2.01} , 5 µm, Indice #1 (Finneth).												
24	(Ru ₆₃ Os ₂₅ Ir ₁₁ Rh ₀₁)1.00S _{2.00} , 10 µm, Indice Nayas.												
70	(Ru ₉₁ Os ₀₃ Ir ₀₂ Rh ₀₃) _{0.99} S _{2.01} , 5 µm, Mine Sterrett (ophiolite d'Asbestos).												
3	(Rh ₈₈ Ir ₅₈ Ru ₂₂ Pd ₁₉ Pt ₁₀ Fe ₀₇ Os ₀₃ Cu ₁₀) _{2.09} S _{2.91} , 3 µm, Mine Hall.												
13	(Cu ₈₄ Fe ₂₉) _{1.13} (Ir ₉₁ Pt ₆₄ Rh ₄₅) _{2.00} S _{3.86} , 5 µm, Mine Hall.												
10	(Cu ₄₈ Fe ₄₁ Ni ₁₅) _{1.04} (Rh ₁₄₇ Ir ₄₆ Pt ₁₇) _{2.10} S _{3.86} , 2 µm, Mine Hall.												
18	(Pt ₉₅ Pd ₀₃ Ni ₀₄) _{1.02} S _{0.98} , 5 µm, Mine Lemelin.												
28	(Ni ₃₇ Fe ₁₅ Ir ₁₅ Cu ₁₂ Rh ₀₉ Pt ₀₈) _{0.96} S _{1.03} , 6 µm, Indice Nayas.												
29	(Cu ₉₉ Fe ₁₃ Ni ₁₃) _{1.25} (Pt ₁₀₀ Ir ₅₉ Rh ₂₄) _{1.83} S _{3.92} , 4 µm, Indice Nayas.												
108A	Rh ₉₇ (Ni ₉₇ Fe ₀₉) _{1.06} As _{0.97} , 7 µm, Mine Lemelin.												
109A	Rh ₉₇ (Ni ₉₈ Fe ₀₄) _{1.02} As _{1.01} , 6 µm, Mine Lemelin.												
21	(Rh ₉₆ Pt ₀₁ Pd ₀₁) _{0.97} (Ni ₁₀₂ Fe ₁₀) _{1.12} As _{0.91} , 5 µm, Indice #1 (Finneth).												
121	(Ru ₂₀₅ Os ₂₂ Fe ₂₂ Rh ₁₇ Ir ₁₆ Ni ₁₄ Cu ₀₃) _{2.99} (As ₉₅ Sb ₀₇) _{1.02} , 15 µm, Indice Lambly-Nadeau.												

et 5F) qui a été observée le plus souvent dans la chromite. Totalement englobée dans les grains, amas ou cristaux de chromite sous forme d'inclusions

finies, la laurite se présente toujours en grains disséminés à quelques dizaines de micromètres d'une fissure ou d'un interstice de serpentine. Une inclusion

TABLEAU 2. COMPOSITION (en % poids) DES ALLIAGES

Anal.	Pt	Pd	Os	Ir	Ru	Rh	Fe	Ni	Cu	Sn	Sb	As	Total
Isoferroplatine Pt₃Fe													
34	87.5	-	-	2.3	-	-	8.6	0.2	-	-	-	-	98.6
40	87.6	-	-	3.4	-	0.5	8.9	-	-	-	-	-	100.4
45	86.3	0.3	-	2.3	-	0.4	8.5	0.4	0.3	-	-	-	98.5
Tétraferroplatine PtFe (?)													
42-1	72.8	-	-	3.1	-	1.4	15.9	3.6	3.2	-	-	-	100
Awaruite platinifère (Ni,Pt)₃Fe													
110	32.5	-	-	-	-	0.5	19.0	48.1	-	-	-	-	100
125	37.8	-	-	16.2	0.5	0.2	14.9	28.8	1.5	-	-	-	99.9
128	47.1	7.0	-	9.3	0.9	0.3	13.4	19.2	2.8	-	-	-	100
Alliage (Cu,Pt)													
106	17.0	3.3	-	-	-	-	6.4	2.3	71.2	-	-	-	100.2
114	33.4	-	-	-	-	-	0.9	2.1	63.0	-	-	-	99.4
Alliage (Pt,Pd,Cu,Fe)													
49	82.0	12.2	-	-	0.4	-	1.6	0.6	3.2	-	-	-	100
Cabriite Pd₂SnCu													
47	0.7	36.6	-	-	-	14.9	0.8	0.5	16.0	26.3	3.9	-	99.7
51	-	44.3	-	-	-	7.1	1.1	0.6	15.3	26.0	4.6	-	99.0
Inconnu #5 Rh₂SnCu													
54	1.9	5.5	-	-	-	43.8	0.7	0.7	15.6	29.6	1.0	-	98.8
55	2.2	4.0	-	-	-	44.4	1.3	1.4	15.0	29.1	0.4	0.5	98.3
Iridosmine (Os,Ir)													
113A	-	-	61.0	37.4	1.3	0.3	-	-	-	-	-	-	100
34	(Pt _{2.90} Ir _{0.08}) _{2.98} (Fe _{1.00} Ni _{0.02}) _{1.02} , 7 μm avec laurite, Mine Hall.												
40	(Pt _{2.85} Ir _{0.11} Rh _{0.03}) _{2.99} Fe _{1.01} , 6 μm, Mine Hall.												
45	(Pt _{2.83} Ir _{0.08} Rh _{0.02} Pd _{0.02}) _{2.95} (Fe _{0.98} Ni _{0.04} Cu _{0.03}) _{1.05} , 8 μm, Mine Lemelin.												
42-1	(Pt _{0.93} Ir _{0.04} Rh _{0.04}) _{1.01} (Fe _{0.71} Ni _{0.15} Cu _{0.13}) _{0.99} , 4 μm avec isoferroplatine, Mine Hall.												
110	(Ni _{2.48} Pt _{0.48} Rh _{<.01}) _{2.96} Fe _{1.04} , 8 μm, Mine Hall.												
125	(Ni _{1.84} Pt _{0.73} Ir _{0.32} Cu _{0.09} Ru _{0.02} Rh _{<.01}) _{3.00} Fe _{1.00} , 4 μm avec inconnu #5, Indice Naves.												
128	(Ni _{1.34} Pt _{0.99} Pd _{0.27} Ir _{0.20} Cu _{0.18} Ru _{0.03} Rh _{0.01}) _{3.02} Fe _{0.98} , 4 μm, Indice #1 (Finneth).												
106	(Cu _{0.81} Fe _{0.08} Pt _{0.06} Ni _{0.03} Pd _{0.02}) ₅ , 5 μm, Mine Lemelin.												
114	(Cu _{0.82} Pt _{0.14} Ni _{0.03} Fe _{0.01}) ₂₀ μm avec awaruite platinifère, Mine Hall.												
49	(Pt _{0.67} Pd _{0.18} Cu _{0.08} Fe _{0.05} Ru _{0.01} Ni _{0.01}) ₁₀ μm avec cabriite, Indice #1 (Finneth).												
47	(Pd _{1.35} Rh _{0.57} Ni _{0.03} Pt _{0.01}) _{1.96} (Sn _{0.87} Sb _{0.13}) _{1.00} (Cu _{0.99} Fe _{0.05}) _{1.04} , 10 μm, Indice #1 (Finneth).												
51	(Pd _{1.64} Rh _{0.27} Ni _{0.04}) _{1.95} (Sn _{0.87} Sb _{0.15}) _{1.02} (Cu _{0.95} Fe _{0.08}) _{1.03} , 8 μm, Indice #1 (Finneth).												
54	(Rh _{1.68} Pd _{0.20} Pt _{0.04} Ni _{0.04}) _{1.96} (Sn _{0.98} Sb _{0.03}) _{1.01} (Cu _{0.97} Fe _{0.05}) _{1.02} , 8 μm, Indice Naves.												
55	(Rh _{1.70} Pd _{0.15} Ni _{0.09} Pt _{0.04}) _{1.98} (Sn _{0.96} Sb _{0.01} As _{0.02}) _{0.99} (Cu _{0.93} Fe _{0.09}) _{1.02} , 7 μm, Indice Naves.												
113A	(Os _{0.60} Ir _{0.37} Ru _{0.02} Rh _{<.01}) ₅ μm avec osmiridium, Mine Hall.												

arrondi de serpentine ou d'orthopyroxène(?), elle-même totalement englobée dans la chromite, peut les accompagner. Ce minéral est reconnaissable au

microscope optique, en lumière réfléchiée par sa couleur blanche bleutée caractéristique. La taille des grains varie généralement entre 2 et 8 μm de diamètre.

TABLEAU 3. LISTE DES SULFURES ET ARSÉNIURES CONTENANT DES EGP, IDENTIFIÉS DANS LES CHROMITITES DU COMPLEXE OPHIOLITIQUE DE THETFORD MINES

PHASE MINÉRALE	COMPOSITION ou FORMULE CHIMIQUE	NOMBRE ET TAILLE DES GRAINS (μm)	ENDROIT	COMMENTAIRES
Laurite	(Ru,Os,Ir) S_2 Ru > Os > Ir	63 1 à 8 parfois 15	Hall Lemelin Indice #1 Nayes Lambly- Nadeau Sterrett	En cristaux bien définis, localement zonés. Englobés dans la chromite, en grains isolés ou avec Pt ₃ Fe et autres sulfures
Bowléite?	(Rh,Ir,Pt) S_3 ? Rh > Ir	5 1 à 3	Hall Lemelin	En grains sub-automorphes dans la chromite, avec Pt,Fe ou laurite
Cupro-iridsite?	(Cu,Fe) (Ir,Pt,Rh) S_4	1 2	Hall	Accompagne le Pt,Fe dans la chromite, sub-automorphe
Cupro-rhodsité?	(Cu,Fe) (Rh,Pt,Ir) S_4 ?	2? 1 à 3	Hall	Accompagne le Pt,Fe dans la chromite, sub-automorphe
Cooperite	PtS	1 5	Lemelin	Sub-automorphe, avec Pt,Fe bowléite dans la chromite
Braggite?	(Pt,Pd) S Pt >> Pd	3? 1 à 5	Hall Nayes	Sub-automorphe, englobé dans la chromite avec laurite et autres sulfures
Inconnu #1	(Ni,Ir,Fe, Cu,Rh,Pt) S ? Ni > Ir	1 3	Nayes	Sub-automorphe avec laurite, braggite(?) et inconnu #2
Inconnu #2	Cu(Pt,Ir,Rh) S_4 ? Pt > Ir	1 6	Nayes	Avec laurite, braggite(?) et inconnu #1, englobé dans la chromite
Inconnu #3	RhNiAs ou (Rh,Ni) S_2 As	6 1 à 7	Lemelin Indice #1	Avec alliages Cu-Ni-Fe-Pt-Pd, dans magnétite ou serpentine, en grains anguleux
Inconnu #4	Ru ₃ As(?)	1 15	Lambly- Nadeau	Grain hexagonal qui semble en bonne partie altéré, dans la chromite fissurée

TABLEAU 4. LISTE DES ALLIAGES CONTENANT DES EGP, IDENTIFIÉS DANS LES CHROMITITES DU COMPLEXE OPHIOLITIQUE DE THETFORD MINES

PHASE MINÉRALE	COMPOSITION ou FORMULE CHIMIQUE	NOMBRE ET TAILLE DES GRAINS (μm)	ENDROIT	COMMENTAIRES
Isoferroplatine	Pt,Fe	24 3 à 7	Hall Lemelin Indice #1	Automorphe, polygonal (4, 5 ou 6 côtés). Dans la chromite, isolé ou avec laurite et autres sulfures
Tétraféropplatine ?	PtFe	1 <4	Hall	Englobé dans la chromite, en intercroissance probable avec Pt,Fe
Awaruite platinifère	(Ni,Pt) S_3 Fe, ± Cu,Ir,Pd	16 1 à 20	Hall Indice #1 Nayes	Grains anguleux à arrondis dans serpentine et magnétite, isolés ou avec d'autres alliages
Alliage Cu-Pt	variable Cu-Pt, Cu>Pt, ± Ni,Fe,Pd	2 7 à 20	Hall Lemelin	Grains xénomorphes, avec inconnu #3 ou awaruite platinifère
Cabriite	Pd ₃ SnCu ± Rh	9 2 à 10	Indice #1	Xénomorphe, dans serpentine magnétite, accompagne des alliages complexes à Pt-Pd-Cu-Fe
Alliages complexes	Pt-Pd-Cu-Fe Pt-Pd-Fe-Ni-Cu	9 2 à 10	Indice #1	Contexte et forme des grains semblables à la cabriite
Inconnu #5	Rh ₃ SnCu ± Pd	3 2 à 10	Nayes Lemelin?	Semblable à la cabriite, accompagne des alliages à Ni-Fe-Pt (awaruite platinifère?)
Alliages complexes	Cu-Ni-Fe-Pt-Pd Ni-Cu-Fe-Ir	10 2 à 10	Lemelin	Xénomorphe, dans magnétite serpentine, avec inconnu #3; composition non homogène
Iridosmine	Os-Ir Os > Ir	1 5	Hall	Sub-automorphe, avec laurite et osmiridium, englobé dans la chromite
Osmiridium	Ir-Os Ir > Os	1 3	Hall	Sub-automorphe, avec laurite et iridosmine
Alliage ?	variable Ru-Os ± Ir	8 2 à 15	Lambly- Nadeau	Dans la chromite fissurée, très altéré, sub-automorphe
Alliage ?	Ir-Fe-Ru	1 10	Lambly- Nadeau	En baguette très altérée dans la chromite fissurée

tre, mais peut atteindre 15 μm (Fig. 3).

La laurite est toujours automorphe (cube modifié), avec une zonalité localement présente (Fig. 3) dans des grains qui peuvent accompagner d'autres sulfures ou alliages automorphes à sub-automorphes. Citons parmi ceux-ci l'isoféropplatine (Fig. 2E), l'iridosmine (Os > Ir), l'osmiridium (Ir > Os), la

bowléite(?), la cooperite, la braggite(?), les minéraux inconnus #1 (Fig. 5C) et #2.

Il y a une nette substitution entre le contenu en Os et Ru de la laurite (Figs. 2E, 3, Tableau 1). Le contenu en Os varie entre 3.1% et 30.3% poids (moyenne de 17.4% sur 13 analyses), alors que le contenu en Ru varie entre 28.6% et 52.0% poids

TABLEAU 5. ASSEMBLAGES MINÉRALOGIQUES DES EGP DANS LES CHROMITITES DE L'OPHIOLITE DE THETFORD MINES

MINÉRAUX PRIMAIRES (magmatiques?)	MINÉRAUX SECONDAIRES (liés à la serpentinisation)
SULFURES	ALLIAGES
* Laurite (Ru,Os,Ir) ₂ S ₂	* Awaruite platinifère (Ni,Pt) ₂ Fe
* Bowiéite (Rh,Ir,Pt) ₃ S ₂	* Alliages complexes Cu-Ni-Fe-Pt-Pd
Cooperite(?) (PtS)	* Cabriite (Pd ₂ SnCu)
Braggite(?) (Pt,Pd)S	* Inconnu #5 (Rh ₂ SnCu)
Cuproiridsite(?) (Cu,Fe)(Ir,Pt,Rh) ₂ S ₂	* Alliages complexes Pt-Pd-Cu-Fe et Pt-Pd-Fe-Ni-Cu
Cuprorhodsite(?) (Cu,Fe)(Rh,Pt,Ir) ₂ S ₂	* Alliage(?) Ru-Os, ±Ir
Inconnu #1 [(Ni,Ir,Fe,Cu,Rh,Pt)S] ₂ (?)	* Alliage Cu-Pt
Inconnu #2 [Cu(Pt,Ir,Rh) ₂ S ₄] (?)	Alliage(?) Ir-Fe-Ru
ALLIAGES	ARSÉNIURES
* Isoferroplatine (Pt,Fe)	* Inconnu #3 [RhNiAs ou (Rh,Ni) ₂ As]
Tétraferroplatine(?) (PtFe)	Inconnu #4 (Ru,Os,Fe) ₃ As?
Iridosmine (Os>Ir)	
Osmiridium (Ir>Os)	

* Plus d'un grain observé.

(moyenne de 38.4%). Les contenus en Ir et en Rh restent relativement constants et faibles (entre 2.8% et 12.7% et entre 1.2% et 2.8% poids, respectivement).

Isoferroplatine Pt₃Fe

L'isoferroplatine (Figs. 2B, C, E, Tableau 2) se retrouve dans un environnement et un contexte très semblables à ceux de la laurite. C'est un minéral toujours totalement englobé dans la chromite mais près des fissures, bordures ou interstices des grains. Observé en lumière réfléchie, il a une couleur blanche très vive, caractéristique de la plupart des alliages platinifères. C'est un minéral automorphe, de forme polygonale (4, 5 ou 6 côtés) et de composition chimique légèrement variable, à cause de son contenu en iridium (entre 0.8 et 17.8% poids, moyenne de 3.2% sur 11 analyses). Les grains, d'une taille de 3 à 7 μm de diamètre, sont soit isolés, soit accompagnés de laurite (Fig. 2E), ou d'autres sulfures comme la bowiéite, la cuproiridsite(?) (Fig. 2B), ou la cuprorhodsite(?) (Fig. 2C). L'isoferroplatine est surtout observé à la mine Hall, mais aussi à la mine Lemelin et à l'indice #1 (Tableau 4).

Ailleurs que dans l'ophiolite de Thetford Mines, l'isoferroplatine est un MGP relativement commun qui fait partie de toutes sortes d'associations minéralogiques [sulfures, autres minéraux à EGP, olivine, chromite et magnétite: Cabri (1981)]. Cette phase minérale a été identifiée dans les complexes ultramafiques du Bushveld (Kinloch 1982), de Stillwater, de Noril'sk (URSS), et dans les gravières aurifères (Cabri 1981). Sa présence dans une ophiolite alpine semble donc nouvelle mais non surprenante.

Un minéral répertorié comme étant un alliage Pt-Pd-Fe a été identifié dans le complexe ophiolitique de Tiébaghi, en Nouvelle Calédonie (Augé 1988). Cette phase minérale indique de fortes ressemblances

avec l'isoferroplatine, sauf pour son fort contenu en Pd.

Iridosmine (Os > Ir) et osmiridium (Ir > Os)

Ces deux alliages, en grains sub-automorphes (Fig. 3), accompagnent un cristal de laurite zoné de près de 15 μm de diamètre, à la mine Hall. L'iridosmine a été analysée (Tableau 2).

Bowiéite(?) (Rh,Ir)₂S₃

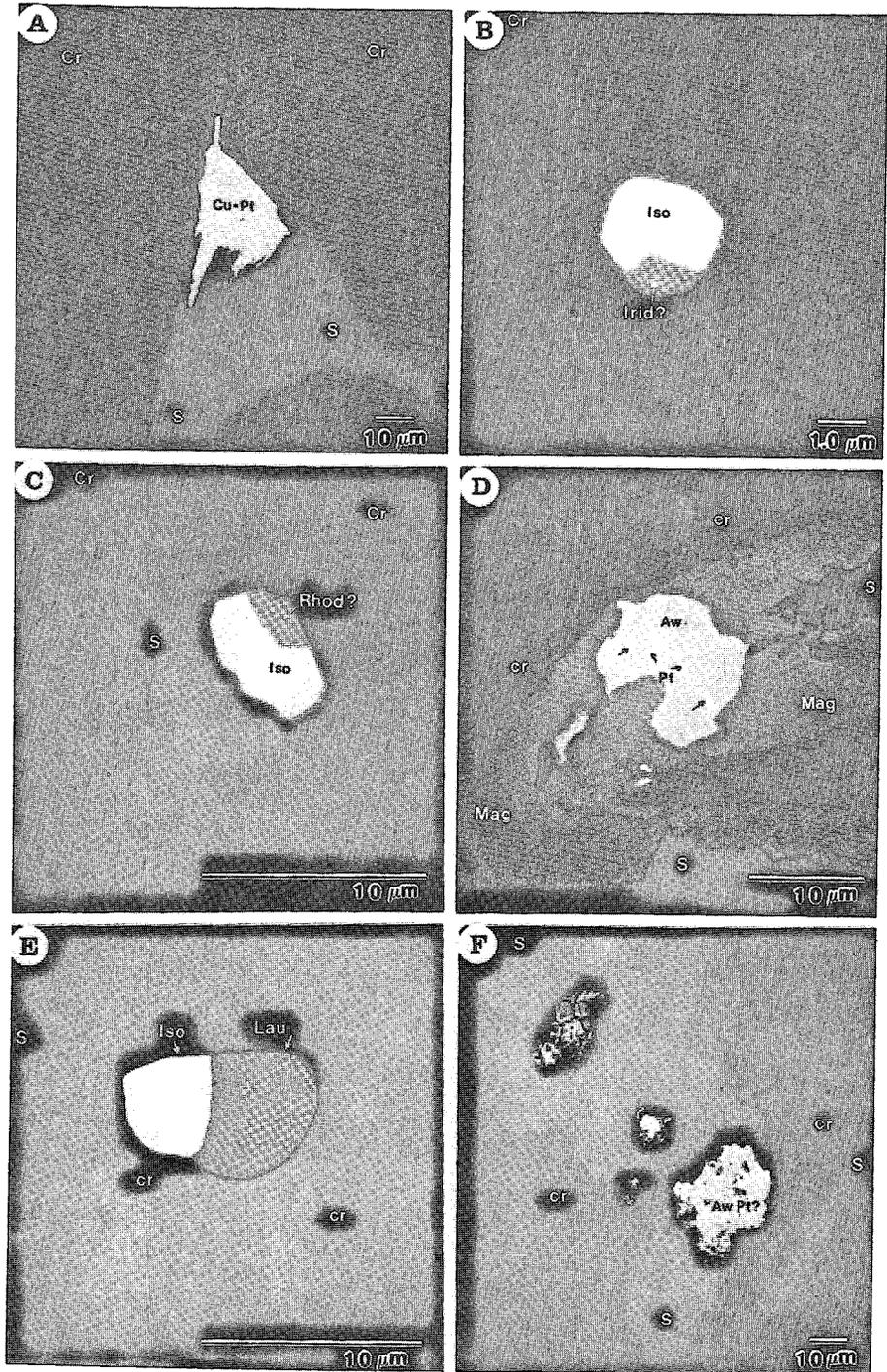
Ce sulfure, en grains très petits et sub-automorphes et qui ont un diamètre de 1 à 3 μm, accompagne la laurite ou l'isoferroplatine à l'intérieur des cristaux ou amas de chromite massive. La bowiéite a été identifiée dans trois pépites de platine provenant de la baie de Goodnews, en Alaska (Desborough et Criddle 1984). Le minéral a aussi été décrit par Cabri *et al.* (1981) dans une pépite d'un alliage Pt-Fe provenant d'Éthiopie; le grain était toutefois trop petit pour une étude en diffraction X.

Cuproiridsite(?) (Cu,Fe)(Ir,Pt,Rh)₂S₄ et cuprorhodsite(?) (Cu,Fe)(Rh,Pt,Ir)₂S₄

Ces deux minéraux (Figs. 2B, C), se présentent en grains de forme et de taille très semblables à celles de la bowiéite, excepté qu'ils semblent accompagner uniquement l'isoferroplatine. Identifiés par Rudashevskii *et al.* (1985) dans un dépôt alluvionnaire du bouclier d'Aldan, au Kamchatka (URSS), ces deux minéraux ont été découverts en inclusions dans l'isoferroplatine, elle-même en compagnie d'autres MGP.

Cooperite (PtS) et braggite(?) (Pt,Pd)S

Le seul grain de cooperite que nous avons identifié mesure 5 μm de diamètre (Fig. 4B, Tableau 1),



et accompagne l'isoferroplatine. Pour ce qui est de la braggite(?), elle accompagne d'autres sulfures de EGP et, en particulier, la laurite aux mines Hall et Naves. Vue la petite taille des grains, toute information supplémentaire ne serait que spéculation.

Inconnu #1 (Ni, Ir, Fe, Cu, Rh, Pt)S et

inconnu #2 [Cu(Pt, Ir, Rh)₂S₄]

Ces deux minéraux (Tableau 1) sont identifiés uniquement au gîte Naves, où ils accompagnent d'autres sulfures comme la laurite et la chalcopyrite(?). Le tout forme un grain composite assez complexe (Fig. 5C). Ces minéraux ont la particularité d'être sub-automorphes et totalement englobés dans la chromite massive. Le minéral inconnu #2 pourrait être l'équivalent platinifère de la cuproiridsite (pour l'iridium) et de la cuprorhodsite (pour le rhodium) (Rudashevsky *et al.* 1985).

Awaruite platinifère

Ayant la formule chimique approximative de (Ni,Pt)₃Fe, avec des proportions variables de Cu, Pd, Ir (Figs. 2D, 2E, 5A, Tableau 2), l'awaruite platinifère est surtout reconnaissable en section polie, par sa présence dans la serpentine et la magnétite des interstices et des fissures, entre les grains ou fragments de chromite dans la chromite. C'est un minéral en tous points semblable à l'awaruite non platinifère, excepté son contenu variable en platine (entre 19.5 et 55% poids sur 9 analyses), qui remplace le nickel dans la formule chimique. Ce sont toujours des grains xénomorphes, arrondis à anguleux et parfois aux contours flous, qui peuvent mesurer de 1 à 20 µm de diamètre et qui ont une forte brillance en lumière réfléchie (blanc intense). A cause de leur composition non homogène, il arrive que les grains d'awaruite platinifère contiennent des inclusions riches en Pt qui semblent être le résultat d'une exsolution (Fig. 2D).

Aucun exemple ne semble avoir été rapporté à date d'une awaruite platinifère. L'awaruite est un alliage nickelifère relativement rare, trouvé surtout dans les roches ultramafiques serpentinisées d'ophiolites et de complexes lités stratiformes. Indépendamment de sa composition chimique exacte, sa formation reste donc intimement associée aux processus de serpentinisation (Nickel 1959, Chamberlain 1966, Stockman et Hlava 1984, Prichard *et al.* 1986, Nilsson 1987). La présence de platine dans la formule chi-

mique de l'awaruite tend à confirmer un processus de destruction d'une ou de plusieurs phases minérales primaires, porteuses de Pt. Tout comme cela a été observé pour une partie du Ni dans l'ophiolite de Thetford Mines (Chamberlain 1966), il est probable que le platine provienne de sulfures primaires, comme la cooperite, la braggite ou des sulfures de nickel porteurs de cet élément. Ces minéraux auraient ultérieurement été altérés et remplacés par l'awaruite comme phase minérale porteuse de Pt, lors de la serpentinisation des dunités et péridotites. Une awaruite contenant de l'iridium a été identifiée par Ahmed et Bevan (1981) dans l'ophiolite de Sakhakot-Qila, Pakistan.

Alliage Cu-Pt

Seulement quelques grains pouvant mesurer 20 µm de diamètre (Fig. 2A) de cet alliage ont été identifiés. Xénomorphes et de composition chimique variable, les grains peuvent accompagner l'awaruite platinifère. Il devient alors impossible de différencier les deux minéraux au microscope optique.

Même si selon les analyses chimiques faites, le Cu domine nettement en proportion sur le Pt (Tableau 2), un lien génétique peut être fait avec la hongshiite, alliage PtCu (Cabri 1981), qui serait une phase secondaire formée par remplacement de la cooperite (Cabri 1981) ou par altération de la sperrylite (Prichard et Tarkian 1988). Cet alliage a aussi été identifié récemment dans le complexe ultramafique de Tulameen (Nixon *et al.* 1990). L'association de cet alliage Cu-Pt avec l'awaruite platinifère dans un grain composite serait une double confirmation de l'origine secondaire de ces minéraux.

Alliages complexes Cu-Ni-Fe-Pt-Pd et Ni-Cu-Fe-Ir et minéral inconnu #3 (RhNiAs)?

Ces minéraux (Figs. 4A, C, Tableaux 1 et 2) ont été identifiés uniquement à la mine Lemelin. Ils sont localisés dans la serpentine et la magnétite. Les grains sont xénomorphes, anguleux à arrondis, et d'un diamètre qui varie de 1 à 7 µm. Tout comme pour l'awaruite platinifère, les alliages complexes sont non homogènes chimiquement. Le minéral inconnu #3 (Fig. 4C), qui est un arsénifère de Ni et de Rh, serait l'équivalent rhodifère de la majakite PdNiAs (Genkin 1978). Rudashevski *et al.* (1983) ont trouvé ce minéral dans des gisements alluvionnaires dérivés de roches ultramafiques du nord-est de l'URSS.

FIG. 2. Minéraux du groupe du platine provenant du gîte Hall. A) Alliage Cu-Pt (anal. #114, Tableau 2), et awaruite platinifère. B) Isoferroplatine (Iso) avec, à sa bordure, de la cuproiridsite(?). C) Isoferroplatine accompagnant la cuprorhodsite(?). D) Awaruite (Aw) en plein milieu d'une zone de magnétite (Mag). Il apparaît dans l'awaruite des zones plus pâles, qui semblent être le résultat d'une exsolution du Pt (indiqué par des flèches noires). E) Grain composite d'isoferroplatine et de laurite (Lau), totalement englobé dans la chromite (Cr). Les zones plus claires dans la laurite sont enrichies en Os. F) Awaruite platinifère (Aw Pt) englobée dans la serpentine (S).

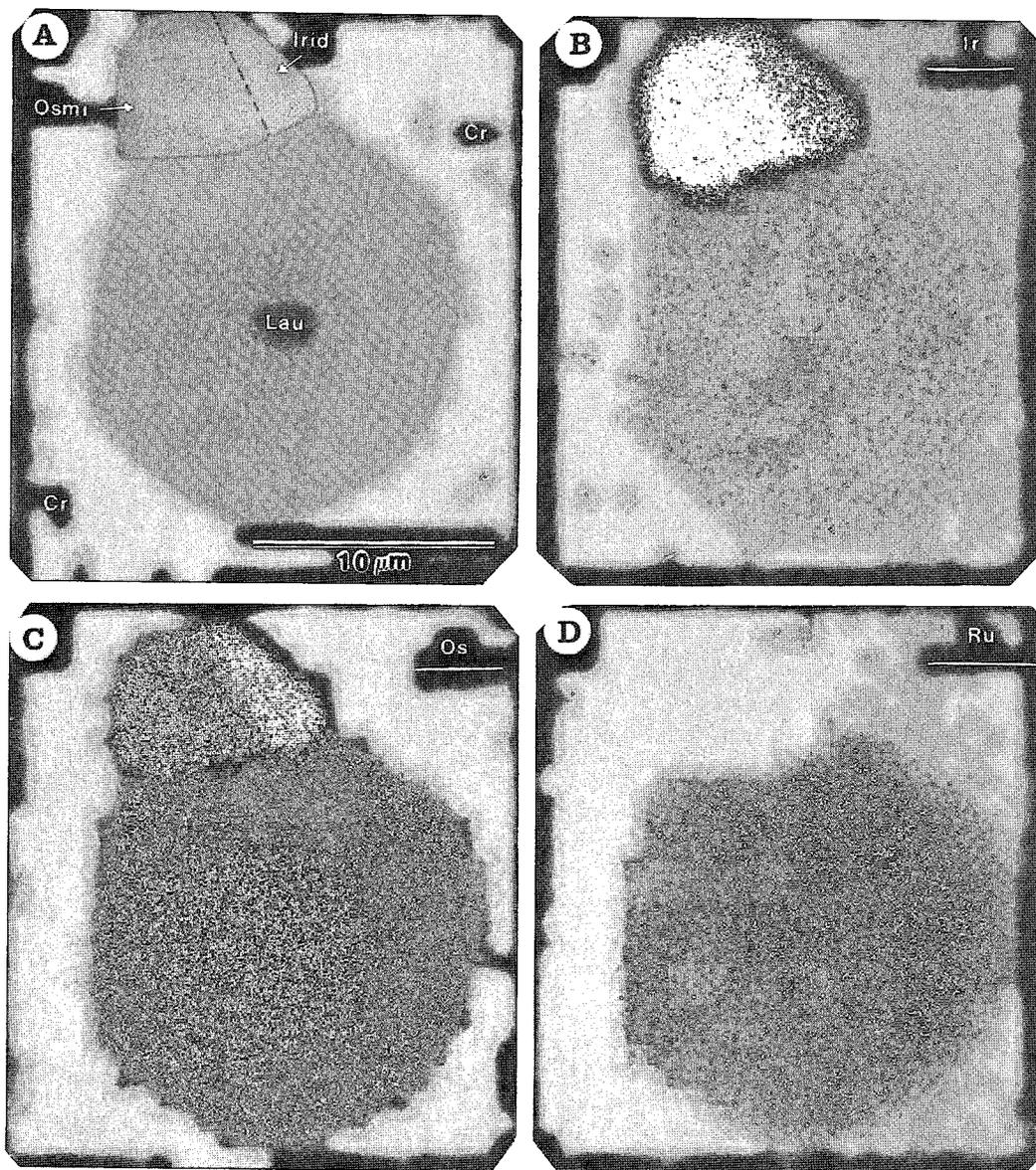


FIG. 3. Balayage d'un grain de laurite zonée, provenant de la mine Hall. A) Image à électrons rétrodiffusés montrant le grain automorphe de laurite (Lau), avec en haut, deux alliages, l'osmiridium (Osmi) et l'iridosmine (Irid). Le grain composite est complètement englobé dans la chromite. Les trois photographies suivantes sont des balayages pour respectivement l'Ir, l'Os et le Ru. Deux analyses chimiques exécutées au SDE (voir anal. #8 et 8B) ont donné un écart de 9% en poids de l'Os, en remplacement réciproque avec le Ru. L'Ir est uniformément distribué, tel que démontré sur la Figure 3B.

*Cabriite Pd₂SnCu et alliages complexes
Pt-Pd-Cu-Fe et Pt-Pd-Fe-Ni-Cu*

Ces alliages (Figs. 4D, E, Tableau 2) ont été identifiés uniquement à l'indice #1. Ce sont les seuls MGP importants qui contiennent des proportions significatives de Pd (Tableau 2). La cabriite (Figs. 4D, E)

(Evstigneeva et Genkin 1983) est présente dans la serpentine en grains xénomorphes, arrondis à anguleux et aux contours parfois flous. Examiné au microscope optique et en lumière réfléchie, ce minéral, de très petite taille et difficile à localiser, paraît d'un blanc rosé terne. La cabriite accompagne généralement les alliages complexes Pt-Pd-Cu-Fe et Pt-Pd-

Fe-Ni-Cu, dont la taille et la forme des grains sont très semblables. Ces alliages sont non homogènes chimiquement. Il arrive que ces minéraux se présentent ensemble, en amas de grains fissurés (Fig. 4E). La taille des grains varie de 2 à 10 μm de diamètre. Identifiée dans le gîte de Cu-Ni d'Oktyabr'sk (URSS) (Evstigneeva et Genkin 1983), la cabriite serait typique des minéralisations en sulfures de Cu-Ni de la région de Noril'sk, URSS.

Inconnu #5: Rh₂SnCu

Cet alliage rhodifère est identifié au gîte Naves (Figs. 5A, B), et probablement à la mine Lemelin. Il peut accompagner l'awaruite platinifère sous forme de grains anguleux à arrondis, xénomorphes et d'une taille égale à ou inférieure à 10 μm de diamètre. Ce minéral semble être l'équivalent rhodifère de la cabriite, comme en témoigne la forme et le contexte des grains. Le fort contenu en Rh de la cabriite et en Pd de l'inconnu #5 (Tableau 2) laisse présager l'existence possible d'une solution solide continue entre ces deux phases, qui ont un lien génétique évident.

Alliage(?) Ru-Os-Ir

Cet alliage(?) est identifié uniquement à l'indice Lambly-Nadeau, où il constitue le *MGP* le plus important. Les grains de ce minéral sont subidiomorphes (Fig. 5E) ou arrondis, avec un diamètre variant entre 2 et 15 μm . Les grains sont localisés dans les fissures et inclusions de serpentine dans la chromite. Cet alliage pourrait être le résultat de l'altération complète de grains de laurite, comme en témoigne la similitude des proportions des *EGP* dans la formule chimique.

Inconnu #4: Ru₃As

Un seul grain, en bonne partie altéré(?), de ce minéral a été identifié, à l'indice Lambly-Nadeau. Il a un aspect "sub-cristallin", avec un diamètre d'environ 15 μm (Fig. 5D). Ce grain accompagne un bâtonnet de 20 μm de longueur de ce qui semble être un produit d'altération d'un bâtonnet d'iridosmine. Cabri *et al.* (1981) ont fait état d'une phase minérale semblable, présente dans des pépites à Pt-Fe provenant d'Éthiopie. Les analyses obtenues sur ces grains se sont avérées peu concluantes, surtout à cause de leur non-homogénéité chimique.

Autres minéraux de nickel et de cuivre

Le sulfure de nickel non platinifère le plus abondant dans les chromitites est la heazlewoodite Ni₃S₂. Il peut arriver que ce minéral accompagne les alliages de platine dans la serpentine ou la magnétite. Les

grains de heazlewoodite, d'un diamètre de 1 à 200 μm et généralement xénomorphes, suivent les interstices et fissures dans la chromite.

Le deuxième minéral de nickel en importance est l'awaruite non platinifère Ni₃Fe, qui est très semblable à la heazlewoodite sauf que les grains sont généralement de plus petite taille et moins nombreux. Les autres minéraux présents seraient la pentlandite(?), la chalcopyrite(?), la mauchérite(?) et la violarite(?).

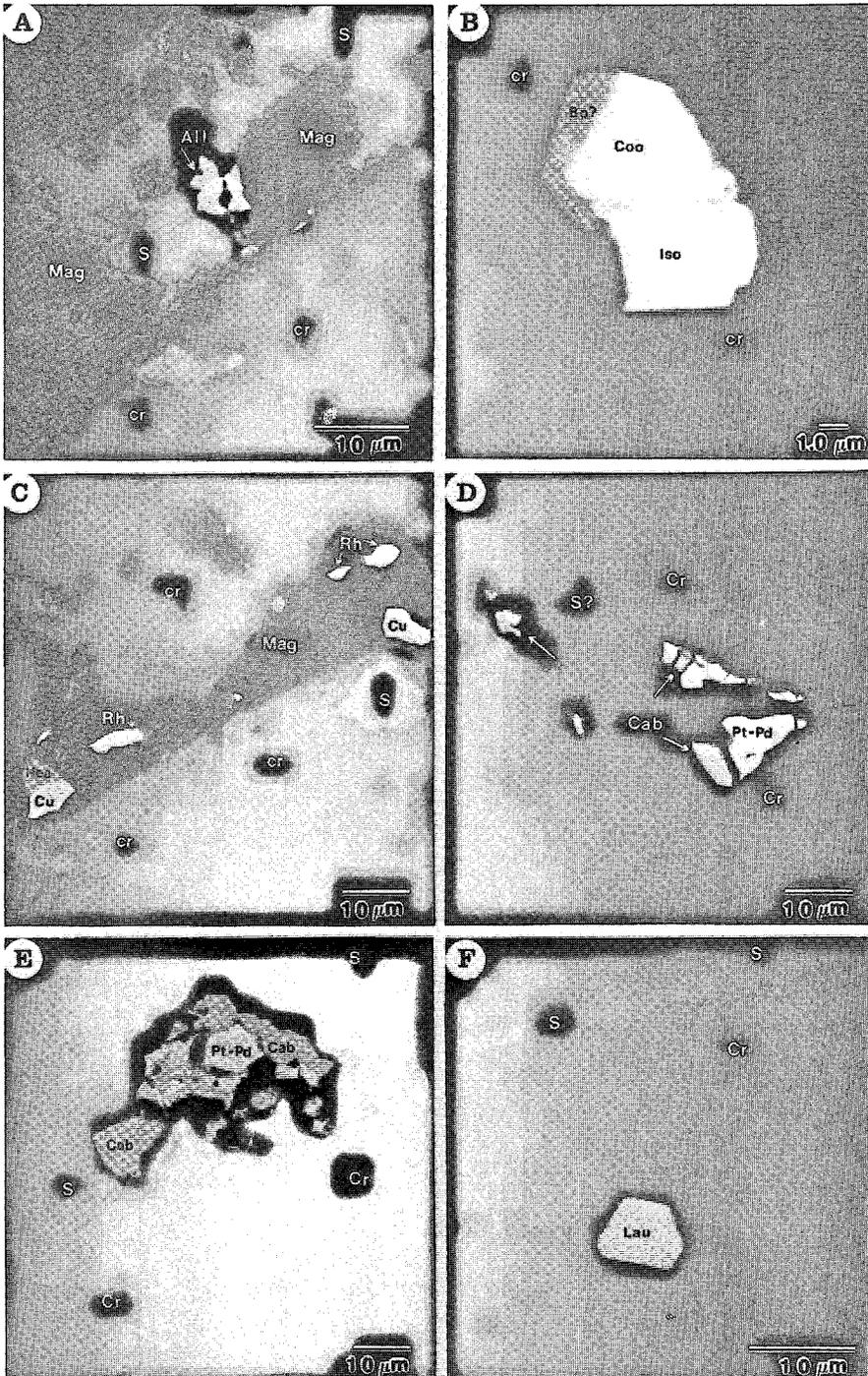
DISCUSSION

Les données présentées (Tableaux 3 et 4) nous permettent de reconnaître la grande variété dans la minéralogie des *EGP*, d'un gîte de chromite à l'autre. Le seul minéral observé dans tous les gîtes étudiés est la laurite (Tableau 3), qui a aussi été identifiée dans l'ophiolite d'Asbestos (mine Sterrett, Fig. 5F). Les autres minéraux rencontrés le plus souvent sont l'awaruite platinifère et l'isoferroplatine, chacun identifiés dans trois gîtes différents.

C'est à la mine Hall que le plus grand nombre de minéraux du groupe du platine a été identifié (11). Le gîte Lemelin se distingue de la mine Hall par la présence 1) du Rh dans une plus forte proportion des minéraux identifiés, et 2) d'un arséniure de nickel et de rhodium. L'indice #1 (Finneth) présente des chromitites beaucoup plus riches en Pd que les autres gîtes étudiés (Gauthier *et al.* 1988). L'identification des *MGP* le confirme (Tableau 4). L'indice Lambly-Nadeau présente un cas encore plus particulier. Il s'agit du seul gîte à être localisé dans la péridotite (Fig. 1). La minéralogie des *EGP* est dominée à cet endroit par les alliages(?) à Ru-Os-Ir et la laurite.

Du point de vue de la granulométrie, nous constatons que les grains d'alliages Rh, Pt et Pd sont généralement plus gros que les sulfures et arséniures dans les mêmes gîtes. Ceci est particulièrement évident au gîte Hall, où les grains d'awaruite platinifère et d'un alliage Cu-Pt ont un diamètre moyen (8 et 20 μm , respectivement) qui équivaut à au moins le double de celui de la laurite, qui est le sulfure des *EGP* en grains les plus grossiers. Cette dichotomie dans la granulométrie des *MGP*, avec d'une part les alliages, et d'autre part, les sulfures et arséniures, tend à prouver une origine de formation différente de ces deux assemblages minéralogiques.

Les *MGP* du complexe ophiolitique de Thetford Mines peuvent se subdiviser en deux sous-groupes. Il y a d'abord les sulfures à Ru, Os, Ir ou Rh et, beaucoup plus rarement, de Pt et de Pd [laurite surtout, bowiéite, braggite(?)]. Ces grains s'observent toujours à l'intérieur même des grains de chromite et ce, généralement près des fissures et interstices avec remplissage de serpentine ou de magnétite. Les grains, parfois composites, sont toujours automorphes à sub-automorphes, sous forme d'inclusions fines qui sont soit isolées dans la chromite,



soit entourées de serpentine ou de clinopyroxène(?), elle-même en inclusion dans la chromite. La taille des grains varie entre 1 et 15 μm , mais leur diamètre moyen dépasse rarement 5 μm . Doivent être aussi inclus dans ce groupe quelques alliages comme l'isoferroplatine, l'osmiridium et l'iridosmine, qui ont les mêmes caractéristiques que les minéraux précédemment décrits.

Il y a ensuite un groupe qui inclut les alliages de Pt surtout mais aussi de Pd, de Ru et des autres *EGP* dans une moindre mesure. Exceptions faites de l'isoferroplatine, l'iridosmine et l'osmiridium, qui font partie du groupe précédent, les alliages sont identifiés dans la serpentine ou la magnétite. Les grains sont soit de composition chimique non homogène (e.g., alliages complexes Pt-Pd, awaruite platinifère), soit, au contraire, de composition fixe (cabriite, inconnu #5). Certains arséniures peuvent accompagner les alliages, comme à la mine Lemelin (Fig. 4C), mais ils sont généralement plus rares. Ce sont surtout le Ni, le Fe et le Cu qui accompagnent les *EGP* dans la composition chimique des alliages, mais l'étain et, plus rarement, l'antimoine peuvent aussi être présents. Les grains, toujours xénomorphes, ont un diamètre qui varie entre 1 et 20 μm . Ce diamètre dépasse généralement celui des sulfures à *EGP* dans les mêmes gîtes.

Les deux assemblages minéralogiques correspondent chacun à une genèse probable de formation. Le premier groupe (Tableau 5) aurait été formé à un stade précoce, en même temps que la chromite. Il paraît probable que des grains de ces minéraux, déjà formés, auraient été piégés en partie par la chromite vers la fin de la cristallisation magmatique de celle-ci (Talkington *et al.* 1984, Barnes *et al.* 1985, Augé 1988). Les processus secondaires qui ont suivi la cristallisation magmatique n'ont pas affecté ultérieurement la partie de ces minéraux qui était englobée dans sa gangue protectrice de chromite.

Le deuxième groupe de minéraux est d'origine secondaire. S'il inclut la plupart des alliages et arséniures à *EGP*, il inclut aussi la heazlewoodite et l'awaruite (Chamberlain 1966, Stockman et Hlava 1984, Prichard *et al.* 1986, Nilsson 1989). La formation de ces phases minérales reste liée à la serpentinisation, puisqu'en plus d'être xénomorphes, ils accompagnent ou sont englobés par la magnétite secondaire et la serpentine.

Il paraît très probable, tout comme cela a été décrit par Prichard et Tarkian (1988) pour l'ophiolite de Shetland, que l'assemblage minéralogique secondaire

résulte de la destruction partielle des *MGP* primaires (Stockman et Hlava 1984, Prichard *et al.* 1986, Augé 1988, Nilsson 1989). Cette altération des minéraux, surtout à Rh, Pt et Pd, aurait été combinée à une faible remobilisation des *EGP*, qui sont restés, au moins en partie, dans la chromite.

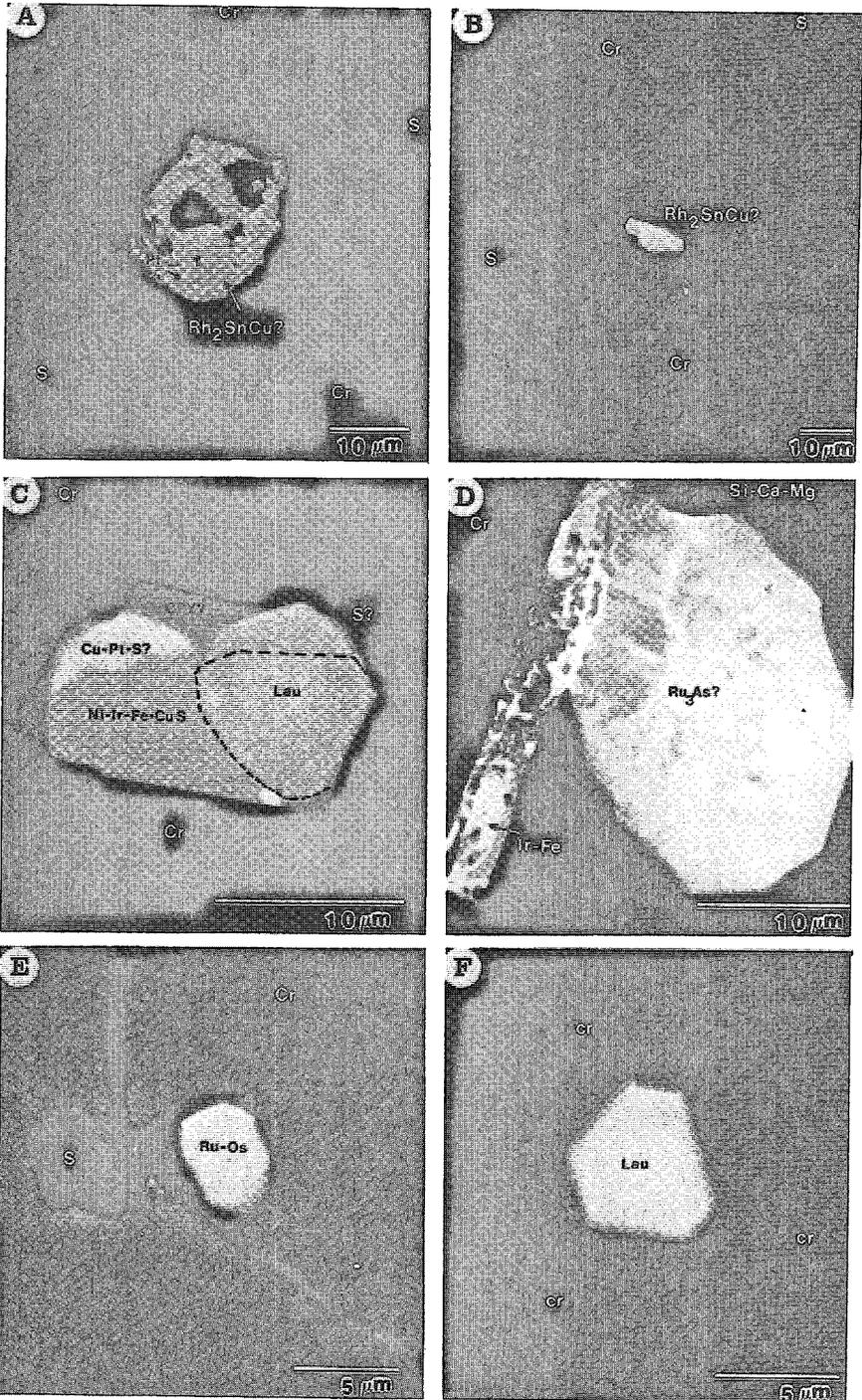
Aucun sulfure à *EGP* n'a été identifié hors de la chromite. Cette observation laisse supposer la destruction complète de ceux-ci et leur remplacement par des alliages ou des arséniures dans un environnement chimique réducteur et appauvri en soufre (Stockman et Hlava 1984). Ce processus de disparition des *MGP* primaires a très probablement été favorisé par l'altération complète d'une bonne partie des silicates et, en particulier, de l'olivine et de l'orthopyroxène.

Le fait qu'une grande partie du Rh, du Pt et du Pd soit présente sous forme de phases minérales secondaires, contrairement aux minéraux à Ru, Os et Ir, reste problématique. Il se peut que la plupart des minéraux primaires de ces éléments étaient concentrés originellement dans les silicates, ce qui les a rendus vulnérables à l'altération. Ceci impliquerait alors une cristallisation primaire tardive de la plupart de ces minéraux, après les sulfures à Ru-Os-Ir et probablement après la chromite. Une autre possibilité est que la plupart des grains de ces minéraux primaires, formés en inclusion dans la chromite, ont été ensuite mis en contact avec les fluides de serpentinisation par un système de fissures tardives associées à la décompression et au refroidissement (Stockman et Hlava 1984). Cette possibilité n'explique cependant pas la présence, en quantité dominante, de minéraux secondaires à Rh, Pt et Pd dans les interstices entre les grains de chromite, ainsi que la rareté relative des minéraux secondaires à Ru, Os et Ir, qui sont abondants uniquement à l'indice Lambly-Nadeau.

Selon Oshin et Crockett (1982), les deux étapes de serpentinisation subies par les roches ultramafiques de l'ophiolite de Thetford Mines n'auraient amené que peu ou pas de remobilisation importante des *EGP*. Cette observation est soutenue dans la présente étude, puisqu'indépendamment de la minéralogie particulière à chaque gîte, les *MGP* primaires et secondaires ont été observés dans les mêmes chromitites. Cette association prouve obligatoirement soit une origine commune de tous ces minéraux, qui est à écarter, soit une remobilisation très locale d'une partie des *EGP* lors des processus d'altération.

Du point de vue du contexte global des minérali-

FIG. 4. *MGP* provenant du gîte Lemelin et de l'indice #1. A) Alliage complexe Cu-Fe-Pt-Ni-Pd (All), et arséniure de nickel légèrement plus foncé. B) Grain composite, constitué d'isoferroplatine (Iso), de cooperite (Coo), et de bowiéite(?), (Bo?), englobé dans la chromite (Cr). C) Série complexe de grains anguleux qui inclut un sulfure de nickel (Hea), un alliage complexe Cu-Ni-Fe-Pt-Pd (Cu), ainsi que le minéral inconnu #3 [RhNiAs ou (Rh,Ni)₂As] (Rh). D) Cabriite (Cab) et alliage complexe Pt-Pd-Cu-Fe (Pt-Pd) étroitement associés, dans une fissure de serpentine (S). E) Amas de grains de cabriite et d'un alliage complexe Pt-Pd-Cu-Fe. F) Grain de laurite automorphe.



sations, un bon rapprochement peut être fait avec les indices de chromite riches en *EGP* du complexe ophiolitique de Shetland (Neary *et al.* 1984, Gunn *et al.* 1985, Prichard *et al.* 1986, Prichard et Tarkian 1988). A cet endroit, toute une série de *MGP* ont été identifiés dans les chromitites, dont des antimoniures, des arséniures, des sulfures et des alliages. Quelques différences existent toutefois entre ces minéralisations et celles de Thetford Mines:

1) Les chromites riches en Rh-Pt-Pd de la région de Thetford Mines sont toutes situées stratigraphiquement dans la dunite de la séquence à cumulats. L'indice #1 (Finneth), qui serait situé dans la partie la plus supérieure dans la stratigraphie de l'ophiolite, est aussi le gîte le plus riche en Pd, ce qui laisse supposer un lien direct entre le rapport $(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)$ des gîtes et leur position stratigraphique (Gauthier *et al.* 1990). Ce lien est aussi observé dans les complexes lités stratiformes. Par contre, les minéralisations en chromite riches en *EGP* de Harold's Grave et de Cliff de l'ophiolite de Shetland sont localisés dans la péridotite (Prichard *et al.* 1986).

2) Malgré la grande variété de *MGP* présents aux deux endroits, il n'y a que deux minéraux qui aient été identifiés à date dans les deux ophiolites, la laurite et un alliage Pt-Pd-Cu. La raison de telles différences minéralogiques est liée, au moins en partie, au fait qu'une bonne part des *MGP* présents dans l'ophiolite de Shetland caractérise un milieu chimique riche en antimoine et en arsenic (Prichard et Tarkian 1989). A Thetford Mines, l'antimoine n'a été que très rarement signalé dans les minéraux analysés, tandis que les arséniures ne sont très communs qu'au gîte Lemelin. Il semble que ces deux éléments, pour des raisons méconnues, n'ont que peu formé de *MGP* dans l'ophiolite de Thetford Mines.

Du point de vue génétique, autant le modèle magmatique (Prichard *et al.* 1986, Prichard & Tarkian 1988) que le modèle hydrothermal (Gunn *et al.* 1985, Hulbert *et al.* 1988) ont été invoqués pour tenter d'expliquer la genèse des minéralisations de l'ophiolite de Shetland. Ces deux modèles pourraient aussi s'appliquer à Thetford Mines, quoiqu'à cet endroit, les arguments supplémentaires suivants viennent soutenir le modèle magmatique:

1) Une chromitite litée, à texture à cumulats, a été observée dans les gîtes Hall, Lemelin et l'indice #1 (Finneth). A la mine Hall, en particulier, des textu-

res et structures de minerai assez inusitées pour les chromitites d'une ophiolite ont été observées. Par exemple, il y a une texture bréchique, dans laquelle la chromitite en veines recoupe des fragments de dunite sub-arrondis à anguleux, et une texture antinodulaire, dans laquelle la chromitite englobe des fragments ou nodules centimétriques de dunite serpentinisée. Dans les deux cas, un milieu de mise en place de la chromitite à l'état visqueux est invoqué (Kaçira 1982, Corrivaux 1990). Il semble que seule la cristallisation de la chromite dans un milieu magmatique fortement perturbé par l'arrivée de nouveaux magmas ou de fluides ait pu amener l'apparition d'un tel minerai de chromite. Un exemple comme celui des potholes en Afrique du Sud (Kinloch 1982) témoigne déjà de tels phénomènes dans la chambre magmatique d'un complexe stratiforme (Gauthier *et al.* 1990).

2) Du point de vue de la géochimie, les chromitites à Rh-Pt-Pd qui ont été l'objet d'analyses quantitatives à la microsonde électronique (Corrivaux 1990) se sont avérées nettement plus enrichies en Fe et en Cr et appauvries en Mg et en Al que les chromitites provenant de gîtes n'ayant pas révélé d'anomalies en *EGP*. Les chromitites à Rh-Pt-Pd se caractérisent aussi par un rapport $Cr/(Cr + Al)$ nettement plus élevé et un rapport $Mg/(Mg + Fe)$ très faible pour les chromitites d'une ophiolite. Le lien entre la géochimie de la chromitite et la présence d'une minéralisation en *EGP* est donc évident.

CONCLUSIONS

Deux paragenèses à *MGP* importantes sont présentes dans l'ophiolite de Thetford Mines. Ces deux assemblages minéralogiques correspondent chacun à une genèse de formation distincte (Tableau 5). Il y a d'abord une série de minéraux primaires, qui sont surtout des sulfures à Ru-Os-Ir automorphes et de granulométrie fine. Les minéraux identifiés, reliques de cet environnement de cristallisation, sont tous totalement englobés dans la chromite. Il y a ensuite une série de minéraux xénomorphes, surtout à Rh-Pt-Pd et de granulométrie généralement plus grossière, qui sont présents dans la serpentine et la magnétite. La présence d'un tel assemblage minéralogique secondaire témoigne sans aucun doute de l'altération d'une partie des minéraux primaires, associée à la serpentinisation. Plus d'une étape d'alté-

FIG. 5. *MGP* provenant des gîtes Nayas et Lambly-Nadeau. A) Grain complexe, composé en bonne partie du minéral inconnu #5 (Rh_2SnCu , anal. #55). Les régions plus pâles sont composées d'awaruite platinifère. B) Minéral inconnu #5 (Rh_2SnCu , anal. #54), au centre d'une région de serpentine (S). C) Grain complexe, constitué de laurite (Lau), du minéral inconnu #1 (Ni-Ir-Fe-Cu-S). En haut, le petit grain blanc est le minéral inconnu #2 (Cu-Pt-S?). Au dessus et à gauche de l'inconnu #2, le minéral plus foncé serait de la chalcopyrite. D) Bâtonnet de ce qui pourrait être un produit de l'altération de l'iridosmine (Ir-Fe). A sa droite: minéral inconnu #4 ($Ru_3As?$). E) L'alliage Ru-Os(?) de forme sub-automorphe. F) Laurite automorphe provenant de la mine Sterrett (complexe ophiolitique d'Asbestos).

ration et de transformation des *MGP* peuvent être envisagées.

L'assemblage minéralogique primaire des *EGP* était très probablement dominé par les sulfures, qui sont ultérieurement devenus instables dans un milieu chimique appauvri en soufre. Ces sulfures, lorsqu'affectés par les fluides associés à la serpentinisation, ont laissé place aux alliages et, dans une moindre mesure, aux arséniures. Une remobilisation très locale des *EGP* a accompagné le tout.

REMERCIEMENTS

Cet article correspond à une partie d'un mémoire de maîtrise à l'Université du Québec à Montréal (UQUAM). Nous tenons à remercier M. Yves Morissette, président de Ressources Minières Coleraine Inc., pour le soutien tant financier que logistique de cette société à la présente étude. Ce document doit beaucoup aux remarques constructives de M. Michel Jebrak (UQAM) et de M. Louis J. Cabri (CANMET).

RÉFÉRENCES

- AHMED, Z. & BEVAN, J.C. (1981): Awaruite, iridian awaruite, and a new Ru-Os-Ir-Ni-Fe alloy from the Sakhakot-Qila Complex, Malakand Agency, Pakistan. *Mineral. Mag.* **44**, 225-230.
- AUGÉ, T. (1988): Platinum-group minerals in the Tiébaghi and Vourinos ophiolitic complexes: genetic implications. *Can. Mineral.* **26**, 177-192.
- BARNES, S.J., NALDRETT, A.J. & GORTON, M.P. (1985): The origin of fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.* **53**, 303-323.
- BIRD, J.M. & DEWEY, J.F. (1970): Lithosphere plate-continent margin tectonics and the evolution of the Appalachian orogen. *Geol. Soc. Am. Bull.* **78**, 379-388.
- CABRI, L.J., ed. (1981): Platinum-Group Elements: Mineralogy, Geology, Recovery. *Can. Inst. Min. Metall., Spec. Vol.* **23**.
- _____, CRIDDLE, A.J., LAFLAMME, J.H.G., BEARNE, G.S. & HARRIS, D.C. (1981): Mineralogical study of complex Pt-Fe nuggets from Ethiopia. *Bull. Minéral.* **104**, 508-525.
- _____ & NALDRETT, A.J. (1984): The nature of the distribution and concentration of platinum-group elements in various geological environments. *Proc. 27th Int. Geol. Congress* **10**, 17-46.
- CHAMBERLAIN, J.A. (1966): Heazlewoodite and awaruite in serpentinites of the Eastern Townships, Quebec. *Can. Mineral.* **8**, 519-522.
- COLEMAN, R.G. (1977): *Ophiolites, Ancient Oceanic Lithosphere?* Springer Verlag, Berlin.
- CORRIVAUX, L. (1990): *Étude des Gîtes de Chrome-Platine du Canton de Coleraine, Estrie*. Mémoire de maîtrise, Univ. Québec à Montréal.
- DENIS, B.T. (1932): Les gisements de chromite des Cantons de l'Est de la Province de Québec. *Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport annuel du service des mines du Québec pour l'année 1931, partie D*.
- DESBOROUGH, G.A. & CRIDDLE, A.J. (1984): Bowieite: a new rhodium-iridium-platinum sulfide in platinum-alloy nuggets, Goodnews Bay, Alaska. *Can. Mineral.* **22**, 543-552.
- EVSTIGNEVA, T.L. & GENKIN, A.D. (1983): Cabriite Pd₂SnCu, a new species in the mineral group of palladium, tin and copper compounds. *Can. Mineral.* **21**, 481-487.
- GAUTHIER, M., AUCLAIR, M., BARDOUX, M., BLAIN, M., BOISVERT, D., BRASSARD, B., CHARTRAND, F., DARIMONT, A., DUPUIS, L., DUROCHER, M., GARIÉPY, C., GODUE, R., JEBRAK, M. & TROTTIER, J. (1988): Synthèse métallogénique de l'Estrie et de la Beauce. *Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport final*.
- _____, CORRIVAUX, L., TROTTIER, J., CABRI, L.J., LAFLAMME, J.H.G. & BERGERON, M. (1990): Chromitites platinifères des complexes ophiolitiques de l'Estrie-Beauce, Appalaches du Sud du Québec. *Miner. Deposita* (sous presse).
- _____ & TROTTIER, J. (1987): Platinoïdes dans les chromitites de l'Estrie-Beauce. *Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, Document de Promotion* **14**.
- GENKIN, A.D. (1978): Majakite, PdNiAs, a new mineral from copper-nickel sulfide ores. *Int. Geol. Rev.* **20**, 96-100.
- GUNN, A.G., LEAKE, R.C. & STYLES, M.T. (1985): Platinum-group element mineralisation in the Unst Ophiolite, Shetland. *British Geol. Surv., Mineral Reconnaissance Programme Report* **73**.
- HULBERT, L.J., DUKE, J.M., ECKSTRAND, O.R., LYDON, J.W., SCOATES, R.F.J., CABRI, L.J. & IRVINE, T.N. (1988): Geological environments of the platinum group elements. *Geol. Surv. Can., Open-File Rep.* **1440**.
- JOHAN, Z. (1986): Chromite deposits in the Massif du Sud ophiolite, New Caledonia. In *Chromite: Genetic Considerations*. Theophrastus Publications, Athens (311-339).
- KAÇIRA, N. (1971): *Geology of Chromite Occurrence and Ultramafic Rocks of the Thetford Mines - Dis-*

- raeli Area, Quebec*. Ph.D. thesis, Univ. Western Ontario, London, Ontario.
- ____ (1982): Chromite occurrences of the Canadian Appalachians. *Can. Inst. Min. Metall. Bull.* **75**(837), 73-82.
- KINLOCH, E.D. (1982): Regional trends in the platinum-group mineralogy of the critical zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Econ. Geol.* **77**, 1328-1347.
- LAURENT, R. (1977): Ophiolites from northern Appalachians of Québec. In North American Ophiolites (R.G. Coleman & W.P. Irwin, eds.). *Oregon Dep. Geol. Mineral Ind., Bull.* **95**, 25-40.
- ____ & KAÇIRA, N. (1987): Chromite deposits in the Appalachian ophiolites. In Evolution of Chromium Ore Fields (C.W. Stowe, ed.). Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- LOGAN, W.E. (1864): Rapport de progrès depuis son commencement jusqu'en 1863. Commission Géologique du Canada. Dawson Frères, Montréal, Québec.
- NEARY, C.R., PRICHARD, H.M. & POTTS, P.J. (1984): Chromite, platinoids, gold and moly in the Shetlands. *Mining Mag.* **151**, 559-560.
- NICKEL, E.H. (1959): The occurrence of native nickel-iron in the serpentine rock of the Eastern Townships of Quebec Province. *Can. Mineral.* **6**, 307-319.
- NILSSON, L.P. (1987): Platinum-group mineral inclusions in chromitite from ophiolitic tectonites in the Caledonides of Norway. In Troodos-87, Ophiolites and Oceanic Lithosphere (Nicosia, Cyprus). *Geol. Surv. Department, Abstr.*, 152.
- ____ (1989): Platinum-group mineral inclusions in ophiolitic chromitite from the Osthammeren tectonite body, Norway. *Geol. Soc. Finland Bull.* **61**, (1), 42-43 (abstr.).
- NIXON, G.T., CABRI, L.J. & LAFLAMME, J.H.G. (1990): Platinum-group-element mineralization in lode and placer deposits associated with the Tulameen Alaskan-type complex, British Columbia. *Can. Mineral.* **28**, 503-535.
- OSHIN, I.O. & CROCKET, H.J. (1982): Noble metals in Thetford Mines ophiolites, Québec, Canada. 1. Distribution of gold, iridium, platinum, and palladium in the ultramafic and gabbroic rocks. *Econ. Geol.* **77**, 1556-1570.
- PAGE, N.J., CASSARD, D. & HAFFTY, J. (1982): Palladium, platinum, rhodium, ruthenium, and iridium in chromitites from the Massif du Sud and Tiébaghi Massif, New Caledonia. *Econ. Geol.* **77**, 1571-1577.
- ____, SINGER, D.A., MORING, B.C., CARLSON, C.A., MCDADE, J.M. & WILSON, S.A. (1986): Platinum-group elements resources in podiform chromitites from California and Oregon. *Econ. Geol.* **81**, 1261-1271.
- PRICHARD, H.M., NEARY, C.R. & POTTS, P.J. (1986): Platinum group minerals in the Shetland Ophiolite. In Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks (M.J. Gallagher, R.A. Ixer, C.R. Neary & H.M. Prichard, eds.). Inst. Mining and Metallurgy, London (395-414).
- ____ & TARKIAN, M. (1988): Platinum and palladium minerals from two PGE-rich localities in the Shetland ophiolite complex. *Can. Mineral.* **26**, 979-990.
- RUDASHEVSKY, N.S., MENSHIKOV, Y.P., MOCHALOV, A.G., TRUBKIN, N.V., SHUMSKAYA, N.I. & ZHDANOV, V.V. (1985): Cuprorhodsite CuRh_2S_4 and cuproiridsite CuIr_2S_4 - new natural thiospinels of platinum group elements. *Zap. Vses. Mineral. Obshchest.* **119**, 187-195 (en Russe).
- ____, MOCHALOV, A.G., MENSHIKOV, Y.P. & SHUMSKAYA, N.I. (1983): Pt_2FeNi , a new mineral species. *Zap. Vses. Mineral. Obshchest.* **112**, 487-494 (en Russe).
- ST-JULIEN, P. & HUBERT, C. (1975): Evolution of the Taconian orogen in the Quebec Appalachians. *Am. J. Sci.* **275A**, 337-362.
- ____ & SLIVITSKY, A. (1985): Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MM-85-04.
- STOCKMAN, H.W. & HLAVA, P.F. (1984): Platinum-group minerals in Alpine chromitites from southwestern Oregon. *Econ. Geol.* **79**, 491-508.
- TALKINGTON, R.W. (1986): Platinum-group element potential of the chromitite deposits, Lewis Hills, Bay of Islands ophiolites, Newfoundland. *Geol. Soc. Am., Abstr. Program* **18**, 70.
- ____, WATKINSON, D.H., WHITTAKER, P.J. & JONES, P.C. (1984): Platinum-group minerals and other solid inclusions in chromite of ophiolitic complexes: occurrences and petrological significance. *Tschermaks Mineral. Petrog. Mitt.* **32**, 285-301.
- WILLIAMS, H. & ST-JULIEN, P. (1978): The Baie Verte - Brompton Line in Newfoundland and regional correlations in the Canadian Appalachians. *Geol. Surv. Can., Pap.* **78-1A**, 225-229.
- ____ & ____ (1982): The Baie Verte - Brompton Line: early Paleozoic continent ocean interface in the Canadian Appalachians. In Major Structural Zones and Faults of the Northern Appalachians (P. St-Julien & J. Béland, eds.). *Geol. Assoc. Can., Spec. Vol.* **24**, 177-208.