

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU GRADE DE MAITRISE EN SCIENCE DE LA TERRE

PAR  
CHAKIB BOUCHAIB

DISTRIBUTION DU CU, NI, CO, EGP, AU ET AG DANS  
LES SULFURES DE LA MINE LORRAINE.

MAI 1992



### **Mise en garde/Advice**

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## RÉSUMÉ

Le dépôt de sulfures de Cu, Ni de la mine Lorraine est associé au contact entre un gabbro syn-volcanique et des laves mafiques tholéitiques de la bande de Lac du Bois. Cette dernière est située dans la ceinture verte d'Angliers-Belleterre au sud de la province du Supérieur du Québec.

La lentille de sulfures est en grande partie englobée dans des laves mafiques et jalonne une zone de cisaillement subparallèle à la foliation régionale. Cette lentille exhibe une zonalité à travers le dépôt, caractérisée par une zone centrale massive à pentlandite et pyrrhotite, et une auréole de sulfures disséminés essentiellement cuprifères.

L'étude pétrographique du minerai montre des évidences de la déformation (extinction ondulante, macles de déformations polysynthétiques, textures granoblastiques de pyrrhotite et chalcopryrite ainsi que la foliation dans les sulfures). La chalcopryrite est infiltrée dans les fractures de pyrrhotite, magnétite, pyrite et minéraux silicatés. Sachant que la chalcopryrite est plus ductile relative aux autres phases minérales, sa mobilité peut expliquer la zonalité observée dans le minerai. Dans ce sens, la déformation de la lentille de sulfures massifs produit une migration de la chalcopryrite du minerai massif vers les zones de basse pression (fractures) par transfert de masse à l'état solide. Par conséquent, la chalcopryrite remobilisée constituera le minerai disséminé en bordure du dépôt, et les zones du minerai originel deviennent massives, enrichies en pyrrhotite et pentlandite. D'autre part, les sulfures disséminés sont riches en Cu, Au, Ag et Zn alors que les sulfures massifs sont riches en Ni et Co. Cette zonalité géochimique reflète la zonalité de la chalcopryrite, pyrrhotite et pentlandite décrite précédemment.

Les sulfures massifs et disséminés ont un contenu très bas en Os, Ir, Ru et Rh avec des patrons d'EGP extrêmement fractionnés ( $Pd/Ir > 1000$ ) semblable aux types généralement associés aux sulfures riches en Cu. Ces patrons d'EGP sont similaires à ceux des veines riches en Cu de la mine de Levack West à Sudbury. Cependant, contrairement à ce qu'on observe dans la littérature, les sulfures

massifs de la mine Lorraine sont pauvres en Cu avec des patrons d'EGP fractionnés. Ces EGP ne montrent pas de distribution systématique dans les sulfures de même pour le Pd et le Cu qui ne sont corrélés entre eux.

Les bismutho-téllurures riches en Pd et Pt sont les seules phases minérales du groupe du platine qui ont été identifiées. Ces dernières ont été observées exclusivement dans la pyrrhotite du minerai massif. Toutefois, la présence de ces bismutho-téllurures peut expliquer la distribution irrégulière du Pd et Pt car ces minéraux précipitent à basse température et leur présence peut refléter la redistribution locale des métaux nobles par les fluides de basse température.

Le modèle général de formation des sulfures de la mine Lorraine nécessite trois étapes: d'abord, a) la mise en place du dépôt de sulfures de la mine Lorraine appauvrit en Os-Ir-Ru-Rh, ensuite b) une déformation de la lentille de sulfures qui produit l'expulsion de la chalcopryrite à partir du minerai massif central riche en pyrrhotite et pentlandite vers la bordure du dépôt pour former les sulfures disséminés, et enfin c) une redistribution locale du Pd et Pt par les fluides de basse température. Deux hypothèses sont à considérer lors de la première étape - formation du dépôt de sulfures de Cu-Ni appauvrit en Os-Ir-Ru-Rh - par le fractionnement du liquide de sulfures magmatique ou bien un dépôt de type hydrothermal. Dans les deux cas l'existence d'un cumulat de sulfures riches en Os-Ir-Ru-Rh est possible dans la région.

## ABSTRACT

The Cu-Ni sulphide deposit of the Lorraine Mine is associated with the contact between a syn-volcanic gabbro and tholeiitic mafic lavas in the Lac du Bois section of the Belleterre-Angliers greenstone belt of the southern Superior Province of Quebec.

The sulphide lens of the Lorraine Mine is almost completely contained within the lavas and occurs along a shear zone subparallel to the foliation. The lens exhibits a mineralogical zonation characterized by a central massive sulphide zone rich in pyrrhotite and pentlandite surrounded by a chalcopyrite-rich disseminated sulphide zone.

Petrographic study of the ore shows evidence of deformation (deformation twins, undulous extinction, granoblastic texture, and foliation of the sulphides). Chalcopyrite fills fractures in the pyrrhotite, magnetite and the silicate minerals. As chalcopyrite is known to be more ductile than the other minerals this textural evidence may be used to explain how the zonation of the ore arose. A massive lens of sulphide ore was deformed and during deformation chalcopyrite migrated from the massive ore into zones of lower pressure (the fractures) by solid state mass induced transfer. The chalcopyrite that migrated produced the marginal disseminated ore and the zones from which it migrated became the massive sulphide, rich in pyrrhotite and pentlandite. The disseminated sulphides are rich in Cu, Au, Ag and Zn in contrast the massive sulphides are rich in Ni and Co. This geochemical zonation reflects the zonation in chalcopyrite, pyrrhotite and pentlandite described above.

Both the massive and disseminated sulphides have very low contents of Os, Ir, Ru and Rh with extremely fractionated PGE patterns ( $\text{Pd/Ir} > 1000$ ) of the type generally associated with Cu-rich ore. The PGE patterns of the sulphides resemble the Cu-rich veins of Levack West Mine of Sudbury. However, the massive sulphides are Cu-poor relative to other sulphides with fractionated PGE patterns. In contrast to other examples of disseminated and massive sulphides, the Lorraine Mine sulphides show no systematic distribution of the PGE and no correlation between Pd and Cu.

The only platinum-group minerals that were observed are palladium and platinum bismutho-tellurides in the pyrrhotite of the massive sulphide. The presence of the palladium bismutho-tellurides may explain the erratic distribution of Pd and Pt because these are minerals that precipitate at low temperature and the presence of these minerals may reflect local redistribution of these elements by a low-temperature fluid.

The overall model formation of the Lorraine Mine sulphide involves three steps a) formation of a Ni-Cu sulphide body depleted in Os-Ir-Ru-Rh b) deformation of the sulphide lens resulting in the migration of chalcopyrite to the margins of the body to form the disseminated sulphides and leaving a core of massive sulphide rich in pyrrhotite and pentlandite c) local redistribution of Pd and Pt by a low temperature fluid. There are two ways in which the first step-formation of a Ni-Cu sulphide body depleted in Os-Ir-Ru-Rh- could have occurred either the Lorraine Mine sulphides represent a fractionated Cu-rich igneous sulphide liquid or they represent hydrothermal sulphides. In both cases the possibility exists that there are Os-Ir-Ru-Rh rich sulphides as yet undiscovered in the area.

## REMERCIEMENTS

Tous d'abord, je tiens<sup>s</sup> surtout à remercier mon directeur de thèse Sarah- Jane Barnes pour son suivi et sa disponibilité durant la réalisation de ce projet, pour toutes les discussions et suggestions abordées dans les différentes étapes de ce mémoire, qui m'ont été d'un intérêt appréciable.

Je voudrais également remercier les membres de mon comité de thèse, E.W. Sawyer et P. Cousineau pour leurs commentaires constructives dans la présentation de ce travail.

Finalement, je dédie ce modeste travail à ma mère.

## TABLE DES MATIERE

	Page
RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	iii
REMERCIEMENTS.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES PLANCHES.....	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
 CHAPITRE I      INTRODUCTION .....	 1
 CHAPITRE II     GÉOLOGIE RÉGIONALE.....	 3
 CHAPITRE III    GÉOLOGIE LOCALE.....	 8
 CHAPITRE IV    PÉTROGRAPHIE	
4. 1   Les roches encaissantes.....	12
4.1.1 Les laves.....	12
4.1.2 Intrusion mafique.....	14
4. 2   Les sulfures.....	15
4.2.1 sulfures à texture massive.....	16
4.2.2 sulfures à texture disséminée.....	23
 CHAPITRE V    DÉFORMATION.....	 25



## CHAPITRE VI GÉOCHIMIE

6.1 Méthodes d'analyses .....	30
6.2 Géochimie des roches mafiques.....	30
6.2.1 Éléments majeurs.....	30
6.2.2 Éléments traces.....	36
6.3..Géochimie des roches minéralisées.....	40
6.3.1 Distribution des éléments lithophiles.....	40
a) Éléments majeurs.....	40
b) Éléments traces.....	44
6.3.2 Distribution des éléments chalcophiles.....	45
a) Distribution des éléments chalcophiles et sidérophiles dans le dépôt de la mine Lorraine .....	45
b) Comparaison avec d'autres exemples de sulfures différenciés .....	55

## CHAPITRE VII DISCUSSION

Mise en place de la lentille de sulfures.....	59
Remobilisation des sulfures.....	60
1- <i>Évidences texturales d'une remobilisation des sulfures dans le         dépôt de la mine Lorraine.....</i>	60
2- <i>Évidences d'une redistribution par les fluides des éléments lithophiles         et chalcophiles dans la mine Lorraine.....</i>	63

2- <i>Évidences d'une redistribution par les fluides des éléments lithophiles et chalcophiles dans la mine Lorraine</i> .....	63
CHAPITRE VIII CONCLUSION.....	66
RÉFÉRENCES.....	68

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Localisation de la ceinture d'Angliers-Belleterre dans le sud de la province géologique du supérieur du Québec (modifié de Hocq, 1990).....4
- Figure 2. Localisation de la mine Lorraine dans la ceinture d'Angliers-Belleterre (modifié de Avramtchev et Lebel-Drolet, 1981).....6
- Figure 3. Carte géologique du secteur de la mine Lorraine avec localisation des échantillons de roche encaissante.....9
- Figure 4. Coupe verticale (N 65° E) de la lentille de sulfures avec les teneurs moyennes en métaux correspondant aux quatres premiers niveaux économiques de la mine Lorraine. (Données et dessin modifiés de Descarreaux, 1967).....10
- Figure 5. Les différentes textures macroscopiques dans le minerai de la mine Lorraine. a) Zonalité macroscopique dans le minerai à texture massive. b) Texture de remplacement de la gangue par la chalcoppyrite dans le minerai disséminé. c) Texture bréchique dans le minerai à texture massive.....27
- Figure 6. a) Les laves et les intrusions mafiques de la ceinture de Lac du Bois correspondant à la série subalcaline (modifié d'Irvine et Baragar, 1971). b) Dans le diagramme AFM, la différenciation des roches mafiques s'effectue dans le champ tholéitique (modifié d'Irvine et Baragar, 1971).....32
- Figure 7. La composition chimique de la série tholéitique dans la ceinture de Lac du Bois est du type riche en fer (modifié de Jensen, 1976).....35

Figure 8. a) Tholéites des îles-en-arc dans le diagramme de discrimination des éléments majeurs (modifié de Mullen, 1983). b) Les éléments traces discriminants, définissent les roches de Lac du Bois dans les basaltes de type arc volcanique (modifié de Meschede, 1986).....37

Figure 9. Distribution des éléments traces en fonction de l'indice de différenciation MgO.....38

Figure 10. Affinité tholéitique des terres rares dans les laves et intrusions mafiques de la ceinture de Lac du Bois .....39

Figure 11. Distribution des éléments traces dans les gabbros et basaltes de la ceinture de Lac du Bois .....39

Figure 12. Comparaison de la composition chimique des roches minéralisées (sulfures disséminés) avec l'encaissant stérile (basaltes et gabbros) de la mine Lorraine .....43

Figure 13. Roches stériles et minéralisées de la mine Lorraine normalisées à 100% silicates. (même symboles que dans la Fig. 12).....43

Figure 14. Correlation entre les éléments chalcophiles dans les sulfures à 100%. Mine Lorraine.....48-49

Figure 15. Variation des rapports Pt/(Pt+Pd) dans les sulfures de la mine Lorraine normalisés à 100% (même symboles que dans la Fig. 14).....50

Figure 16. Distribution des éléments du groupe du platine et métaux associés dans la lentille de sulfures de la mine Lorraine (normalisation au manteau de Barnes et al., 1988).....52

Figure 17. Comparaison entre les patrons d'EGP des sulfures massifs et disséminés de la mine Lorraine (normalisation au manteau de Barnes et al., 1988).....53

- Figure 18. Composition et classification des sulfures de la mine Lorraine dans le diagramme de discrimination de roche mafiques et ultramafiques (modifié de Barnes et al., 1988).....56
- Figure 19. Concentrations moyennes en EGP et métaux associés dans les sulfures normalisés à 100 %: dans les veines enrichies en Cu du dépôt de Levack West à Sudbury (Naldrett et al., 1982), et les sulfures massifs et disséminés de la mine Lorraine.....57
- Figure 20. Modèles possibles pour générer des dépôts de sulfures de composition comparable à celle de la lentille de la mine Lorraine.....61

## LISTE DES PLANCHES

Planche 1. a)- Laves mafiques à texture gabboïque près du contact de l'intrusion mafique de la mine Lorraine. b)- Veines de sulfures (Sul) recoupant le faciès amphibolitique, qui est défini par les porphyroblastes à hornblende pœcilitique (Hb) avec inclusions de minéraux de plagioclases séricitisés (Sér). L.N. Ech. ML2.....13

Planche 2. a)- Minerai à texture massive avec inclusions de gangue (Gn) fréquentes et chalcopryrite (jaune) associée. Pyrrhotite (Po), pentlandite (Pn). L.R. Ech. ML5. b) Minerai à texture disséminée. Veines de sulfures (Sul) avec inclusions de minéraux de gangue orientés et altérés (brun). Encaissant (Gn). L.N. Ech ML2. ....17

Planche 3. a)- Minerai à texture massive montrant, en nicols légèrement décroisés, des porphyroblastes de pyrrhotites (Po), avec macles de déformation polysynthétiques. Magnétite (Mgt). L.R. Ech. ML11. b)- Pyrrhotite massive (Po) à texture granoblastique avec grains de magnétite (Mgt) dispersés. L.R, nicols décroisés. Ech 4A. c)- Chalcopryrite avec macles de déformations polysynthétiques observés à la jonction du point triple de la pyrrhotite (Po) granoblastique et associée à la magnétite (Mgt). L.R, en nicols décroisés. Ech 31D.....18

Planche 4. a)- Porphyroblastes de pyrite (blanc) cubiques infiltrés par la chalcopryrite (Cp) dans les fractures orientées suivant les plans cristallographiques. Pyrrhotite (brun). Pyrrhotite (Po). L.R. Ech. 31F. b)- Brèches de magnétite (Mgt) cimentés par la chalcopryrite (Cp) dans le minerai massif cisailé. Pyrrhotite (Po). gangue (Gn). L.R. Ech. 4D.....21

Planche 5. a)- Mélonites (Mel) localisés sur la bordure entre la chalcoppyrite (Cp) et la pyrrhotite (Po). Pyrrhotite (Po), gangue (Gn). L.R. Ech. ML5. b)- Agrégats de cristaux de mélonites automorphes, associés à la gangue (Gn), chalcoppyrite (Cp), magnétite (Mgt) et pyrrhotite (Po). L.R. Ech. ML12.....22

## LISTE DES TABLEAU

Tableau 1. Composition chimique des roches mafiques de Lac du Bois.....	33
Tableau 2. Composition chimique des gabbros de Lac du Bois.....	34
Tableau 3. Composition chimique des roches minéralisées de la mine Lorraine.....	42
Tableau 4. Roches minéralisées et normalisées à 100% silicates dans la mine Lorraine.....	43
Tableau 5. Différents modes de classification des sulfures de la mine Lorraine.....	46
Tableau 6. Roches minéralisées et normalisées à 100% sulfures dans la mine Lorraine.....	47
Tableau 7. Concentration moyenne des métaux dans les sulfures (à 100%) de la mine Lorraine et de Levack West (Sudbury).....	57



## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

Les dépôts de sulfures de Cu, Ni et EGP sont associés spatialement et génétiquement aux roches mafiques et ultramafiques et sont issus en général d'une ségrégation magmatique. Néanmoins, l'action des fluides tardi-magmatiques ou deutériques (Merensky Reef dans Ballhaus et Stumpfel, 1986) et post-magmatiques (Kambalda dans Lesher et Keays, 1984) contribuent parfois d'une manière plus effective à l'édification de concentrations économiques de métaux chalcophiles mobiles (Cu, Pd, Pt, Au, Ag, Te et Bi) remobilisés à partir de leurs sites originels. Les dépôts de Rathburn Lake (Rowell and Edgar, 1986), New Rambler (McCallum et al., 1976) et Messina (Mihalik et al., 1974) ont été considérés comme des dépôts de type hydrothermal, par un lessivage des métaux à partir d'une source mafique par des fluides hydrothermaux et précipités dans des zones de cisaillements quand les conditions du milieu sont adéquates. Les travaux théoriques de Mountain et Wood (1988) ont confirmé l'action des fluides durant la dissolution, le transport et le dépôt des EGP dans des conditions hydrothermales.

D'autre part, l'action des fluides n'est pas toujours le processus primordial dans la modification de la signature originelle des sulfures de Cu, Ni et EGP. En effet, la déformation peut générer également une remobilisation dynamique à l'état solide dans les dépôts de sulfures en général avec souvent la contribution des fluides au stade tardif de la déformation, quand la perméabilité est favorable (Barrett et al., 1977; Talkington et Watkinson, 1984; et McQueen, 1987), et une

reconcentration des EGP par les fluides hydrothermaux le long des fractures et des zones de cisaillements (Paterson et Watkinson, 1984).

Le sujet de cette étude est le dépôt de sulfures de Cu, Ni, EGP, Au et Ag de la mine Lorraine, qui est localisé dans la bande volcanique de Lac du Bois en Abitibi-Témiscamingue du Québec (Canada). Cette lentille de sulfures est associée à une zone de cisaillement le long du contact entre les laves et une intrusion gabbroïque.

De part le contexte géologique de mise en place, le caractère qui a suscité le plus d'intérêt dans l'étude des sulfures de la mine Lorraine est la zonalité minéralogique et chimique à travers le dépôt (Descarreaux, 1967). La question est de savoir est-ce que cette zonalité est primaire, c'est-à-dire résultante de la différenciation dans la solution solide de monosulfure (mss), ou générée par les événements tectono-métamorphiques qui ont marqué la géologie de la région après la mise en place de la lentille de sulfures dans son site actuel.

Dans ce sens, on s'est basé sur les descriptions pétrographiques des échantillons recueillis en surface et sur les analyses géochimiques de l'encaissant stérile et des sulfures, pour définir la distribution des éléments chalcophiles et lithophiles. Les différentes données récoltées de cette étude vont nous permettre probablement de voir le degré d'influence des processus géologiques post-magmatiques, comme la déformation (effet dynamique) et / ou la circulation des fluides (effet chimique), dans la distribution des métaux dans les sulfures associés aux zones de déformations.

## CHAPITRE II

### GÉOLOGIE RÉGIONALE

La ceinture d'Angliers-Belleterre est située dans la sous province du Pontiac (Fig. 1) (Hocq, 1990), cette dernière constitue la partie sud de la province géologique du Supérieur (Card, 1990).

Les roches volcaniques, qui constituent la sous province du Pontiac, sont représentées de l'est vers l'ouest par la bande volcanique de Belleterre, de Lac du Bois et de Baby (Fig. 2), et sont localisées à au moins 8 km au nord du front de Grenville. Des intrusions de granitoïdes recoupent la série volcano-intrusive et sont interprétées comme syntectoniques à tarditectoniques (Hocq, 1990). Les datations à U/Pb (Mortensen et al., 1988) sur les tonalites qui recoupent la ceinture de Angliers-Belleterre, définissent un âge de 2.695 Ga.

L'ensemble des séries qui constituent la sous province du Pontiac ont été affectées par l'orogénèse kénorienne d'environ 2.65 Ga (Hocq, 1990).

Une large intrusion massive de granodiorite et de granite rose limite au nord la bande volcanique de Lac du Bois; le contact avec les laves et les gabbros de cette bande est tectonisé. La limite sud est constituée de roches sédimentaires métamorphisées en paraschistes à biotite. La bande volcanique de Lac du Bois porte le plus d'intérêt dans cette étude en raison des intrusions mafiques avec des sulfures de Cu, Ni qui sont associés exclusivement à cette série volcanique. Des

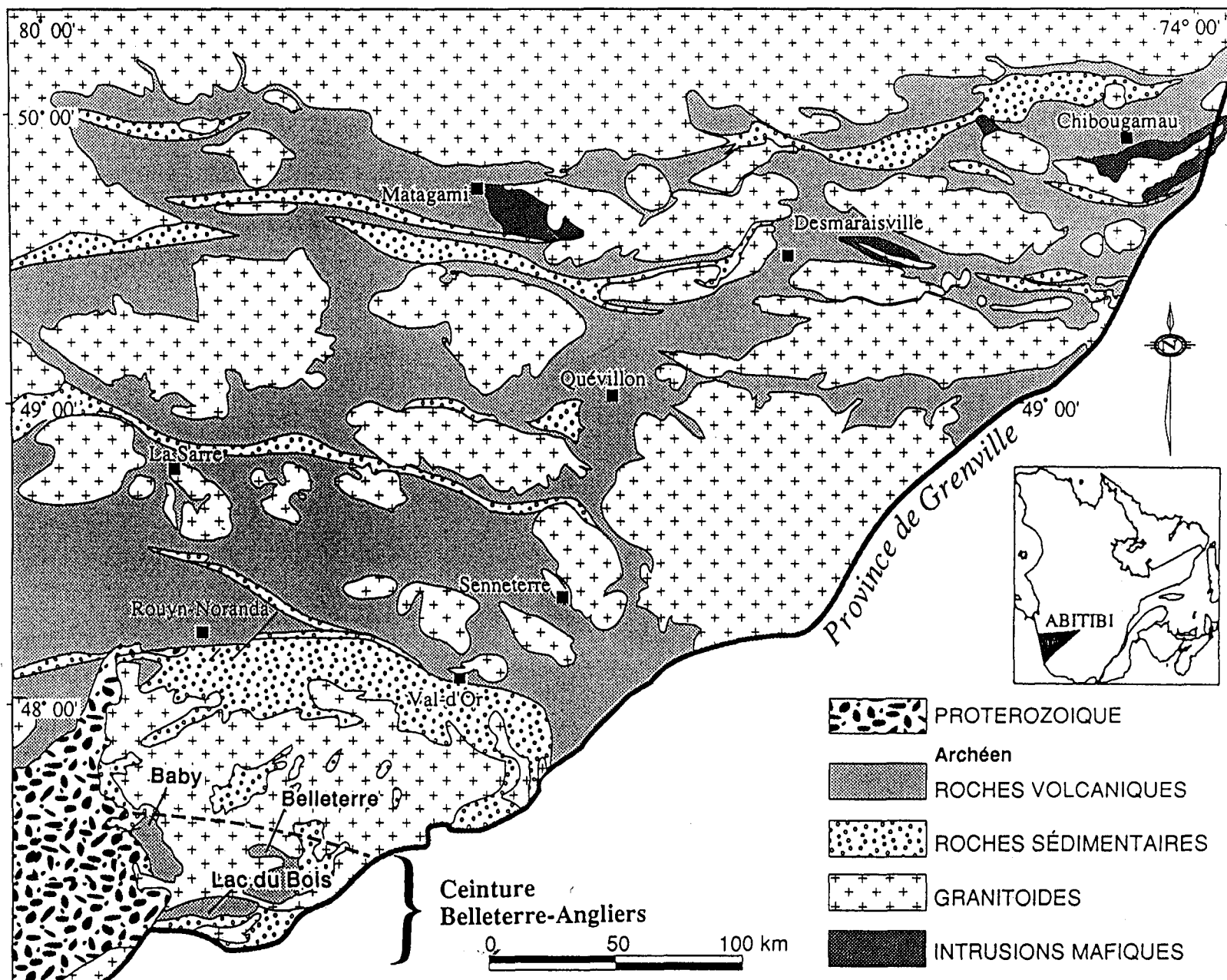


Fig. 1 Localisation de la ceinture d'Angliers-Bellettre dans le sud de la province géologique du supérieur du Québec (modifié de Hocq, 1990).

relations similaires ont également été mentionnées par Imreh (1978) pour les intrusions basiques de la bande volcanique de Baby, le correspondant à l'ouest de la bande de Lac du Bois dans la ceinture d'Angliers-Belleterre, qui sont définies dans un contexte géologique très comparable à celui de la bande volcanique de Lac du Bois. Les roches volcaniques de la bande centrale de Lac du Bois sont constituées de laves massives et en coussins de composition variable, allant des séries les plus felsiques aux séries mafiques. Dans la sous province de l'Abitibi, on assiste également à des intrusions antékénoriennes, comme les lacolithes de gabbro, qui sont directement associées à l'activité volcanique mais aussi aux plaines de laves à l'extérieur des complexes volcaniques (Dimroth et al., 1982).

Durant la phase principale du métamorphisme qui a affecté la région, les roches volcaniques et les intrusions mafiques de la bande de Lac du Bois sont métamorphisées au faciès schiste vert et ont subi des transformations texturales. Sur la bordure de certaines intrusions mafiques comme au Lac du Bois, au lac Girard (Kish, 1971) et à la mine Lorraine (Descarreaux, 1967), les auteurs mentionnent un faciès amphibolitique qui semble être issu du métamorphisme thermal de contact. L'équivalent au sud du métamorphisme régional produit des paraschistes à biotites dans la série sédimentaire.

L'exploration faite sur cette bande volcanique de Lac du Bois a permis d'inventorier des indices minéralisés de type Cu, Ni qui sont spatialement associés aux intrusions mafiques (Kish, 1971). Certaines minéralisations de ce type, comme c'est le cas du dépôt de la mine Lorraine, ont déjà été exploités.

Imreh (1978) mentionne dans la bande volcanique de Baby que les intrusions gabboïques, qui sont les plus favorables à la minéralisation, se manifestent dans

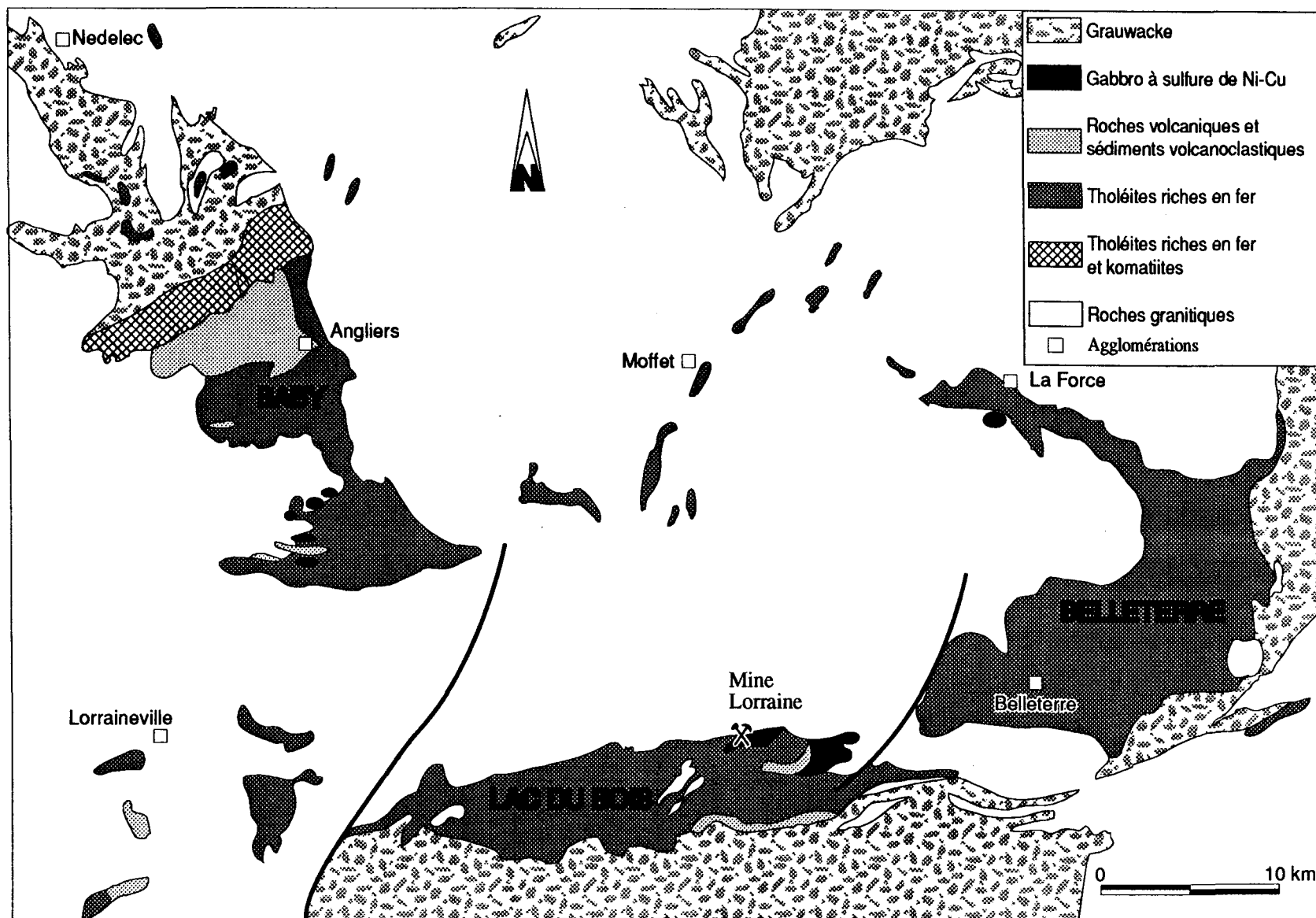


Fig. 2 Localisation de la mine Lorraine dans la ceinture d'Angliers-Belleterre.  
(Modifié de Avramtchev et Lebel-Drolet, 1981)

un niveau lithostratigraphique particulier, intimement liés à la séquence volcanique supérieure de la série de Baby.

Les sulfures associés aux intrusions mafiques de la ceinture d'Angliers-Belleterre sont riches en EGP (Barnes et al., 1990), c'est le cas des dépôts de la mine Lorraine, Midrim, Lac Croche, Alotta, Lac Kelly et Delphi-2 dont la teneur en EGP + Au dans les échantillons riches en sulfures est de 1 à 2 ppm.

### CHAPITRE III

#### GÉOLOGIE LOCALE

Les différentes formations géologiques qui constituent la région de la mine Lorraine sont caractérisées par un assemblage minéral de basse température de type schiste vert, et sont marquées par une foliation est-ouest (Fig. 3). Des dykes felsiques à phénocristaux de feldspaths et de couleur pâle, recoupent les roches volcaniques et la structure régionale.

Les intrusions mafiques aux alentours de la mine Lorraine montrent un contact défini par une variation abrupte et non différenciée. L'intrusion tardive des granodiorites affecte l'évolution tectonique de la région (Kish, 1971). L'intrusion affleure à quelques kilomètres au nord de la mine Lorraine et montre des déformations intenses qui sont beaucoup plus évidentes près du contact avec les roches volcaniques et révélé par la présence de porphyroblastes de quartz montrant des rotations dextres. Cette masse de granodiorite comporte des enclaves de roches mafiques entraînées lors de la mise en place (Kish, 1971) et qui attestent ainsi de l'ampleur de cette déformation.

La lentille de sulfures de la mine Lorraine est associée spatialement (et génétiquement) à l'intrusion mafique. Les sulfures jalonnent le contact géologique entre les gabbros et les roches volcaniques (Fig. 4), et sont associés à une zone de cisaillement orientée à N 60° E. En profondeur, ces sulfures sont englobés en grande partie dans les roches volcaniques (Descarreaux, 1967).



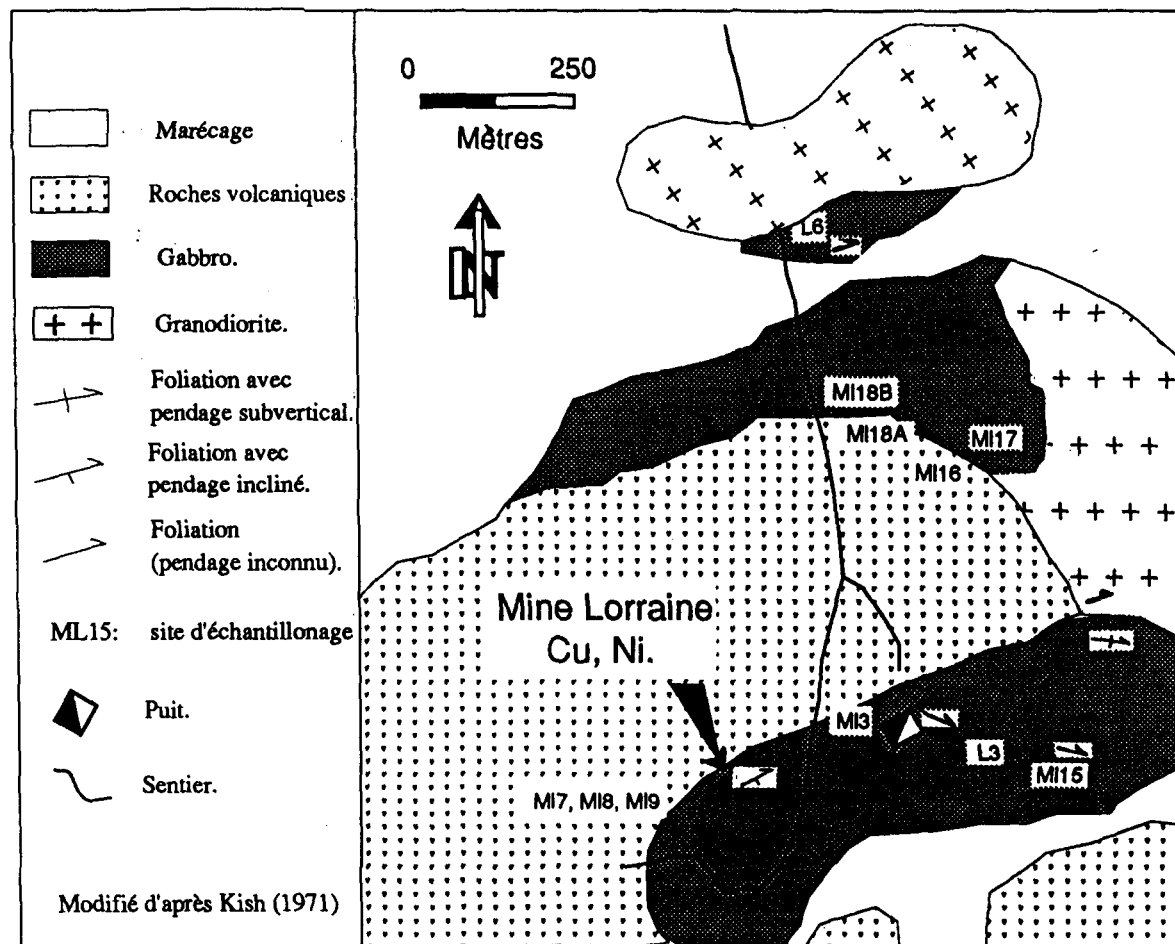
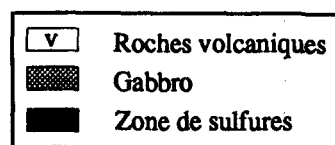
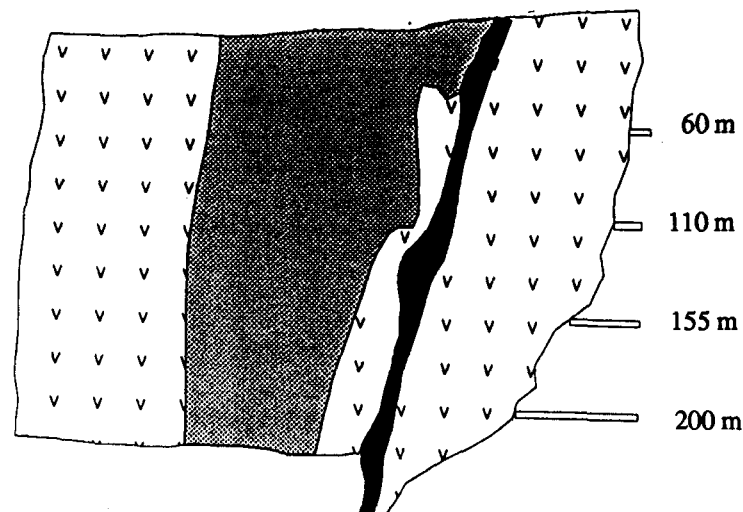


Fig. 3 Carte géologique du secteur de la mine Lorraine avec localisation des échantillons de roche encaissante.



0 50  
Mètres



Ni (%)	Cu (%)	Ag (ppm)	Au (ppm)	Cu/Ni
0.81	2.41	9.2	1	2.97
0.56	1.22	5.1	0.6	2.17
0.48	1.45	9.6	1.3	3.02
0.89	1.06	3.4	0.34	1.19

Fig. 4 Coupe verticale (N 65 E) du dépôt de la mine Lorraine avec les teneurs moyennes en métaux correspondant aux quatre premiers niveaux économiques. (Données et dessin modifiés de Descarreaux, 1967).

Cependant, à l'échelle du dépôt de la mine Lorraine, la lentille de sulfures prend une allure constante et subparallèle à la foliation régionale définie dans l'encaissant (Descarreaux, 1967). Cette morphologie du dépôt reflète également l'implication de l'histoire tectono-métamorphique.

Tous ces processus géologiques qui ont marqué l'évolution de cette région semblent avoir affecté à des degrés variables les sulfures et probablement la distribution originelle des métaux.

L'observation macroscopique des échantillons minéralisés recueillis en surface, dans la mine Lorraine, montrent deux textures primordiales du minerai: (1) une texture massive constituée essentiellement de pyrrhotite et pentlandite avec apparition occasionnelle de chalcoppyrite, et (2) une texture disséminée à chalcoppyrite prédominante avec de la pyrrhotite associée ou en inclusion dans la chalcoppyrite. Descarreaux (1967) signale une zonalité à l'échelle du dépôt, caractérisée par une zone centrale de minerai massif à pyrrhotite et pentlandite, et une auréole de sulfures disséminés et cuprifères.

Des zones cupro-aurifères sont observées également dans les niveaux inférieurs de la mine qui ont la même attitude que la lentille principale, ainsi que de minces filons argentifères recoupant la structure générale du dépôt (Descarreaux, 1967).

L'exploitation de la lentille de sulfures de la mine Lorraine a produit 600 000 tonnes en minerai total, avec des teneurs en Cu de 1.08 % et 0.471 % en Ni (MRN, 1966). Descarreaux (1967) a estimé des teneurs en Au et Ag dans ce dépôt de 0.68 g/t et 6.86g/t respectivement, avant la production.

## CHAPITRE IV

### PÉTROGRAPHIE

#### 4.1 Les roches encaissantes

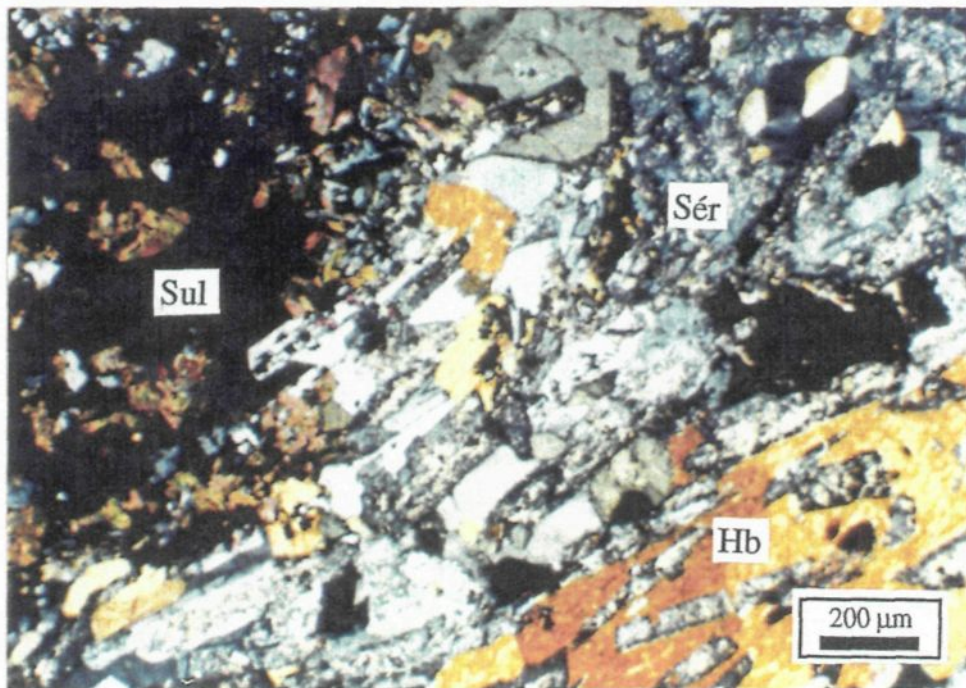
##### 4.1.1- Les laves

La série de Lac du Bois constitue la formation prédominante qui affleure aux alentours de la mine Lorraine; elle renferme surtout des laves massives et parfois en coussins. Cette série est souvent recoupée par des intrusions mafiques. Aux abords du puit de la mine, les roches ont une couleur plus sombre qu'ailleurs et exhibent, à quelques mètres du contact cisailé de l'intrusion gabbroïque et la zone des sulfures, une texture gabbroïque qui délimite parfois certains contours qui semblent être des bordures de coussins (Pl. 1). En lame mince, ce détail est défini par une granulométrie variable qui montre parfois une texture gabbroïque à phénocristaux d'amphiboles et de plagioclases altérés. Les roches volcaniques représentatives de cette série de lave sont de composition mafique, constituées d'environ 70 % de minéraux ferro-magnésiens alors que les 30 % restant sont représentés essentiellement de plagioclase, silice et de magnétite par ordre d'importance respectif. Parmi les minéraux d'altération de basse température les plus fréquents, la chlorite, la silice, les carbonates, la séricite et l'épidote sont les plus représentatives. L'assemblage minéral de ces roches est caractéristique du faciès schiste vert. L'observation microscopique montre une roche à texture

## Planche 1



a)- Laves mafiques à texture gabbroïque près du contact de l'intrusion mafique de la mine Lorraine.



b)- Veines de sulfures (Sul) recoupant le faciès à amphibolite qui est défini par des porphyroblastes à hornblende pœcilitique (Hb) avec inclusions de minéraux de plagioclases séricitisés (Sér). L.P. Mine Lorraine. Ech. ML2.

ophitique, définit par des minéraux férromagnésiens dont l'actinote est le minéral d'amphibole le plus commun dans la roche. Ce silicate se présente en grains fins dont la taille moyenne ne dépasse pas 80  $\mu\text{m}$ , de forme xénomorphe avec occasionnellement de rares petits cristaux d'hornblende maclés et losangiques. Ces amphiboles avec une magnétite à grains fins ( $< 40 \mu\text{m}$ ) disséminés, sont englobés dans une matrice de plagioclases en fines aiguilles interstitielles dont la taille moyenne est de 100  $\mu\text{m}$ .

#### **4.1.2- Intrusion mafique**

La minéralogie est assez simple, alors que la composition varie des gabbros aux diorites d'après le chimisme de la roche et la proportion des minéraux colorés. Les minéraux mafiques marquent souvent la foliation régionale.

L'observation des lames minces montre des roches à texture équi-granulaire dont la taille moyenne des grains est de 400  $\mu\text{m}$ , constituées essentiellement de plagioclases (oligoclase à andésine) à macles polysynthétiques et en forme de lattes automorphes représentant 25 à 40 % de la roche. Les minéraux férromagnésiens sont intensément altérés et d'aspect fibreux. Ils occupent avec les minéraux opaques une position jointive et interstitielle aux lattes de plagioclases et parfois ils les englobent. Ces phases férromagnésiennes, y compris les minéraux secondaires, constituent une proportion de 40 à 60 %. Elles sont représentées par des reliques d'actinote et de pyroxènes avec une chlorite de remplacement. Des grains de pyrite et chalcoppyrite sont souvent disséminés dans la masse silicaté.

Un métamorphisme de contact de faciès amphibolite de quelques mètres d'épaisseurs affleure dans la mine à la bordure de la zone de sulfure. Ce faciès est

caractérisé par des cristoblastes d'hornblende et de plagioclases. L'hornblende, dont la taille varie de 1 à 3 mm, est de couleur vert foncé à vert clair avec souvent des macles polysynthétiques. Ces minéraux sont à texture pœcilitique (Pl. 1b) avec inclusions de lattes de plagioclases primaires altérés, pyroxènes et minéraux opaques. Les reliques de ces phases sont observées fréquemment dans les sulfures. Des plages subautomorphes de plagioclases maclées atteignent parfois une taille de 4 mm. Une altération rétrograde dans ce faciès est définie par une épidote dans les fractures d'hornblende, la chlorite, la silice, la séricite et les carbonates qui est un assemblage minérale typique du faciès schiste vert.

## 4.2 Les sulfures

La description à l'échelle du dépôt a été reportée par Descarreaux (1967) durant l'exploitation des sulfures dans la mine. La principale texture qui ressort de cette étude est la zonalité dans le dépôt qui est défini par une zone centrale massive et ferrifère et une zone périphérique de sulfures disséminés essentiellement cuprifère. Les échantillons qui ont été récoltés pour cette étude aux abords de la mine, reflètent parfaitement la variabilité texturale des sulfures mentionné par Descarreaux (1967) à travers le dépôt. Les descriptions sont surtout d'ordre microscopiques et les estimations en proportion des espèces minérales dans les sulfures massifs et disséminés sont définies à partir des observations de lames polies.

### 4.2.1- Sulfures à texture massive

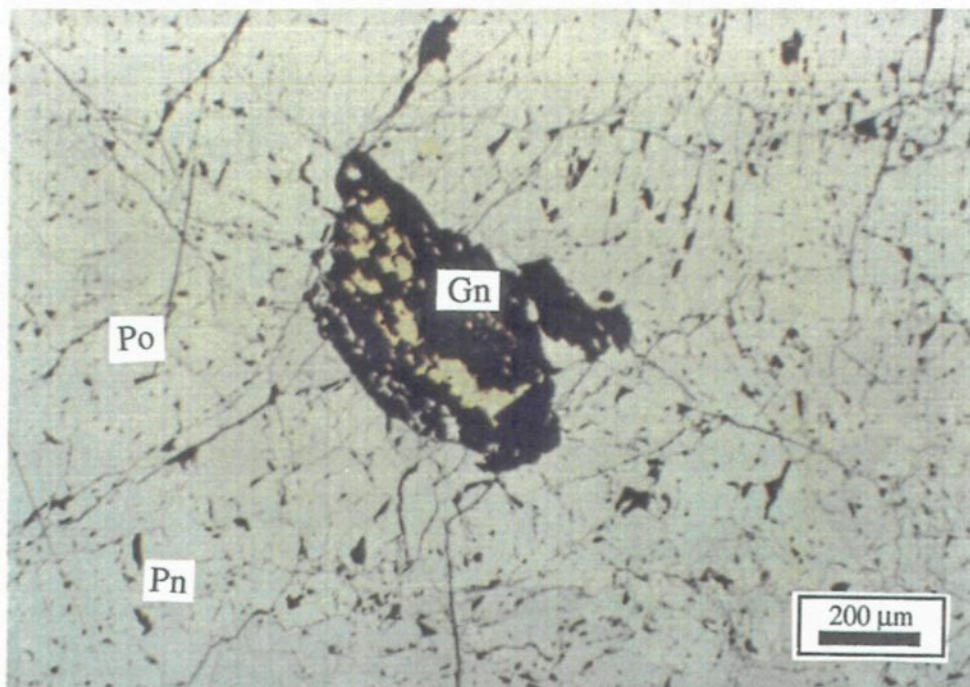
Ces sulfures sont caractérisés essentiellement par la pyrrhotite comme minéral principal, accompagné de pentlandite et oxyde de fer (magnétite) qui sont régulièrement présentes dans le minerai. La chalcoppyrite par contre, représente un contenu plus faible dans ce minerai, relatif aux phases précédentes. Le minerai à texture massive présente des inclusions fréquentes de minéraux de gangue altérés comme l'hornblende (Pl. 2a), le plagioclase, et la silice. Descarreaux (1967) observe une concentration plus intéressante en chalcoppyrite à l'extérieur de la zone centrale massive mais sans un rubannement visible.

**La pyrrhotite** est le minéral prédominant dans le minerai massif. Elle constitue plus de 80 % des sulfures massifs. Elle se présente en grandes cristaux (300  $\mu\text{m}$  à 1 mm) avec bordures irrégulières. Ces minéraux exhibent différentes textures de recristallisation dynamique qui sont définies par des macles de déformation polysynthétiques (Pl. 3a), extinctions ondulantes ainsi que des textures granoblastiques à granulométrie plus petite, de 150  $\mu\text{m}$  (Pl. 3b). Des plages et des agrégats de cristaux automorphes de pyrite sont fréquemment observés dans la pyrrhotite massive.

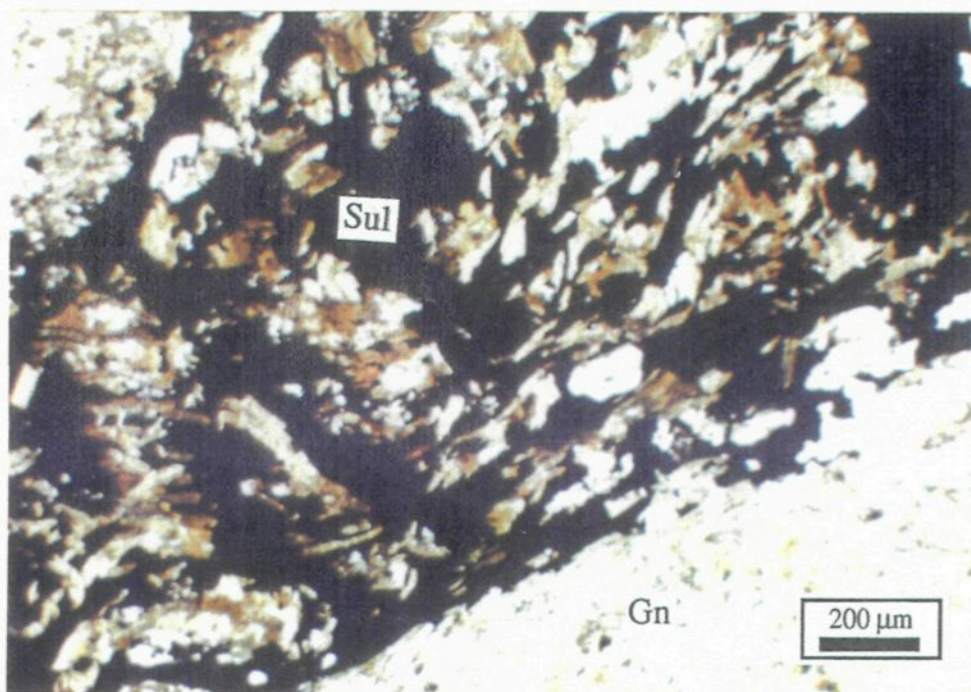
**La pentlandite** est disséminée dans la pyrrhotite, elle atteint une taille moyenne de 150  $\mu\text{m}$  et sa proportion dans le minerai massif varie de 1 à 5 %. Elle se développe préférentiellement sur les bordures des cristaux de pyrrhotite (Pl. 2a) et moins souvent en flammes d'exsolution, et s'altère fréquemment en violarite. La pentlandite présente des concentrations notables en cobalt révélées par les résultats de l'analyse semiquantitative à la microsonde.



## Planche 2



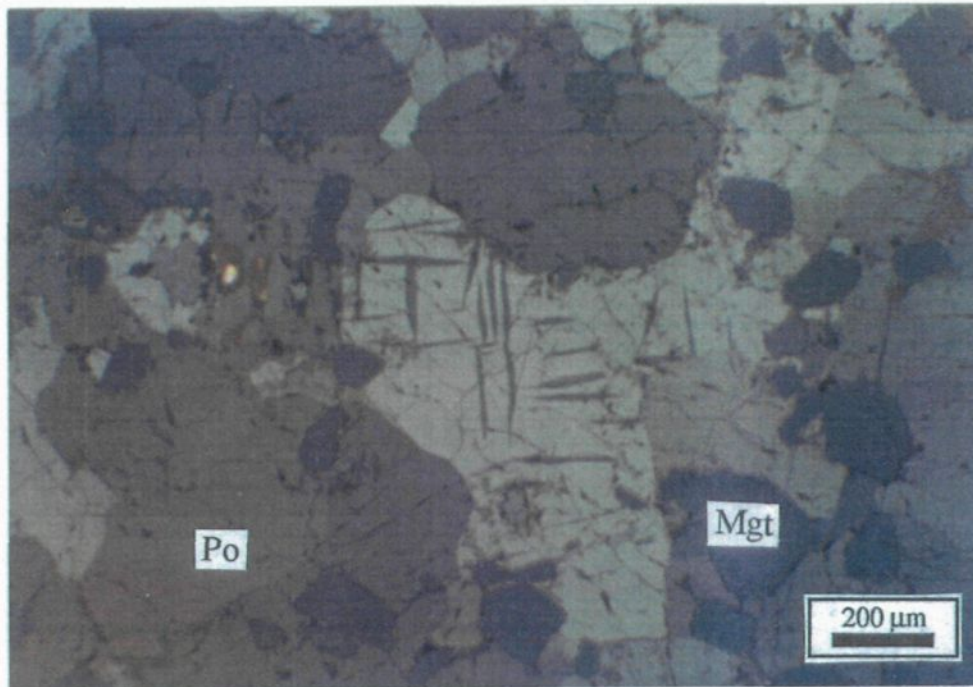
a)- Minerai à texture massive. Inclusions de gangue (Gn) fréquentes avec chalcopirite (jaune) associée. L.R. Pyrrhotite (Po), pentlandite (Pn). Mine Lorraine. Ech. ML5.



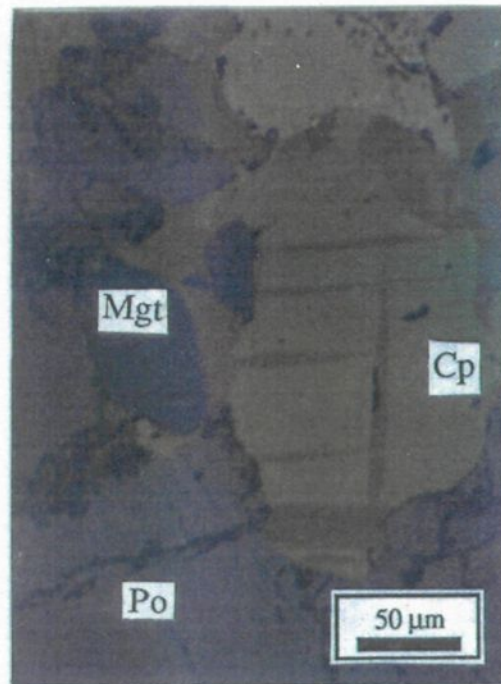
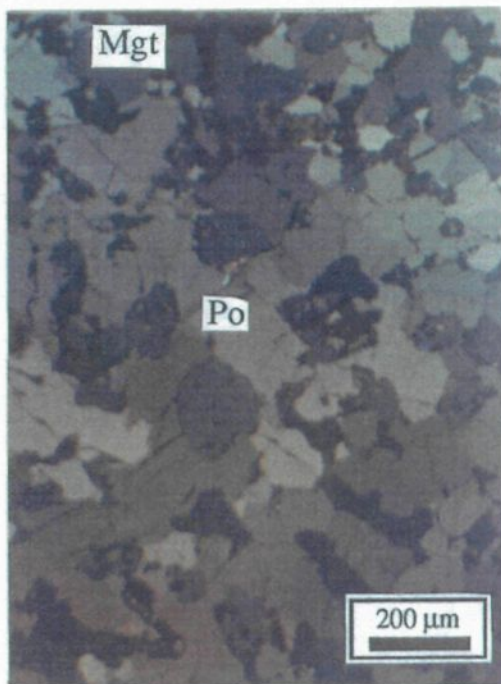
b)- Minerai à texture disséminée. Veines de sulfures (Sul) avec inclusions de minéraux de gangue orientées et altérées (brun). L.N. Encaissant (Gn). Mine Lorraine. Ech. ML2.



### Planche 3



a)- Minerai à texture massive montrant, en nicks légèrement décroisés, des blastes de pyrrhotites (Po) avec macles de déformation polysynthétiques. L.R. Magnétite (Mgt). Mine Lorraine. Ech. ML11.



b)- Pyrrhotite massive (Po) à texture granoblastique avec grains de magnétite (Mgt) dispersés. L. R, nicks décroisés. Mine Lorraine. Ech. 4A.

c)- Chalcopirite (Cp) avec macles de déformation polysynthétiques, observée à la jonction du point triple de la pyrrhotite (Po) granoblastique et associée a la magnétite (Mgt). L.R, nicks décroisés. Mine Lorraine. Ech. 31D.

**La chalcopryrite** est un minéral accessoire dans la zone du minerai massif. Elle se présente en grains fins ( $< 100 \mu\text{m}$ ) disséminés dans la pyrrhotite massive, mais plus souvent associée à la magnétite et aux inclusions de silicates, comme les agrégats de quartz et les porphyroblastes d'hornblende, dont elle occupe les zones cristallographiques (Pl. 2a). Dans certaines zones du minerai à texture massive, on observe un enrichissement significative en chalcopryrite qui atteint localement une proportion de 10 % du minerai. Ces cristaux exhibent des macles de déformation polysynthétiques (Pl. 3c) et parfois des agrégats de cristaux à texture granoblastique associés à des zones de déformation.

**La pyrite** représente une proportion assez irrégulière qui ne dépasse pas 5 % dans le minerai massif. Elle est observée occasionnellement dans les zones à pyrrhotite massive et cisailée où elle se développe sur les bordures des fractures de pyrrhotite comme minéral d'altération, et en cubes de taille variable atteignant parfois 1 cm avec inclusions de sulfures et magnétite corrodée. Parmi les variétés automorphes, les individus les plus grossiers sont les plus affectés par la fracturation (McClay et Ellis, 1984), ces derniers sont envahis ensuite par la chalcopryrite dans les zones de ruptures (Pl. 4a).

**La magnétite** est à tendance automorphe est ubiquiste (1 à 10 % dans le minerai). Elle est souvent corrodée par les sulfures et atteint parfois une taille de quelques mm. Dans le minerai massif, on observe parfois des gouttelettes de pyrrhotite et chalcopryrite associées et en inclusions dans les cristaux de magnétite, cette texture suggère une cristallisation de la magnétite à partir du liquide de sulfure. Une texture similaire a également été attribuée par Lightfoot et al.

(1984) à une texture magmatique. Dans les zones de cisaillements, la magnétite est bréchifiée et cimentée par la chalcopryrite (Pl. 4b).

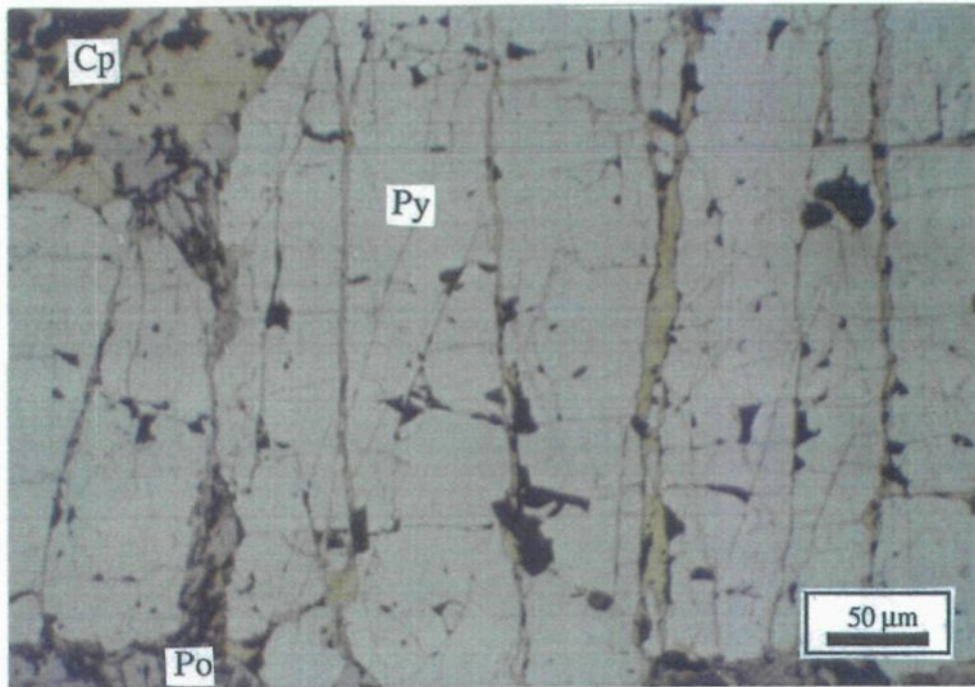
**Les tellurures et bismutho-tellurures:** Cinq grains ont été identifiés par les analyses qualitatives à la microsonde l'UQAC. Ce sont surtout des tellurures [Mélonite palladinifère.  $(\text{Ni}, \text{Pd}, \text{Pt}) (\text{Te}, \text{Bi})_2$ ] et un grain de bismutho-tellurures [Tsumoïte.  $(\text{Pt})(\text{Bi}, \text{Te})$ ]. A cause de la taille des grains extrêmement fine, les résultats quantitatifs de la composition chimique de ces phases minérales à la microsonde n'ont pas été considérés dans cette étude.

Ces phases minérales ont été observées exclusivement dans le minerai à pyrrhotite massive qui exhibe des extinctions ondulantes et des macles polysynthétiques. La mélonite est un minéral de taille inférieure à  $15 \mu\text{m}$  et de forme arrondie, se présentent également en agrégats cubiques (Pl. 5a et 5b). Ils sont localisés à la bordure des minéraux de sulfures et associés aux inclusions de gangue, mais sans avoir une association préférentielle pour une espèce minérale particulière. La tsumoïte est un grain de bismutho-tellurures de  $25 \mu\text{m}$  à été identifié à la microsonde. Il est associé à une inclusion de gangue dans la pyrrhotite massive.

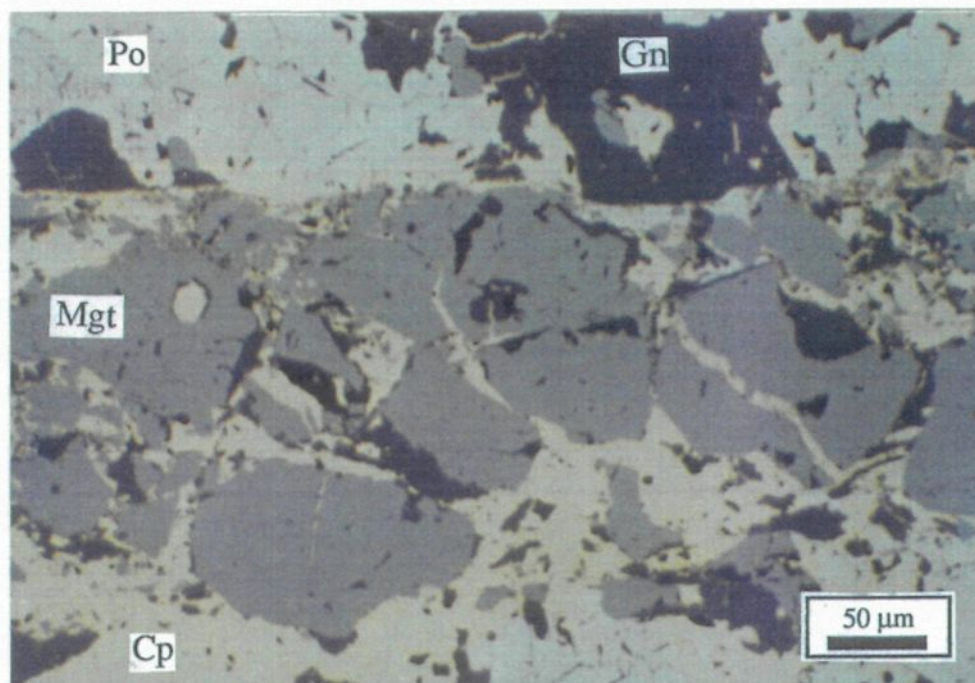
La concentration de ces bismutho-tellurures, dans la littérature, montre une affinité chalcophiles pour ces phases, associées aux veines riches en Cu et en inclusion dans la chalcopryrite. Ceci a permis d'ailleurs de les attribuer à une exsolution au stade subsolidus, à partir du liquide résiduel de la solution solide intermédiaire (iss) enrichi en Pt, Pd, Te, Bi, Sb, Ag (Cabri et Laflamme, 1976).



## Planche 4

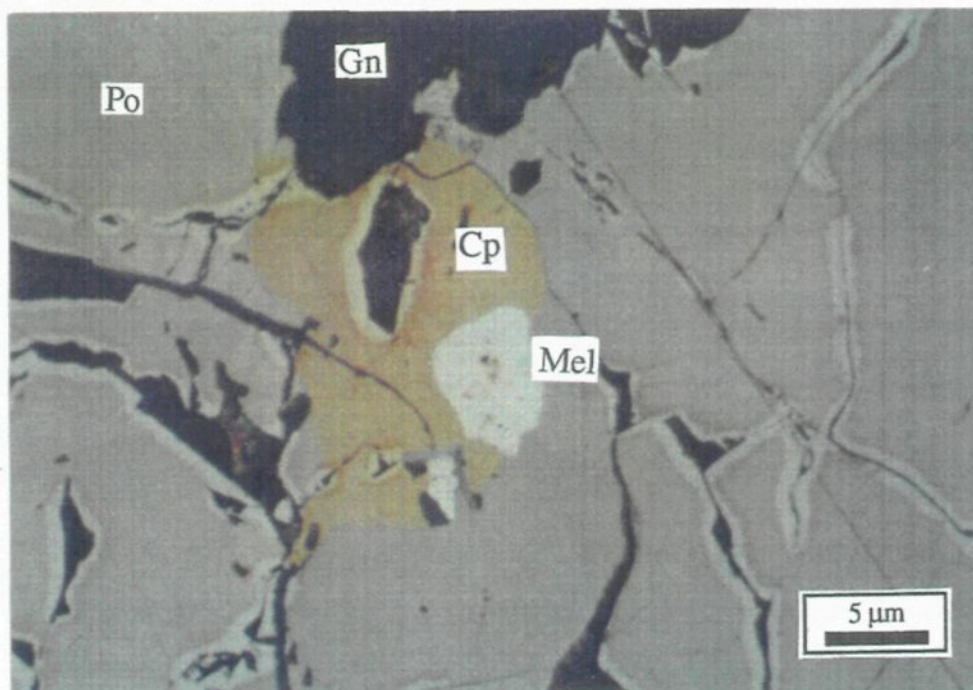


a)- Porphyroblastes de pyrite (Py) cubiques infiltrés par la chalcopyrite (Cp) dans les fractures orientées suivant les plans cristallographiques. L.R. Pyrrhotite (Po). Mine Lorraine. Ech. 31F.

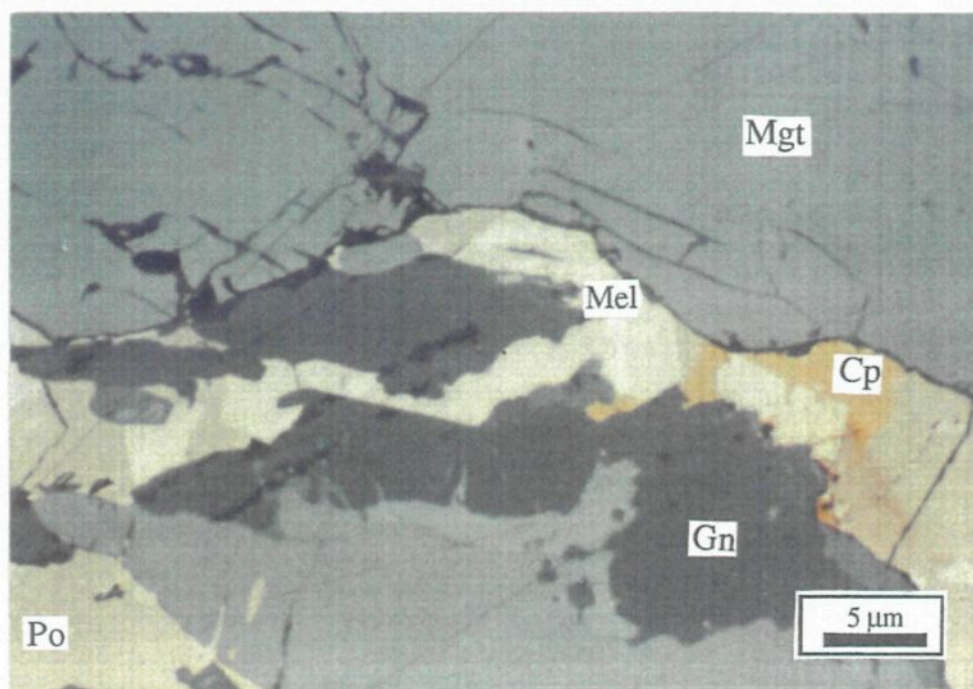


b)- Brèches de magnétite (Mgt) cimentées par la chalcopyrite (Cp) dans le minerai massif cisailé. L.R. Pyrrhotite (Po), gangue (Gn). Mine Lorraine. Ech. 4D.

## Planche 5



a)- Mélonites (Mel) à la bordure entre la chalcopyrite (Cp) et la pyrrhotite (Po). L.R. Pyrrhotite (Po), gangue (Gn). Mine Lorraine. Ech. ML5.



b)- Agrégats de cristaux de Mélonites (Mel) de forme automorphes, associés à la gangue (Gn), chalcopyrite (Cp), magnétite (Mgt) et pyrrhotite (Po). L.R. Mine Lorraine. Ech. ML12.



Au Merensky Reef, les EGP sont remobilisés par les fluides hydrothermaux durant le stade post-magmatique et redéposés sous forme de bismutho-téllures et arsénures (Mostert et al., 1982).

Dans les dépôts de sulfures de type hydrothermaux, le Pd et le Pt se présentent exclusivement sous forme de complexes bismutho-téllures. Ces minéraux sont plus souvent associés à des zones d'altération ou à un assemblage minéral de basse température comme c'est le cas du dépôt de sulfures de New Rambler (McCallum et al., 1976), de Rathburn Lake (Rowell et Edgar, 1986) et celui de Messina en Afrique du sud (Mihalik et al., 1974).

#### **4.2.2- Sulfures à texture disséminée**

La texture du minerai dans cette zone présente un caractère de remplissage occupant les espaces créés par la fracturation (Pl. 2b). Des veines de sulfures recoupent parfois la bordure de l'encaissant d'amphibolite, défini par des porphyroblastes poëcilitiques caractéristiques. La chalcopryrite représente plus de 60 % du minerai alors que la pentlandite devient rare, sinon elle est observée en inclusion dans la pyrrhotite. Cette dernière représente une proportion d'environ 30 % dans le minerai. Les sulfures disséminés sont plus riches en pyrite; celle-ci se présente en veinules et en plages avec souvent des textures de remplacement de la pyrrhotite. Descarreaux (1967) remarque également un contenu élevé en pyrite dans l'auréole des sulfures disséminés.

**La chalcopryrite** devient prédominante dans les sulfures disséminés. Elle atteint au plus une proportion de 75 % dans ces sulfures où elle est plus souvent associée

aux fractures . Cette chalcopryrite se présente en grains fins disséminés dans la gangue et en grandes plages atteignant une taille de 700  $\mu\text{m}$  qui englobent des inclusions de silicates, pyrrhotite et débris d'oxydes. Elle exhibe parfois une texture de remplissage et de remplacement dans la gangue (Fig. 5b) avec des macles de déformation polysynthétiques.

**La pyrrhotite** constitue au plus de 50 % de ces sulfures disséminés. Cette pyrrhotite est observée dans les veinules, intimement associée à la chalcopryrite. La taille des grains est beaucoup plus petite que dans le minerai massif (< à 150  $\mu\text{m}$ ) avec de rares inclusions de pentlandite et une altération assez fréquente en pyrite.

**La magnétite** représente 2 % de l'encaissant dans le minerai disséminé et sa taille ne dépasse pas 100  $\mu\text{m}$ . Les grains sont beaucoup plus dispersés dans la gangue contrairement à la zone massive. Des reliques de magnétite sont observées également dans les sulfures.



## CHAPITRE V

### DÉFORMATION

Le dépôt de sulfures de la mine Lorraine est associé à une zone de cisaillement. La mise en place de ces sulfures a été probablement contrôlée par le cisaillement et/ou le contact volcano-intrusif.

La lentille de sulfures de la mine Lorraine est concordante avec la structure régionale. Cependant, des microstructures observées dans le dépôt de sulfures révèlent une répercussion beaucoup plus complexe de la déformation qui a marquée cette région, sachant que les sulfures sont liés génétiquement à l'encaissant et par conséquent ont subi la même histoire tectono-métamorphique.

La zonalité macroscopique des sulfures (Descarreux, 1967) est possiblement due à une remobilisation différentielle. Celle-ci est suggérée par la texture distincte des différentes espèces de sulfures dans le minerai déformé, et une large variation dans la granulométrie de la pyrrhotite à travers le dépôt. Les sulfures massifs et disséminés exhibent une variété de formes texturales qui se traduisent par des fabriques de déformations ductiles et fragiles.

Dans le minerai disséminé, des inclusions de l'encaissant sont beaucoup plus fréquentes relativement à la zone massive, et définissent parfois une foliation dans les veines de sulfures. Des petits amas de cristaux de quartz de tailles variables et de carbonates colmatent les vides créés par la dissolution des silicates primaires. Ces minéraux néoformés sont souvent repris par des cisaillements et incorporés

dans la masse sulfurée sous forme de reliques de quartz à extinction ondulante et lattes de chlorite et carbonates tordues. La magnétite se présente souvent en grains fracturés probablement sous l'effet de sa rotation dans le minerai plus ductile.

Des veinules de sulfures recoupent la bordure des roches encaissantes à hornblende pœcilitique à bordures chloritisées. Les brèches de gangue dans le minerai présentent un litage marqué par des feuillets de chlorite (Fig. 5c) et une silice d'altération avec une magnétite à grains fins linéaires dans les interstices. Cette texture témoigne d'une phase de déformation antérieure à la bréchification. Une déformation de style ductile se manifeste par les brèches déformées et orientées dans un même sens (Fig. 5c).

Dans les sulfures massifs et cisailés, on assiste à un développement d'agrégats de minéraux de pyrite cubiques, enchevêtrés et de taille variable. La croissance de ces porphyroblastes de pyrite semble être plus propice dans la pyrrhotite déformée (Graf et Skinner, 1970). Par ailleurs, les grains de pyrrhotite dans ces zones sont de l'ordre de 100 à 300  $\mu\text{m}$ . Ils sont souvent accompagnés par un remplacement partiel de pyrite dans les fractures ou par un remplacement total dans la zone bréchique. Cette fracturation de la pyrrhotite est seulement possible à basse température, défini au-dessous de 250°C dans les conditions expérimentales (Gilligan et Marshall, 1987), mais sous une pression assez élevée.

D'autre part, la zone des sulfures massifs, est caractérisée par une pyrrhotite avec de rares inclusions de silicates. Ces cristaux de pyrrhotite massive, à bordures irrégulières, présentent des extinctions ondulantes et des macles de déformation orientées dans deux directions cristallographiques préférentielles (Pl. 3a). Toutefois, cette recristallisation dynamique semble être développée sous un

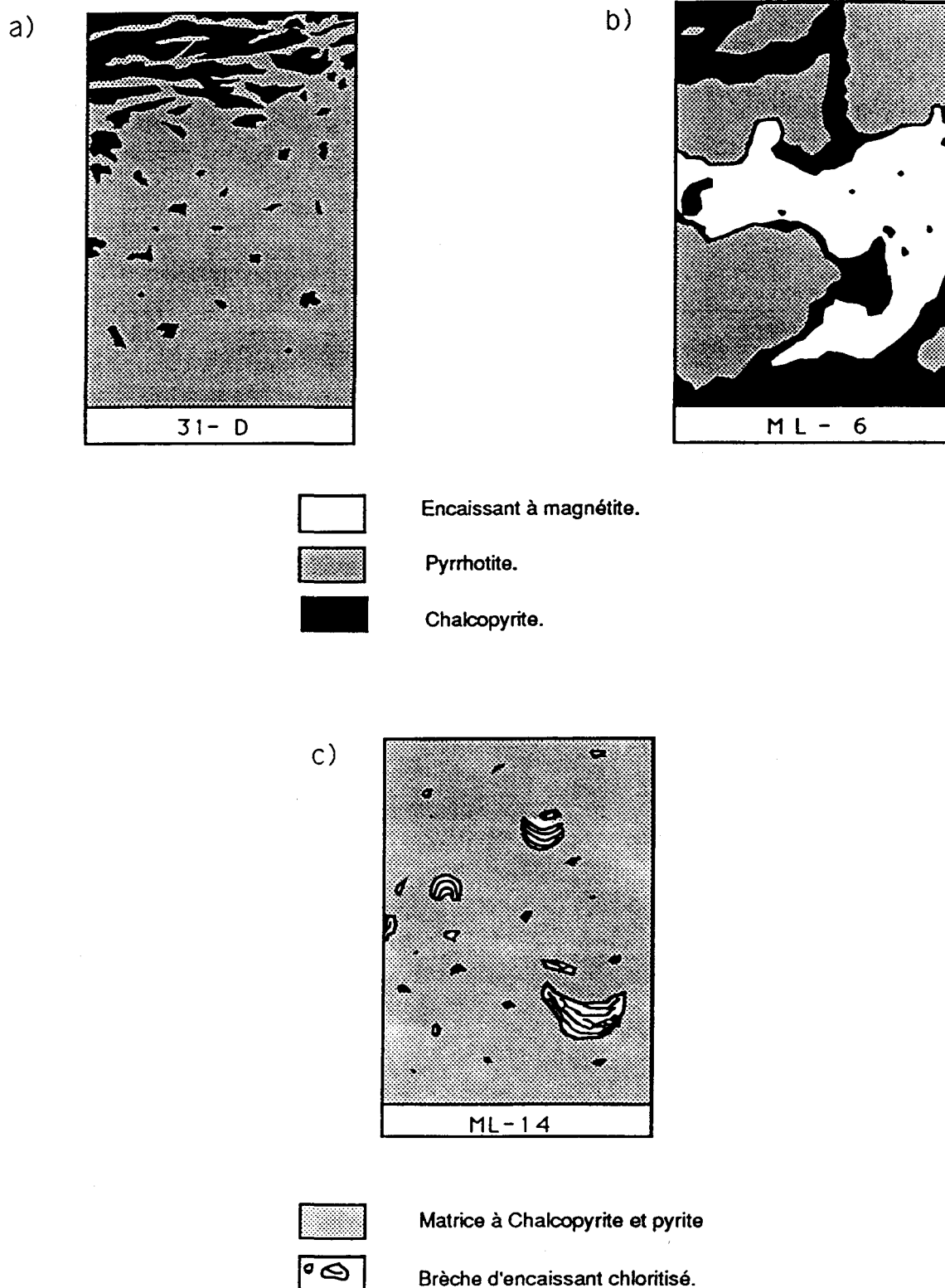


Fig. 5 Les différentes textures macroscopiques dans le minerai de la mine Lorraine.  
 a) Zonalité macroscopique dans le minerai massive.  
 b) Texture de remplacement de la gangue par la chalcopyrite dans le minerai disséminé.  
 c) Texture bréchique dans le minerai massive.

régime de contrainte beaucoup plus ductile que celui de la pyrrhotite cisailée (Frizzo et al., 1982). Cette texture typique est obtenue dans les essais expérimentaux à partir d'une température de 250°C (Clark et Kelly, 1973) et serait plus attribuable à une fabrique du métamorphisme dynamique.

Par ailleurs, la chalcopyrite montre des textures de remplissage dans les différentes zones du dépôt. Elle est associée aux inclusions de gangue dans le minerai à pyrrhotite massive et elle est souvent concentrée dans les zones de cisaillements où elle s'infiltré dans les fractures et cimente les brèches de magnétite et de pyrite cataclasées. Dans le minerai massif plus enrichis en chalcopyrite, ce minéral exhibe parfois une zonalité macroscopique (Fig. 5a) et montre au microscope des macles de déformation polysynthétiques avec des inclusions de pyrrhotite et magnétite alors que dans les sections à pyrrhotite prédominante, la chalcopyrite est toujours maclée, elle se loge dans les espaces intergranulaires (Pl. 4c) et à la jonction du point triple de la pyrrhotite granoblastique polygonale. Dans les essais expérimentaux, cette chalcopyrite est ductile sous une large fourchette de conditions de pression et température durant la déformation (Kelly et Clark, 1975), mais les macles polysynthétiques sont largement exprimées entre 150° et 300°C (Roscoe, 1975).

Des lentilles de quartz cupro-aurifères ont été interceptées dans les niveaux inférieures de la zone de sulfures ainsi que de minces filons argentifères dans des veines de tension recoupant la structure générale du gisement (Descarreux, 1967). Ces systèmes de veines témoignent d'une activité tectonique et hydrothermale importante syn ou post-métamorphique.

L'altération qui accompagne la déformation et la remobilisation des sulfures, exprimée dans l'encaissant de la mine, est nettement plus intense que dans les

roches stériles de même type dans la région, mais le type d'altération n'est pas caractéristique. La silicification, la chloritisation et la séricitisation sont les altérations les plus courantes et qui sont également typique du faciès schiste vert, seulement leur réaction est plus intense bien que plus irrégulière dans les sulfures.

Pour conclure, la zone de cisaillement semble avoir affectées les sulfures après leurs mise en place, ceci est suggéré par les fractures de basse température dans le minerai qui semblent être développées durant la phase de relaxation de la déformation régionale. Seulement, cette zone de cisaillement pourrait être également préexistante. Elle aurait jouée un rôle de contrôle structural pour la minéralisation et ensuite réactivée durant la déformation régionale.

## CHAPITRE VI

### GÉOCHIMIE

#### 6.1 Méthodes d'analyses

Les résultats des analyses des oxydes majeurs et traces (S, Cu, Ni, Ag, Nb, Pb, Sr, Y et Zr) des échantillons avec un préfixe MI, BB et L ont été obtenus par fluorescence aux rayons-X au laboratoire Caleb Brett International Limited d'Angleterre. Les autres éléments traces et Na<sub>2</sub>O ont été effectués par activation neutronique à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) selon la méthode de Bédard et Barnes (1989). Les analyses des éléments du groupe du platine (EGP) et l'Au ont été réalisés par activation neutronique à l'UQAC après préconcentration dans les boutons NiS. Les différentes étapes de fusion et dissolution des boutons de NiS sont décrites par Tremblay (1990).

Les autres échantillons (sans préfixe) ont été analysés au centre de recherche minérale (ministère de l'Energie et des Ressources du Québec). Les analyses des éléments traces ont été réalisés par absorption atomique et les EGP et l'Au par la même méthode qu'à l'UQAC.

#### 6.2 Géochimie des roches mafiques

##### 6.2.1 Éléments majeurs

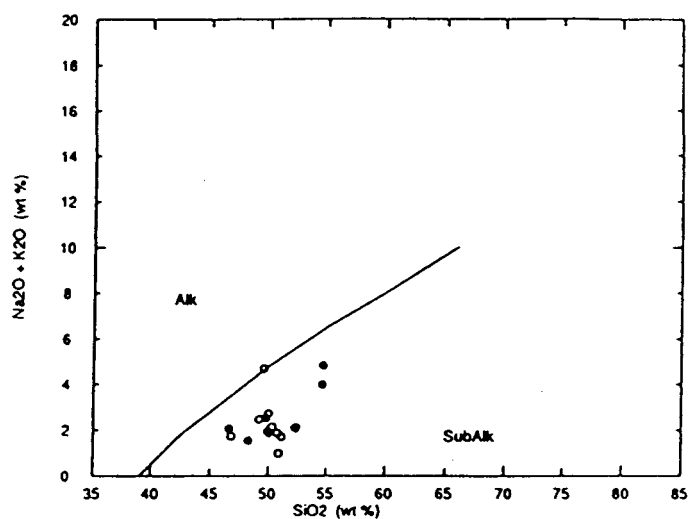
Les roches mafiques analysées pour cette étude représentent la bande volcanique centrale de Lac du Bois. Elles englobent les gabbros (ML3, ML18b, L3, L6, 30D, LK1 et 13G) et les laves mafiques (ML7, ML8, ML9, ML18a) de la mine Lorraine, les laves mafiques de Lac du Bois au "sens stricte" (BB55, BB57, BB60, BB61) et le gabbro du Lac Kelly (LK1, 13G). Ces roches correspondent dans le diagramme  $K_2O + Na_2O$  vs.  $SiO_2$  au domaine des séries subalcalines (Fig. 6a) (Tableaux 1 et 2).

Dans le diagramme AFM (Fig. 6b), ces roches mafiques montrent un enrichissement en fer qui est commun dans la différenciation des séries tholéitiques. La dispersion de quelques échantillons dans le domaine des roches calco-alcalines est souvent attribuée au caractère mobile de  $Na + K$  durant l'altération.

Le diagramme de Jensen réduit l'effet du métamorphisme et l'altération météorique qui peuvent affectés la composition originelle de la roche du fait que des oxydes autre que les alcalins ou le calcium, qui sont relativement plus mobiles, agissent comme discriminants entre les basaltes. Les roches mafiques définies précédemment comme appartenants à la série tholéitique (Fig. 6b), correspondent aux champ des basaltes tholéitiques riches en fer (Fig. 7). Ces roches sont caractérisées par un contenu bas en  $Al_2O_3$  ( $< 17\%$ ) qui est un caractère commun dans les séries tholéitiques.

Dans l'application du modèle de la tectonique des plaques moderne. Le contexte géotectonique qui a prévalut lors de la mise en place de ces roches archéennes est caractérisé par le type de magma, défini dans le diagramme de Mullen (Fig. 8) à l'aide des oxydes mineurs  $P_2O_5$ ,  $MnO$  et  $TiO_2$  qui sont

a) ● Intrusions mafiques. ○ Laves mafiques.



b)

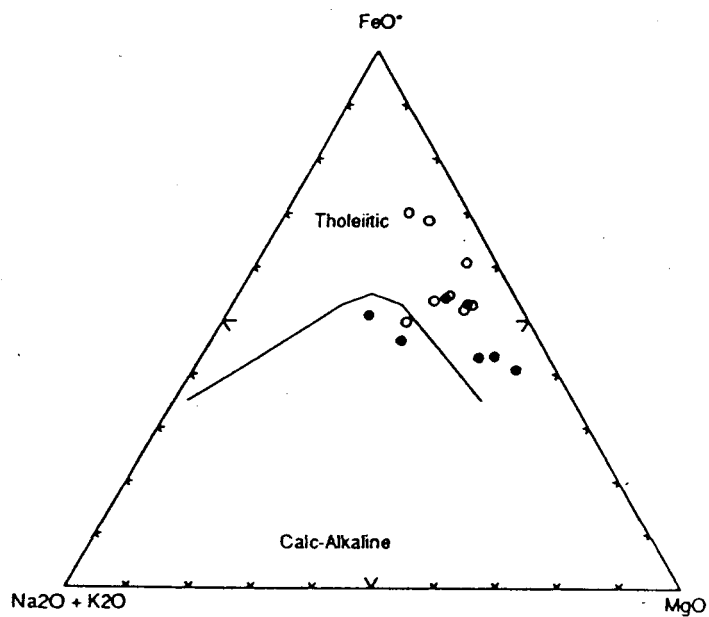


Fig. 6 a) Les laves et intrusions mafiques de la ceinture de Lac du Bois correspondent à la série subalkaline (modifié d'Irvine et Baragar, 1971). b) Dans le diagramme AFM, la différenciation des roches mafiques s'effectue dans le champ tholéitique (modifié d'Irvine et Baragar, 1971).



Tableau 1. Composition chimique des roches volcaniques de Lac du Bois

	BB55	BB57	BB60	BB61	ML7	ML8	ML9	ML18A
<b>ELEMENTS MAJEURS (%)</b>								
SiO <sub>2</sub>	48.72	47.8	49.66	49.84	48.62	47.54	49.54	46.37
TiO <sub>2</sub>	1.54	1.1	1.52	1.88	1.16	1.51	1.22	2.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.07	14.29	13.97	14.44	14.55	13.9	14.12	12.39
FeO	11.53	10.28	12.16	13.3	11.23	12.28	11.37	16.5
MnO	0.23	0.2	0.18	0.37	0.18	0.23	0.2	0.26
MgO	7.02	6.27	6.87	3.85	8.3	7.6	6.44	5.86
CaO	9.02	11.77	10.6	10.82	9.01	9.36	8.78	11.83
Na <sub>2</sub> O	3.08	2.43	0.87	1.55	1.77	2.13	1.37	1.56
K <sub>2</sub> O	1.54	0.18	0.11	0.29	0.32	0.27	0.3	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.13	0.29	0.27	0.19	0.16	0.28	0.04
T - LOI	96.94	94.45	96.23	98.08	95.33	95.1	95.62	97.2
LOI	1.66	4.11	2.31	1.47	2.48	2.37	2.47	0.78
<b>ELEMENTS TRACES (ppm)</b>								
Ag	-	-	-	-	3	<1	9	-
As	2.3	0.4	0.6	2.6	<0.2	<0.4	0.25	<1
Ba	91	41.2	43.6	2.6	86	122	80	21.8
Co	43.6	46.3	42.7	47.4	45.9	52	430	67.1
Cr	212	230	179	204	284	291	253	12.1
Cs	4.1	0.5	0.4	0.4	0.7	<0.4	<0.4	<0.3
Cu	99	45	38	33	40	80	60	90
Hf	2.2	1.7	2.7	2.4	1.5	2	1.7	0.6
Nb	7	4	8	9	5	6	3	3
Ni	146	126	77	79	130	180	140	20
Rb	64.8	7.2	7.9	8	9	4	8	4
S	463	404	275	240	1100	3270	1400	780
Sb	0.1	0.06	0.04	0.06	<0.05	<0.04	0.06	0.05
Sc	28.8	30.7	36.4	32.7	36.1	35.9	33.6	25.2
Se	12.6	9.4	14.4	13.7	<0.9	1.6	<0.88	0.9
Sr	158	164	177	179	138	179	123	147
Ta	0.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.07
Th	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.1
U	1.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.07
Y	26	21	25	26	19	22	23	14
Zn	288	95.7	78	127	77	95	91	432
Zr	106	78	119	121	64	81	77	32
<b>TERRES RARES (ppm)</b>								
La	5.8	5.7	7.1	6.8	5.7	6	6.6	1.3
Ce	12.6	16.5	21	16.7	14.7	17.1	19.7	2.8
Nd	7.7	9.5	14	14.7	10.7	13.8	12.3	2.9
Sm	3.2	2.7	3.9	4.1	2.3	3	2.8	1.3
Eu	1.2	0.8	1.3	1.5	1.1	1.1	1.1	0.8
Ho	0.6	0.6	0.8	1.1	0.6	0.8	0.8	0.2
Tb	0.7	0.5	0.7	0.7	0.5	0.6	0.5	0.4
Yb	2	1.6	2	2.5	1.5	1.9	1.9	1.1
Lu	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2
<b>EGP + Au (ppb)</b>								
Os	-	-	-	-	<1.2	<1.2	<1.2	-
Ir	-	-	-	-	0.07	0.07	0.04	-
Ru	-	-	-	-	<5	<5	<5	-
Rh	-	-	-	-	0.4	<0.34	0.36	-
Pt	-	-	-	-	6.3	2.8	3.7	-
Pd	-	-	-	-	8.2	<4.8	<10	-
Au	-	-	-	-	1.7	2.4	2.9	-

Tableau 2. Composition chimique des gabbros de Lac du Bois.

	ML3	L3	L6	M118b	30D	LK1	13G
<b>ELEMENTS MAJEURS (%)</b>							
SiO <sub>2</sub>	46.1	44.67	54.05	48.96	47.7	54.04	51.2
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.54	1.31	1.76	1.18	0.88	0.63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.21	16.77	15.49	14.96	14.2	16.93	16.3
FeO	9.24	9.83	9.60	11.86	10.97	8.15	8.54
MnO	0.15	0.13	0.16	0.19	0.18	0.13	0.13
MgO	11.92	10.95	4.44	7.53	7.93	5.51	8.98
CaO	8.55	9.88	7.70	9.13	9.38	8.31	8.67
Na <sub>2</sub> O	1.14	1.89	2.84	2.19	1.53	3.38	1.7
K <sub>2</sub> O	0.34	0.11	1.03	0.32	0.23	0.57	0.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.07	0.25	0.05	0.24	0.14	0.1
T - LOI	94.45	94.74	97.77	96.95	96.83	98.06	98.75
LOI	4	3.86	1.68	1.53	3.29	0.78	1.93
<b>ELEMENTS TRACES (ppm).</b>							
Ag	8	-	-	-	<0.5	-	0.5
As	<0.2	<1	<1	<1	<1	<1	1
Ba	67	35.2	159	19.2	41	119	82
Co	51.4	64.6	33.2	46.7	42	30.4	38
Cr	523	292	40	236	277	168	408
Cs	0.3	<0.2	<0.2	0.2	-	1	3
Cu	20	30	50	60	80	61	42
Hf	0.9	0.7	3.6	1.3	-	2.7	-
Nb	3	2	7	4	-	5	-
Ni	430	470	70	130	150	103	157
Pb	8	-	-	-	22	-	29
Rb	10	5.2	24.6	7.5	-	<6	-
S	840	370	650	1170	300	188	100
Sb	0.05	0.1	<0.02	0.03	-	<0.06	0.1
Sc	20.6	17.1	22.6	29	32	22.3	21
Se	<0.7	0.4	<1	3	<10	2.9	10
Sr	148	238	216	180	-	218	-
Ta	<0.2	0.08	0.6	0.2	-	0.4	-
Th	0.2	0.1	0.6	0.3	-	0.6	-
U	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.2
Y	15	12	29	18	145	24	102
Zn	93	167	258	265	94	174	85
Zr	51	29	120	56	-	122	-
<b>TERRES RARES (ppm).</b>							
La	4.8	3.6	12.9	3.9	-	9.4	-
Ce	16.9	9.6	33.3	10.3	-	22.7	-
Nd	6.2	5.7	17.4	6.7	-	14	-
Sm	1.5	1.5	4.7	1.9	-	3.2	-
Eu	0.7	0.6	1.5	0.9	-	1	-
Ho	0.1	<0.01	1.2	0.5	-	0.7	-
Tb	0.3	0.3	0.7	0.3	-	0.6	-
Yb	1	1	2.3	1.4	-	2	-
Lu	0.1	0.1	0.4	0.2	-	0.3	-
<b>EGP + Au (ppb).</b>							
Os	<1.4	-	-	-	-	-	-
Ir	0.08	-	-	-	-	-	-
Ru	<5	-	-	-	-	-	-
Rh	0.4	-	-	-	<6	-	6
Pt	<10	-	-	-	<6	-	6
Pd	<14	-	-	-	<6	-	8
Au	1.5	-	-	-	6	-	5

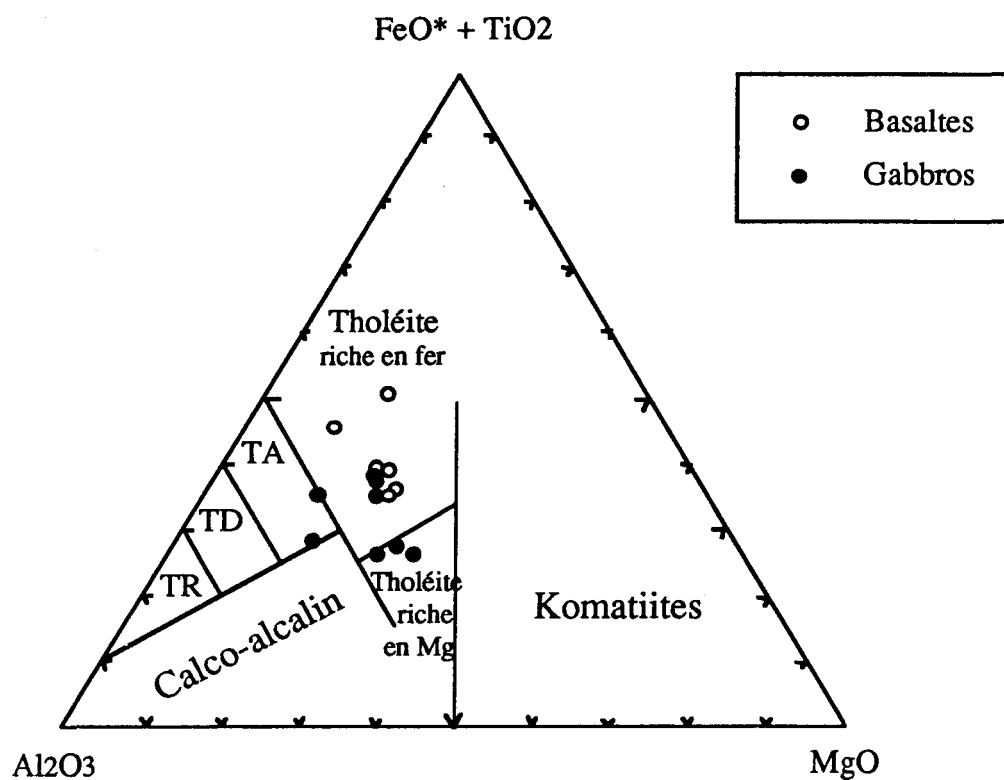


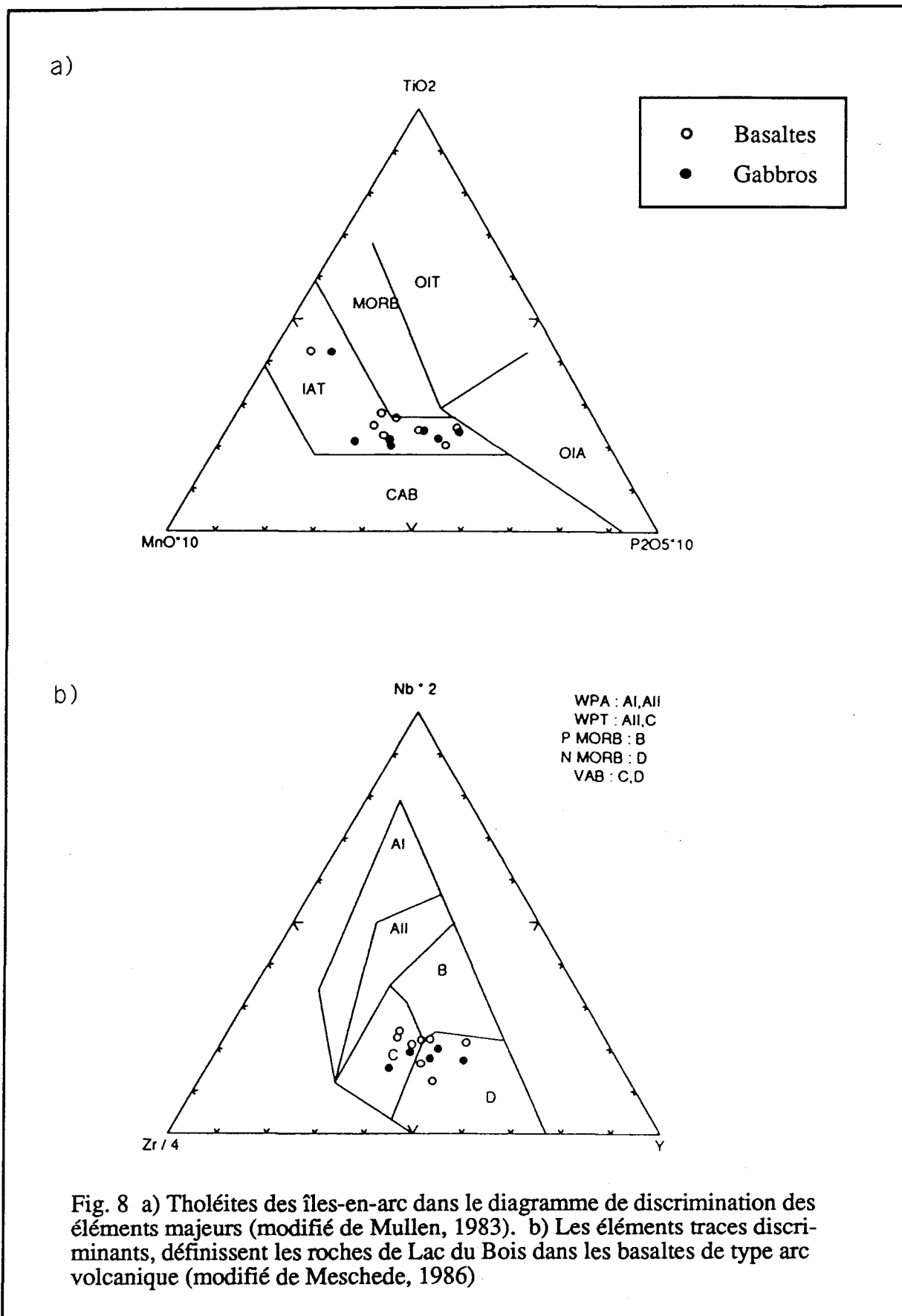
Fig. 7 La série tholéitique de la ceinture de Lac du Bois est du type riche en fer (modifié de Jensen, 1976).

relativement immobiles et sont de bon discriminants entre les roches basaltiques ( $\text{SiO}_2$  entre 45-54 %). Ce diagramme est valable pour les roches du faciès schiste vert et définit la série tholéitique étudiée dans le domaine des Iles en Arc actuelles, ces derniers se distinguent des tholéites des autres environnements pétrotectonique océanique par des valeurs basses en  $\text{TiO}_2$ .

### 6.2.2 Éléments traces

Dans les laves et l'intrusion mafique de la bande volcanique de Lac du Bois, la distribution de certains éléments traces compatibles (Cr, Ni) montre une corrélation positive avec le  $\text{MgO}$  (Fig. 9) qui nous laissent supposer que ces éléments sont fortement distribués dans les phases férromagnésiennes durant la cristallisation fractionnée. Alors que les éléments traces incompatibles, comme le Zr, Hf ou les Terres rares (REE), montrent une corrélation négative avec le  $\text{MgO}$  et un enrichissement dans le liquide (Fig. 9). Les profils des terres rares dans ces roches sont plats avec un léger enrichissement en terres rares légères (Fig. 10) caractéristiques des séries tholéitiques. Les anomalies positives de l'Eu sont plus exprimées dans les intrusions mafiques et suggèrent une cristallisation par cumulat des plagioclases de la série intrusive.

La distribution des éléments traces dans le diagramme de normalisation par rapport au manteau, montre également la même composition chimique des laves et des intrusions mafiques (Fig. 11) en plus de leur composition minéralogique similaire. Ces multiples remarques suggèrent une même source parentale et un lien cogénétique entre les gabbros et les basaltes.



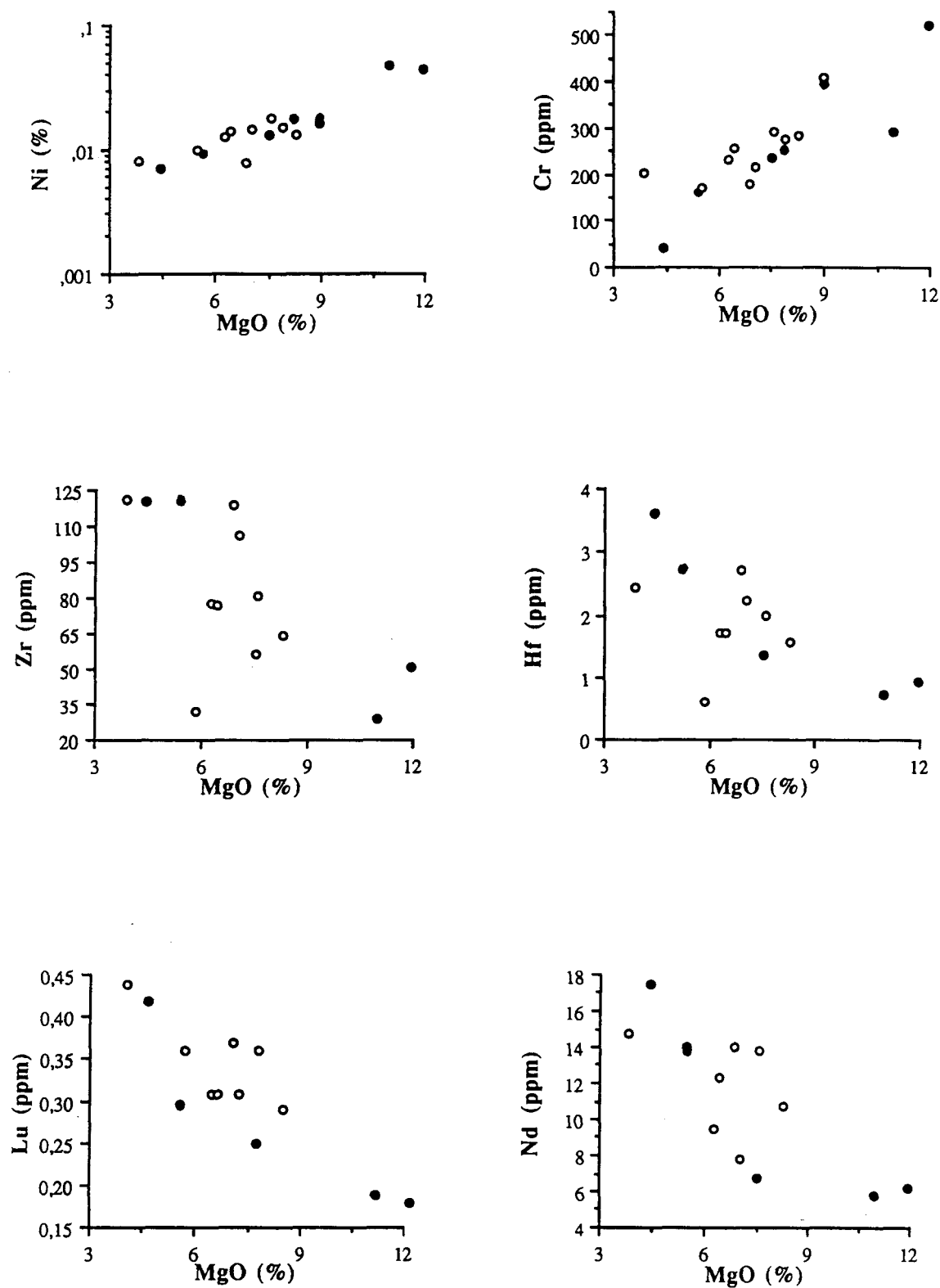


Fig. 9 Distribution des éléments traces en fonction de l'indice de différenciation MgO, dans les gabbros et laves mafiques de la bande volcanique de Lac du Bois. Gabbro (●) et basalte (○)

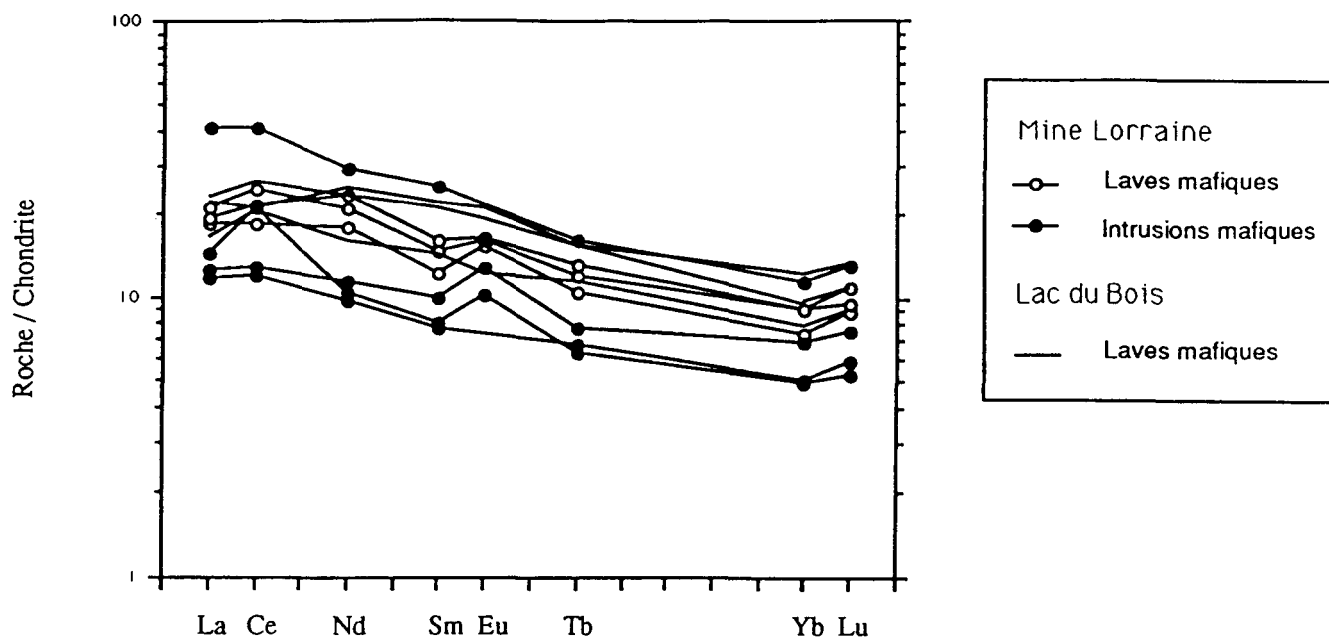


Fig. 10 Affinité tholéitique des terres rares dans les laves et intrusions mafiques de la ceinture de Lac du Bois.

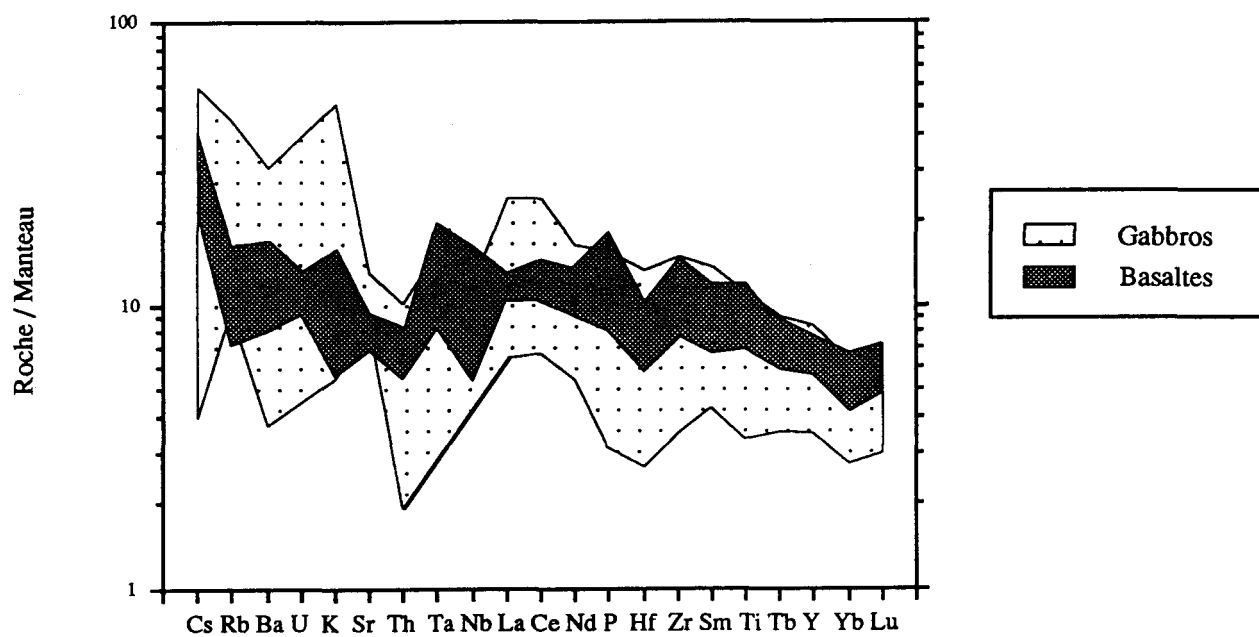


Fig. 11 Distribution des éléments traces dans les gabbros et basaltes de la ceinture de Lac du Bois.

Les profils d'éléments traces sont également plats avec un léger enrichissement en éléments incompatibles (Rb, Ba, K, La, Ce, Cs). Cet enrichissement pourrait être dû à une source mantellique enrichi en ces éléments, à la contamination par la croûte ou à la mobilité relative de ces éléments sous l'action des fluides hydrothermaux (Wilson, 1989).

L'utilisation des éléments traces immobiles, considérés par certains auteurs comme relativement plus déterminants à titre de discriminants géotectonique, défissent également les roches mafiques de la bande de Lac du Bois dans le domaine des basaltes de type arc volcanique, dans le diagramme de Meschede Y-Nb-Zr (Fig. 8).

La composition chimique des laves et intrusions mafiques de la bande volcanique de Lac du Bois, la variation géochimique des éléments majeurs et traces durant la cristallisation fractionnée, et l'association spatiale et exclusive entre ces deux formations, seraient probablement de nature génétique et semblent être comparable à une suite ignée cogénétique.

### 6.3 Géochimie des roches minéralisées

#### 6.3.1 Distribution des éléments lithophiles

##### a) Éléments majeurs

Les brèches de roches, en inclusion dans le minerai massif, atteignent une taille moyenne de quelques centimètres avec une composition chimique (Tableau 4) assez proche de celle de l'encaissant stérile. Cette observation rejoint celle de la composition minéralogique des fragments de ces roches qui montrent des



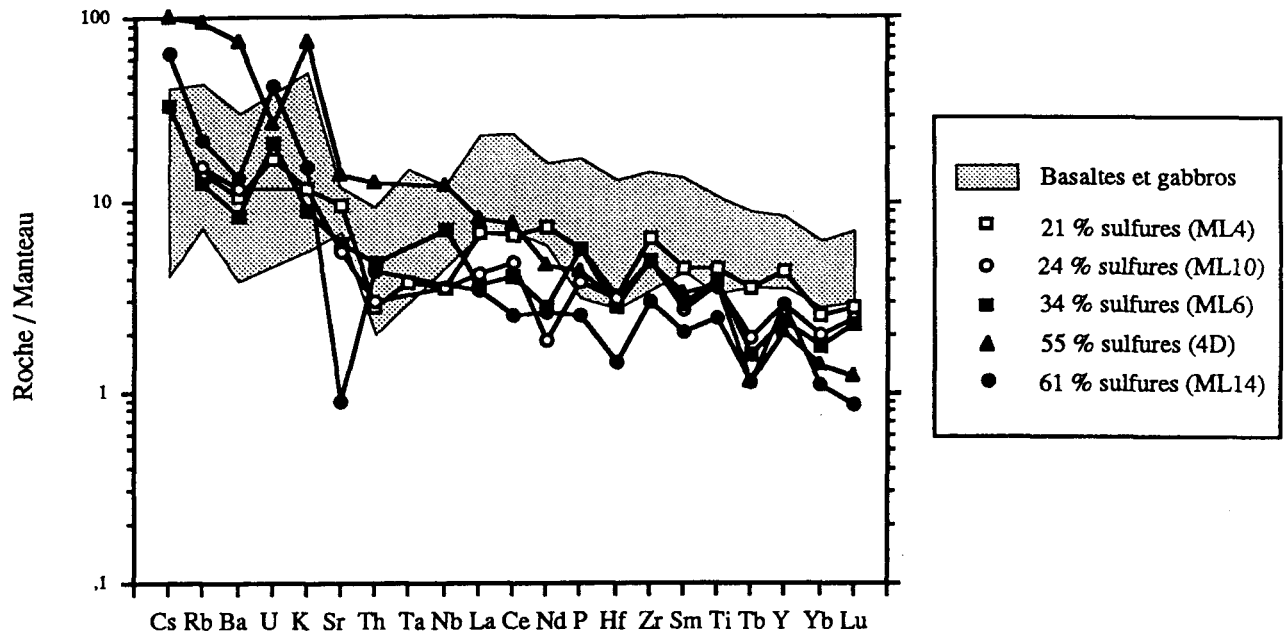


Fig. 12 Comparaison de la composition chimique des roches minéralisées (sulfures disséminés) avec les roches encaissantes (gabbro et basalte) de la mine Lorraine.

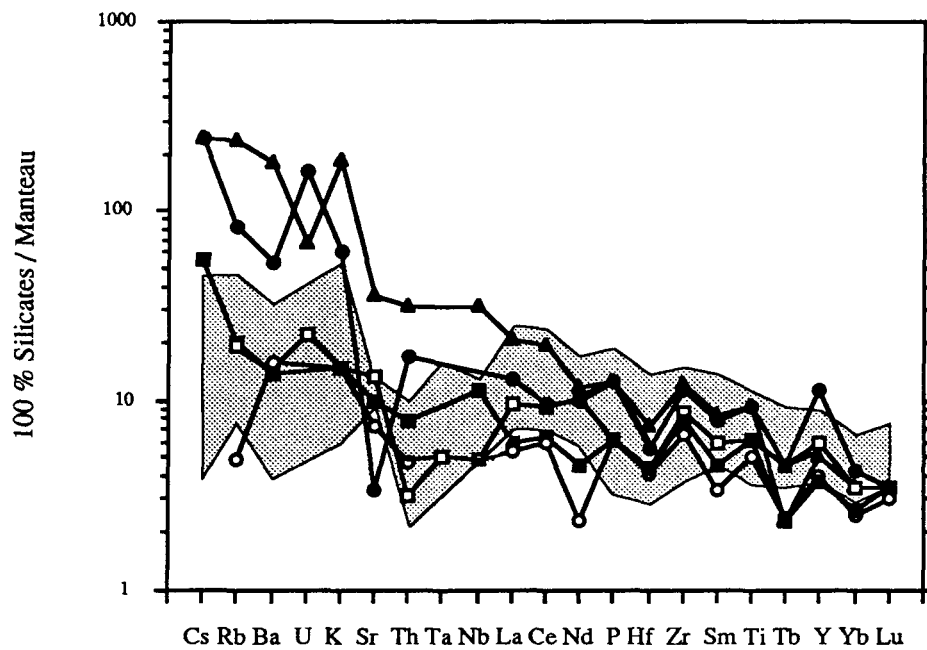


Fig. 13 Roches stériles et minéralisées de la mine Lorraine normalisées à 100 % silicates (même symboles que dans la Fig. 12).





composantes minérales comparable à celle de la roche volcanique. Cette dernière représente le principal encaissant du dépôt de sulfures de la mine Lorraine.

#### b) Éléments traces

Dans le diagramme de variation des éléments traces normalisés au manteau (Fig. 12), les éléments sont reportés dans l'ordre de décroissance de leurs incompatibilités (du Cs vers Lu) et de leurs mobilités relatives dans les phases fluides aqueuses. La distribution de ces éléments traces dans la zone des sulfures disséminés de la mine Lorraine montre une forte mobilité des éléments solubles relative aux éléments immobiles, et ceci à partir de la roche totale (Tableau 3) normalisée au manteau. Le niveau très bas des éléments immobiles (et mobiles) relatif à l'encaissant stérile est dû à l'effet de dilution par les sulfures.

Le diagramme de variation des éléments traces des roches minéralisées est normalisé à 100 % silicates (Fig. 13) (Tableau 4) pour corriger l'effet des sulfures. Ce diagramme montre également une migration évidente des éléments lithophiles les plus mobiles (du Cs au Nb) relative à la roche stérile dans la mine Lorraine.

Cette migration différentielle des éléments lithophiles mobiles dans la zone des sulfures disséminés de la mine Lorraine semble être fonction de la proportion des sulfures présents dans la roche (Fig. 13). Ce degré de mobilité semble indiquer que leur histoire est intimement liée et résulterait probablement de l'action des fluides minéralisateurs qui seraient responsables de la redistribution mutuelle d'éléments lithophiles et chalcophiles. Les sulfures sont généralement plus réactifs chimiquement que les silicates dans des conditions métamorphiques, et sous l'action des fluides hydrothermaux.

### 6.3.2 Distribution des éléments chalcophiles

#### a) Distribution des éléments chalcophiles et sidérophiles dans le dépôt de la mine Lorraine

Les roches minéralisées considérées dans cette étude sont en nombre de 17. Ces échantillons sont divisés en deux groupes: les sulfures massifs et les sulfures disséminés. Cette subdivision est basée d'abord sur la proportion de sulfures présents dans la roche, qui est définie à 60 % entre ces deux groupes, mais aussi sur la texture du minerai.

Dans les sulfures normalisés à 100 % de la mine Lorraine (Tableau 6), une classification suivant la composition chimique (Tableau 5) et plus particulièrement la concentration en Cu dans le minerai, montre des valeurs très variables qui définissent trois classes chimiquement distinctes dans le minerai massif: les sulfures pauvres en Cu (0.04 à 0.5 %), des sulfures à Cu intermédiaire (1.6 à 2.8 %) et des sulfures riches en Cu (7.4 à 12 %). Par contre, tous les échantillons des sulfures disséminés sont exclusivement riches en Cu (entre 12 et 22 %).

Par ailleurs, le Ni est relativement plus constant que le Cu dans les roches minéralisées, mais présente un enrichissement significatif dans le minerai massif (1.2 à 3.1 %) en comparaison avec le minerai disséminé (1 à 1.8 %). La corrélation du Ni versus Cu montre une corrélation négative entre ces deux métaux à travers le dépôt (Fig. 14).

Cet appauvrissement en Ni dans les sulfures disséminés, accompagnés d'un enrichissement en Cu, est exprimé également par le soufre dans la roche totale en corrélation négative avec le Ni (à 100 % sulfures) (Tableau 6), et négative versus

Tableau 5. Différents modes de classification des sulfures de la mine Lorraine.

Ech	Texture		Composition chimique		
	Massive (Sulf > 60%)	Disséminée (Sulf < 60%)	Sulf pauvre en Cu (0.04-0.5 %)	Cu intermédiaire (7.4-12.9 %)	Sulf riches en Cu (7.4-22 %)
ML5	X		X		
ML11	X		X		
4B	X		X		
31B	X		X		
31G	X		X		
ML12	X			X	
ML13	X			X	
4A	X			X	
31D	X			X	
ML14	X				X
31C	X				X
31F	X				X
ML2		X			X
ML4		X			X
ML6		X			X
ML10		X			X
4D		X			X

Tableau 6. Roches minéralisées à 100% sulfures. Mine Lorraine.

%	ML-1	ML-2	ML-4	ML-5	ML-6	ML-10	ML-11	ML-12	ML-13	ML-14	4A	4B	4D	31B	31C	31D	31F	31G
Ni (%)	1.93	1.99	1.06	2.64	1.8	1.23	2.77	2.31	2.34	1.99	2.8	3	1.3	2.6	2.2	3	1.7	3.3
Cu (%)	0.42	7.38	21.91	0.51	12.402	18.43	0.33	3.7	3.03	9.94	2.3	0.04	14.2	0.4	12.8	2.9	12.9	0.3
S (%)	38.6	37.7	36.2	38.37	37.2	36.55	38.39	38.1	38.16	37.45	38.2	38.4	37	38.4	37.1	38.1	37.1	38.3
Fe (%)	59	52.9	40.83	58.47	48.59	43.79	58.51	55.89	56.47	50.61	56.7	58.6	47.4	58.6	47.9	56	48.2	58.1
ELEMENTS TRACES (ppm)																		
Ag	18.8	29.3	163	1.1	47.2	76.1	2.2	7.2	6.8	72.9	3.7	1.3	23	2.9	34.3	9.4	29.6	3.4
As	17.9	<1.5	<0.7	<1.8	<1	<0.8	<1.6	<1.4	<1.1	<1.1	<1	1.1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Co	2060.4	1363.2	473	1226.6	886	715	1148.4	1074.6	1220.5	781	1387.6	1279.9	856	1437.4	832.4	1179.2	952.6	1161
Pb	33	29.2	67	<2	29.5	21.1	20.2	17.3	17.1	46.4	<12	<12	<12	<12	<12	<12	<12	<12
Sb	0.5	<0.1	<0.05	<0.1	<0.07	<0.05	<0.09	<0.08	<0.07	<0.08	-	-	-	-	-	-	-	-
Se	58	60.2	86.7	95	88.3	54.9	77.4	59.8	67.5	106	138.8	106.7	<6	130.7	126.9	107.2	109.5	105.5
Zn	474.9	1382.3	1668.6	34.9	1349.4	1639.6	9	391.17	246.4	722.58	169.3	53.3	380	64	162.4	174.7	<2	15.8
EGP + AU (ppb)																		
Os	5.6	-	<8	<2	<1	<6	<3.2	<3.4	7.5	<4	8.3	<3	<3	<3	5.1	<3	4.4	<3
Ir	1.5	-	0.2	<1	0.3	<0.08	<0.1	0.4	0.2	0	1.2	0.1	0.6	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ru	155.2	-	<10	23.3	<1	<6	48.3	44.7	32.5	<12	<5	<5	<5	9.1	<5	21.4	<5	7.4
Rh	10.3	-	22.1	<0.1	<5.6	15.6	1.6	5.1	2.2	3.3	12.5	<1	<1	3.9	<1	<1	<1	<1
Pt	305.6	-	2359	117.3	507.9	384.6	112.2	111.1	294.3	107.7	402.4	136.5	652.5	112.4	2516.1	167.2	258.4	128.8
Pd	438.7	-	5777.7	742.1	806.1	562	261.5	233.8	1168.7	206	420.4	296.5	<1	565.8	1177.5	444.9	411.7	620.6
Au	108.1	332.8	3979.7	309.7	1517.7	1005.7	10.2	336.3	280.6	1254.6	93	<5	2302.8	222.1	164.9	407.4	284.7	12.7
* Calcul de Fe (s).																		
$C_p = Cu / 63.54; P_n = Ni / 58.7; P_o = S / 32 - 2 * C_p - 1.77 * P_n.$																		
$Fe(s) = [C_p + P_n + P_o * 0.9] * 55.84$																		

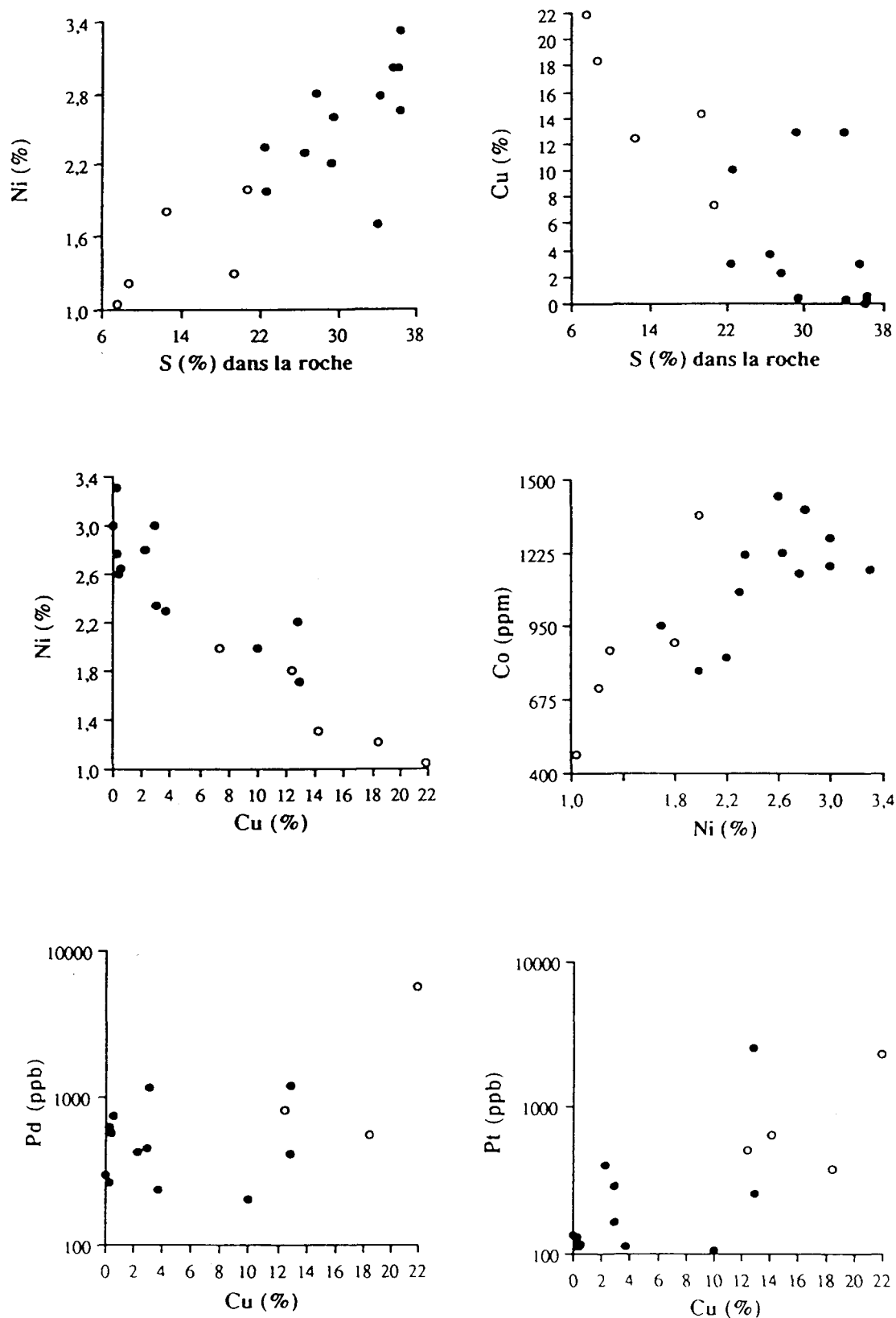


Fig. 14 Corrélation entre les éléments chalcophiles dans les sulfures à 100%. Sulfures massifs (●) et sulfures disséminés (○). Mine Lorraine.



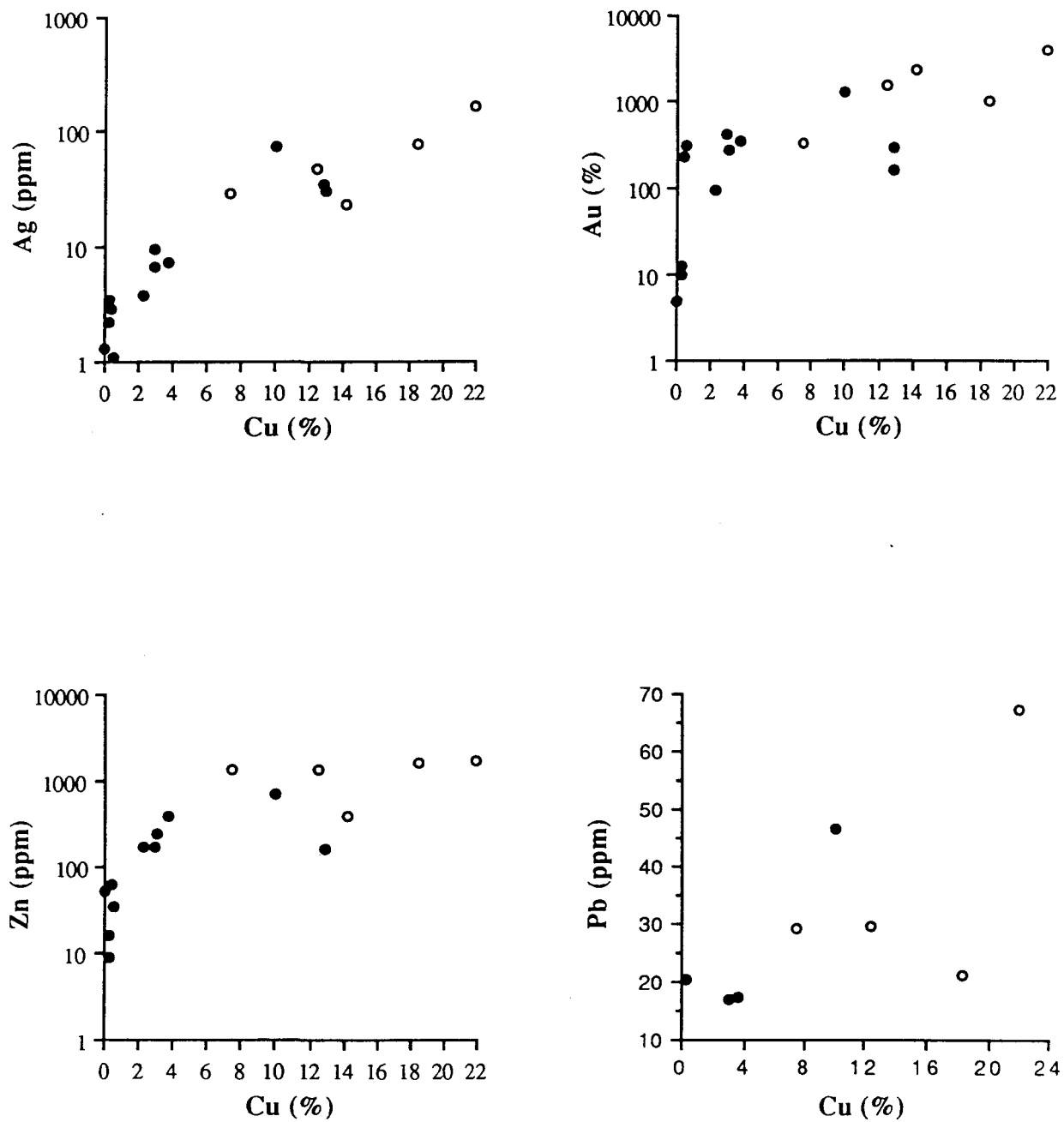


Fig. 14 Suite.

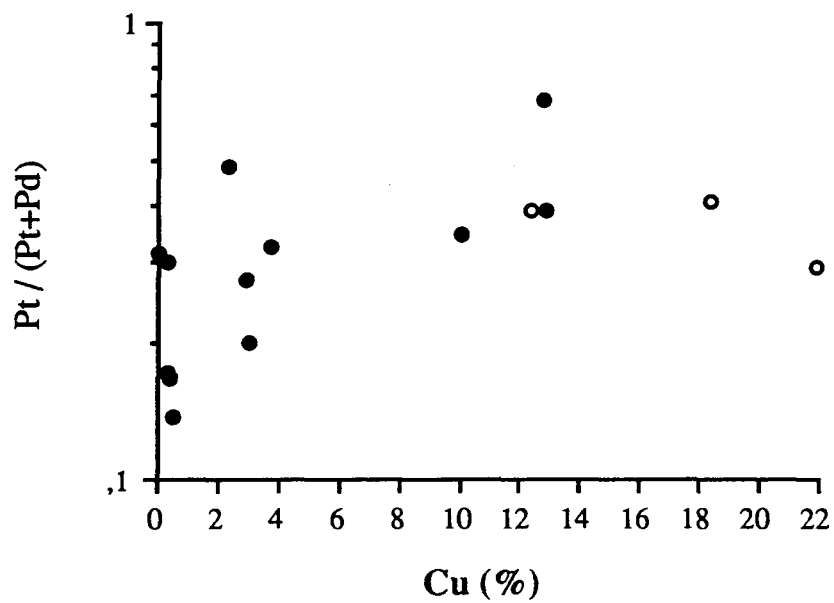


Fig. 15 Variation dans le rapport  $Pt / (Pt+Pd)$  dans les sulfures de la mine Lorraine normalisés à 100 % (même symboles que dans la Fig. 14).

Cu (à 100 % sulfures) (Fig. 14). Ceci confirme et traduit un enrichissement en Cu et un appauvrissement en Ni progressif, des sulfures massives vers les sulfures disséminés.

Toutes ces remarques rejoignent la zonalité spatialement décrite par Descarreux (1967) et qui se manifeste par une distribution texturale, minéralogique et chimique variable à travers la lentille de sulfure de la mine Lorraine.

L'étude de la distribution des métaux chalcophiles a révélée trois principaux groupes géochimiquement distincts: un premier groupe de Ni, où une corrélation positive est établie entre le Ni et le Co (Fig. 14). Les échantillons les plus enrichis en ces métaux sont les sulfures massifs où la pentlandite est plus répandue et dont certaines individus sont enrichis en Co (jusqu'à 4 % dans le minéral, voir le chapitre. Pétrographie). Ceci nous porte à croire que l'encaissant principal du Co est la pentlandite; un deuxième groupe représenté par l'Au, l'Ag et le Zn, où ces métaux montrent une corrélation positive avec le Cu (et négative avec le Ni) et sont beaucoup plus enrichis dans le minerai disséminé (Fig. 14); et enfin le groupe des métaux nobles (Pt et le Pd). Ces derniers, par contre, ne présentent aucune corrélation entre eux, de même qu'avec les autres métaux chalcophiles. Néanmoins, un léger enrichissement en Pt (relativement au Pd) est observé dans le minerai disséminé et les échantillons riches en Cu en général (Fig. 14), tel qu'apparant sur le diagramme  $Pt/(Pt + Pd)$  vs. Cu (Fig. 15).

Dans les patrons des EGP, Ni, Cu, Au et Ag associés, les valeurs dans la roche totale sont normalisées au manteau (Fig. 16). Les signatures des EGP à travers tous le dépôt (minerai massif et disséminé) montrent une anomalie négative de l'Ir, Os et Ru (Fig. 16), définie au dessous de la limite de détection et qui est une

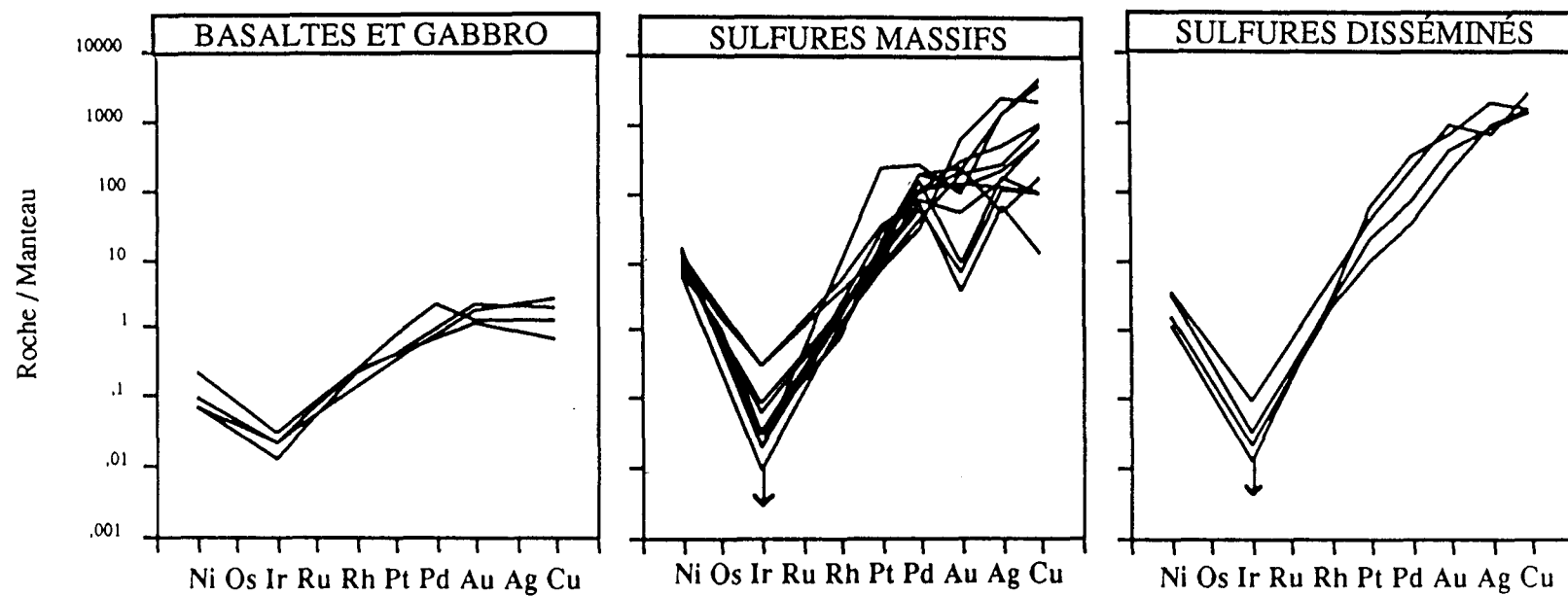


Fig. 16 Distribution des éléments du groupe du platine et métaux associés dans la lentille de sulfures de la mine Lorraine (normalisation au manteau de Barnes et al., 1988).

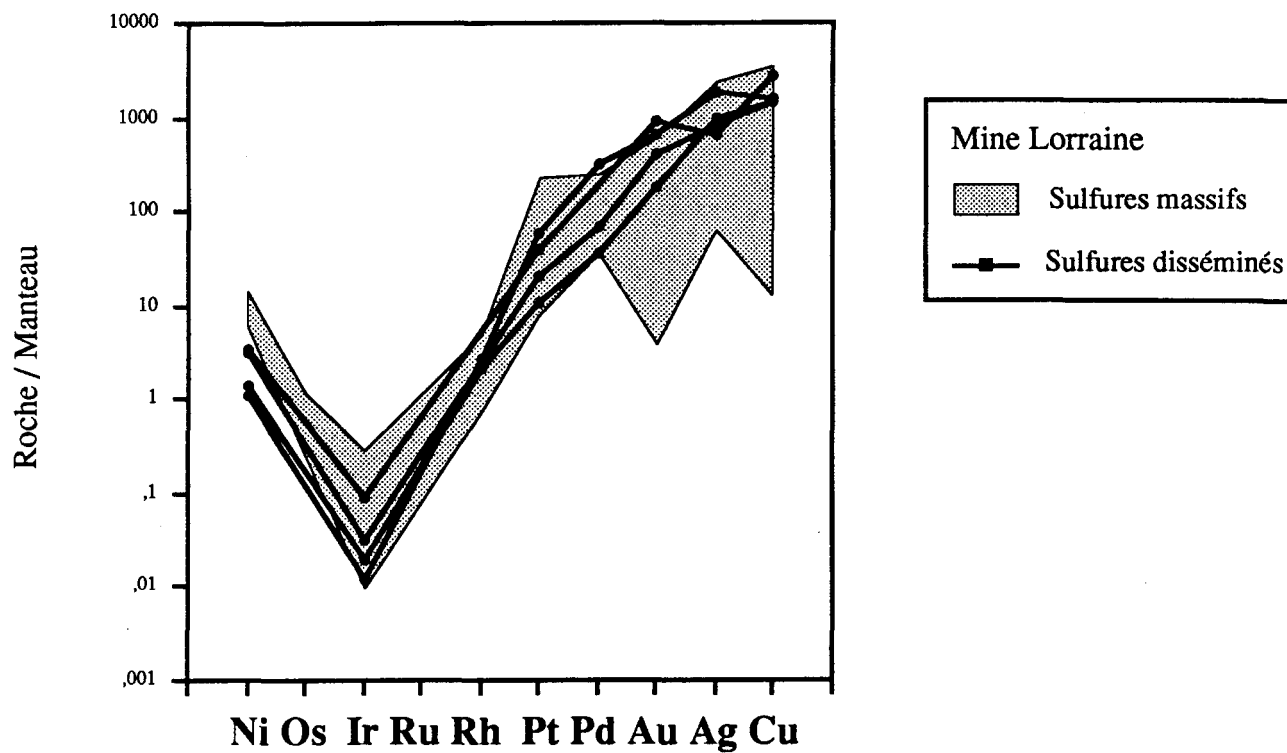


Fig. 17 Comparaison entre les EGP et métaux associés des sulfures massifs et disséminés de la mine Lorraine (normalisation au manteau de Barnes et al., 1988).

caractéristique des sulfures de la mine Lorraine, comparées aux dépôts de sulfures riches en EGP de la ceinture d'Angliers-Belleterre (Barnes et al., 1990). Cependant, les valeurs du Cu, Au, Ag et (Ni) varient dans le dépôt de la mine Lorraine.

Dans les sulfures massifs, le Ni, le Pt et Pd sont constants alors que des métaux chalcophiles mobiles comme l'Au, l'Ag et le Cu sont très variables (Fig. 17) (Tableau 6). Une anomalie négative marque certains échantillons dans le minerai massif pauvre en Cu.

Dans les sulfures disséminés, les quatre échantillons texturalement représentatifs montrent une signature similaire en EGP, Ni, Cu, Au et Ag, et sont tous enrichis en éléments chalcophiles mobiles.

Les diagrammes de corrélation entre les métaux sont défini pour essayer de déterminer les processus qui contrôlent leurs distributions dans le liquide de sulfure. Des métaux comme l'Au, l'Ag et le Zn exhibent une bonne corrélation positive avec le Cu en s'enrichissant dans les échantillons riches en Cu, et montrent par contre une corrélation négative avec le Ni et le S. Descarreux (1967) à mentionné également (et seulement) une légère dépendance entre le Cu et l'Ag dans la roche totale, mais en général une indépendance totale entre les métaux (Ni, Cu, Au, Ag) dans les différentes zones du dépôt à partir des 92 échantillons de forages effectués dans la mine.

La corrélation dans cette étude est évaluée à 100 % de sulfures pour une meilleure analyse du fractionnement des métaux dans le liquide sulfuré (Fig. 14). Cependant le Pd (et le Pt) ne présentent pas de corrélation avec le Cu, Ni, Au et Ag à partir des 17 échantillons analysés, mais le Pt présente un léger

enrichissement dans les sulfures disséminés et les échantillons riches en Cu en général.

b) Comparaison avec d'autres dépôts de sulfures différenciés

La lentille de sulfures de la mine Lorraine est associée à une zone de cisaillement dans un environnement de roches mafiques. Le dépôt est de petite taille, d'environ 60 mètres de longueur et une largeur moyenne de 8 mètres (MRN, 1966). La distribution de ces échantillons dans le diagramme Cu/Ir versus Ni/Pd (Fig. 18) correspond à un champ de composition différente de ceux générés par des processus orthomagmatiques définis dans la littérature. Néanmoins, certains échantillons chevauchent le champ des veines de sulfures riches en Cu.

La lentille de sulfures de la mine Lorraine montre une composition très différenciée indiquée par la distribution des éléments du groupe du platine et les éléments chalcophiles mobiles. Les sulfures disséminés de la mine Lorraine montrent un patron d'EGP comparable avec celui des veines riches en Cu de la mine de Levack West, Sudbury (Naldrett et al., 1982) (Tableau 7). La zonalité minéralogique et géochimique observée dans le dépôt de Levack West et de Strathcona, exprimée par les rapports des métaux du Cu et Ni et ceux des EGP, a été attribuée à la différenciation de la solution solide de monosulfure (ssm) du fait de l'évolution progressive et continue le long du dépôt. Les veines enrichies en Cu, Pt, Pd, Au et Zn dans le dépôt de Levack West correspondraient à la portion résiduelle du stade tardive de la cristallisation de la ssm (Naldrett et al., 1982) avec un rapport  $Pt/(Pt+Pd)$  plus bas relatif au cumulat.

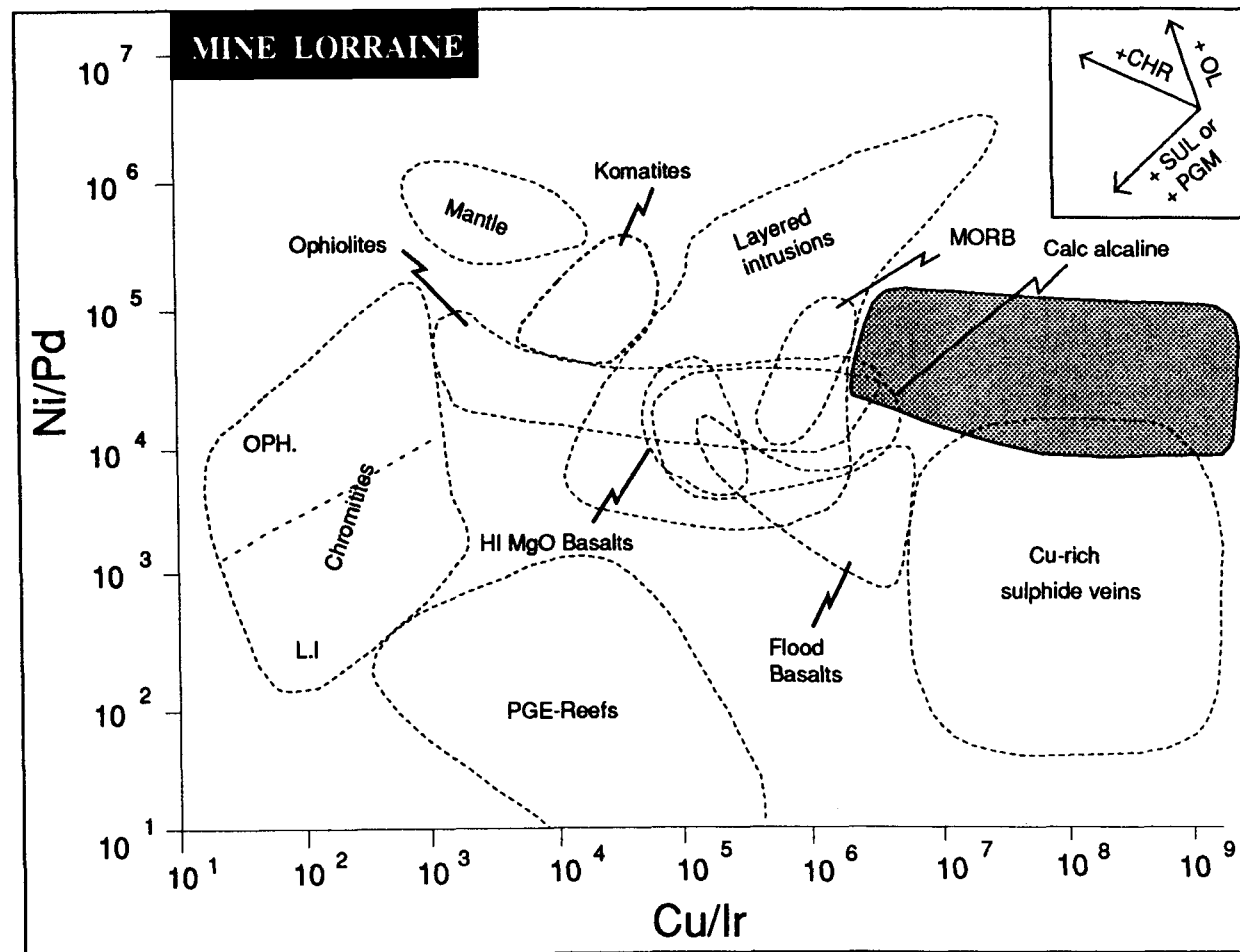


Fig. 18 Composition et classification du dépôt de la mine Lorraine dans le diagramme de discrimination des roches mafiques et ultramafiques (champ en grisé) (modifié de Barnes et al., 1988).



Tableau 7. Concentration moyenne des métaux dans les sulfures (à 100 %) de la mine Lorraine et de Levack West (Sudbury).

Zone de dépôt	Nb. d'éch.	ppb							ppm	%	
		Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Ag	Cu	Ni
- Veines riches en Cu. Levack West*	4	<2	0.3	<3	<10	5948	3370	167	-	27.8	2.6
- Sulfures massifs. Mine Lorraine	12	<4	<0.4	<18.2	-	372	545	345	14.56	4.1	2.55
- Sulfures disséminés. Mine Lorraine	4	<4	<0.5	<5.5	-	967	2382	2362	77.32	16.73	1.34

\* Données tirées de Naldrett et al., 1982.

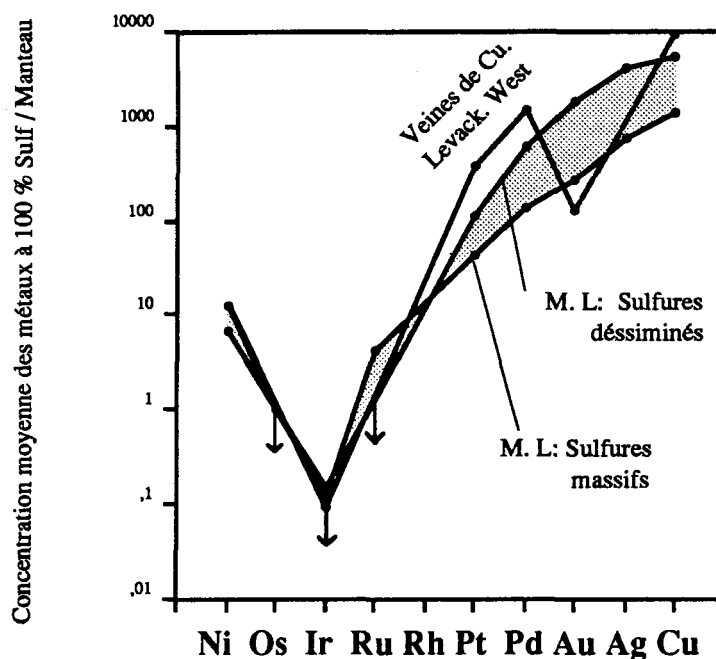


Fig. 19 Concentrations moyennes en EGP et métaux associés dans les sulfures normalisés à 100 %: les veines enrichies en Cu du dépôt de Levack West à Sudbury (Naldrett et al., 1982) et les sulfures massifs et disséminés de la mine Lorraine.

Cependant, cette analogie entre le dépôt de la mine Lorraine avec la portion cuprifère de Levack West (Fig. 19) suggère l'existence d'un cumulat, génétiquement lié à la lentille de sulfures de la mine Lorraine, enrichi en Ni et EGP immobiles et encaissé dans l'intrusion mafique.

Ces types de veines riches en Cu sont souvent attribuées à la différenciation de la solution solide de monosulfure à la phase tardive de la cristallisation fractionnée (Lightfoot et al., 1984, Barnes et Naldrett, 1986). Ainsi, les travaux expérimentaux de Craig et Kullerud (1969) dans le système Fe-Ni-S ont montré une coexistence du liquide riche en Cu avec la solution solide de monosulfure de pyrrhotite au dessus de 850°C. La portion cuprifère est séparée à basse température pour s'enrichir en Cu, Pd et Pt dans le liquide résiduel et s'appauvrir en Ir, Os, Ru et Ni. Ces derniers sont compatibles dans les réseaux de la solution solide de monosulfure (Craig et Kullerud, 1969).

Les sulfures massifs et disséminés dans le dépôt de la mine Lorraine présentent un rapport Pd/Ir >1000. Ce découplage des EGP est considéré comme une évidence pour une origine hydrothermale dans le dépôt de Rathburn Lake (Rowell et Edgar, 1986) avec le  $(Pt+Pd)/(Os+Ru+Ru) >1000$ , et qui reflète probablement la solubilité relative des EGP dans les fluides (McCallum et al., 1976).

## CHAPITRE VII

### DISCUSSION.

#### Mise en place de la lentille de sulfures

On distingue deux modèles possibles qui peuvent générer un liquide de sulfure dont la composition est comparable à celle du dépôt de la mine Lorraine (Fig. 20):

1- Fractionnement de la solution solide de monosulfure. Une portion de sulfure enrichi en S, Cu, Pd, Pt, Au et Ag, résultant d'un magma très fractionné, avec un cumulat correspondant enrichi en fer et en EGP immobiles, cette portion plus dense se situerait probablement plus en profondeur.

L'extraction et la mise en place de la lentille de sulfures de la mine Lorraine, correspondant à la portion la plus différenciée de la solution solide de monosulfure, peut s'effectuer soit par une injection du liquide de sulfure cuprifère le long du contact géologique (cisailé ?), avant la solidification du liquide de sulfure (Abel et al., 1979), où bien elle est entraînée dans cette zone de contact par le cisaillement (Fig. 20).

2- Depuis que les travaux expérimentaux de Mountain et Wood (1988) ont montré que la solubilité des EGP (Pt, Pd) dans des conditions hydrothermales et sous une variété d'environnements géologiques a donnée des résultats quantitatives

intéressantes, on attribue aux fluides hydrothermaux un rôle important dans la redistribution des EGP.

La mise en place du dépôt de la mine Lorraine par les fluides hydrothermaux est surtout supportée par le contexte géologique de mise en place, mais surtout par le rapport extrêmement élevé du Pd/Ir  $> 1000$ . McCallum et al (1976), et Rowell et Edgar (1986) considèrent des rapports très élevés du Pd/Ir comme reflétant la solubilité du Pd relative à Ir dans les fluides hydrotheraux.

Cependant, le mécanisme de dissociation entre les EGP immobiles (Os, Ir et Ru) et mobiles (Pt et Pd), magmatique ou hydrothermal, offre une possibilité d'exploration de nouvelles zones minéralisées résiduelles enrichies en Ir, Os et Ru. Il faut signaler que des zones minéralisées, encaissées dans les gabbros à l'est de la mine Lorraine, ont été signalées lors des forages d'explorations effectués aux alentours de la mine (Kish, 1971).

## **Remobilisation des sulfures**

Les différents processus qui ont mené à la mise en place de la lentille de sulfures dans la mine Lorraine (métamorphisme régional, intrusion de granodiorites et cisaillement) semblent affectés sérieusement la morphologie à l'échelle du dépôt, la texture du minerai et la distribution géochimique originelle des métaux dans les sulfures.

### *1- Évidences texturales d'une remobilisation des sulfures dans le dépôt de la mine Lorraine*

**Stade A****- Différentiation de la solution solide de monosulfure**

- ① Injection du liquide de sulfures riche en Cu le long du contact.
- ② Sulfures cisailés

**- Hydrothermalisme**

Transport des métaux solubles par les fluides.

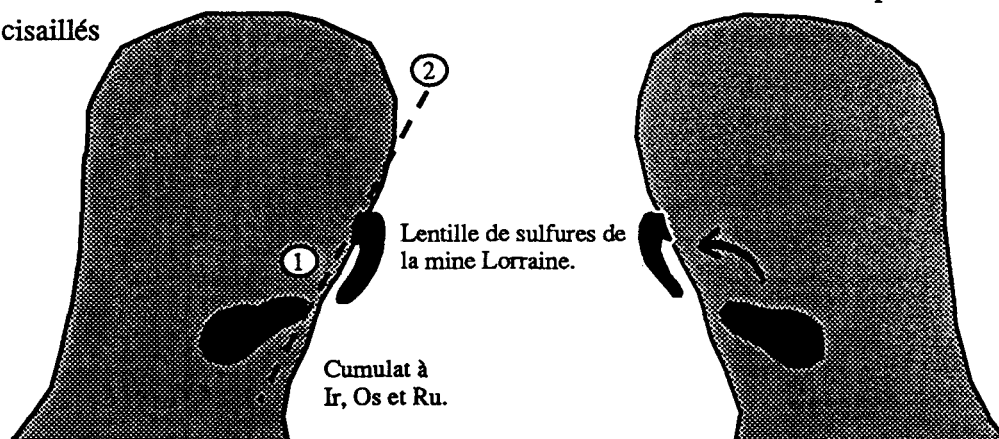
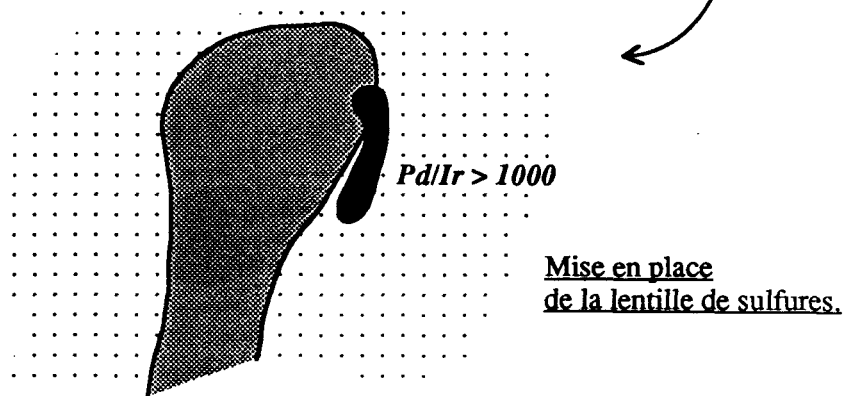
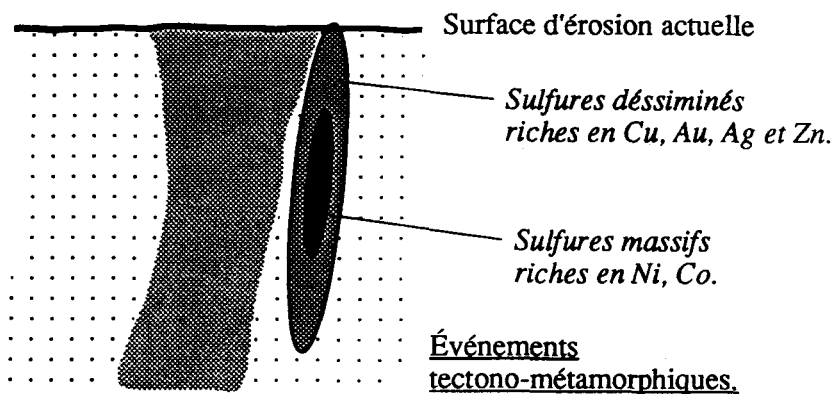
**Stade B****Stade C**

Fig. 20 Modèles possibles pour générer des dépôts de sulfures de composition comparable à celle de la lentille de sulfures de la mine Lorraine.

Les textures des phases minérales observées dans les sulfures massifs indiquent que le minerai a été déformé à une température minimum de 250°C, celle-ci est comparable aux températures du métamorphisme des schistes verts. Cependant, dans le dépôt de la mine Lorraine les microfabriques de la déformation sont plus exprimées dans le minerai massif que dans le minerai disséminé.

Dans la zone des sulfures massifs, la pyrrhotite révèle des macles de déformation qui sont exclusivement présentes dans ce minerai. Cette caractéristique est due à la faible compétence du minerai massif durant le métamorphisme dynamique relativement aux sulfures disséminés associés à une gangue plus compétente. La chalcoppyrite, si elle est présente, est associée aux inclusions de gangue où elle présente une texture de remplissage et de remplacement.

Dans les sulfures à texture massive et plus enrichis en chalcoppyrite, une zonalité macroscopique est parfois visible dans le minerai. A ce niveau la pyrrhotite est recristallisée et exhibe une texture granoblastique polygonale (Pl. 4b), recristallisation caractéristique d'un degré bas du métamorphisme. Elle est associée à une chalcoppyrite à grains fins (50 à 150  $\mu\text{m}$ ) et maclée, ce qui suggère que la mobilisation dynamique de la chalcoppyrite se serait effectuée à basse température, probablement durant le métamorphisme rétrograde. La ductilité de la chalcoppyrite relative à la pyrrhotite peut générer une remobilisation à l'état solide assez importante (Patterson et Watkinson, 1984; Vokes, 1971) dont il résulterait une mobilité différentielle et une zonalité dans le minerai.

Dans le minerai à texture disséminée, les évidences microtexturales de la déformation ductile sont définies par:

- la foliation des inclusions de minéraux de silicates dans les sulfures laquelle suit la schistosité de l'encaissant.
- et une infiltration de la chalcopryrite le long des fractures des minéraux de gangue.

Le métamorphisme dynamique semble être responsable de la zonalité minéralogique (et chimique) qui se manifeste à travers le dépôt. Les évidences microtexturales et macrotexturales montrent une ségrégation dynamique de la chalcopryrite dans la pyrrhotite massive et son expulsion préférentielle à l'extérieur de la zone centrale à pyrrhotite massive décrite par Descarreaux (1967).

Le dépôt de sulfures de Cu, Ni de Thierry Mine, Ontario, est associé à une zone de cisaillement et montre également des rapports étendus des rapports Chalcopryrite/Pyrrhotite et du Ni/Cu à travers le dépôt (Patterson et Watkinson, 1984).

## *2- Évidences d'une redistribution par les fluides des éléments lithophiles et chalcophiles dans la mine Lorraine*

Des échantillons à sulfures disséminés montrent une redistribution des éléments mobiles Cs, Rb, Ba et K relative à la roche encaissante stérile de même nature. L'ampleur de cette redistribution semble être dépendante de la proportion de sulfures présents dans la roche, ceci peut être interprété comme une conséquence de l'action des fluides minéralisateurs.

D'autre part, dans la distribution des éléments chalcophiles, aucune corrélation n'est observée entre le Pt et le Pd ainsi que entre ces métaux et le Cu,

Ni, Au ou Ag. Néanmoins, les éléments chalcophiles mobiles (Cu, Au, Ag et Zn) montrent un enrichissement évident dans le minerai disséminé relatif au minerai massif plus enrichi en Ni et en Co.

On pense que les tellurures ont probablement agi comme agents discriminants entre les éléments chalcophiles mobiles. Ainsi, le contexte textural de mise en place des bismutho-tellurures suggère que ces phases ont précipité par les fluides hydrothermaux lors des événements tectono-métamorphiques.

- ces tellurures sont concentrés exclusivement dans le minerai à pyrrhotite massive pauvre en Cu, tandis que dans un cas de différenciation magmatique ces semimétaux (Bi, Te) sont des volatiles qui s'enrichissent dans le liquide résiduel riche en Cu.

- ces phases sont associées aux bordures des grains de sulfures, et plus souvent aux inclusions de gangue.

- la pyrrhotite associée à ces phases volatiles montre des évidences microtexturales de la déformation ductile (extinction ondulante et macles de déformation polysynthétiques).

- aucune affinité de ces tellurures avec la chalcopyrite où les métaux nobles avec le Cu.

- le rapport  $Pt/(Pt + Pd)$  vs. Cu (Fig. 17) montre un enrichissement en Pt par rapport au Pd dans les échantillons riches en Cu ( $Pt = 258 - 2516$  ppb) du minerai massif et disséminé, relatif au minerai massif pauvre en Cu ( $Pt = 112 - 137$  ppb). Ceci reflète aussi la composition des tellurures qui montre dans les analyses semiquantitatives à la microsonde des concentrations élevées en Pd relatif au Pt dans les mélonites. Ces derniers sont observées exclusivement dans la pyrrhotite massive pauvre en Cu.



D'après les travaux expérimentaux de Wood (1988), la solubilité des EGP dans les fluides diminue avec la présence des ligands bismutho-téllurures, car les EGP constituent des complexes très stables avec ces semi-métaux (Wood, 1988). Contrairement aux téllurures de Cu, qui sont extrêmement rares dans la nature du fait que ces complexes nécessitent une fugacité très basse en S dans le milieu (Afifi et al., 1988). Par conséquent, les EGP seront immobilisés lors de l'interaction des fluides avec les sulfures riches en Pd, et en Ni (pentlandite). La concentration du Ni dans les bismutho-téllurures palladinifères semble être due au fait que ce métal constitue une composante majeure des sulfures encaissants (Rucklidge, 1969). Le nickel subit une migration et une redistribution locale dans les fluides hydrothermaux par les phases téllurures (Hudson, 1986).

La distribution distincte du Pt et du Pd relative au Cu, Au, Ag et Zn serait probablement une conséquence du mécanisme du transport et de la nature des fluides.

Dans la littérature, on observe des exemples de concentration de métaux nobles dans les sulfures, où ces EGP ont tendance à suivre un cheminement différent des autres métaux dans les sulfures associés aux zones de déformations. C'est le cas des sulfures magmatiques déformés de Lac des Iles, Ontario, (Talkington et Watkinson, 1984), où on observe aucune corrélation entre le Cu, Ni et S avec le Pt et le Pd. les métaux nobles ont précipité sous forme de téllurures, bismutho-téllurures, arsénures et sulfures, et ont été également attribués à une précipitation durant les événements tectono-métamorphiques.

## CHAPITRE VIII

### CONCLUSION.

Les laves et intrusions mafiques de la série tholéitique de Lac du Bois sont comparables à une suite cogénétique. Les différentes lithologies qui constituent la région de la mine Lorraine (laves, gabbro et granodiorite), sont marquées par une foliation est-ouest et définissent un assemblage minéral de basse température au faciès schiste vert.

Des évidences microtexturales ont révélée une déformation ductile, accompagnée d'une remobilisation dynamique dans les sulfures de la mine Lorraine, à une température comparable aux conditions du métamorphisme régionale des schistes verts ( $> 250^{\circ}\text{C}$ ). Dans ce sens, la zonalité qui caractérise la lentille de sulfure de la mine Lorraine semble être une conséquence du caractère plus ductile de la chalcopryrite sous contrainte, relative à la pyrrhotite.

L'étude de la distribution des éléments chalcophiles dans les sulfures montre trois groupes géochimiquement distincts: d'abord, le groupe du Ni, Co qui est enrichi dans le minerai massif, en corrélation négative avec celui du Cu, Au, Ag et Zn. Ce dernier par contre est enrichi dans le minerai disséminé. Et un troisième groupe à Pd et Pt qui ne montre aucune affinité avec les deux groupes précédents.

Cependant, cette distribution distincte entre les éléments chalcophiles mobiles [(Cu, Au, Ag et Zn) et (Pd, Pt)] résulte probablement de processus géologiques différents, lors de la remobilisation des métaux. Par conséquent, la redistribution

du Cu (et Au, Ag, Zn) est attribuée à la remobilisation dynamique de la chalcoppyrite, alors que celle du Pd et du Pt résulterait probablement d'une redistribution par les fluides hydrothermaux qui précipiteraient sous forme de complexes bismutho-téllurures.

Cette redistribution des EGP dans les sulfures remobilisés semble être plus effective à l'état fluide. Ainsi, la concentration des EGP dans les sulfures associés aux zones de déformations (et d'altérations hydrothermales), où la circulation des fluides est plus intéressante, pourrait être un bon guide d'exploration de ces métaux nobles.

D'autres part, la composition chimique de la lentille de sulfures de la mine Lorraine est très différenciée avec un rapport  $\text{Pd/Ir} > 1000$ . Dans un intérêt d'exploration géologique, cette étude suggère un cumulat de sulfures en profondeur, enrichi en métaux nobles immobiles (Ir, Os et Ru).

## RÉFÉRENCES

- Abel, M. K., Buchan, R., Coats, C. J. A., and Penstone, M. E., 1979. Copper mineralisation in the footwall complex, Strathcona mine, Sudbury, Ontario. *Canadian Mineralogist*, **17**: 275-285.
- Afifi, A. M., Kelly, W. C., and Essene, E. J., 1988b. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxydes: II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, **83**: 395-404.
- Avramchev, L., and Lebel-Drolet, S., 1981. Catalogue des gîtes minéraux du Québec: région de Laurentie-Saguenay. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec; DPV-809.
- Ballhaus, C. G., and Stumpf, E. F., 1986. Sulfide and platinum mineralisation in the Merensky reef: Evidence from hydrous silicites and fluid inclusions: Contribution to Mineralogy and Petrology, **94**: 193-204.
- Barnes, S.-J., and Naldrett, A. J., 1986. Variations in Platinum-Group Element concentrations in the Alexo Mine Komatiite, Abitibi greenstone belt, northern Ontario. *Geological Magazine*, **123**: 515-425.
- Barnes, S.-J., Boyd, R., Korneliussen, A., Nilsson, L. P., Often, M., Pederson, R. B., and Robins, B., 1988. The use of mantle normalisation and metal ratios in discriminating the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway. In *Geo-Platinum 87*, Elsevier Applied Science Publishers, London, 113-143.
- Barnes, S.-J., Couture, J. F., Poitras, A., Tremblay, C., 1990. Platinum-Group Elements in the Quebec portion of the Abitibi Greenstone Belt. Rapport du Centre sur les Ressources minérales de l'Université du Québec à Chicoutimi soumis au Ministère de l'Énergie et des ressources du Québec, 109 p.

- Barrett, F. M., Binns, R. A., Groves, D. I., Marston, R. J., and McQueen, K. G., 1977. Structural history and metamorphic modification of archean volcanic-type nickel deposits, Yilgarn Block, Western Australia. *Economic Geology*, **72**: 1195-1223.
- Bédard, L. P., and Barnes, S-J., 1989. Instrumental neutron activation analysis by collecting only one spectrum: results for international geochemical reference samples. *Geostandards Newsletter*, **3**: 479-484.
- Cabri, L. J., and Laflamme, J. H. G., 1976. The mineralogy of the Platinum-Group-Element from some Copper-Nickel deposits of the Sudbury Area, Ontario. *Economic Geology*, **71**: 1159-1195.
- Card, K. D., 1990. A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archean accretion. *Precambrian Research*, **48**: 99-156.
- Clark, B. R., and Kelly, W.C., 1973. Sulfide deformation, studies; I. Experimental deformation of pyrrhotite and sphalerite to 2,000 bars and 500 C. *Economic Geology*, **68** : 332-352.
- Craig, J. R., and Kullerud, G., 1969. Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their application to magmatic ore deposits. *Economic Geology, Monograph*. **4**: 344-358.
- Descarreaux, J., 1967. *Géologie et géostatistique de la mine Lorraine*. Thèse de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 61 p.
- Dimroth, E., Imreh, L., Rocheleau, M., and Goulet, N., 1982. Evolution of the south central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part I: Stratigraphy and paleogeographic model. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **19**: 1729-1758.
- Frizzo, P., Mills, J., and Visona, D., 1982. Ore Petrology and Metamorphic history of Zn-Pb Ores, Monteneve, Tyrol, N. Italy. *Mineralium Deposita*, **17** : 333-347.

- Gilligan, L. B., and Marshall, B., 1987. Textural evidence for remobilisation in metamorphic environments. In: B. Marshall and L.B. Gilligan (Editors), *Mechanical and Chemical (Re)mobilisation of Metalliferous Mineralisation*. *Ore Geology Reviews*, 2: 205-230.
- Graff, J. L., and Skinner, B. J., 1970. Strength and deformation of pyrite and pyrrhotite. *Economic Geology*, 65: 206-215.
- Hocq, M., 1990. Lithotectonique des sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec; D V. 89-04.
- Hudson, D. R., 1986. Platinum-Group Minerals from the Kambalda Nickel Deposits, Western Australia. *Economic Geology*, 81: 1218-1225.
- Imreh, L., 1978. Canton de Baby Township. Ministère des ressources naturelles du Québec. Rapport géologique-185.
- Irvine, T. N., and Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Jensen, L. S., 1976. A New Cation Plot For Classifying subalkalic volcanic rocks. Ministry of Natural Ressources of Quebec. Miscellaneous paper 66.
- Kelly, W. C and Clark, B. R., 1975. Sulphide deformation studies: III. Experimental deformation of chalcopyrite at 2,000 bars and 500 degrees celsius. *Economic Geology*, 70: 431-453.
- Kish, L., 1971. Part of Gaboury and Blondeau Townships, Timinscamingue County. Ministry of Natural Ressources of Quebec. Geological Report-145.
- Leshner, C. M., and Keays, R. R., 1984. Metamorphically and hydrothermally mobilized Fe-Ni-Cu Sulfides at Kambalda, Western Australia. In: *Buchanan., D. L and Jones, M. J (eds): Sulphide deposits in mafic and ultramafic rocks*, London, Institute of Mining Metallurgy, 62-69.

- Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., and Hawkesworth, C. J., 1984. The Geology and geochemistry of the Waterfall Gorge section of the Insizwa Complex with particular reference to the origin of the nickel-sulfide deposit. *Economic Geology*, **79**: 1857-1879.
- Martson, R.J., and Kay, B.O., 1980. The distribution, petrology and genesis of nickel ores at the Juan Complex, Kambalda, Western Australia. *Economic Geology*, **75**: 546-565.
- McCallum, M.E., Loucks, R. R., Carlson, R. R., Cooley, E. F., and Doerge, T. A., 1976. Platinum Metals Associated with Hydrothermal Copper Ores of the New Rambler Mine, Medicine Bow Mountains, Wyoming. *Economic Geology*, **71**: 1429-1450.
- McClay, K. R., and Ellis, P. G., 1984. Deformation of pyrite. *Economic Geology*, **79**: 400-403.
- McQueen, K. G., 1987. Deformation and remobilisation in some western australian nickel ores. *Ore Geology Reviews*, **2** : 269-286.
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, **56**: 207-218.
- Mihalik, P., Jacobsen, J. B. E., and Hiemstra, S. A., 1974, Platinum -Group Element minerals from a hydrothermal environment: *Economic Geology*, **69**: 257-262.
- Ministère des richesses naturelles (MRN) du Québec, 1966. Rapport annuel pour l'année 1964-65, 28p.
- Mortensen, J. K., Theriault, R. J., and Card, K., 1988. U-Pb and Rb-Sr age constraints for plutonism and metamorphism in the Pontiac subprovince Abstract, GAC-MAC meeting, St John's, A87.
- Mostert, A. B., Hofmeyr, P. K., and Potgieter, G. A., 1982. The Platinum Group Mineralogy of the Merensky Reef at the Impala Platinum Mines, Bophuthats Wana. *Economic Geology*, **77**: 1385-1395.

- Mountain, B. W., Wood, S. A., 1988. Solubility and Transport of Platinum-Group Element in Hydrothermal Solutions: Thermodynamic and Physical Chemical Constraints. In *Geo-Platinum 87*. Elsevier Applied Science Publishers, London, 57-82.
- Mullen, E. D., 1983. MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planetary Sciences Letters*, **62**: 53-62.
- Naldrett, A. J., Innes, D. G., Sowa, J., and Gorton, M. P., 1982. Compositional variations within and between five Sudbury. Ore Deposits. *Economic Geology*, **77**: 1519-1534.
- Patterson, G. C., and Watkinson, D. H., 1984. Metamorphism and supergene alteration of Cu-Ni sulfides, Thierry Mine, Northwestern Ontario. *Canadian Mineralogist*, **22**, 13-21.
- Roscoe, W. E., 1975. Experimental deformation of natural chalcopyrite at temperatures up to 300°C over the strain rate range 10<sup>-2</sup> to 10<sup>-6</sup> sec<sup>-1</sup>. *Economic Geology*, **70**: 454-472.
- Rowell, W. F., and Edgar, A. D., 1986. Platinum Group Element Mineralisation in a Hydrothermal Cu-Ni Sulfide Occurrence, Rathburn Lake, Northeastern Ontario. *Economic Geology*, **81**: 1272-1277.
- Rucklidge, J., 1969. Electron Microprobe investigations of Platinum Metal Minerals from Ontario. *Canadian Mineralogist*, **9**: 617-628.
- Talkington, R. W., Watkinson, D. H., 1984. Trends in the distribution of the precious metals in the Lac des Iles complex, northwestern Ontario. *Canadian Mineralogist*, **22**: 125-136.
- Tremblay, C., 1990. Les éléments du groupe du platine dans le dyke de Méquillon. Ceinture de Cape Smith, Nouveau-Québec. Thèse de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 76 p.



Vokes, F.M., 1971. Some aspects of the regional metamorphic mobilisation of pre-existing sulphide deposits. *Mineralium Deposita*, 6: 122-129.

Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Dept. of Earth Sciences, University of Leeds. Unwin Hyman. London, 307-308.