

Pétrographie des gisements de Ni-Cu de Pechenga, Russie

par :
Jean-François Lagueux

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

Août 1999

Université du Québec à Chicoutimi

Résumé

Les gisements de Pechenga sont localisés au nord-ouest de la Russie, près de la frontière norvégienne. Ils consistent en des dépôts de Ni-Cu d'âge protérozoïque (1990-1970 Ma) mis en place dans la ceinture de roche verte discontinue de Polmak-Opukasjarvi-Pasvik-Pechenga-Imandra/Varzuga-Ust'Ponoy, lors de l'ouverture d'un rift continental (2500-1800 Ma). Ils produisent annuellement 36 000t de Ni avec des réserves prouvées de 162 M/t à 1% Ni et 0.4% Cu.

Un modèle de mise en place des gisements a été développé par Melezhick (1994) stipulant que les dépôts localisés à l'est étaient d'origines intrusives (faible profondeur) alors que les dépôts situés à l'ouest étaient d'origines effusives. Cette proposition a été apportée suite à l'observation d'une différence dans la proportion des isotopes de ^{34}S entre les deux secteurs (0-2‰ à l'ouest et 4-6‰ à l'est).

La minéralogie des encaissants est principalement composée d'olivine et de clinopyroxène (métamorphisés en serpentine et talc), de carbonates, de biotite et de chlorite. Les opaques présents sont la pyrrhotite, la pentlandite, la chalcopyrite et la magnétite.

La partie disséminée constitue un cumulat d'olivine polygonale et de clinopyroxène intergranulaire avec des sulfures disséminés ou globulaires. Elle montre une proportion de chalcopyrite plus importante par rapport aux autres sections.

La partie matricielle montre des grains d'olivines polygonales qui baignent dans une matrice de ol+cpx cryptocristallins serpentinisés et de sulfures.

La section bréchique montre des fragments subarrondies de péridotite, de shale, de tuff et de conglomérat qui baignent dans des sulfures granoblastiques et matriciels.

La section massive est composée principalement de pyrrhotite, de pentlandite et de chalcopyrite granulaire. Un peu de magnétite podiforme est associé à cette phase.

Le diagramme Fe-S-Ni-Cu montre, premièrement, une concentration importante dans le champs des ssm, représentant la composition du cumulat de sulfure et deuxièmement, une certaine tendance qu'ont les échantillons disséminés à subir le fractionnement.

La mise en place des intrusions à faible profondeur va permettre d'accélérer la vitesse de cristallisation, diminuant ainsi le fractionnement des liquides sulfureux. Elle va aussi générer des textures qui seront semblables à celles qu'il est possible d'observer dans les roches volcaniques, rendant alors difficile la différenciation entre les intrusions et les coulées.

Table des matières:

1	Introduction.....	1
2	Géologie régionale.....	5
3	Pétrographies des gisements de Ni-Cu.....	10
4	Modèles.....	12
	4.1 Modèle de mis en place des gisements de Ni-Cu Pechenga.....	12
	4.2 Modèle général des gisements de Ni-Cu:.....	14
5	Méthodologie:.....	17
6	Observation:.....	18
	6.1 Pétrographie des sulfures massifs	18
	6.2 Pétrographie des sulfures bréchifiés.....	22
	6.3 Pétrographie des sulfures matriciels ``grey ore``	27
	6.3.1 Secteur Est (Vostochnoe).....	27
	6.3.2 Secteur Ouest (Kotselvaara-Kamakivi et Semiletka).....	28
	6.4 Pétrographie des sulfures disséminés:.....	33
	6.4.1 Secteur Est (Vostochnoe).....	33
	6.4.2 Secteur Ouest (Kotselvaara-Kamakivi et Semiletka).....	34
7	Discussion.....	39
	7.1 Modèle de mis en place des gisements de Ni-Cu de Pechenga.(Melezhik et al(1994)	39
	7.2 Modèle général des gisements de Ni-Cu. (Barnes 1997).....	40
8	Conclusion.....	43
9	Remerciement.....	45
10	Référence.....	46

Liste des figures:

Figure 1: Localisation géographique de la région de Pechenga.....	3
Figure 2: Diagramme de la teneur en Ni en fonction du tonnage d'une sélection de gisements et de districts au Canada et à l'étranger.....	4
Figure 3: Géologie du Super Groupe de Pechenga (Russie).....	7

Figure 4: Géologie locale du Groupe de Pechenga Nord.....	8
Figure 5: Géologie de la Formation Productive (Formation sédimentaire de Pilg'uyarvi).....	9
Figure 6: Modèle de mise en place pour les gisements de Ni-Cu de Pechenga proposé par Melezhik (1994).....	13
Figure 7: Modèle général de distribution des sulfures dans les gisements de Ni-Cu.....	16
Figure 8: Distribution de Fe-S-Ni-Cu des sulfures des gisements de Pechenga.....	42

Liste des planches photos:

Planche 1: Section massive et métamorphisme	20
Planche 2: Section bréchique.....	25
Planche 3: Section matricielle.....	30
Planche 4: Section disséminée.....	37

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Pétrographie des sulfures massifs.....	19
Tableau 2 : Pétrographie des sulfures bréchifiés.....	24
Tableau 3 : Pétrographie des sulfures matriciels (grey ore).....	29
Tableau 4 : Pétrographie des sulfures disséminés.....	36

Appendice 1:

Tableau des concentrations des minéraux pour les lames minces.

1 Introduction

Les dépôts de Ni-Cu de Pechenga sont localisés dans le nord-est de la Russie, près de la frontière finlandaise (fig. 1). Ils consistent en des dépôts de Ni-Cu d'âge protérozoïque encaissés dans des roches ultra-mafiques mis en place dans un environnement intra-continentale (Melezhik et al. 1994).

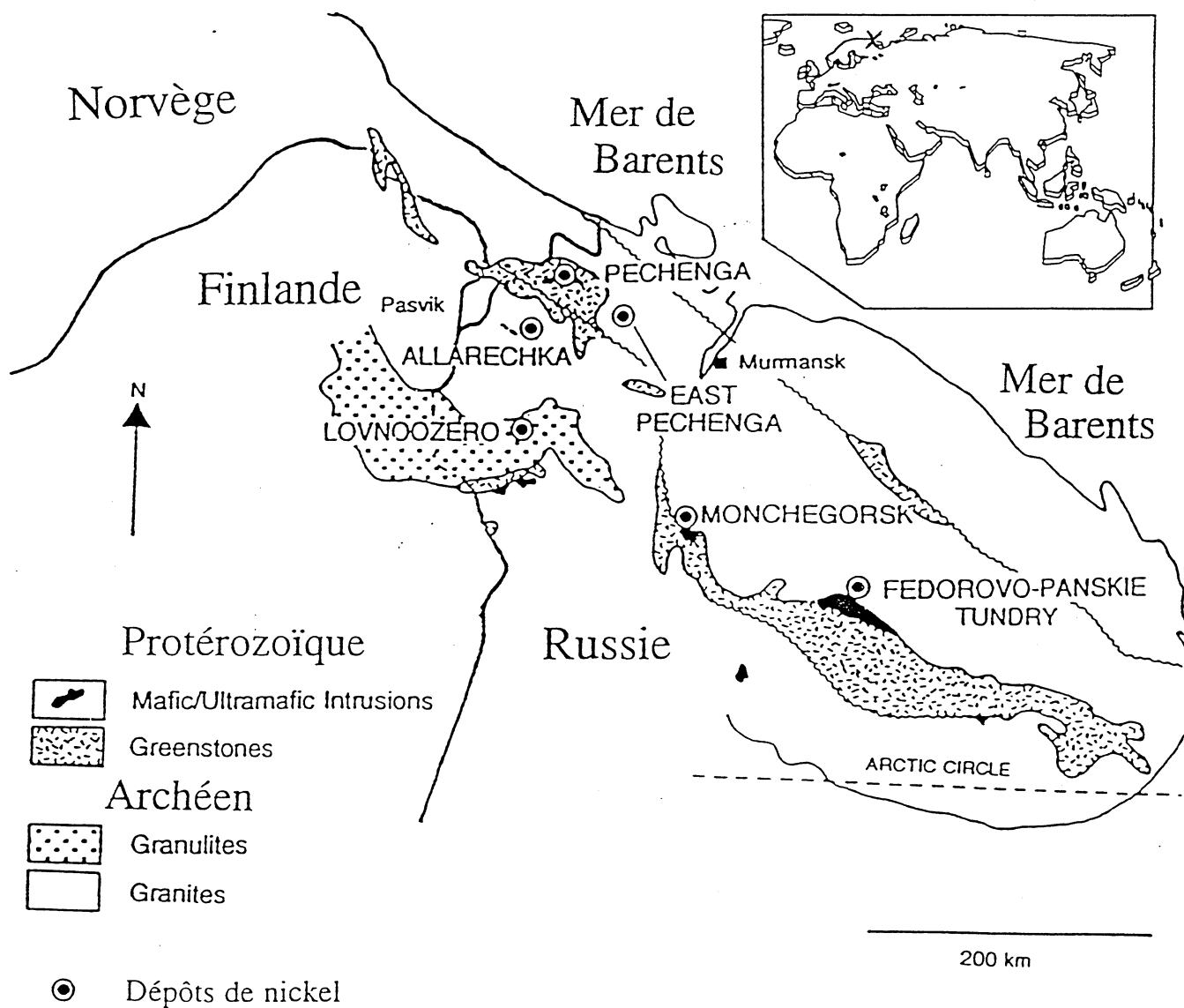
Ces gisements sont en exploités depuis 1940 et produisent annuellement 36000t de Ni à une concentration de 1% Ni et 0.4% Cu avec des réserves estimées à 162 M/t (Eckstran, 1996). (fig. 2).

Plusieurs modèles ont été élaborés dans le but d'expliquer la répartition et le mode de formation des dépôts de Ni-Cu de Pechenga. Un premier modèle proposé faisait appel à un mélange entre un magma et un liquide immiscible sulfureux (Vayrynen 1938). Gorbunov (1968) propose un régime tectonique compressif relié à la formation des horizons enrichis en soufre avec un chenal nourricier. Ce n'est qu'avec Predowski (1971) et Hanski (1989), qui effectuèrent des études géochimiques, qu'il a été possible d'identifier que les horizons riches en sulfures étaient reliés aux intrusions de gabbro/werhlite différenciées et aux coulées ferropicritiques.

Le dernier modèle, élaboré par Melezhik et al. (1994), propose que le magma s'est mis en place dans un rift intra-continentale (similaire à celui de la Mer Rouge) entre 1990 et 1970 Ma. Les amas sulfureux du secteur ouest se seraient formés dans des sédiments non consolidés alors que ceux à l'est se seraient développés dans des sédiments consolidés. Les sulfures apparaissent sous quatre formes, soit disséminés, matriciels, brechique ou massifs.

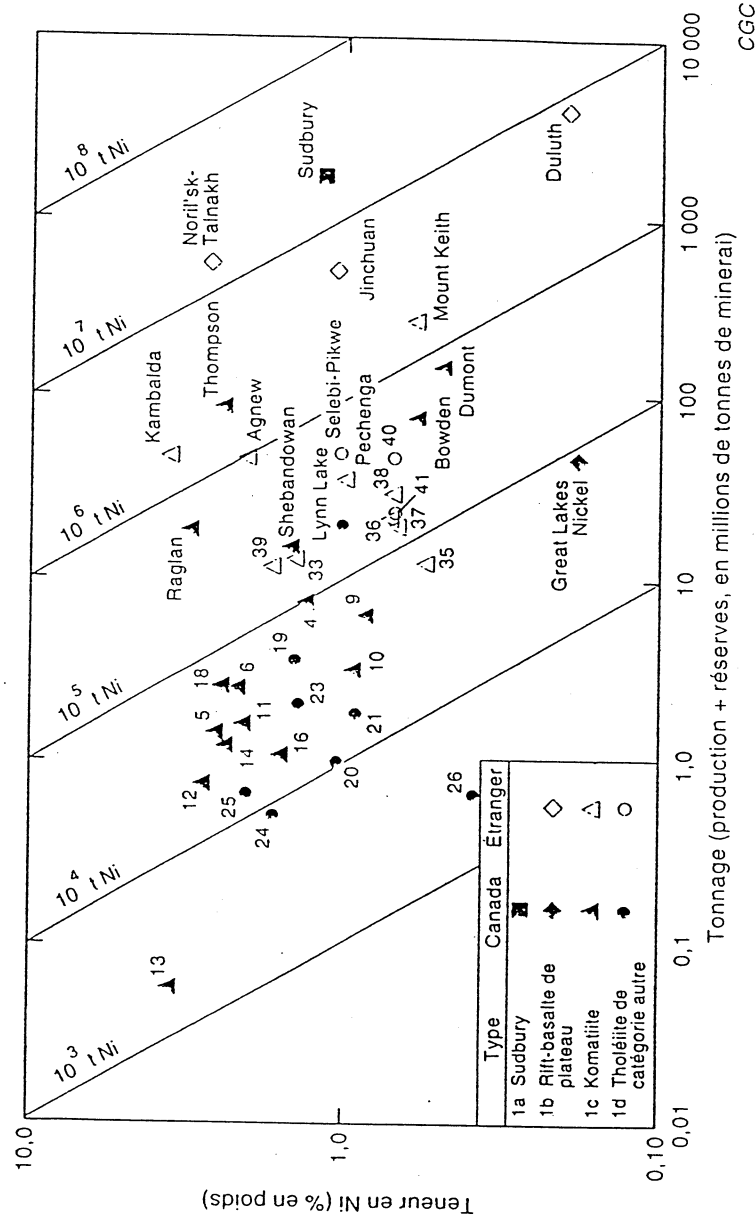
Le but de ce rapport est donc de décrire chacun de ces types pétrographiques afin de comparer, premièrement, les gisements de Ni-Cu de Pechenga avec des modèles plus généraux de mise en place de dépôts de même type, et, deuxièmement, comparer les gisements situés à l'est et à l'ouest, pour voir si il existe des différences texturales pouvant être reliées aux différents types de mise en place des corps minéralisés.

Figure 1 : Localisation géographique de la région de Pechenga.



(Tirée de Melezhik et al. 1994)

Figure 2: Diagramme de la teneur en Ni en fonction du tonnage d'une sélection de gisements et de districts au Canada et à l'étranger.



(Tirée de Eckstran 1996)

2 Géologie régionale

(Tirée de Melezhik et al. 1994)

La région de Pechenga est localisée au nord-ouest de la Russie, près de la frontière norvégienne, dans la Péninsule de Kola (figure 1). Cette péninsule abrite six gisements majeurs de Ni-Cu encaissés dans des intrusions archéennes ou dans la ceinture de roche verte protérozoïque discontinue de Polmak-Opukasjarvi-Pasvik-Pechenga-Imandra/Varzuga-Ust'Ponoy longue de plus de 1000 km.

L'histoire géologique de la région consiste en un rift d'origine intra-continental dont l'évolution couvre environ 600 Ma. La phase d'ouverture couvre une période entre 2400 et 1970 Ma et la phase de collision se termine autour de 1800 Ma. La section du rift affleurant dans le secteur de Pechenga est appelée le Super Groupe de Pechenga (figure 3).

Ce Super Groupe est divisé en deux sections séparées par la faille majeure syn-volcanique de Poritash. Le premier groupe, Groupe de Pechenga Nord, correspond à un graben formé lors de l'ouverture du rift. Il est composé de l'alternance de quatre cycles sédimentaires-volcaniques reposant sur un socle archéen (figure 4).

De la base au sommet, le Groupe de Pechenga Nord est constitué des Formations suivantes:

- Formation sédimentaire-volcanique d'Akhmalti
 - sédiment d'origine fluviatile (conglomérat) et volcanisme sub aérien.
- Formation sédimentaire-volcanique de Kuetsyarvi
- Formation sédimentaire-volcanique de Kolasyoki
- Formation sédimentaire-volcanique de Pil'guyarvi
 - shale et volcanisme sous-marin

La pétrographie des Formations montre une évolution et un changement dans l'environnement de dépôts des sédiments et des laves.

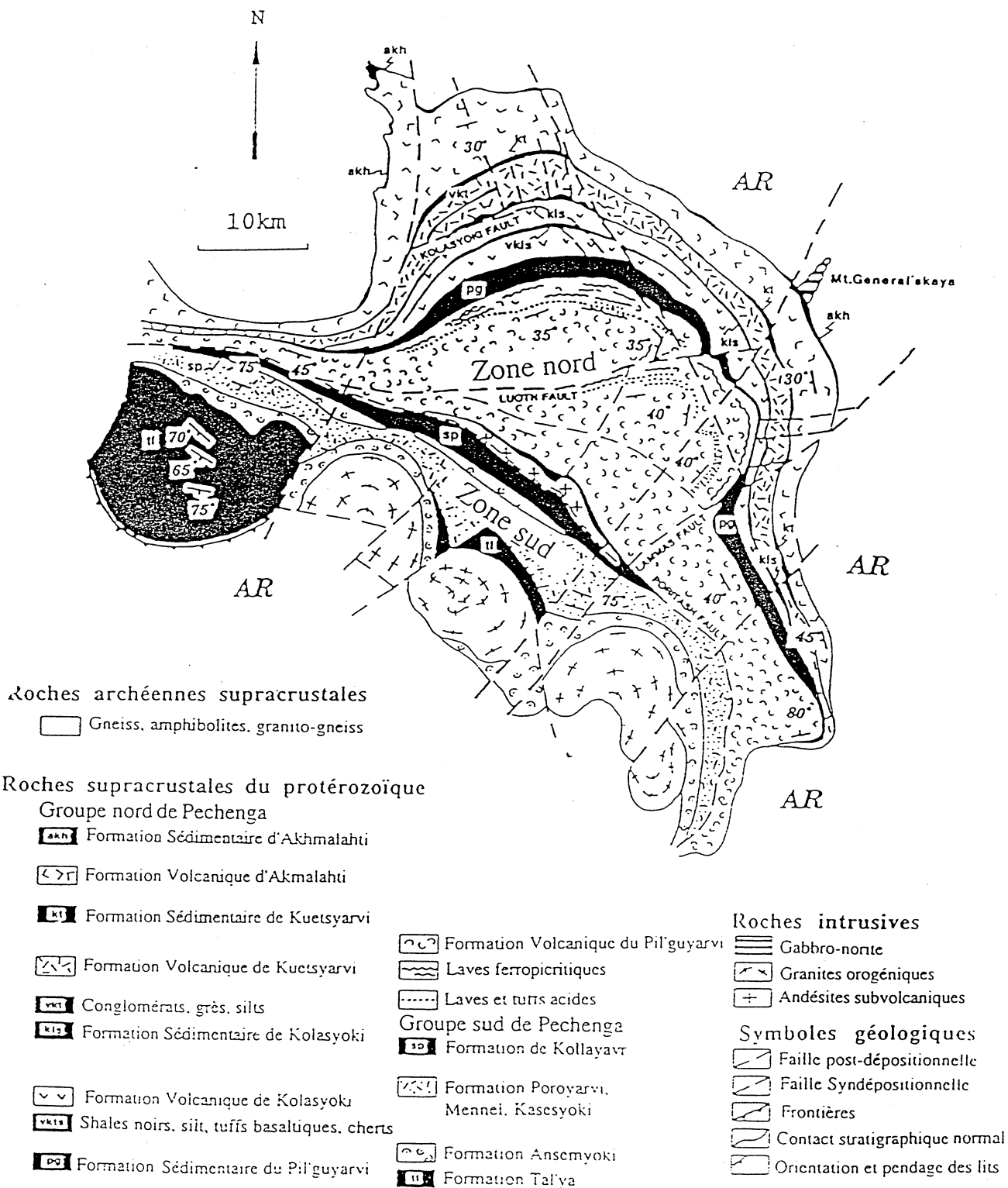
Le Groupe de Pechenga Sud est composé de roches synorogéniques. Il représente la phase de collision du rift (1800 Ma) et est très peu étudié.

La section sédimentaire de la Formation de Pil'guyarvi est aussi appelée Formation Productive. Son importance réside dans le fait que l'ensemble des horizons minéralisés se trouve à l'intérieur de cette Formation (figure 5).

Elle est divisée en trois Membres dont les deux premiers sont composés de roches sédimentaires et le dernier est composé de roches d'origine volcanique.

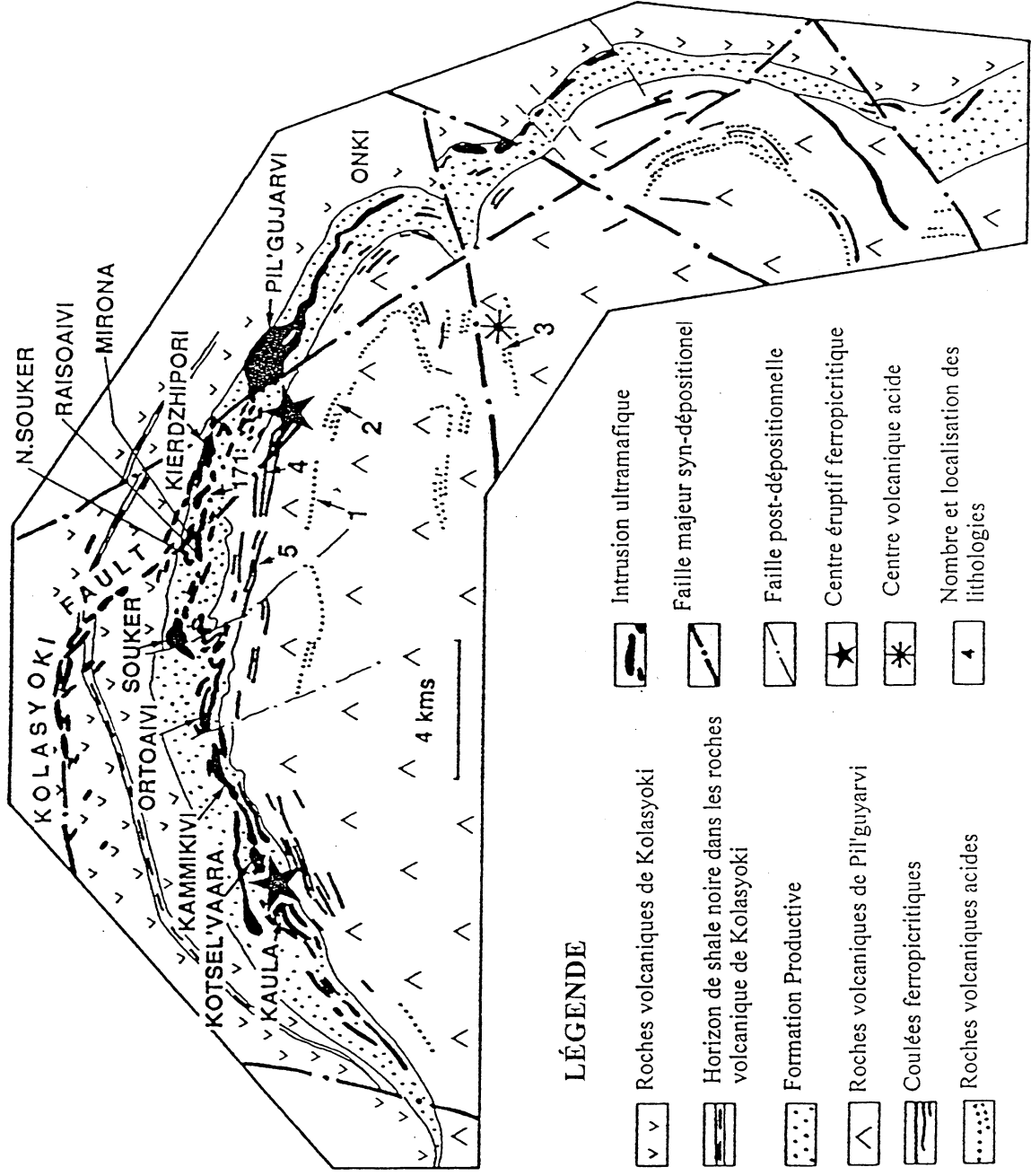
- Membre A (greywacke)
- Membre B (greywacke)
- Membre de Lammas (tuf picritique).

Figure 3: Géologie du Super Groupe de Pechenga (Russie).



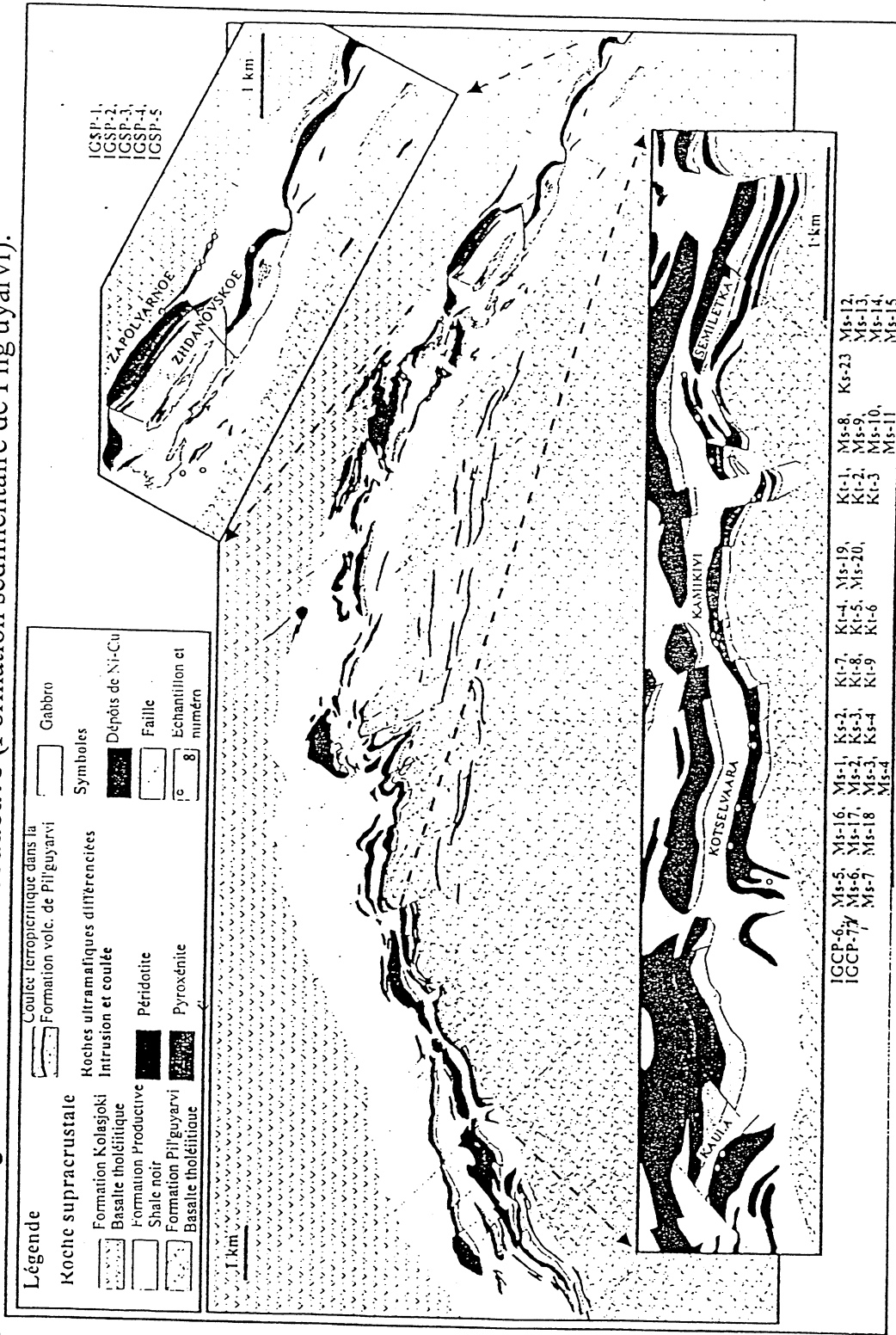
(Tirée de Melezhik et al. 1994)

Figure 4: Géologie locale du Groupe de Pechenga Nord.



(Tirée de Melezhik et al. 1994)

Figure 5: Géologie de la Formation Productive (Formation sédimentaire de Pilguyarvi).



(Barnes, informations personnelles 1999)

3 Pétrographies des gisements de Ni-Cu

(Tirée de Melezhik 1994)

Les gisements de Ni-Cu sont distribués à la base des intrusions de gabbro/werlhite différenciées et à la base des coulées ferropicritiques localisées à l'intérieur de la Formation Productive.

Les intrusions sont composées, de la base au sommet, d'un cumulat d'olivine, de clinopyroxène et de gabbro. (Hanski 1992). Les coulées sont composées, de la base au sommet, de sulfures massifs, de sulfures disséminés et de ferropicrites, massives et globulaires surmontés de shale noir riche en C_{org} .

Les sulfures présent dans les intrusions et dans les coulées ferropicritiques sont principalement la pyrrhotite, la pentlandite, la chalcopyrite et de traces de pyrite, magnétite, violarite, sphalérite, bornite, cubanite et EGP. Le seul sulfure présent à l'intérieur des sédiments est la pyrite.

Associés aux gisements de Ni-Cu, il est possible d'observer des dépôts massif enrichis en Ni, des dépôts bréchiques composés de fragments sub arrondis à la base des intrusions, et des dépôts disséminés syn-génétiques.

L'ensemble des roches a subi un métamorphisme schiste vert modifiant la minéralogie et montrant un assemblage de serpentine+dolomite+magnésite+talc +brucite.

4 Modèles

4.1 Modèle de mis en place des gisements de Ni-Cu Pechenga (Melezhik et al.1994)

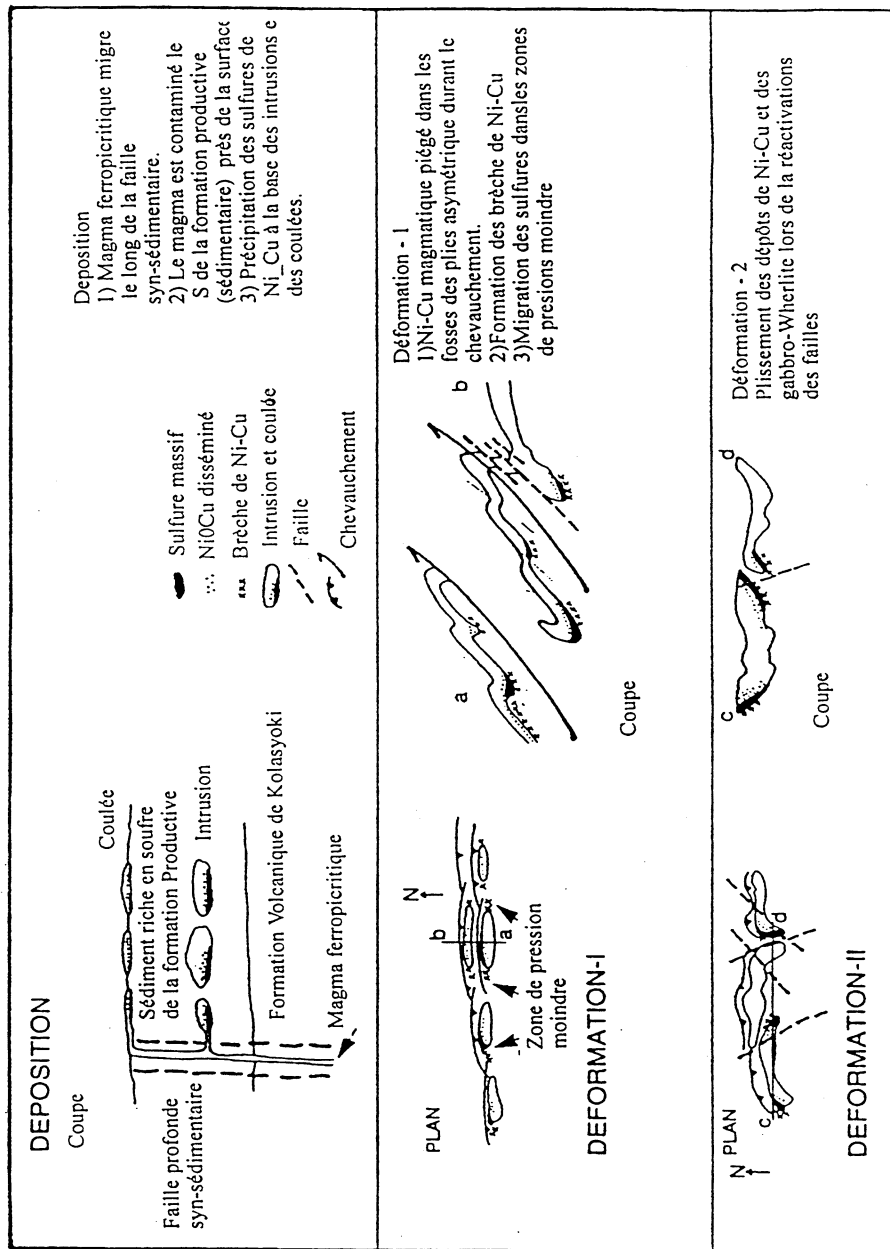
Le modèle de mis en place de Melezhik et al (1994) est bien illustré à la figure 6. Il montre que lors de l'ouverture du rift, il y a eu alternance de quatre cycles sédimentaires-volcaniques contrôlés par l'évolution du rift (2400-1970 Ma). Les gisements de Ni-Cu proviennent de la migration du magma riche en Ni et Cu le long des failles syn-sédimentaires profondes vers la surface. À l'est, le magma se serait mis en place sous forme d'intrusions dans les roches consolidées du membre A et B, alors qu'à l'ouest, le magma se serait épanché dans les sédiments en phase de diagenèse.

Lors du passage dans la Formation Productive, le magma a été contaminé par le soufre se trouvant dans les sédiments, permettant ainsi la saturation et la cristallisation des sulfures.

Ce modèle est basé sur le rapport des isotopes δS^{34} qui diffère entre l'est et l'ouest. Dans les intrusion le rapport de $\delta S^{34} = 4$ à 6 ‰ alors que dans les coulées, $\delta S^{34} = 0$ à 2 ‰ .

Cette différence est possiblement dûe au fait que les intrusions ont pu assimiler plus de soufre alors que les coulées ont perdu du soufre sous forme de H_2S lors d'éruptions. (Verrault 1996).

Figure 6: Modèle de mise en place pour les gisements de Ni-Cu de Pechenga proposé par Melezhik et al. (1994).



(Tirée de Melezhik et al. 1994)

4.2 Modèle général des gisements de Ni-Cu

(Tirée de Barnes et al. 1997)

Le modèle proposé par Barnes (1997) divise les gisements de Ni-Cu en sections avec des caractéristiques géochimiques et texturales bien défini. De plus, il présente un modèle tectonique permettant d'expliquer l'origine et le mode de mise en place des dépôts de Ni-Cu (figure 7).

Le modèle tectonique propose que lorsque qu'une plume mantellique recoupe un rift, un gros volume de magma riche en métaux migre le long des failles profondes et monte vers la surface. Le magma est contaminé par le soufre lors de son passage à travers la croûte terrestre, permettant ainsi la saturation du magma et la cristallisation des sulfures.

Les sulfures intraplaques sont divisés en trois catégories, soit disséminée, matricielle et massive.

- La section disséminée est généralement plus riche en métaux et contient entre 0 et 30% de sulfures intersticiels ou globulaires. Elle se localise dans la section sommitale de la coulée ou de l'intrusion.
- La section matricielle contient entre 30 et 80% de sulfure formant ainsi une matrice englobant les cumulats d'olivine.

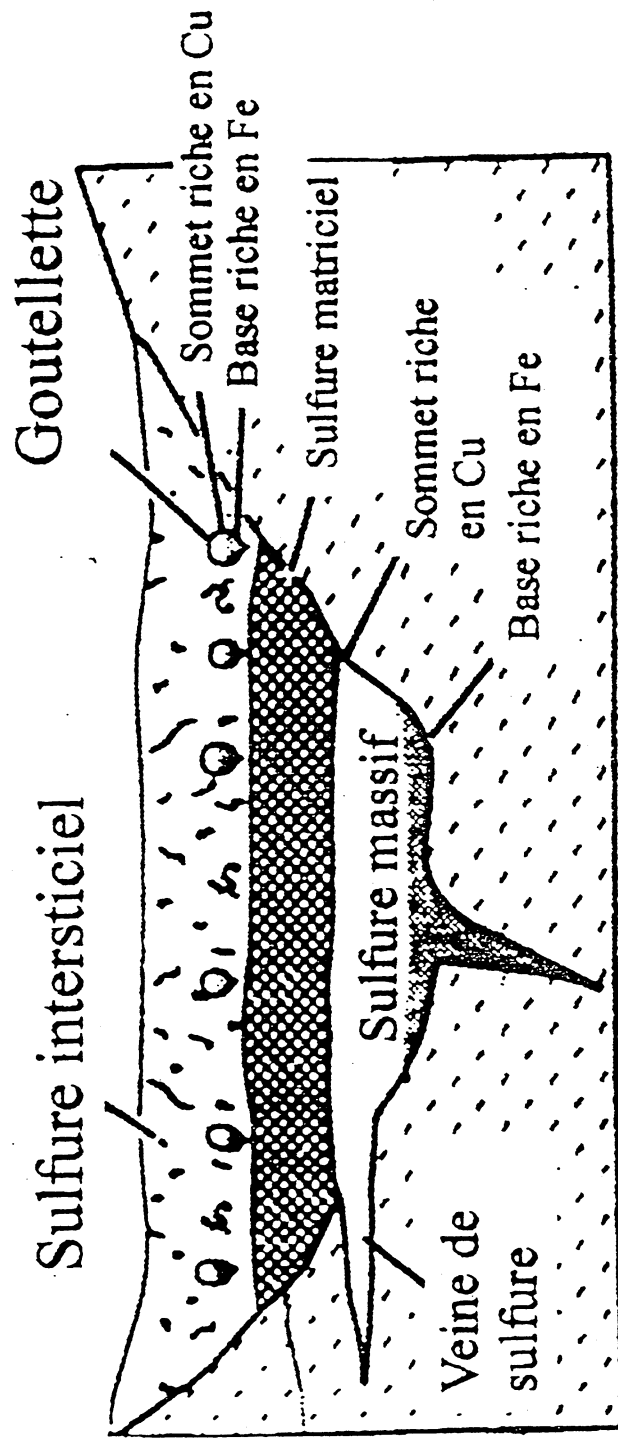
- La section massive contient entre 80 et 100% de sulfures et se trouve à la base de la coulée ou de l'intrusion, aux contacts entre la roche encaissante et le magma.

Les sections matricielle et massive peuvent être soit:

- riche en Fe, avec un enrichissement en Os, Ir, Ru, Rh. Cette composition représente la solution solide monosulfuré (mss)
- riche en Cu, avec un enrichissement en Pt, Pd, Au. Cette composition représente le liquide sulfureux fractionné.

La concentration en Ni reste identique d'une section à l'autre et ne semble pas être affectée par le fractionnement.

Figure 7: Modèle général de distribution des sulfures dans les gisements de Ni-Cu.



(Tirée de Barnes et al. 1997)

5 Méthodologie

L'étude consiste en des observations de lames minces dans le but de déterminer la pétrographie et les textures présentes et ainsi, essayer de discriminer entre les roches d'origine volcaniques et les roches d'origine intrusives.

Les résultats vont permettre de déterminer l'exactitude du modèle de Melezhik et al. (1994) et de faire des liens avec le modèle plus général de mis en place des gisements de Ni-Cu établit par Barnes et al (1997).

Les comparaisons seront faites entre les sections matricielles et disséminés. Les sections bréchique et massive seront décrites mais ne serviront pas pour l'étude car ils proviennent tous du même secteur.

Pour la localisation des lames minces, voir figure 5.

6 Observation

6.1 Pétrographie des sulfures massifs

(MS-8 et MS-12)

Les lames minces de sulfures massifs proviennent tous des péridotites de Semiletka (figure 5).

Elles sont composées de pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite et magnétite (Planche 1). La texture générale est granulaire, à l'exception de la magnétite qui est podiforme. Les minéraux opaques font plus de 95% de la lame mince.

La pyrrhotite est le minéral le plus abondant avec une concentration d'environ 70%, suivit de la pentlandite (22%), de la chalcopyrite (3%) et de la magnétite (5%).

La granulométrie est très fine avec une dimension moyenne de 0.25mm pour les sulfures et de 0.5mm pour la magnétites.

Les minéraux translucides sont principalement des carbonates et du talc présentant une texture de remplacement. Ces minéraux sont le résultats du métamorphisme schiste vert.

Tableau 1 : Synthèse de la pétrographie des sulfures massifs

Provenance: Semiletka

Lame mince: MS-8 et MS-12

Type de roche: Péridotite

Mis en place à l'interface entre le magma et l'encaissant.

Opaques: 100%

Sulfures et oxydes:

- Pyrrhotite: granulaire
- Pentlandite: granulaire et globulaire
- Chalcopyrite: granulaire et globulaire
- Magnétite: podiforme

Silicates:

Trace de carbonates ayant rempli les porosités

Les sulfures sont dominés par la pyrrhotite granulaire

Granulométrie des sulfures homogène = 0.25mm

La magnétite baigne dans la pyrrhotite.

Planche 1

Section massive

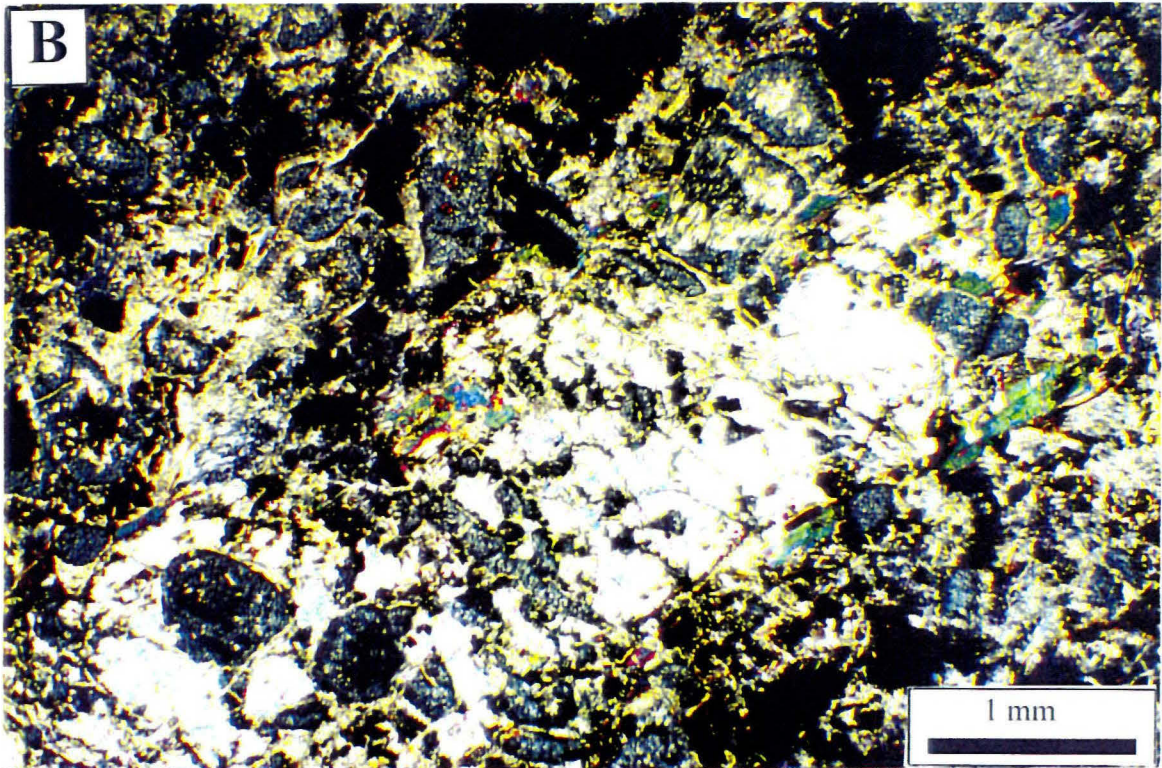
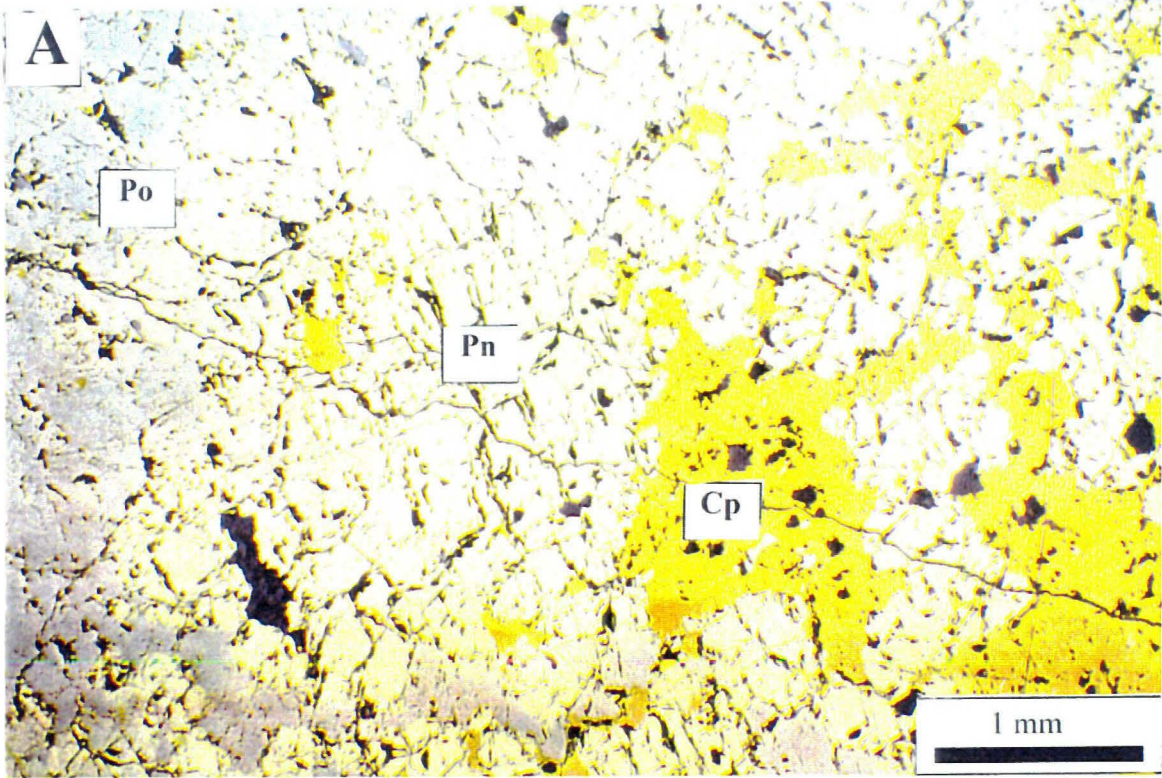
et métamorphisme

A: MS-8: *Semiletka* (lumière réfléchie),

Sulphure massif composée principalement de pyrrhotite à texture granulaire avec de la pentlandite et de la chalcopyrite formant un nodule à l'intérieur de la matrice de pyrrhotite.

B: MS-15: *Semiletka* (lumière transmise),

Lame montrant le métamorphisme au faciès schiste vert ayant affecté la région. L'olivine est serpentinisée en lizardite à texture en maillon et "hourglass", le talc aciculaire entre les grains et les CPX intergranulaires métamorphisés. La texture primaire est bien conservée.



6.2 Pétrographie des sulfures bréchifiés

Les sections bréchifiées proviennent uniquement de Kotselvaara-Kamikivi et de Semiletka (secteur ouest). Elles sont principalement associées aux péridotites (figure 5).

Le pourcentage de minéraux opaques et de silicates est très variable dû au fait qu'il s'agit de matériel remobilisé. Lors de la première phase de déformation, le chevauchement a déplacé les sulfures vers les zones de pression moindre créant une distribution hétérogène entre les sulfures et les fragments.

La section bréchique comprend principalement de la pyrrhotite (phase principale), de la pentlandite et de la chalcopryrite avec, plus ou moins de la magnétite (Planche 2). Les sulfures montrent une texture granoblastique avec une distribution de la pentlandite et de la chalcopryrite à l'interface des fragments et de la matrice sulfureuse. La magnétite podiforme est beaucoup moins abondante (entre 0 et 5% des minéraux opaques). L'ensemble de cette distribution est dû à la différence du potentiel d'énergie de surface de chaque minéral. La magnétite, étant moins mobile, est restée en place alors que les sulfures ont migré dans les zones de moindre pression.

Les fragments sont composés majoritairement de péridotite. Par contre, il est possible d'observer des fragments de tufs et de shale. Dans certaines lames, il est possible de voir des fragments de quartz et de plagioclase.

Les seules caractéristiques communes entre les fragments est le fait qu'ils baignent tous dans une matrice sulfureuse granoblastique, qu'ils sont tous sub anguleux à subarrondis et qu'ils ont subi un métamorphisme au faciès schiste vert formant un assemblage composé de serpentine+talc+carbonates.

Tableau 2 : Synthèse de la pétrographie des brèches**Provenance: Semiletka et Kotselvaara-Kamikivi (ouest)***Lame mince:*

MS-1, MS-5, MS-7, MS-9, MS-13, MS-14, MS-17, MS-19, KT-1, KT-4, KT-7, KTW-5b

*Type de roches: variable**opaques: variable**silicates: variable**Sulfures et oxydes:*

- Pyrrhotite: granoblastique
- Pentlandite : granoblastique
- Chalcopyrite: granoblastique
- ± magnétite: podiforme (très faible %)

Fragment:

- composition variable
 - Conglomérat
 - Péridotite
 - Shale
 - Tuf
- Les fragments sont subarrondis

Planche 2

Section bréchique

A: MS-9: *Semiletka* (lumière transmise),

Contact entre un fragment de péridotite (a) et la matrice de la brèche composée de sulfures (b). La péridotite est composée de grains d'olivine serpentinisée et de grains de CPX baignant dans une matrice composée de serpentine à texture "hourglass".

B: MS-9: *Semiletka* (lumière réfléchie),

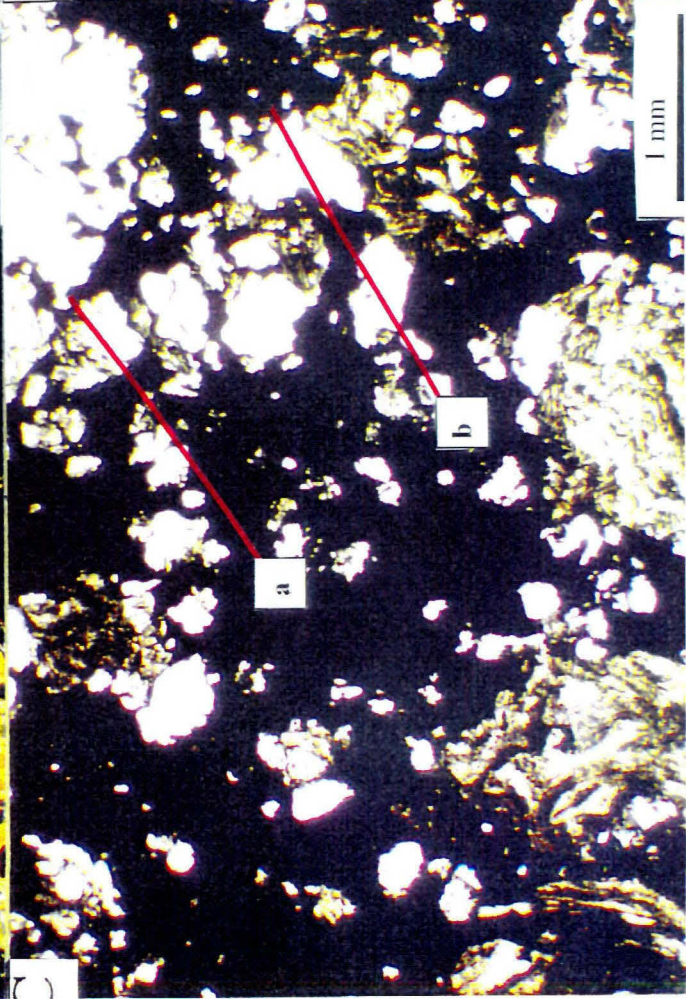
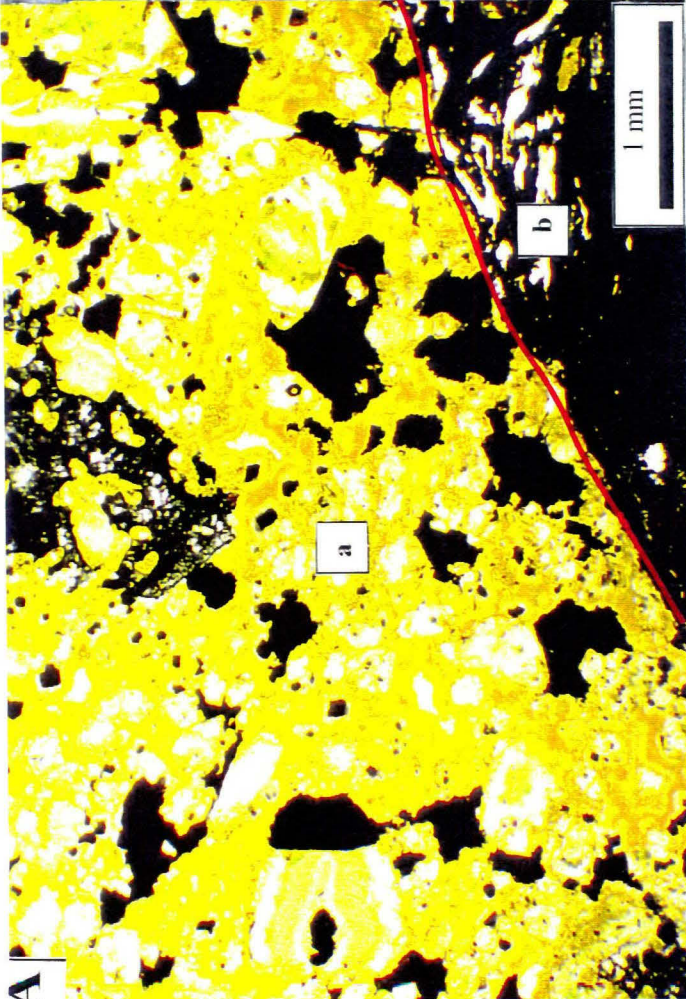
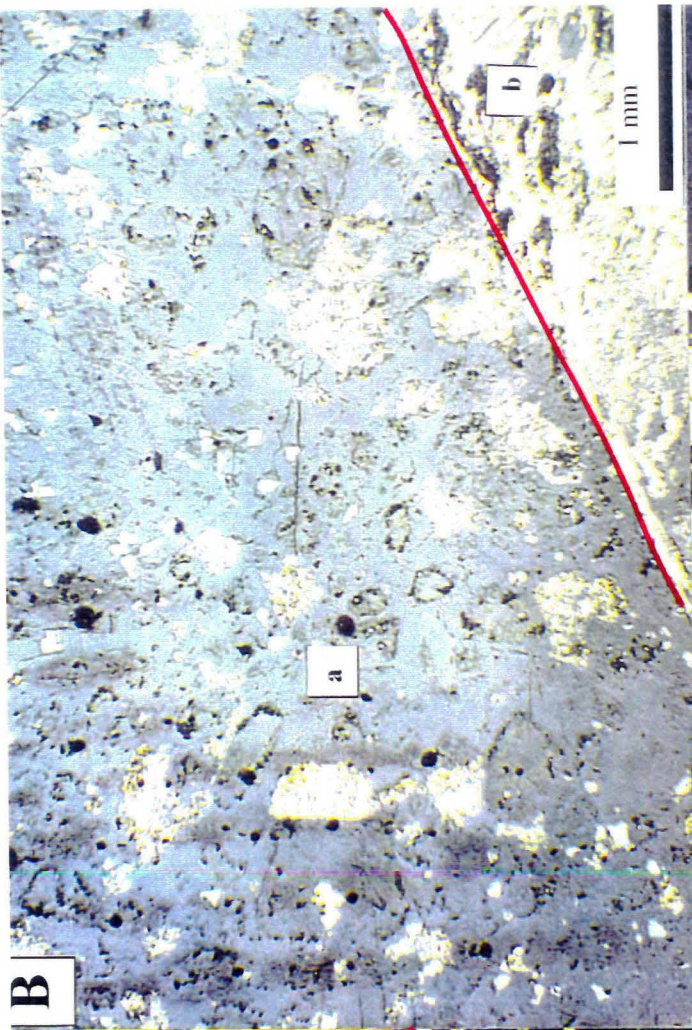
Pyrrhotite disséminé dans la péridotite (a) et pyrrhotite granoblastique formant la matrice de la brèche (b).

C: MS-6: *Kotselvaara* (lumière transmise),

Grains de plagioclase et de quartz subarrondis (a) baignant dans une matrice de sulfure (b).

D: MS-6: *Kotselvaara* (lumière réfléchie),

Matrice de la brèche composée de pyrrhotite (a), de pentlandite et de chalcopyrite (b) granoblastique.



6.3 Pétrographie des sulfures matriciels ou ``grey ore``

(Planche 3)

6.3.1 Secteur Est (Vostochnoe):

Les échantillons de la section matricielle sont encaissés dans la péridotite et sont composés à environ 45% de minéraux opaques et à 55% de silicates.

Les minéraux opaques sont la pyrrhotite, la pentlandite, la chalcopyrite et la magnétite. Les sulfures se présentent sous plusieurs textures. Ils sont intergranulaires, matriciels et disséminés alors que la magnétite est toujours podiforme avec une granulométrie plus importante ($\approx 0.3\text{mm}$) comparativement aux sulfures ($\varnothing = 0.2\text{ mm}$).

Les silicates présents sont la serpentine à texture vitrifiée, aciculaire et en maillon avec du talc aciculaire, des traces de chlorites et des veinules de carbonates recoupants certaines lames. Ces minéraux ont remplacé la minéralogie primaire lors du métamorphisme. La texture primaire est bien conservée. Elle consiste en un ad cumulat (10 à 25%) d'olivine subpolygonal à polygonale de 0.3 mm de diamètre baignant dans une matrice d'olivine cryptocristalline et intergranulaire avec les sulfures.

Les sulfures sont syngénétiques avec la cristallisation de la péridotite (intergranulaire) et forme, avec l'olivine cryptocristalline, une partie de la matrice. La phase principale est la pyrrhotite (avec environ 60%) pauvre en chalcopyrite.

6.3.2 Secteur Ouest (Kotselvaara-Kamakivi et Semiletka):

Les sulfures matriciels de Kotselvaara-Kamakivi et de Semiletka sont très semblable à ceux de Vostochnoe. Ils présentent la même texture primaire d'ad cumulat d'olivine polygonale baignant dans une matrice composés d'olivine cryptocristalline et de cumulat de sulfures syngénétiques.

Dans les deux cas, la structure polygonale et le diamètre des grains d'olivine indiquent une cristallisation rapide du magma.

Tableau 3 : Synthèse de la pétrographie (Matriciel ou grey ore)

Secteur est (Vostochnoe)	Secteur ouest (Kotselvaara-kamikivi-Semiletka)
<i>Lame mince</i> : IGCP-2, 3, 4, 5c1	<i>Lame mince</i> : MS-2, 3, 10, 17, KT-8,
<i>Type de roche</i> : Péridotite	<i>Type de roche</i> : Péridotite
<i>Opaques</i> : 45%	<i>Opaques</i> : 45 %
<i>Silicates</i> : 55%	<i>Silicates</i> : 55%
<i>Sulfures et oxydes</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Pyrrhotite: intergr.; matri. et diss. Ø = 0.2mm • Pentlandite: intergr., matri. et diss. Ø = 0.2mm • Chalcopyrite: intergr., matri et diss. Ø = 0.1mm • Magnétite: podiforme) toujours présente) 	<i>Sulfures et oxydes</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Pyrrhotite: intergr. matri et diss. Ø = 0.2mm • Pentlandite: intergr. Matri et diss Ø = 0.2mm • Chalcopyrite: intergr, matri et diss Ø = 0.2mm • Magnétite: podiforme
<i>Silicates</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Serpentine: Vitrifié; aciculaire; maillon • ± talc: acciculaire 	<i>Silicates</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Serpentine: vitrifié; maillon; aciculaire • Talc :aciculaire • ± chlorite: acciculaire
<i>Texture primaire</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Ad cumulat d'olivine (10 à 25%) polygonale de Ø = 0.5 mm dans une matrice d'olivine vitrifié serpentinisé et de sulfures matriciels intergranulaire. 	<i>Texture primaire</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Ad cumulat (15%) d'olivine polygonale à Ø = 1.0 à 0.5 mm dans une matrice composée d'olivine vitrifié et de sulfure intergranulaire
Les sulfures sont riches en pyrrhotite (phase principale avec +60% et pauvre en chalcopyrite.. Ils sont matriciels et intergranulaire (syn-génétique). Forme des gouttelettes de même dimension que Ol. La serpentine est la phase silicatée principale.	Sulfure riche en pyrrhotite et pauvre en chalcopyrite. Ils ont matriciel et intergranulaire avec la matrice d'olivine (syngénétique).
<i>Métamorphisme</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Schiste vert: Serpentine ± talc ± chlorite (aciculaire) 	<i>Métamorphisme</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Schiste vert: Serpentine ± talc ± chlorite (aciculaire)

Planche 3

Section matricielle

A: IGCP-5C-1 : Zentral'noe (lumière transmise),

La lame est composée d'un cumulat de sulphure (a) baignant dans une matrice d'olivine serpentinisée à texture "hourglass" formant des maillons autour des grains de sulphures (b).

B: IGCP-5C-1 : Zentral'noe (lumière réfléchie),

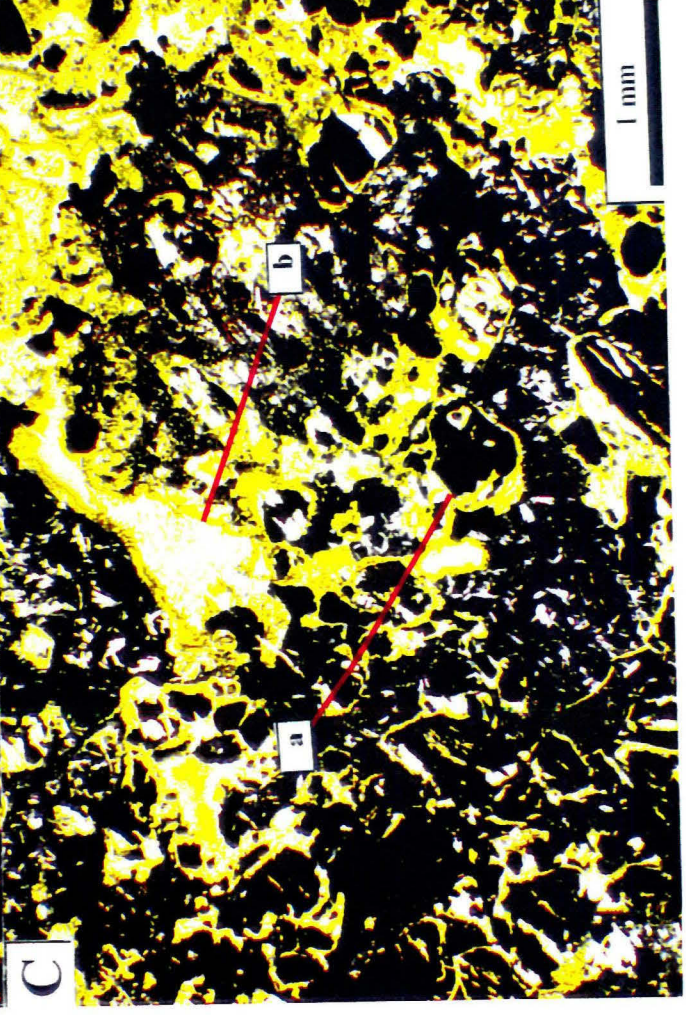
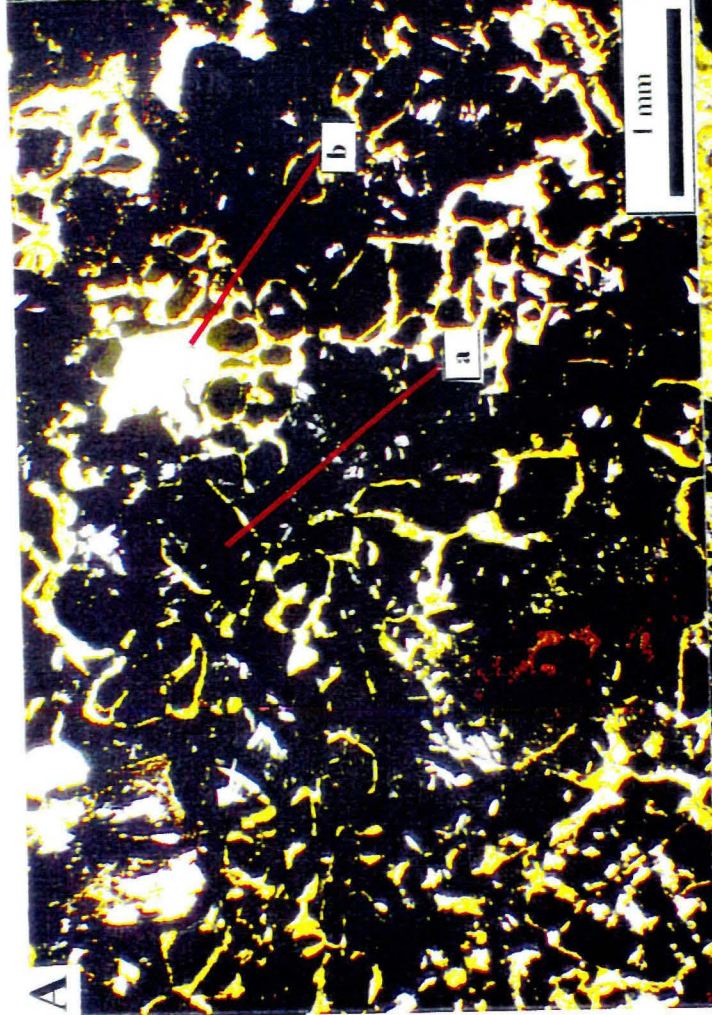
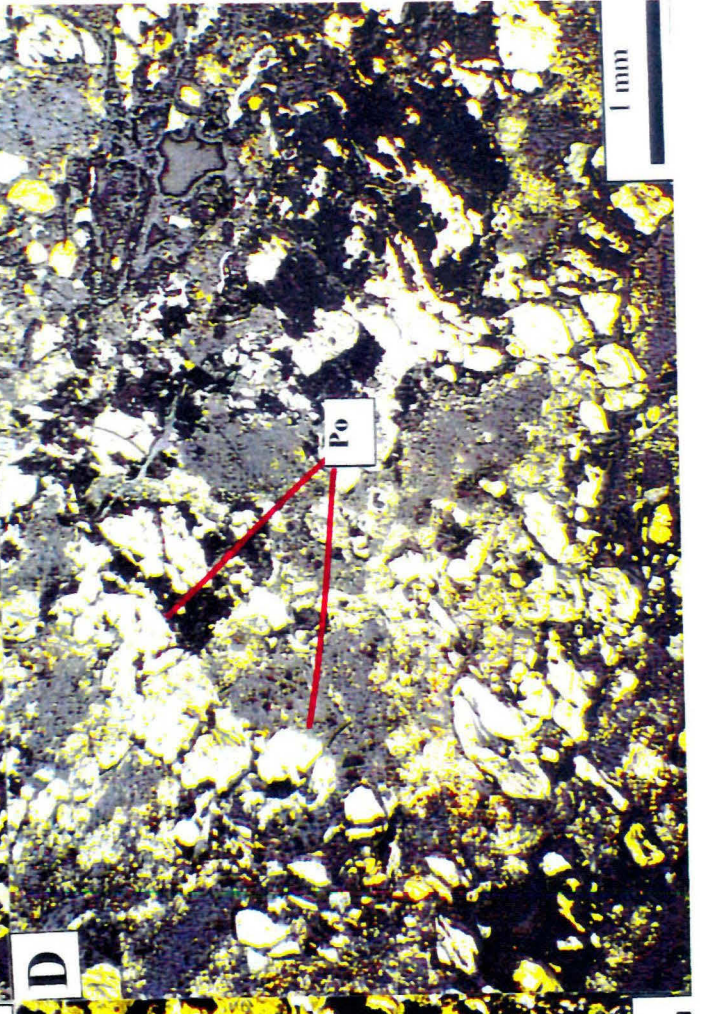
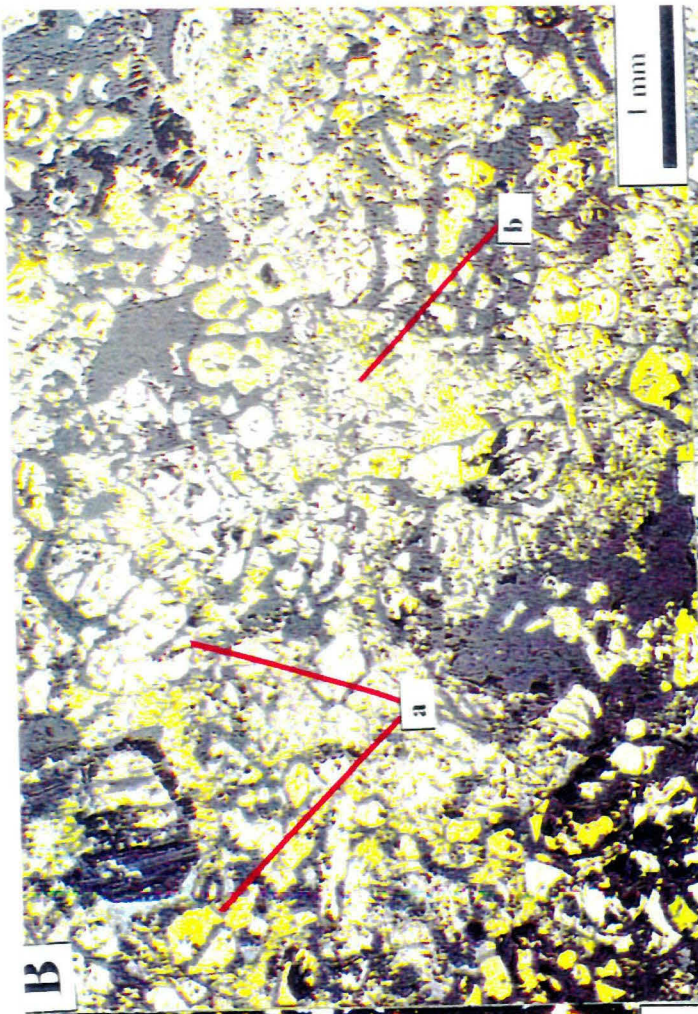
Le cumulat de sulphure est composée de pyrrhotite + pentlandite + chalcopyrite (a). Certains grains de sulphures sont en intercroissance avec des grains de talc aciculaire très fin (b).

C: MS-3 : Kotselvaara (lumière transmise),

Péridotite composée d'un cumulat de sulphure (a) baignant dans une matrice de serpentine à texture "hourglass" formant des maillons autour des grains de sulphures (b).

D: MS-3 : *Kotselvaara* (lumière réfléchie),

Le cumulat de sulphure est composée de pyrrhotite + pentlandite + chalcopyrite
ayant une \varnothing de 0.2 mm.



6.4 Pétrographie des sulfures disséminés (Planche 4)

6.4.1 Secteur Est (Vostochnoe)

Les sulfures de la section disséminée sont encaissés dans la péridotite et sont composés à environ 5% de minéraux opaques et à 95% de silicates.

Les minéraux opaques sont la pyrrhotite, la pentlandite, la chalcopyrite, la magnétite et la chromites (trace). Les sulfures sont disséminés dans le cumulat alors que la magnétite et la chromite sont podiformes. La magnétite se présente aussi sous forme xénomorphie, résultant de l'expulsion de Fe lors de la serpentinisation de l'olivine. La granulométrie des sulfures est d'environ 0.05 mm alors que la magnétite et la chromite font environ 0.1 mm de diamètre.

Les silicates présent sont la serpentine à texture vitrifié et en maillon avec du talc intergranulaire. La chlorite est aussi observable et semble remplacer la biotite. Ces derniers minéraux sont le fruit de la serpentinisation de la péridotite. La texture primaire est très bien conservée, ce qui permet de déterminer qu'originellement, la péridotite était composée d'un cumulat d'olivine avec des clinopyroxènes intergranulaires. Les grains d'olivines sont polygonaux et ont un diamètre moyen de 0.3mm.

Les sulfures sont syn-génétiques à la formation de la péridotite et sont dominés par la pyrrhotite. Fait intéressant à noter, la concentration de chalcopyrite a augmentée sensiblement, devenant parfois plus importante que la pentlandite. Ceci est dû au fait que le liquide sulfuré a fractionné et est devenu plus riche en Cu.

6.4.2 Secteur Ouest (Kotseivaara-Kamakivi et Semiletka)

Le secteur ouest montre des similitudes avec le secteur est.

L'encaissant des sulfures disséminés de la section ouest sont des péridotites et des serpentinites.

Les minéraux opaques forment entre 5 et 20% des lames alors que la section silicatée occupe entre 80 et 95% de la lame. Les minéraux opaques sont constitués de pyrrhotite, de pentlandite, de chalcopyrite et de magnétite. Les sulfures sont disséminés et globulaires (gouttelettes) avec une granulométrie d'environ 0.05 mm alors que la magnétite est podiforme et fait environ 0.1 mm de diamètre.

Les silicates sont composés de serpentine à texture vitrifiée, engrènement et en maillon avec du talc intergranulaire et aphanitique. Il y a aussi de la chlorite aciculaire et de la biotite qui forme des microphénocristaux.

La texture primaire est aussi bien conservée dans les péridotites et serpentinites de la section ouest. Elle forme des ad cumulâts et des cumulats composés d'olivine polygonale de 0.5 à 1.0 mm de diamètre et de clinopyroxènes intergranulaire baignant dans une matrice d'olivine cryptocristalline.

Les sulfures sont syngénétiques et la concentration de chalcopryrite est encore plus importante que dans les autres sections.

La forme et la granulométrie des olivines indiquent, ici aussi, que le magma a cristallisé rapidement.

Tableau 4 : Synthèse de la pétrographie: (Disséminé)

Secteur est (Vostochnoe)		Secteur ouest (Kotselvaara-kamikivi-Semiletka)	
Lame mince :/GCP-1,		Lame mince : /GCP-6, 7, KT-2, 3, 5, 6, 9, KTW-3,4, MS-7,15, 18, 20	
Type de roche: Péridotite		Type de roche: Péridotite et serpentinite	
opaque: 5%		opaque: 5 à 20%	
Silicate: 95%		Silicate: 80 à 20%	
Sulfures et oxydes:		Sulfures et oxydes:	
<ul style="list-style-type: none"> • Pyrrhotite: Disséminée • Pentlandite: Disséminée • Chalcopyrite: Disséminée • Magnétite: Podiforme 	<ul style="list-style-type: none"> • Pyrrhotite: Disséminée ; Globulaire • Pentlandite: Disséminée • Chalcopyrite: Disséminée; globulaire • Magnétite: Podiforme 	<ul style="list-style-type: none"> • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.1\text{mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.05\text{mm}$ • $\varnothing = 0.1\text{mm}$
Silicates		Silicates	
<ul style="list-style-type: none"> • Serpentine: Maillon et vitrifié • Talc: Intergranulaire <ul style="list-style-type: none"> • Chlorite • Biotite 	<ul style="list-style-type: none"> • Serpentine: Maillon; vitrifié; engrenement • Talc: Intergranulaire et aphanitique <ul style="list-style-type: none"> • Chlorite: aciculaire • Biotite: microphénacristaux 		
Texture primaire:		Texture primaire:	
<ul style="list-style-type: none"> • Cumulat d'olivine polygonale à $\varnothing = 0.5$ mm avec magnétite xénomorphe dans les fractures de Ol serpentinisé 	<ul style="list-style-type: none"> • Ad cumulat et cumulat d'olivine polygonale à $\varnothing = 1.0$ à 0.5 mm avec magnétite xénomorphe dans les fractures de Ol serpentinisée. La matrice est composée d'olivine cryptocristalline et vitrifiée. 		
Les sulfures sont disséminés dans le cumulat d'olivine. Le % de chalcopyrite est plus important que dans les autres types de sulfures.		Les sulfures sont disséminés dans le cumulat d'olivine. Présence de gouttelettes de pyrrhotite et chalcopyrite. Le % de chalcopyrite est plus important que dans les autres types de sulfures.	
Métamorphisme:		Métamorphisme:	
<ul style="list-style-type: none"> • Schiste vert: Serpentine et talc 	<ul style="list-style-type: none"> • Schiste vert: Serpentine et talc 		

Planche 4

Section disséminée

A: IGCP-1 : *Vostochnoe*,

Péridotite serpentinisée composée d'un cumulat d'olivine polygonale serpentinisée et de CPX intergranulaire. La texture primaire est bien conservée.

Les grains d'olivines ont une \varnothing de 0.5 mm.

B: MS-18 : *Kotselvaara*,

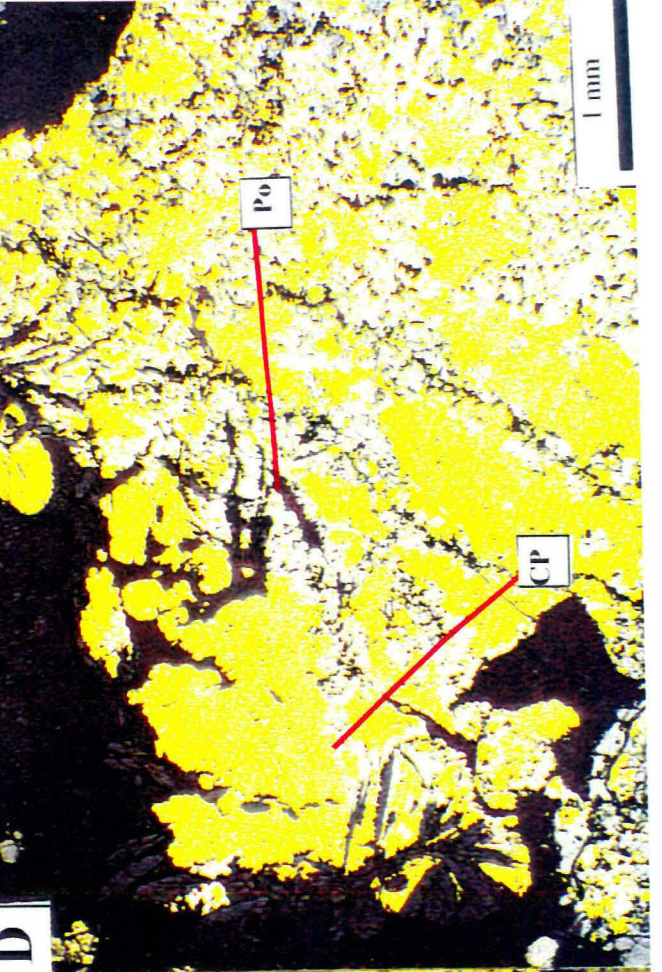
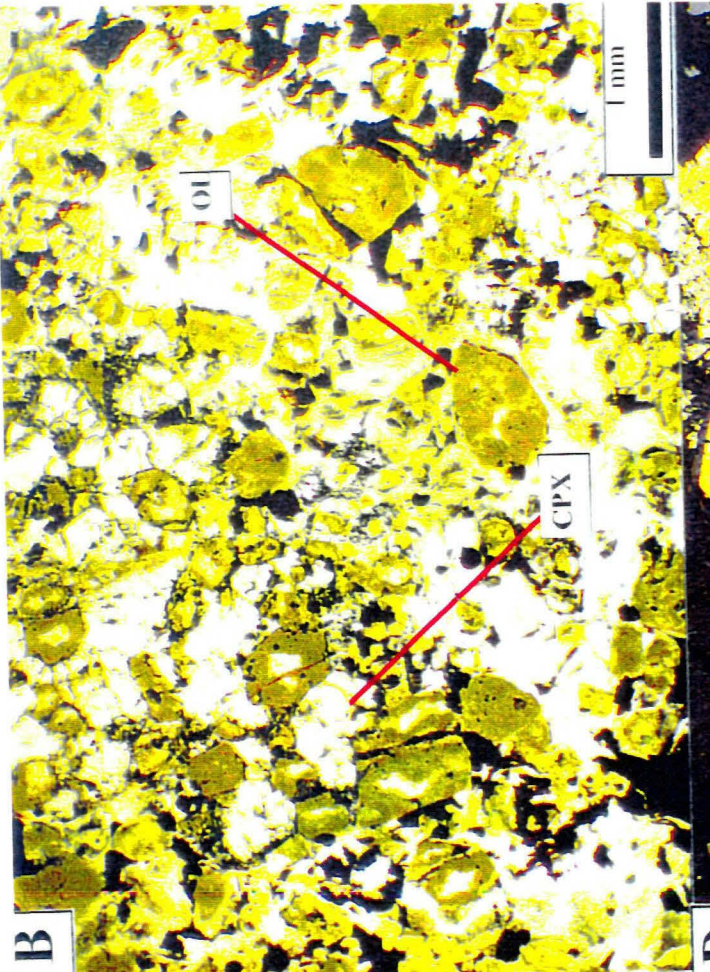
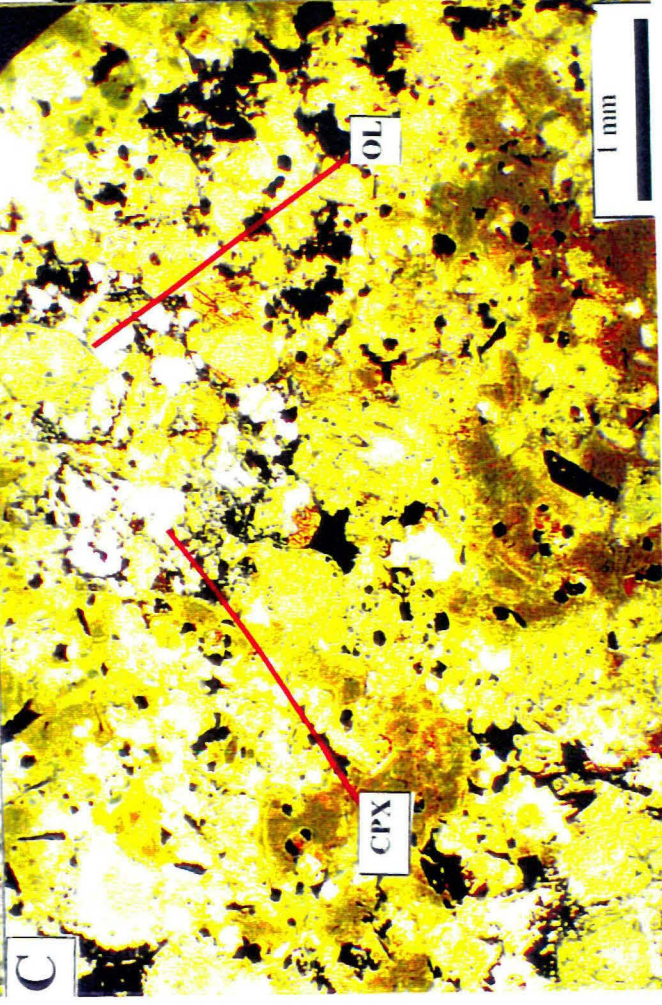
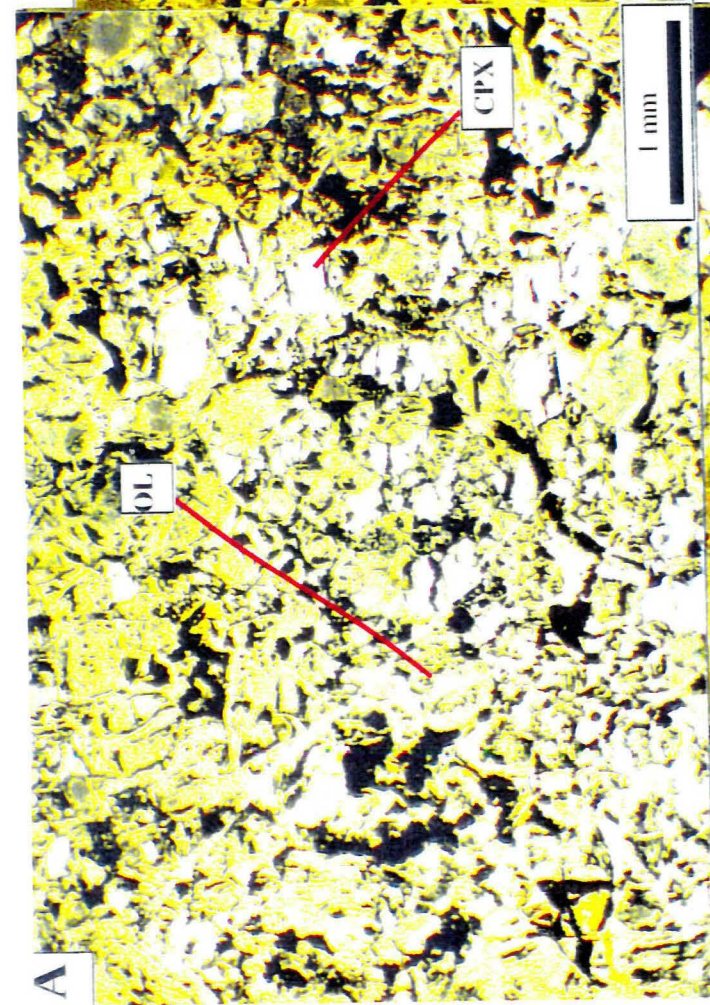
Serpentinite composée d'olivine polygonale serpentinisée, de CPX intergranulaire et de verre intersticiel.. La texture d'ad cumulat est très bien préservée. La \varnothing de l'olivine est d'environ 0.5 mm.

C: MS-15: *Semiletka*;

Serpentinite composée d'olivine polygonale serpentinisée et de CPX intergranulaire. La texture de cumulat est encore visible. L'olivine a une d'environ 0.4 mm.

D: MS-15: *Semiletka* (lumière réfléchie);

Gouttelettes de sulfures composées de pyrrhotite à la base et de chalcopryrite au sommet. Des microcristaux de magnétite à texture framboïdale sont imbriqués dans la gouttelette.



7 Discussion

7.1 Modèle de mis en place des gisements de Ni-Cu de Pechenga. Melezhik et al. (1994)

Pour cette partie de ce rapport, seules les lames minces des sections disséminées et matricielles seront prises en considération car ils couvrent entièrement la région étudiée.

L'encaissant des sulphures disséminés est composé, dans le cas de Zentral'noe, Kotselvaara-Kamikivi et Semiletka, de péridotites métamorphisées aux faciès schiste vert. La texture primaire est, dans la majorité des cas, très bien visible et montre un ad cumulat ou un cumulat originellement composée d'olivine et de clinopyroxène intergranulaires. L'olivine a un diamètre d'environ 0.3 mm et est polygonale, résultant d'une cristallisation très rapide du magma. Ce type de texture est observable dans les intrusions ayant cristallisé très proche de la surface ou encore dans les laves.

Les section polies matricielle quant à elles, montrent encore beaucoup de similarité. Elles sont composées d'un cumulat de sulfures ayant une granulométries d'environ 0.2mm où se mélange la pyrrhotite, la chalcopryrite et la pentlandite. La cristallisation des sulfures est syngénétique à la formation de la

péridotite comme le démontrent les microcristaux aciculaire de CPX et d'olivine serpentinisée intergranulaires. La matrice du cumulat de sulfures est composée d'olivine cryptocristalline à texture "hourglass". Ce type de phénomène est attribuable, ici encore, à une cristallisation rapide du magma.

Il devient donc impossible, à l'aide de ses données, de différencier l'environnement de cristallisation des magma et ainsi, les diviser en deux sections. Les seules évidence qu'il est possible de tirer des analyses est de dire que l'encaissant peut, soit être mis en place lors de coulées volcaniques, ou encore, il s'agit de filons couche formés près de la surface, où le contraste de température entre le magma et la roche hôte était énorme, augmentant ainsi la rapidité de cristallisation.

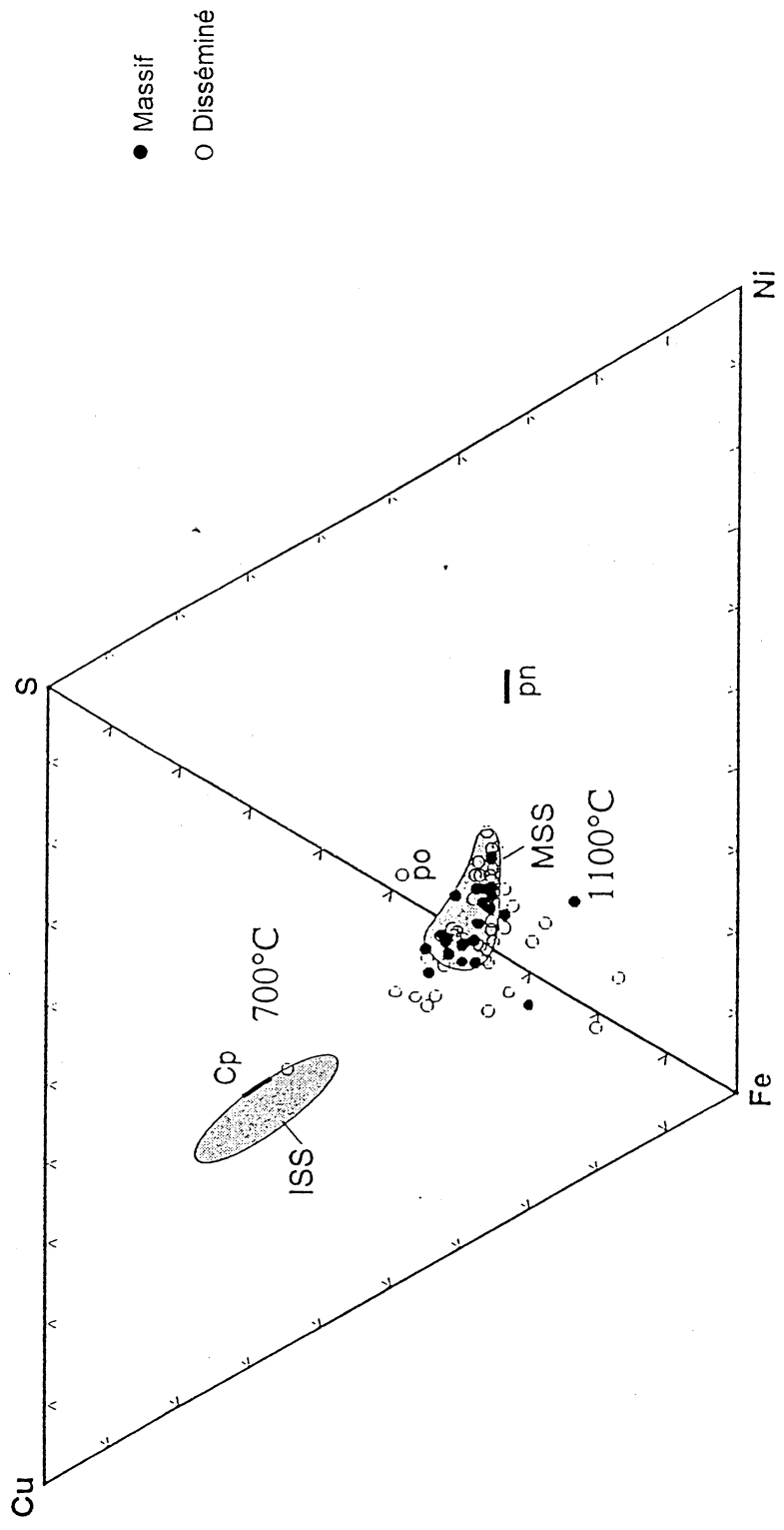
7.2 Modèle général des gisements de Ni-Cu. (Barnes et al.1997)

Le modèle de Barnes (1997), décrit précédemment, stipule qu'il existe une distribution morphologique particulière des sulfures dans les gisements. Qu'il s'agisse de dépôt dans les laves ou dans les intrusions, ils sont distribués, de la base au sommet, de sulfure massif , d'une couche matricielle et finalement, d'une séquence disséminée (figure 7).

Les sulfures de Kotselvaara-Kamakivi et Semiletka répondent à cette distribution, avec des sulfures massif riches en pyrrhotite (Fe) à la base, d'une séquence matricielle médiane et d'une séquence disséminée sommitale qui ici, est plus riche en Cu par rapport à la séquence massive (La proportion de Cp est plus élevé). Il est aussi possible d'observer des gouttelettes de sulfure composées de pyrrhotite et de chalcopyrite dans la section disséminée.

Le diagramme Fe-S-Cu-Ni (figure 8), obtenue par le calcul de la distribution des éléments observée sur les sections polies, montre un enrichissement en Cu et en S dans les gisements disséminés alors que la proportion de Fe et de Ni semble stable. La concentration des points dans le champs des SSM (solution solide monosulfuré) indique que la majorité des sulfures ont cristallisé tôt dans le processus de refroidissement, empêchant ainsi le fractionnement des sulfures. Seul quelques points à l'extérieur de ce champs indiquent une tendance qu'ont les sulfures disséminés à subir le fractionnement, impliquant ainsi un refroidissement moins rapide. Les points qui présentent une concentration anormale de Fe, sous le champs de SSM, indiquent soit une erreur d'estimation, ou, plus probablement, la présence de chromite.

Figure 8: Distribution de Fe-S-Ni-Cu des sulfures des gisements de Pechenga.



Les champs de SSM et ISS, ainsi que les T° sont tirés de Kullerud et al. 1969

8 Conclusion

L'observation des sections polies a montrée plusieurs similitudes entre les gisements de Zentral'noe, Semiletka et Kotselvaara-Kamakivi.

La minéralogie des gisements est sensiblement la même. Les sulfures sont composés de pyrrhotite, de pentlandite, de chalcopyrite et parfois de magnétite. Ces sulfures sont encaissés dans des péridotites ayant subi un métamorphisme de faciès schiste vert et qui, originellement, étaient composées d'olivine et de CPX.

La texture primaire est généralement très bien préservée et montre, pour les sections disséminées, un cumulat composée de grains d'olivine polygonale serpentinisée à texture en maillon et des CPX intergranulaires. Dans la section matricielle, le cumulat est composé de sulfures baignant dans une matrice composée de serpentine à texture "hourglass" et de talc aphanitique aciculaire.

Ces évidences montrent que la formation des gisements sont syngénétiques à la formation de la roche et que les magmas ont cristallisé très rapidement, diminuant énormément le fractionnement des sulfures.

La cristallisation rapide des magmas est caractéristique des coulées et des intrusions mis en place à faible profondeur. Il devient donc impossible, avec les résultats obtenus, de porter un jugement éclairé sur l'exactitude du modèle proposé par Melezhik (1994) qui stipulait que les gisements à l'ouest étaient d'origine effusive alors que les gisements localisés à l'est étaient mis en place dans des filons couches.

Finalement, l'étude a permis de diviser les sulfures des gisements de Ni-Cu de Pechenga en trois groupes morphologiques caractéristiques décrits par le modèle de Barnes (1997). La section disséminée est enrichie en chalcopryrite et montre des évidences de gouttelettes de sulfures (Po à la base et Cp au sommet). La section matricielle, avec plus de 30% de minéraux opaques, forme un cumulat de sulfures baignant dans une matrice de silicates. La portion massive est riche en pyrrhotite et représente la composition original du liquide monosulfuré.. Le diagramme Fe-S-Ni-Cu montre que la proportion de pentlandite est stable à travers les divisions et que le fractionnement des sulfures est peu important à cause de la cristallisation rapide des magmas.

9 Remerciement

Je tiens à remercier Mme Barnes qui m'a fourni le matériel et le soutien scientifique nécessaires pour mener à bien ce projet. De plus, je remercie M. Hassan Nabil et M. Jean Lafrance pour leur support informatique.

10 Référence

Barnes, S.J. 1997. Ni, Cu, Au, and Platinum Group element contents of sulfides associated with intraplate magmatism: a synthesis. *Journal canadien des sciences de la terre*, vol **34**, 3537-3551.

Barnes, S.J. 1999, Comm personnelles.

Eckstrand O.R. 1996. Gîtes de sulfures de nickel-cuivre; dans *Géologie des types de gîtes minéraux du Canada*, rév. Par O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair et R.I.Thorpe, Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, n°8; (aussi *The Geology of North America*, vol. P-1, Geological Society of America).

Gorbunov, G.I. *Geology and origin of the copper-nickel sulphide ore deposits of Pechenga (Petsamo) (Moscow: Nedra, 1968) 358p*

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

Hanski, E.J., and Smol'kin, V.F., 1989 Pechenga ferropicrites and other Early Protérozoic picrites in the eastern part of the Baltic Shield. *Precambrian Res.*, **45**, 63-82.

Kullerud, G., Yund, R.A. and Moh, G.H. 1969. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S and Fe-Ni-S systems. *Economic Geology. Monograph 4*. 323-343.

Melezhik, V.A., Hudson-Edwards, P. K Skufin et Nilsson, L. P. 1994. Pechenga area, Russia-Part 1: Geological setting and comparaisn with Pasvik, Norway. Trans. Instn. Min. Metall (Sect. B: Appl. Earth Science.), **103**: B129-B144.

Melezhik, V.A., Hudson-Edwards, P. K Skufin et Nilsson, L. P. 1994. Pechenga area, Russia-Part-2: nickel-cooper deposits and related rocks. Trans. Instn. Min. Metall (Sect. B: Appl. Earth Science.), **103**: B129-B144.

Predowsky, A. A., Zhangurov, A. A., et Fedotov, Zh. A., Evolution of the composition of mafic-ultramaficrocks and itsrelation to associated Ni-Cu ores in Pechenga. In *Problems of magmatism of the Baltic Shield*, (Leningrad: Nauka, 1971), 166-76

Vayrynen, H., 1938. Petrologie des Nickelerzfeldes Kaulatunturi-Kammikivitunturi in Petsamo. Bull. Comm. Geol, Finlande, **116**,

Verreault, N. 1996. La formation du gisement de nickel-cuivre de Pechenga en Russie. Projet de fin d'étude. UQAC.

Appendice 1

Tableau des concentrations minérales des
lames minces.

Tableau des concentrations des minéraux pour les lames minces.

Lame	Provenance	Type	%op	%gangeue	%Po	%pn	%Cp	%Mag	%Serp	%Talc	autre
IGCP-1	Vostochnoe	Diss.	2	98	20	15	5	60	80	20	Cl(tr)
IGCP-2	Vostochnoe	matriciel	40	60	60	20	5	15	100		
IGCP-3	Vostochnoe	matriciel	40	60	75	10	5	10	100		
IGCP-4	Vostochnoe	matriciel	7	93	10	5	85	tr	5	55	CPX(30%), Bi(10%)
IGCP-5A	Zentral'noe	congl.	10	90	20	-	tr	-	-	-	Py(80%), Qz(5%), Cb(20%), Plag(45%), Fragments (10%)
IGCP-5B	Vostochnoe	sédiment	5	95	10	-	tr	-	-	-	Py(90%), Qz(10%), Cb(40%), Plag(50%)
IGCP-5C	Vostochnoe	sédiment	3	97	-	-	-	-	-	-	Py(100%), Qz(5%), Cb(20%), Plag(75%)
IGCP-5C-1	Vostochnoe	Matriciel	40	60	70	15	10	5	70	25	Cl(5%)
IGCP-5D	Vostochnoe	congl.	10	90	15	-	tr	-	-	-	Qz(20%), Plag(60%), Cb(15%), Fragment(5%)
IGCP-6	Kotselvaara	diss.	1	99	85	10	5	-	-	20	Qz(20%), Cb(10%), Fragments(40%), Cl(10%)
IGCP-7	Kotselvaara	diss.	tr	100	-	-	100	nd	nd	nd	
KI-1	Kotselvaara	brèche	20	80	80	15	5	-	30	30	Cb(40%)
KT-2	Kotselvaara	diss.	8	92	55	30	15	-	5	15	Cb(25%), Mica(10%)
KT-3	Kotselvaara	diss.	10	90	60	36	3	tr	26	70	Bi(2%), Cb(tr), Cl(2%)
KT-4	Kotselvaara	brèche	35	65	85	15	tr	-	80	10	Cb(5%), Qz(5%)
KT-5	Kotselvaara	diss.	7	97	94	2	1	3	nd	nd	CPX(nd)
KT-6	Kotselvaara	diss.	20	80	93	6	1	-	17	60	Cb(10%), Bi(13%)
KT-7	Kotselvaara	brèche	30	70	75	15	5	-	40	60	
KT-8	Kotselvaara	matriciel	45	55	60	25	10	5	80	20	
KT-9	Kotselvaara	diss.	2	98	40	10	20	30	40	30	Cl(30%)
KTW-3	Kotselvaara	diss.	3	97	40	20	10	30	50	50	
KTW-4	Kotselvaara	diss.	15	85	40	20	10	30	44	50	Cb(1%), Cl(5%)
KTW-5B	Kotselvaara	brèche	35	65	70	15	10	5	85	5	Cb(10%)
KTW-6	Kotselvaara	brèche	70	30	50	10	40	tr	30	70	
KTW-7	Kotselvaara	brèche	25	75	80	15	5	tr	25	75	

diss. = disséminé, Po = pyrrhotite, Pn = pentlandite, Cp= Chalcopyrite, Mag = magnétite, Serp = serpentine, Cl = chlorite, Cb = carbonates, Qz = quartz, Bi=biotite, Plag= plagioclase, Py = pyrite, CPX = clinopyroxène, fragment = fragments de compositions indéterminées.

Lame	Provenance	Type	%op	%gangue	%Po	%pn	%Cp	%Mag	%Serp	%Talc	autre
MS-1	Kotselvaara	brèche	80	20	57	35	7	1	45	50	Cb(5%)
MS-2	Kotselvaara	matriciel	40	60	20	40	30	10	85	10	Cl(5%)
MS-3	Kotselvaara	Matriciel	60	40	55	30	10	5	75	25	Cl(tr)
MS-4	Kotselvaara	diss.	20	80	30	22	30	18	98	2	
MS-5	Kotselvaara	brèche	35	65	55	40	5	-	70	5	Qz(15%), Cb(10%)
MS-6	Kotselvaara	Brèche	45	55	60	35	5	-	50	-	Qz(50), Cb (tr)
MS-7	Kotselvaara	diss.	nd	nd	59	40	tr	-	nd	nd	
MS-8	Semiletka	Massif	97	3	70	24	4	2	-	80	Cb(20%)
MS-9	Semiletka	Brèche	15	85	77	20	1	2	90	3	Cb (veinule), Cl(tr)
MS-10	Semiletka	matriciel	60	40	65	5	30	tr	30	70	Cl(tr)
MS-11	Semiletka	diss.	5	95	60	25	15	tr	nd	nd	
MS-12	Semiletka	massif	97	3	67	15	8	10	-	-	Cb(100%)
MS-13	Semiletka	brèche	65	35	60	18	20	2	37	60	Cb(5%), Bi(2%)
MS-14	Semiletka	brèche	25	75	50	38	1	2	45	55	Cl(tr), Cb(tr)
MS-15	Semiletka	Diss.	6	94	40	20	30	10	55	40	Bi(3%), Cl(2%)
MS-17	Kotselvaara	matriciel	35	65	70	28	2	-	-	-	Plag(60%), Qz(10%), fragments(27%) Cb(3%),
MS-18	Kotselvaara	Diss.	1	99	30	20	10	40	70	30	Cl(tr)
MS-19	Kotselvaara	Brèche	25	75	70	20	10	-	8	90	Bi(2%)
MS-20	Kotselvaara	diss.	1	99	89	10	1	-	50	50	

diss.= disséminé, Po = pyrrhotite, Pn = pentlandite, Cp= Chalcopyrite, Mag = magnétite, Serp = serpentine, Cl = chlorite, Cb = carbonates, Qz = quartz, Bi=biotite, Plag= plagioclase, Py = pyrite, CPX = clinopyroxène, fragment = fragments de compositions indéterminées.