

## Les cumulats sulfurés

- Le soufre, forme en effet, un complexe très stable avec le fer , ainsi il génère la pyrrhotite (FeS).
- A **800°C et 2 Kbars**, l'olivine n'est pas stable en présence du soufre (Kullerud et Yoder, 1965), alors qu'elle l'est en son absence :



- Exemple : **La troctolite** (Gabbro très basique, type péridotite, où le minéral coloré est essentiellement de l'**olivine** et où le plagioclase est la **bytownite** ou le **labrador**) :
  - \*\* 50% d'olivine
  - \*\* 50% de plagioclase.

# Les cumulats sulfurés

- Le soufre, forme en effet, un complexe très stable avec le fer , ainsi il génère la pyrrhotite (FeS).
- A **800°C et 2 Kbars**, l'olivine n'est pas stable en présence du soufre (Kullerud et Yoder, 1965), alors qu'elle l'est en son absence :



**Olivine**

Soufre

**pyrrhotite**

**Magnétite**

Enstatite

- Exemple : **La troctolite** (Gabbro très basique, type péridotite, où le minéral coloré est essentiellement de l'**olivine** et où le plagioclase est la **bytownite** ou le **labrador**) :
- \*\* 50% d'olivine
- \*\* 50% de plagioclase.

## *La troctolite*

Il suffirait de **2,3% en poids de soufre** pour détruire toute l'olivine de cette roche en donnant :

Troctolite + 2.3% S

6.5% FeS + 16.5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + 29%  
Mg<sub>2</sub> Si<sub>2</sub> O<sub>6</sub>

**50% d'olivine**

**50% Pl**

Avec une telle composition, la roche devient une norite (Gabbro où l'hypersthène domine sur l'augite) à pyrrhotite et magnétite.

## *Les cumulats nickélifères*

- ❑ Le nickel (Ni) a très fortement tendance à se substituer au magnésium (Mg) dans la structure des péridots (olivine), notamment dans les roches ultrabasiques.
- ❑ La substitution du Mg dans la structure des orthopyroxènes semble beaucoup moins active.
- ❑ C'est donc avec la pyrrhotite que le sulfure de nickel  $\text{Ni}_x \text{S}_{x-1}$  se mélangera, la solution solide et liquide  $(\text{Ni}, \text{Fe})_x \text{S}_{x-1}$  étant complète au-dessus de  $300^\circ\text{C}$ .
- ❑ Nous citons comme exemples les sulfures de nickel :
  - **la Pentlandite =  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9 \text{S}_8$ , avec 2 à 3 % de Co**
  - **l'Heazlwoodite =  $\text{Ni}_3 \text{S}_2$**
  - **la Bravoïte =  $(\text{Ni}, \text{Fe}) \text{S}_2$ , avec  $\text{Ni} > \text{Fe}$ .**



**Olivine**

Soufre

**Ni<sub>x</sub> S<sub>x-1</sub>**

**Magnétite**

Enstatite

**(Ni, Fe)<sub>x</sub> S<sub>x-1</sub>**

**Pyrrhotite , Pentlandite,**

**Heazlewoodite , Bravoïte**

# SEGREGATION DU LIQUIDE IMMISCIBLE

□ Les minéralisations sont généralement le **résultat de processus d'immiscibilité d'un liquide, sulfuré ou oxydé, dans un magma silicaté.**

□ Cette **immiscibilité** peut être provoquée par **divers phénomènes** :

- un **changement de composition** par **assimilation de l'encaissant**,
- un **mélange de magmas**,
- des **changements de température** ou de **pression**.

□ Le liquide ainsi formé est **plus dense** que le **magma silicaté** et va migrer par **gravité** dans la **chambre magmatique**.

□ Selon le caractère **chalcophile** ou **lithophile** des éléments, les métaux se concentreront dans le liquide **sulfuré** ou **oxydé** respectivement. Des reprises hydrothermales permettront dans certains cas d'augmenter les teneurs.

## *immiscibilité de liquides*

- **Elle se fait par :**
  - **immiscibilité de sulfures** (avec enrichissement des éléments **chalcophiles** (Fe, **Cu**, Ni, PGE).
    - Ex : Gisements de Ni dans des laves komatitiques.
  - **immiscibilité d'oxydes** (avec enrichissement des éléments **sidérophiles** (**Fe**, Cr, Ti, V, P).
    - Ex : Gisements de Ni-Cu dans des gabbros ou Oxydes de Fe-Ti en anorthosites.

## *le soufre des magmas basiques*

- Au dessus de 1100°C, ce sont des **liquides sulfurés ferrifères** qui se ségrégeront hors du magma silicaté ; ces **mattes** (les premières fusion d'un minerai) sont susceptibles de **dissoudre, sans immiscibilité** un certain nombre d'autres liquides sulfuré de Ni, Cu, etc., voire des oxydes de fer (magnétite).
- La silice et les silicates, en revanche, y sont beaucoup moins solubles (moins de 1 %).
- Donc, le soufre des magmas basiques, fixe à la fois le **fer**, le **nickel** et un certain nombre de **chalcophiles** (les moins volatils : Cu, Au et Ag) sous forme de **liquide sulfuré immiscible**, avec le magma silicaté où il formera des **gouttelettes** (plus denses que le liquide silicaté), qui auront tendance à **sédimenter**, et la matte sulfurée ainsi formée cristallisera indépendamment du liquide silicaté.

## Éléments du Groupe du Platine (EGP : Pt, Pd, Ir, Os, Ru, Rh) et les métaux communs (principalement Ni et Cu)

- Les éléments du groupe du platine (EGP : Pt, Pd, Ir, Os, Ru, Rh) et les métaux communs (principalement Ni et Cu) ont à l'heure actuelle **une importance économique considérable.**
- Les **EGP** sont utilisés dans différents domaines : dans **l'industrie automobile** (pot catalytique essentiellement) ; en **médecine** (traitement contre le cancer, la dentisterie etc.) ; en **joaillerie** ; ainsi que dans de nombreux domaines de **hautes technologies** (électronique, pile à combustible etc.).
- La **forte demande en EGP** a provoqué depuis quelques années **une recrudescence de l'exploration minérale** pour ces éléments. Par conséquent, un des problèmes majeurs à l'heure actuelle en géologie économique est de mieux comprendre les phénomènes pouvant engendrer la formation de ces minéralisations.

# EGP : Pt, Pd, Ir, Os, Ru, Rh

- **Pd** : Palladium
- **Pt** : platine
- **Ir** : Iridium
- **Os** : Osmium
- **Ru** : Ruthénium
- **Rh** : Rhodium

## TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Numéro atomique → Z ← Masse molaire atomique (g.mol<sup>-1</sup>)

Symbole atomique → X ← Famille

Nom

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogène																	2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57 La Lanthane	58 Ce Cérum	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutétium	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lw Lawrencium	118 Uuo Ununoctium
												114 Uuq Ununquadium		116 Uuh Ununhexium			118 Uuo Ununoctium

# *Types de minéralisations associées aux roches mafiques à ultramafiques*

- Les minéralisations riches en Ni, Cu et éléments du groupe du platine (EGP) sont souvent associées avec des roches mafiques à ultramafiques. Ces minéralisations peuvent être divisées en deux catégories (Naldrett, 1989):
  - (i) celles comprenant des minéralisations riches en **Ni et Cu** et dans lesquelles les **EGP sont des sous-produits** (exemples : Nkomati en Afrique du Sud, **Noril'sk en Russie**, Voisey's Bay au Labrador, Kabanga en Tanzanie);
  - (ii) celle où les **EGP sont les ressources principales** et le **Ni et Cu sont des sous-produits** (exemples : Merensky Reef dans le **Complexe du Bushveld en Afrique du Sud**, John Manville Reef et Picket Pin Reef dans le Complexe de **Stillwater dans le Montana aux Etats-Unis**).

## *Variété de styles de minéralisations riches en EGP*

- Il existe une très grande variété de styles de minéralisations riches en EGP pouvant se retrouver dans différentes parties des intrusions et être soit (Maier, 2005) :
  - (i) situées à la base de l'intrusion au contact ou dans la roche encaissante ;
  - (ii) situées dans la partie inférieure des intrusions (<1000 m de la base) constituées essentiellement de péridotites et de pyroxénites ;
  - (iii) associées à des niveaux de chromites ;
  - (iv) situées dans la partie centrale des intrusions et associées généralement à des unités ;
  - (v) situées dans la partie supérieure des intrusions ;
  - (vi) dues à une activité hydrothermale.

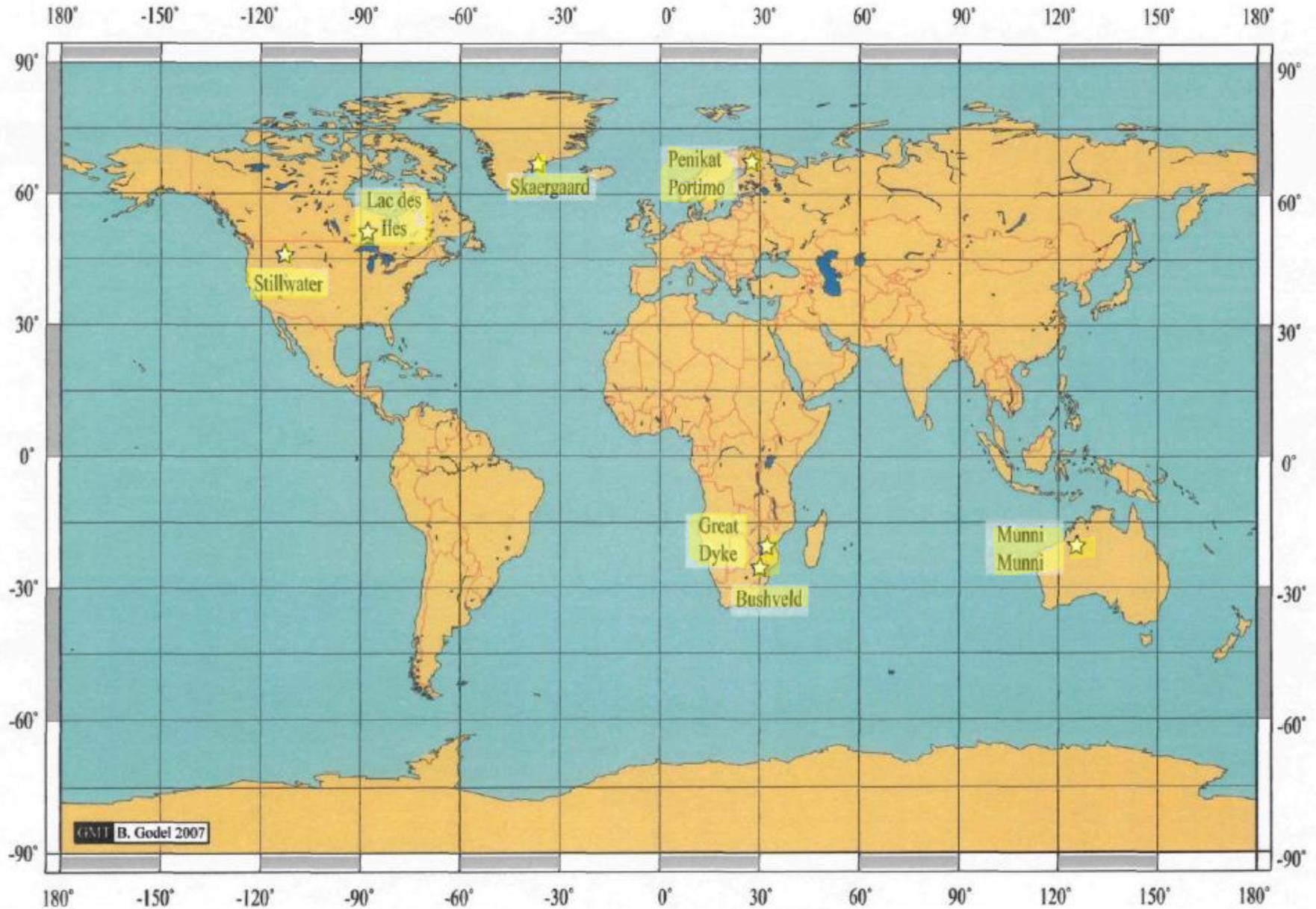
## *Minéraux contenant des EGP*

- Les EGP sont en général étroitement associés à des minéraux sulfurés :
  - pentlandite ((Fe, Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) ;
  - pyrrhotite ( (Fe(1-x)S) (x=0-0.17)) ;
  - chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>) essentiellement.
- Les EGP se retrouvent en solution solide dans les sulfures et/ou sous forme de minéraux du groupe du platine (MGP)

# CARACTÉRISTIQUES DES GÎTES DE NI-CU±EGP

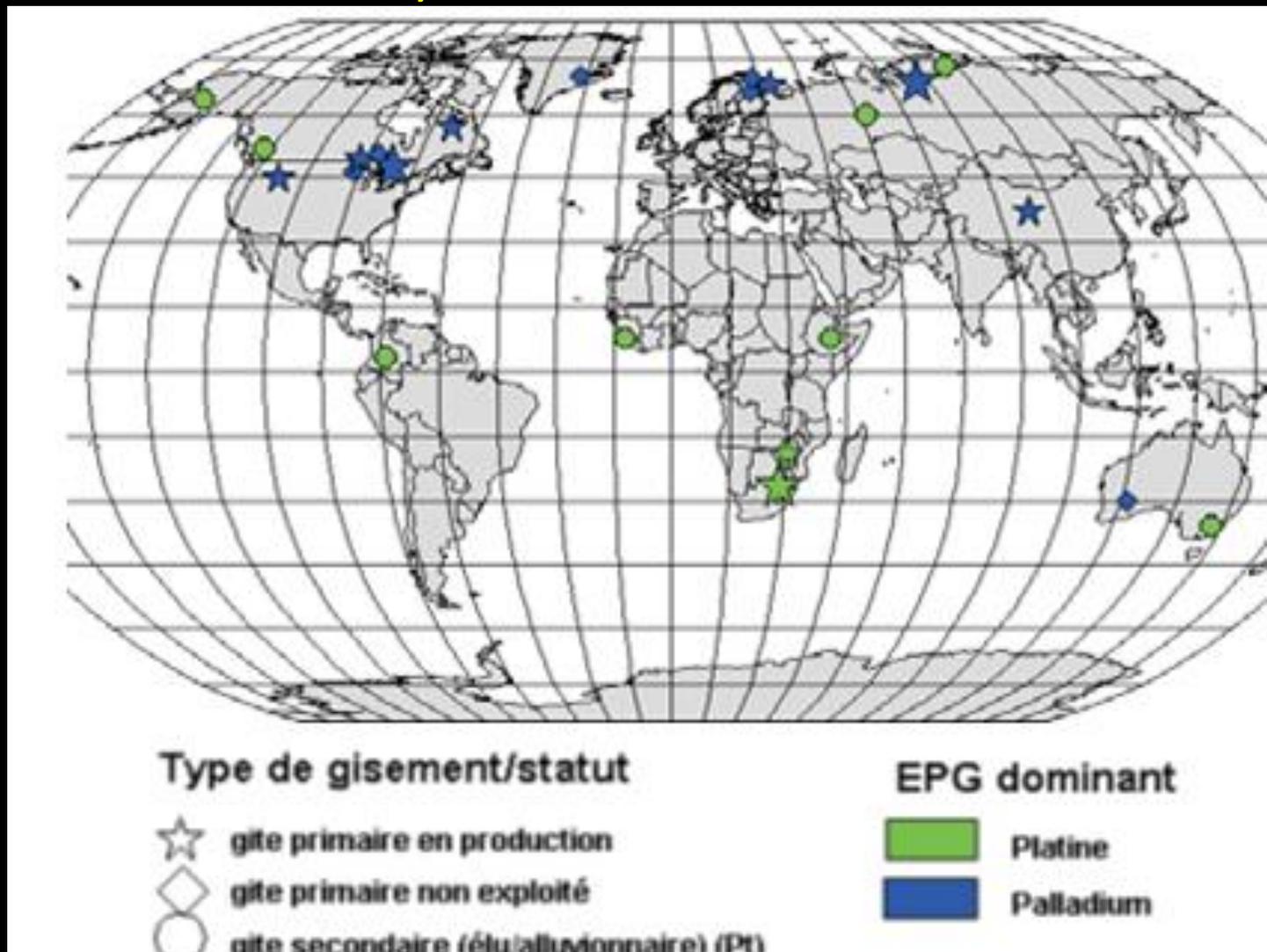
- D'après Naldrett (1997, 1999), les **gites de Ni-Cu+/- EPG** de classe mondiale partagent plusieurs caractéristiques communes. Ces caractéristiques sont :
  - 1) une **association avec des magmas relativement riches en MgO** favorisant la cristallisation d'**olivine**,
  - 2) la proximité d'une **discontinuité crustale majeure**,
  - 3) des **roches encaissantes** contenant des **sulfures**,
  - 4) **l'appauvrissement en éléments chalcophiles et précieux** dans les magmas silicatés associés aux sulfures ,
  - 5) **l'interaction** entre les magmas silicatés associés aux sulfures et les roches encaissantes,
  - 6) la présence ou la proximité d'un **conduit magmatique**.
- Ces caractéristiques ont une grande influence sur trois processus clés dans la formation des gites de Ni-Cu+/-EPG a fort potentiel économique. Il s'agit de (i) **l'immiscibilité des sulfures**, (ii) du **mélange adéquat** entre les **sulfures** et les **magmas silicatés associés** et du (iii) **piégeage des sulfures**.

# Carte de localisation des complexes intrusifs contenant des minéralisations enrichies en EGP



Les principaux producteurs mondiaux du groupe du platine sont :

l'Afrique du Sud (complexe de Bushveld), la Russie, les États-Unis et le Canada (mine en Ontario et au nord du Québec)

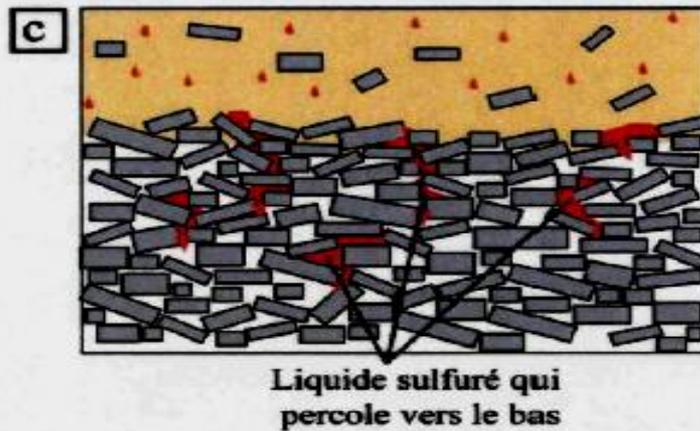
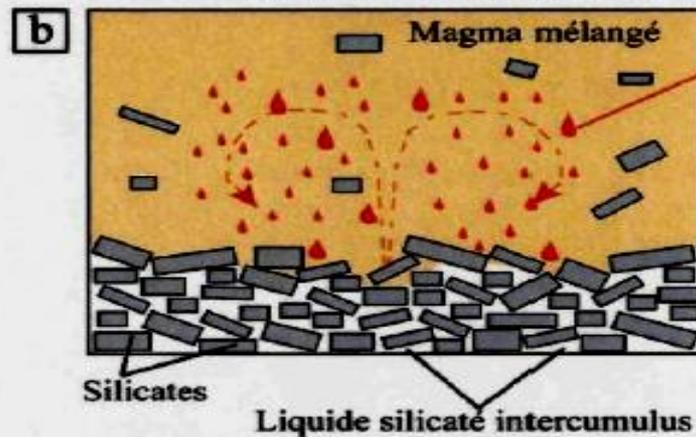
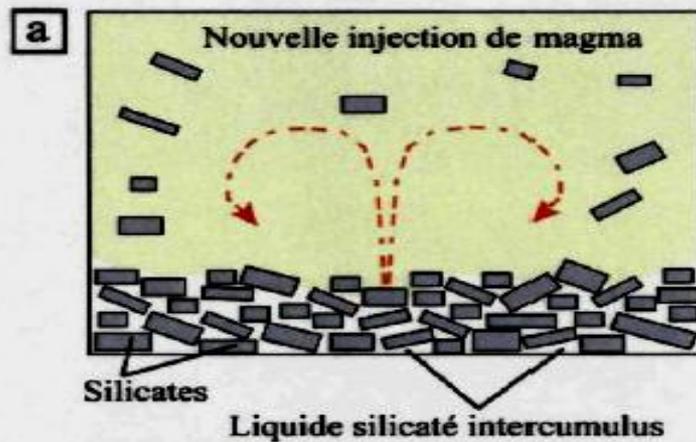


Nom du complexe ou de l'intrusion*	Nom de la zone minéralisée enrichie en EGP	Lithologie	Références
Bushveld	Merensky Reef	chromite, mélanorite	Barnes and Maier (2000a)
	UG-2	chromite	Cawthorn (2002)
Stillwater	JM Reef	troctolite, anorthosite, gabbronorite	Zientek <i>et al.</i> (2002)
Great Dyke	Main Sulphide Zone	websterite	Oberthür (2002)
Munni Munni	Porphyritic Websterite Zone	websterite	Barnes and Hoatson (1994)
Penikat	Paasivaara Reef (PV reef)	gabbro	Alapieti and Lahtinen (2002)
	Ala-Penikat Reef (AP reef)	anorthosite et gabbronorite	
	Sompujarvi Reef (SJ reef)	gabbronorite, chromite	
Portimo	SK reef	orthopyroxenite, gabbro	Alapieti and Lahtinen (2002)
	RK reef	anorthosite, norite	Alapieti and Lahtinen (2002)
Skaergaard	Platinova Reefs	gabbro	Andersen <i>et al.</i> (2002)

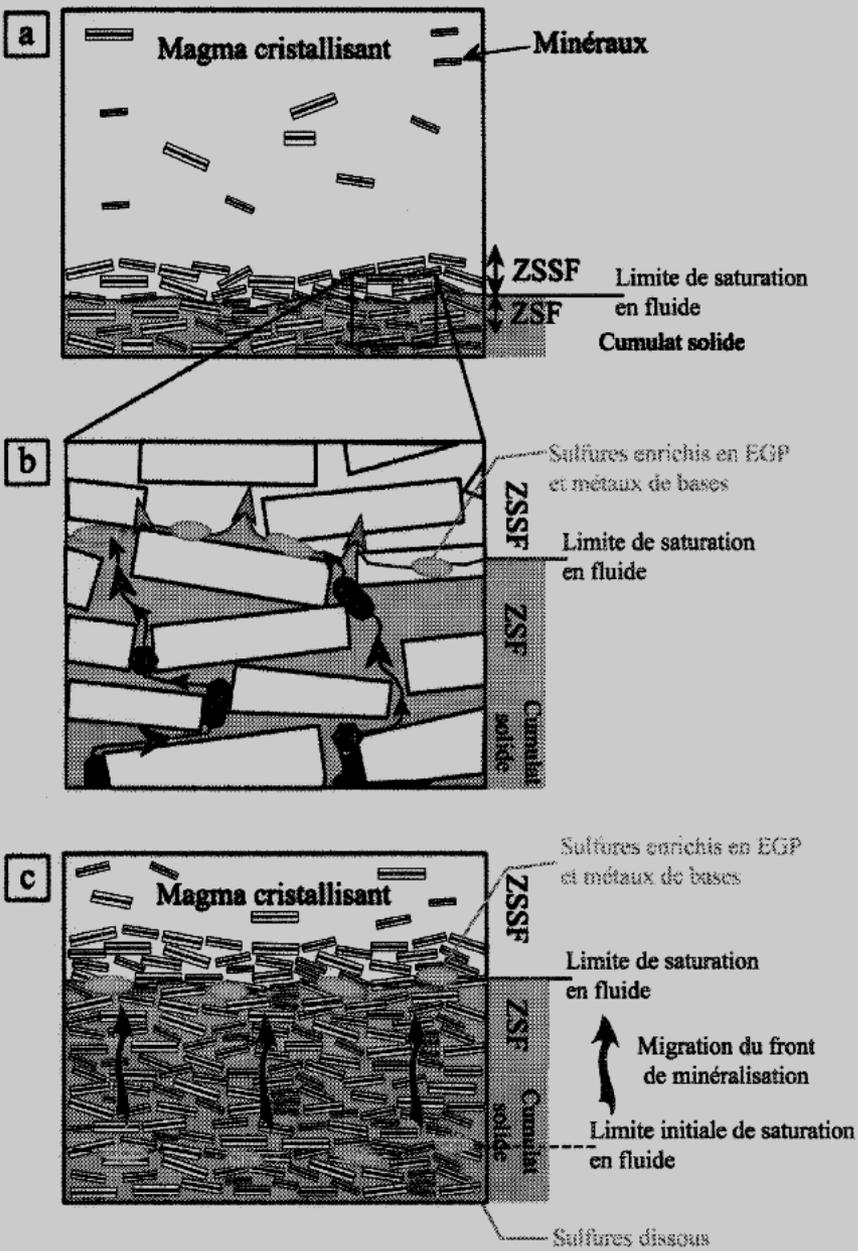
## *Les roches ultrabasiques*

- Les types les plus répandus des roches ultrabasiques sont :
  - parmi les **péridotites** :
    - **la dunite** (olivine seule),
    - **la harzburgite** (olivine + orthopyroxène),
    - **la wehrlite** (olivine + clinopyroxène)
    - **la lherzolite** (olivine + orthopyroxène + clinopyroxène) ;
  - parmi les **pyroxénites** :
    - les **orthopyroxénites** et **clinopyroxénites** et
    - la webstérite** (orthopyroxène + clinopyroxène).
- La présence de divers **minéraux accessoires** conduit à la reconnaissance de nombreuses variétés parmi chacun de ces types. Il existe ainsi des péridotites et des pyroxénolites à plagioclase, **spinelle**, **grenat** ou **amphibole**.

# Collecte des EGP et les métaux de bases



# Modèle de dépôts des EGP par un fluide enrichi en chlore.



a- Lors de la solidification de la pile de cumulat, le liquide silicaté interstitiel devient saturé en fluide aqueux (riche en S, Cl, ...).

b- Lors de la compaction, ce fluide migre vers le haut en apportant avec lui le **soufre**, les **métaux de base** et les **EGP**. La migration du liquide s'arrête à l'interface entre la zone saturée en fluide (Z.S.F) et la zone sous-saturée en fluide (Z.S.S.F). Au niveau de la limite de saturation en fluide, ce dernier se redissout dans le liquide silicaté interstitiel (sous-saturé en fluide).

Lorsque le soufre, les métaux et les EGP sont saturés dans le liquide silicaté interstitiel, ils précipitent sous forme de **sulfures enrichis en EGP**.

c- Au fur et à mesure que la pile de cumulat se solidifie, le **front de minéralisation** se **déplace vers le haut** de la pile de cumulats

## Gîtes de Ni-Cu-EGP des complexes stratifiés :

### Le **COMPLEXE DE SUDBURY**

Actuellement 77 gisements de **Ni** et **Cu**, incluant ceux exploités dans le passé, et 11 gites dont le potentiel économique fait l'objet d'études avancées.

En 2007, la minéralisation extraite des gisements et celle qualifiée de ressource était évaluée à 1,655 milliard de tonnes, ce qui fait du complexe de Sudbury, un gisement de classe mondiale.

**La teneur moyenne des gisements est de 1% - 1.2% en Ni, 1% en Cu et 1g/t en Pd et Pt, il s'agit donc de gisements à faible teneur et à fort tonnage.**

Le complexe de Sudbury est situé en Ontario, au Nord de la ville de Sudbury. Il s'agit d'un complexe basique lité, constitués de norites à la base, puis des gabbros, ensuite des granophyres et des granites pegmatitiques. A ces roches s'associent des dykes de diorites quartzifères intrusifs dans la norite.

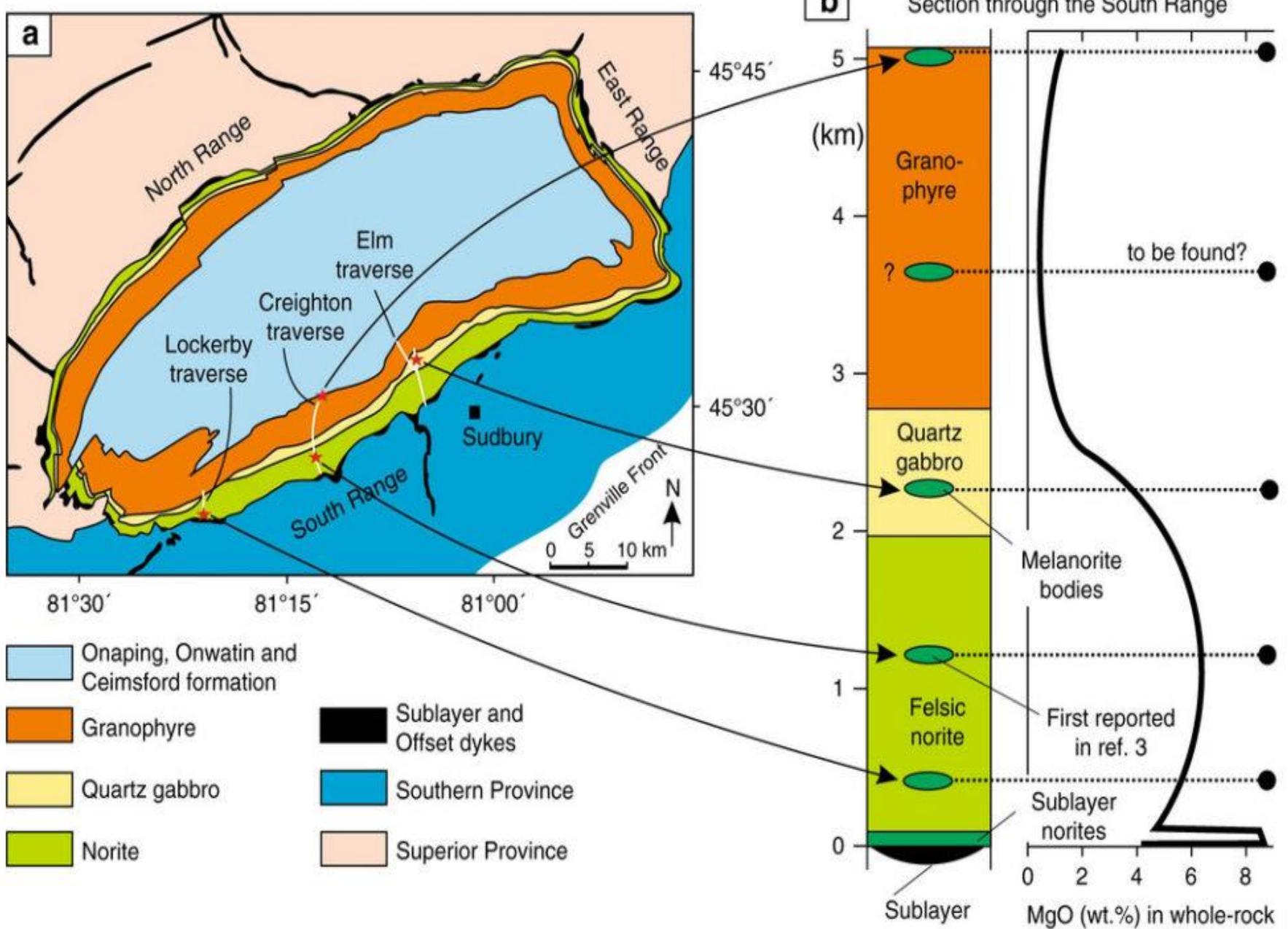
Le complexe se serait mis en place suite à la chute d'un astéroïde (10 km de diamètre) vers 1.85 Ma (Dietz, 1964; Pye et al., 1984).

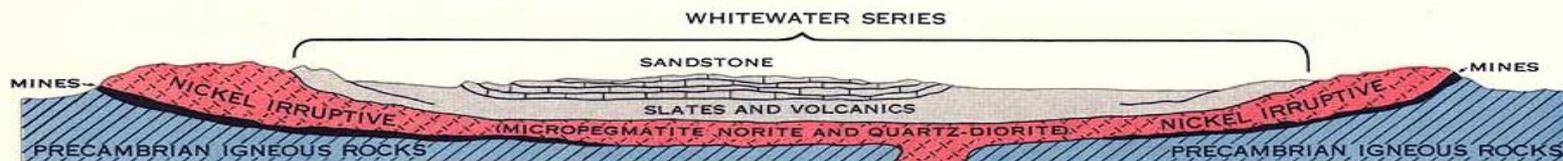
La formation sus-jacente riche en clastes a été interprétée comme une brèche de retombée suite à l'impact. L'ensemble est recouvert de shales et de roches détritiques

Des travaux de Rais Latypov et trois autres scientifiques publiés dans *Nature Communications* vont dans le même sens. Leur idée a été d'étudier l'une des plus grandes structures d'impact sur Terre, datée à 1,85 milliard d'années. C'est le **bassin de Sudbury** au Canada, dans l'Ontario, vestige d'un cratère qui a pu avoir 250 km de diamètre. Il en reste une structure de 62 km de long et 30 km de large, qui est clairement stratifiée. Dans la partie sud, à 5 km de profondeur, se trouve une sous-couche de **norite**. Il s'agit d'une variété de gabbro, roche présente dans la croûte océanique sous le basalte. Au-dessus, jusqu'à 3 km de profondeur, figure une **norite felsique**, puis du **gabbro à quartz**. D'un peu plus de 2 km de profondeur jusqu'à la surface, il y a du **granophyre**, une roche felsique à cristaux de quartz et de feldspath potassique.

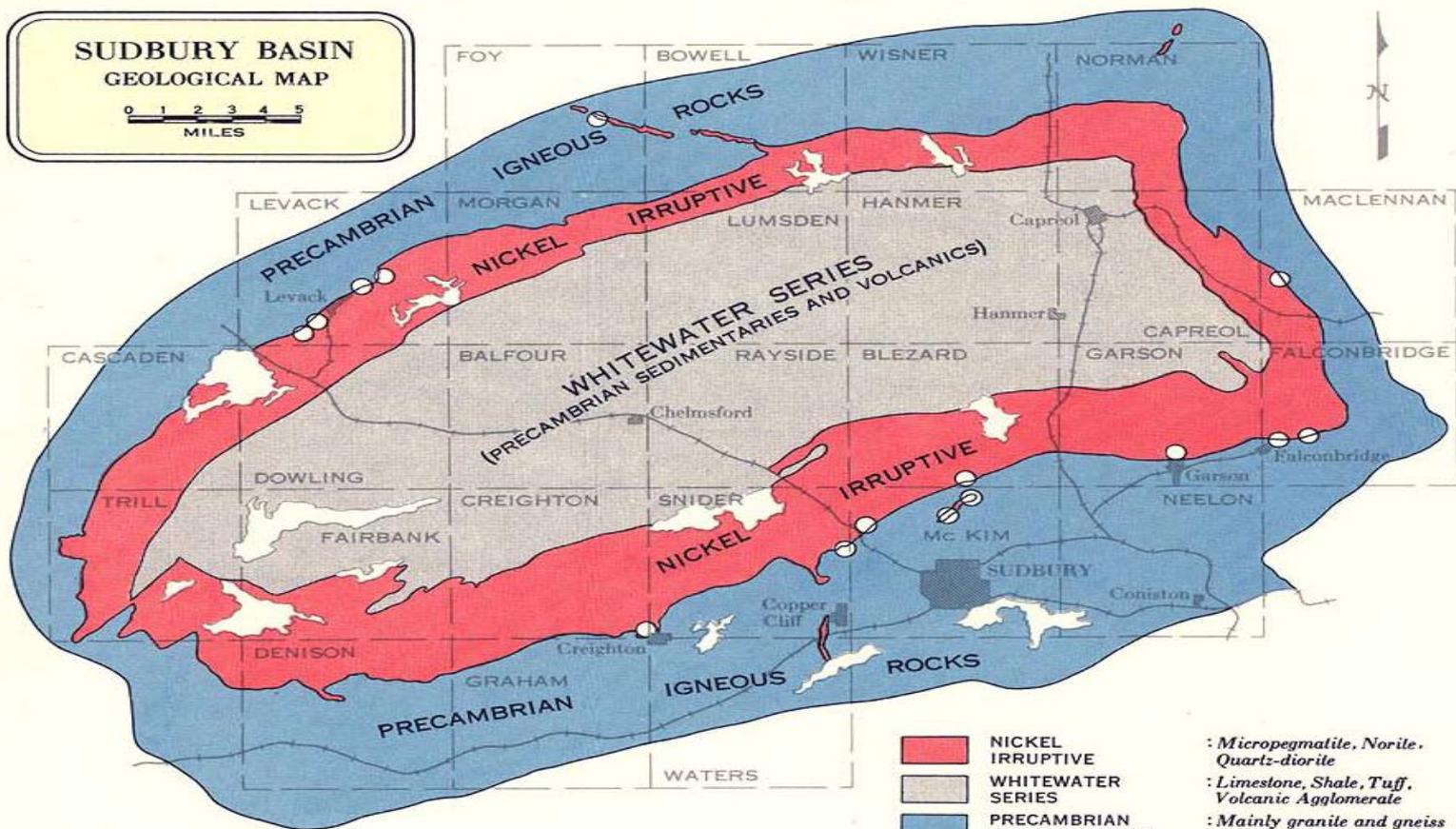
Toutes ces roches sont magmatiques : elles résultent du refroidissement d'un magma à très haute température. Il devait avoir entre 1 700 et 2 000 °C. La chute de la météorite a donc créé un grand lac de lave, que des brèches (des débris de roche) sont venues recouvrir. Celles-ci constituent la formation d'Onaping, en bleu clair sur la carte géologique.

La composition globale est celle d'une granodiorite, mais on observe une stratification qu'il faut expliquer. L'une des hypothèses est qu'il a existé dès le début deux couches de magmas, l'une provenant du manteau et l'autre de la croûte.





**SUDBURY BASIN  
GEOLOGICAL MAP**



- |   |                               |  |
|---|-------------------------------|--|
|  | NICKEL IRRUPTIVE              | : Micropegmatite, Norite, Quartz-diorite       |
|  | WHITewater SERIES             | : Limestone, Shale, Tuff, Volcanic Agglomerate |
|  | PRECAMBRIAN IGNEOUS ROCKS     | : Mainly granite and gneiss                    |
|  | OPERATING COPPER-NICKEL MINES |  |
|  | TOWNS                         |  |
|  | TOWNSHIP BOUNDARIES           |  |
|  | RAILWAYS                      |  |

## **La minéralisation cupro-nickélique se présente soit en :**

- lentilles plates et concordantes avec le plancher du complexe. Ces lentilles sont associées à des norites à la base ;
- filons périphériques liés aux dislocations tectoniques . Les sulfures massifs contiennent des fragments de roches encaissantes (gneiss, granite, gabbro et norite).

Le minerai est massif, disséminé ou bréchique. L'assemblage minéralogique comprend Ni-Cu-Fe-Pt sous forme sulfurée (identiques dans les 2 types morphologiques) : Pyrrhotite : 70 à 90%  $\text{Fe}_{90}\text{S}_{10}$  + inclusion de Pentlandite (sulfure de Ni) : 2 à 4%  $(\text{NiFe})_9\text{S}_8$ , Chalcopyrite, cubanite et bornite.

# ATTENTION A LIRE !!!!!!!

## DISCUSSION SUR L'ORIGINE DES MINERALISATIONS CUPRO-NICKELIFERES SULFURES

### 1 Modèle magmatique de mise en place des gisements de Ni-Cu-Co-EGP

#### 1.2 Magma primitif : source des métaux

Les magmas hôtes de sulfures magmatiques sont ceux qui ont une composition mafique à ultramafique riche en Mg (Barnes et al., 1988).

La source essentielle de Ni-Cu et EGP est constituée par les sulfures du manteau. Il suffit qu'une faible quantité de sulfure demeure dans le manteau au cours de la fusion partielle pour que le liquide qui en résulte soit irrémédiablement appauvri en EGP.

Barnes et al. (1985) ont calculé qu'un taux moyen de 20 à 25 % de fusion partielle était normalement requis pour fondre la totalité des sulfures du manteau et qu'ainsi le liquide qui en résulte soit enrichi en métaux. Un tel taux de fusion partielle entraîne la formation d'un magma hautement magnésien, soit picritique, komatiitique ou boninitique.

### **1.3 Ascension des magmas en surface**

Afin de prévenir une ségrégation prématurée des sulfures en profondeur, une ascension rapide du magma est nécessaire (Barnes et al., 1988). Ceci est favorisé par une zone d'extension crustale (rift) et/ou des zones de failles profondes comme dans les zones de suture.

### **1.4 Saturation du magma en soufre**

Suivant la mise en place du magma dans la croûte, une ségrégation des sulfures doit avoir lieu relativement tôt dans la cristallisation du magma afin d'avoir un gisement économiquement rentable.

On considère généralement que le **Ni, le Cu et les EGP** étaient présents dans le magma parent en quantité suffisante pour produire les minéraux sulfurés dans lesquels ces métaux ont été concentrés. Mais il reste à savoir si la quantité de soufre d'origine magmatique est assez abondante pour produire les minéraux sulfurés.

Les études tirées de certains gisements magmatiques de nickel, comme ceux de **Noril'sk**, de **Sudbury**, de Thompson (Eckstrand et al., 1989), du complexe de Duluth (Ripley et Alawi, 1988; Thériault et al., 1997), Muskox (Barnes et Francis, 1995) et de Kambalda (Lesher et Arndt, 1995) suggèrent que les liquides sulfurés nickélifères ont été générés suite à la contamination du magma mafique par du soufre provenant des roches crustales, généralement des roches sédimentaires sulfurées ou des paragneiss.

*Les indications sont fondées sur des données isotopiques (S, Sr, Nd, Os), les rapports Se/S et la présence de xénolites partiellement fusionnés. Les mécanismes de contamination proposés sont, entre autres, l'assimilation de soufre dans les roches encaissantes sulfurées (Naldrett, 1989; Barnes et Francis, 1995; Thériault et al., 1997).*

On signale que la position des dépôts de sulfures de Ni-Cu-Co-EGP dans la croûte continentale conforte l'hypothèse supposant que le soufre provienne d'une source crustale. Mais il existe certains gisements qui possèdent des caractéristiques particulières capables de mettre la théorie de contamination en question. Parmi ces gisements, on cite ceux de Kambalda (Foster et al. 1996) et de Cape-Smith (Shirey et Barnes 1994).

## ***1.5 Accumulation et concentration des sulfures***

En se basant sur la texture, les sulfures peuvent être divisés en trois principales catégories (Fig)

**les sulfures massifs, les sulfures matriciels et les sulfures disséminés.**

On parle de sulfures massifs lorsque la roche contient plus de 80% de sulfures et on parle de sulfures matriciels lorsque la roche contient de 30 à 80% de sulfures (Barnes et al., 1997).

L'existence de concentrations de sulfures massifs et matriciels permet de penser que les phases sulfurées ont pu se séparer très tôt du magma silicate sous forme d'un liquide immiscible et qu'elles se sont mises en place par gravité. Les sulfures disséminés (moins de 30% de sulfures dans la roche) sont probablement le produit d'une séparation qui aurait eu lieu lorsque la cristallisation des silicates avait atteint un stade plus avancé.

L'existence de concentrations de sulfures massifs et matriciels permet de penser que les phases sulfurées ont pu se séparer très tôt du magma silicaté sous forme d'un liquide immiscible et qu'elles se sont mises en place par gravité.

sulfures disséminés (moins de 30% de sulfures dans la roche) sont probablement le produit d'une séparation qui aurait eu lieu lorsque la cristallisation des silicates avait atteint un stade plus avancé.

