

Projet 2013-01

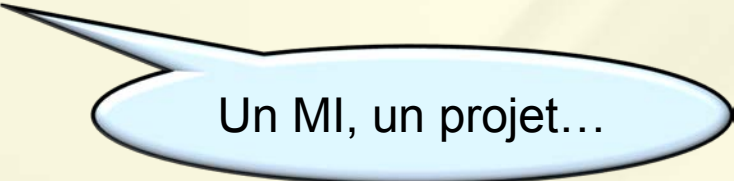
Minéraux indicateurs dans l'environnement secondaire pour l'exploration des gisements de métaux usuels (porphyres, IOCG, Cu-Ni magmatiques, VMS)

17 novembre 2014 – Atelier CONSOREM, Québec Mines

Lucie Mathieu, Ph.D.



- La recherche sur les MI* est très active, et de nombreux travaux récents sont disponibles.
- Les recettes sont complexes et changent en fonction du gisement recherché et de la géologie régionale.
- Une mise à jour des connaissances et le transfert vers l'industrie est nécessaire.
- Projet débuté l'an passé par S. Trépanier
- Précédents projets Consorem sur les MI:
 - 2003-10: chromite-tourmaline (nombreuses analyses collectées)
 - 2004-11: zircon, apatite, titanite (analyses effectuées, pour Kwyjibo)
 - 2011-05: grains d'or dans le till



Un MI, un projet...

* *MI = Minéraux Indicateurs*

Sommaire

- 1. Éléments de réflexion**
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Classification des MI
5. Recommandation et conclusions

Comment utilise-t-on les MI? L'exemple des KIM

- **KIM**: « Kimberlite Indicator Minerals »
- Pyrope, Mg-ilménite, chromite, Cr-diopside, forsterite, enstatite.

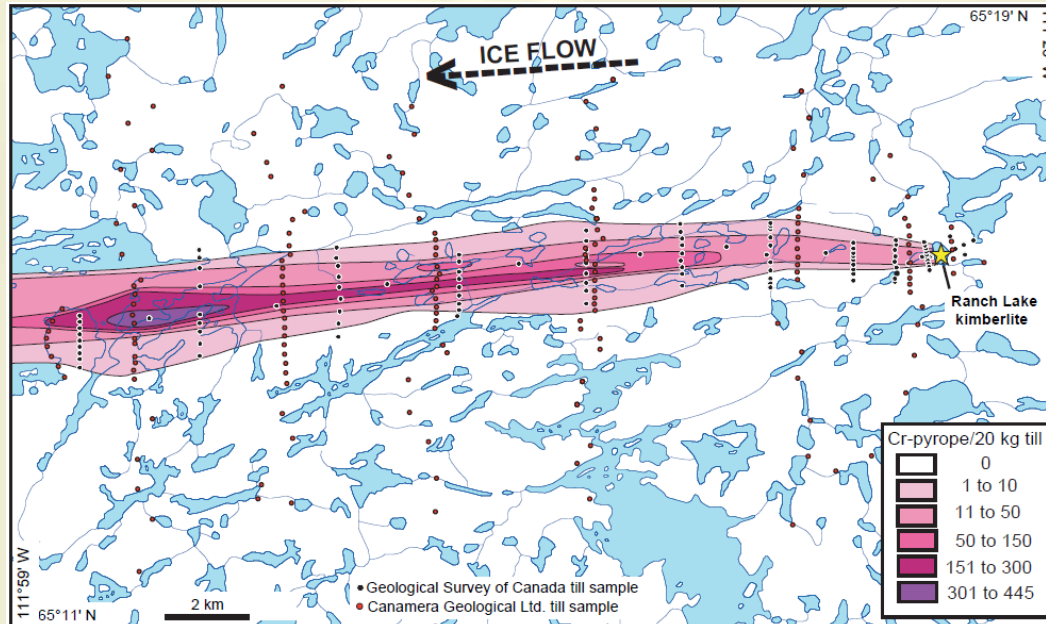


FIGURE 20. Ribbon-shaped dispersal train trending westward from the Ranch Lake kimberlite, Lac de Gras, as defined by Cr-pyrope concentrations in 20 kg till samples. The train was formed by a single phase of ice flow towards the west (modified from McClenaghan et al., 2002a).

Source:
McClenaghan
et Kjarsgaard
(2007)

- **Pourquoi un tel succès des KIM?** On recherche des roches ultramafiques, qui sont un type de roche relativement peu abondant dans la croûte terrestre.
- Les pipes kimberlitiques sont **ponctuelles** et leurs **compositions contrastent** avec le reste de la croûte: leurs MI sont très spécifiques.

Où est le problème?

- **Les KIM, si spécifiques que ça?**
Les KIM caractérisent des roches ultramafiques. Les kimberlites ne sont pas les seules sources de roches UM dans la croûte (pensons seulement aux intrusions contenant des gîtes de Ni-Cu-ÉGP).
- Comment caractériser des minéralisations dont la composition chimique contraste moins fortement avec celle de la croûte? Pensons aux minéralisations associées aux granitoïdes, et souvenons nous que la croûte terrestre est majoritairement constituée de roches felsiques.

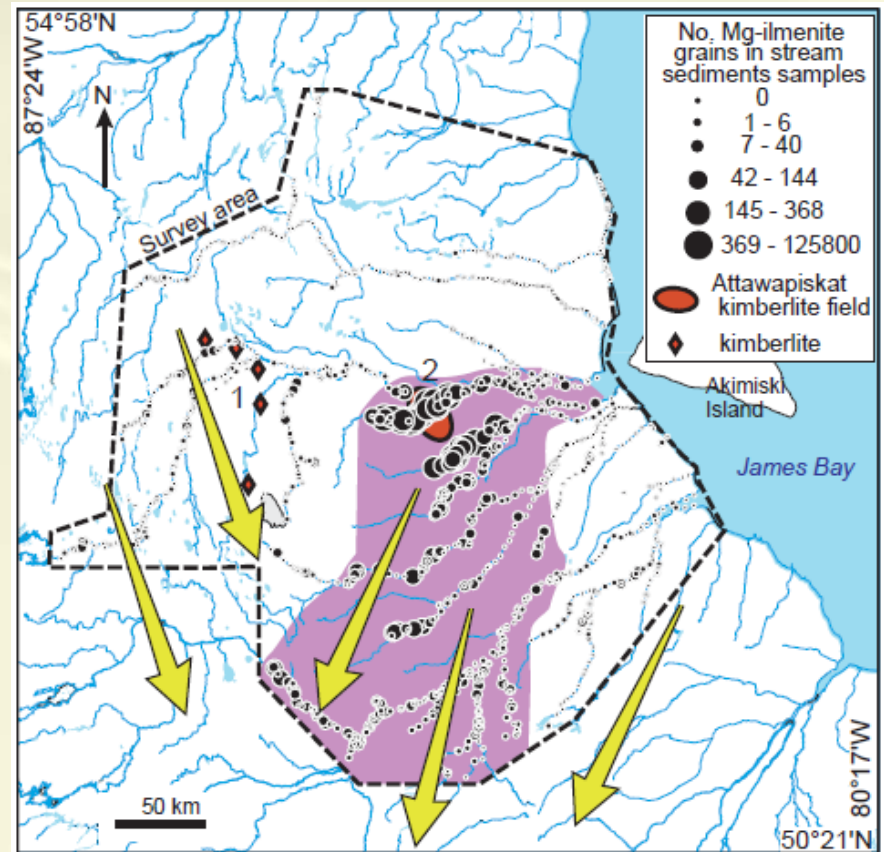
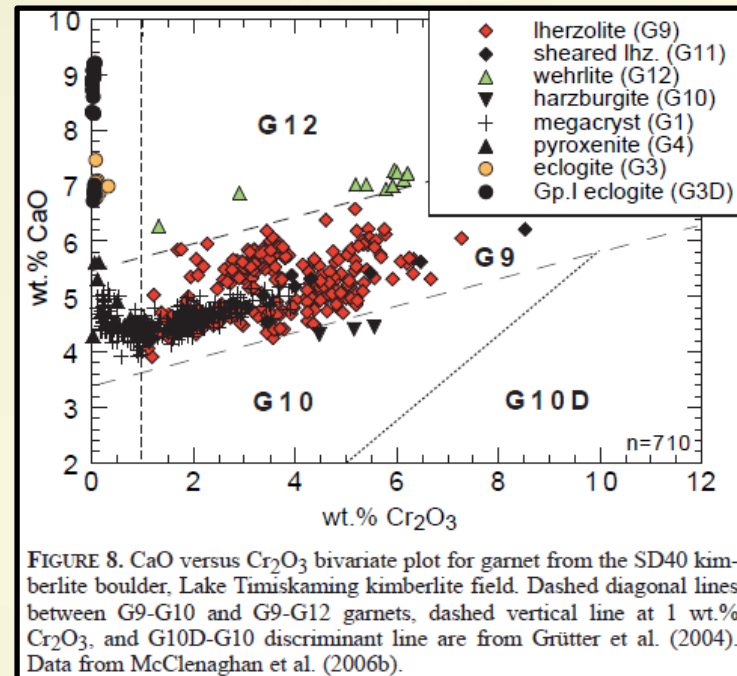
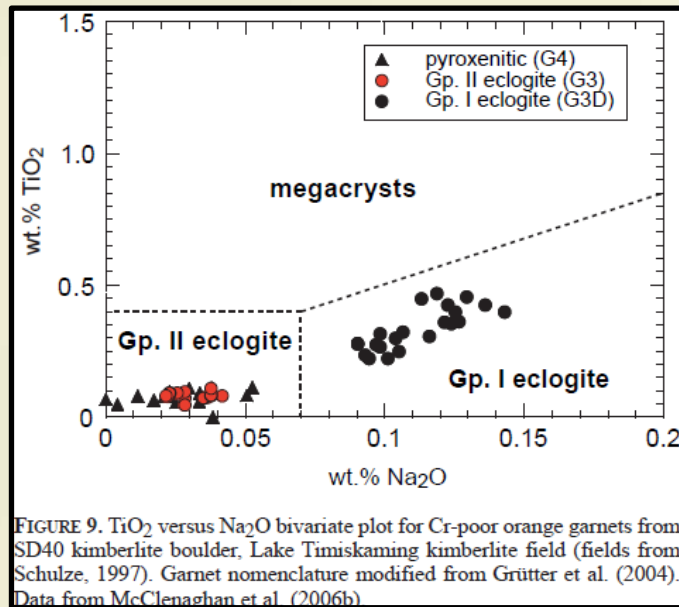


FIGURE 17. Abundance of Mg-ilmenite in the 0.25 to 2.0 mm heavy mineral fraction of 8 to 13 kg stream sediment samples around the Attawapiskat kimberlite field in northern Ontario (modified from Crabtree, 2003). Red diamonds (1) indicate location of the Kyle Lake kimberlites; red oval (2) indicates location of Jurassic age kimberlite cluster. Yellow arrows indicate the orientation of linear ice flow features (Prest et al., 1968; Crabtree, 2003). The dispersion fan, highlighted in purple, is the net effect of glacial transport from the Jurassic age kimberlite cluster to the southwest and subsequent postglacial fluvial transport to the northeast and east.

Mais encore ...

- **Les diagrammes de discrimination** développés pour les grenats permettent de juger de la fertilité diamantifère de leurs roches hôtes.
- **Problème:** il faut d'abord identifier les grenats associés au magma kimberlitique ou aux enclaves remontées par ce magma avant d'utiliser ce type de diagramme. Comment fait-on pour isoler ce type de MI dans le till?



Source: McClenaghan et Kjarsgaard (2007)

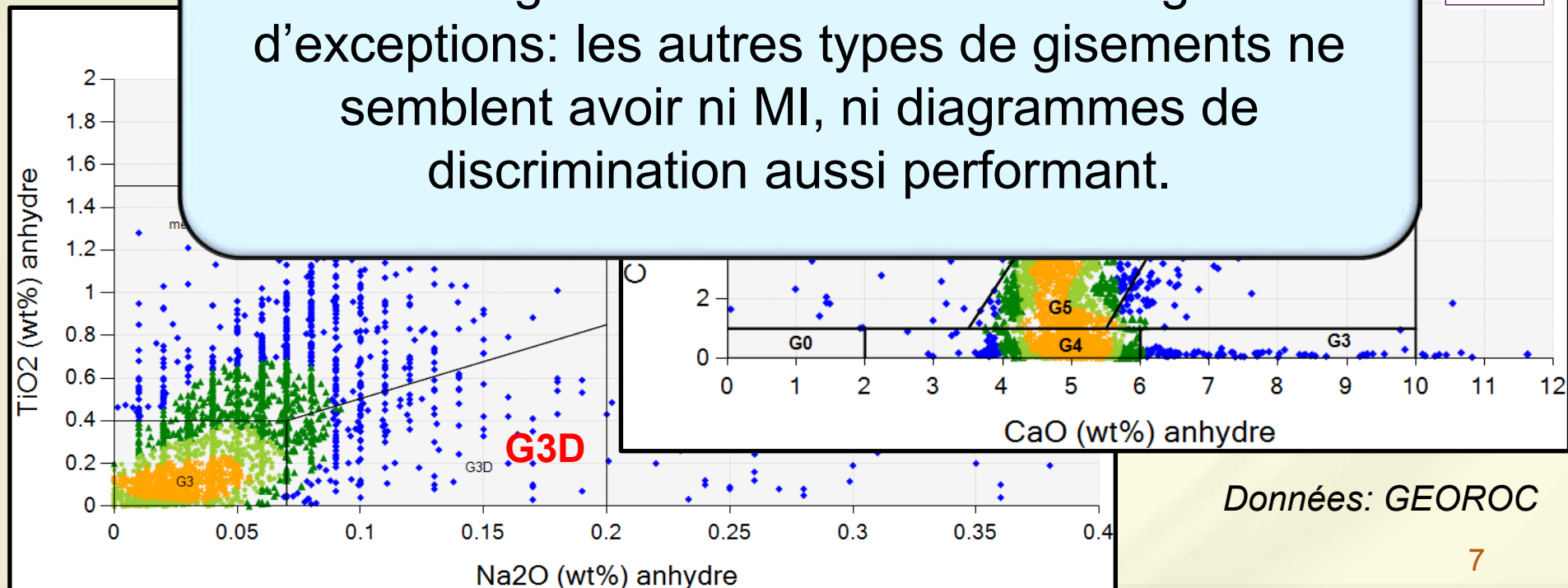
Diagrammes de discrimination

- En fait, les **pyropes** de compositions G3D et G10D sont assez rares dans les roches magmatiques. Les diagrammes de discrimination, lorsqu'ils sont appliqués aux pyropes, permettent d'isoler les pyropes ayant des compositions similaires à ceux que l'on observe dans les pipes kimberlitiques.

Diagramme Cr-Ca pour grenats (Grutter et al. 2004) (pyropes) N=3920

Mais les grenats et autres KIM font figures d'exceptions: les autres types de gisements ne semblent avoir ni MI, ni diagrammes de discrimination aussi performant.

◆ 1-272
▲ 272-428
● 428-563
■ 563-848



Sommaire

1. Éléments de réflexion
- 2. Problématique**
3. Méthodologie
4. Classification des MI
5. Recommandation et conclusions

Qu'est-ce qu'un MI?

Définition 1*:

- **Résistant** à l'altération chimique et mécanique (érosion)
- **Lourd**, facilement concentré dans les sédiments (till, rivière)
- **Gros**, récupérable, identifiable et capable de résister longtemps à l'abrasion (>0,25 mm)
- **Spécifique**, « indique quelque chose d'intéressant » (présence de minéralisation, de halo d'altération, d'intrusion mafique, ...)

Définition 2:

- Minéral transporté par l'eau ou la glace et qui peut être **rattaché à une source** particulière.

Deux façons d'étudier les MI

Documenter les MI

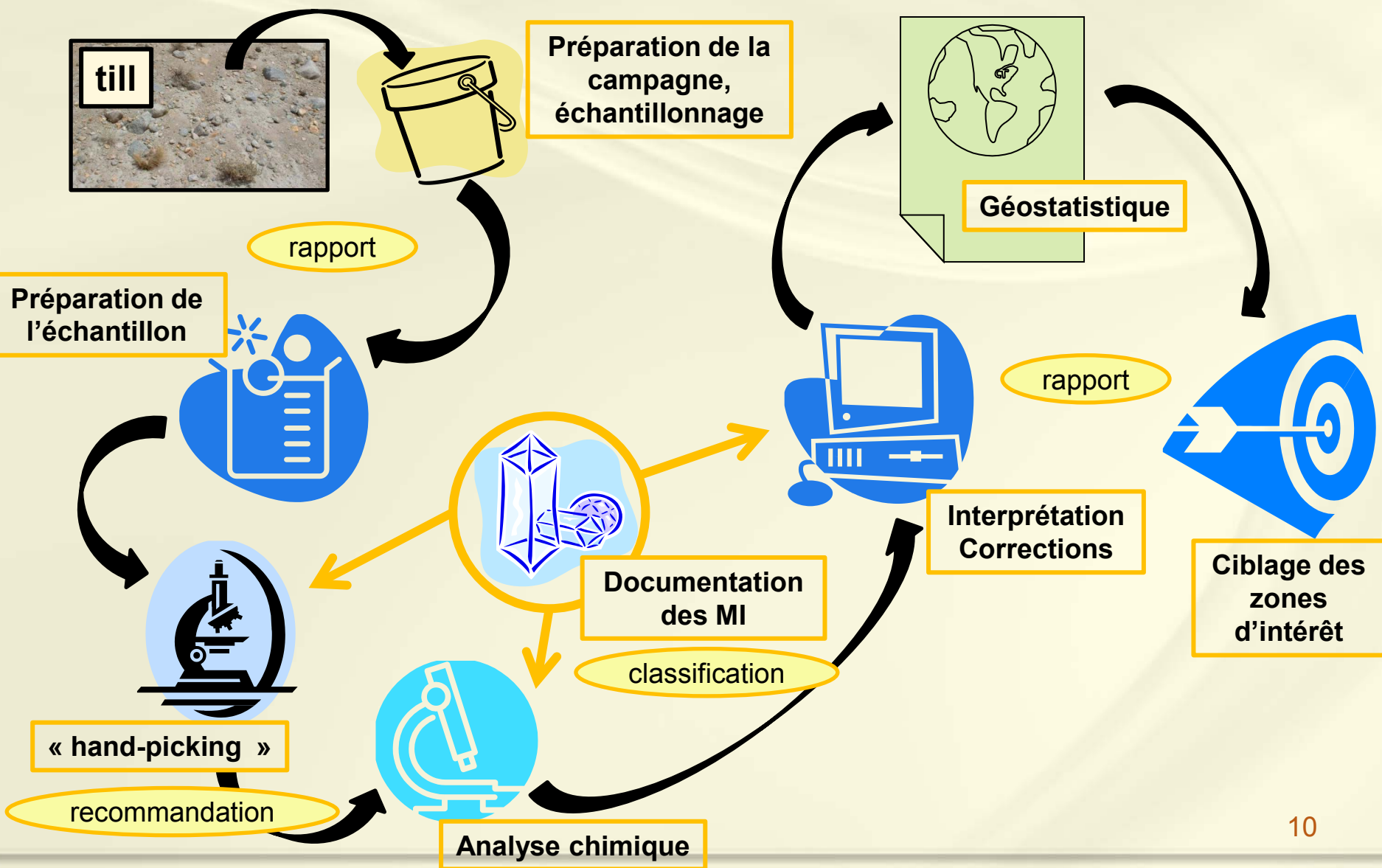
- Groupes et espèces d'intérêt
- Compositions chimiques
- Occurrence
- **CLASSIFICATION**

Échantillonnage, géostatistique

- Échantillons exploitables
- Méthodes d'analyses
- Corrections
- Traitements géostatistiques

*Source: McClenaghan 2005, Avrill 2007, Bouzari et al. 2012, etc.

Cycle de vie d'un échantillon de l'environnement secondaire



Sommaire

1. Éléments de réflexion
2. Problématique
- 3. Méthodologie**
4. Classification des MI
5. Recommandation et conclusions

Principe de la documentation des MI

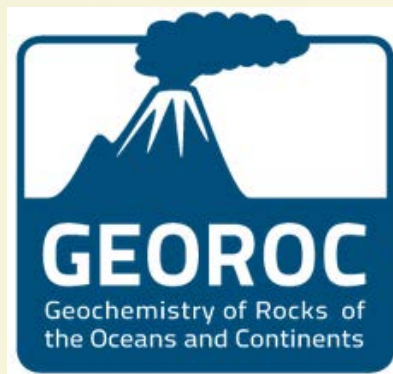
- De nombreuses études rapportent la composition qu'ont les MI observés dans des roches minéralisées.
- Dans cette étude, on tentera de se faire une idée de la composition des MI de la croûte et du manteau supérieur, afin de faire ressortir les espèces et/ou compositions chimiques qui sont véritablement symptomatiques de l'association d'un MI avec tel ou tel type de gisement.

Les olivines des kimberlites sont riches en Mg!

Celles des magmas mafiques à UM aussi.

Outils utilisés pour documenter les MI

- Utilisation des publications scientifiques
- Documentation de la chimie des MI et proposition d'une classification:
 - Utilisation de bases de données:
 - GEOROC (roches magmatiques)
 - Compilation à partir de la littérature (compilation limitée par la courte durée du projet)
 - **Développement d'un outil** permettant d'exploiter les bases de données.

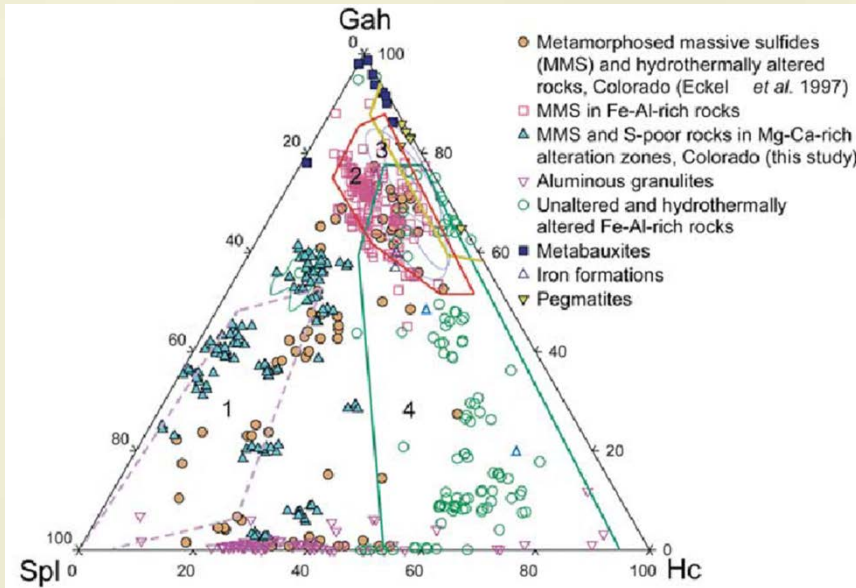


> 673 000 analyses, >355 000
échantillons, > 11900 papiers

Exploitation des bases de données

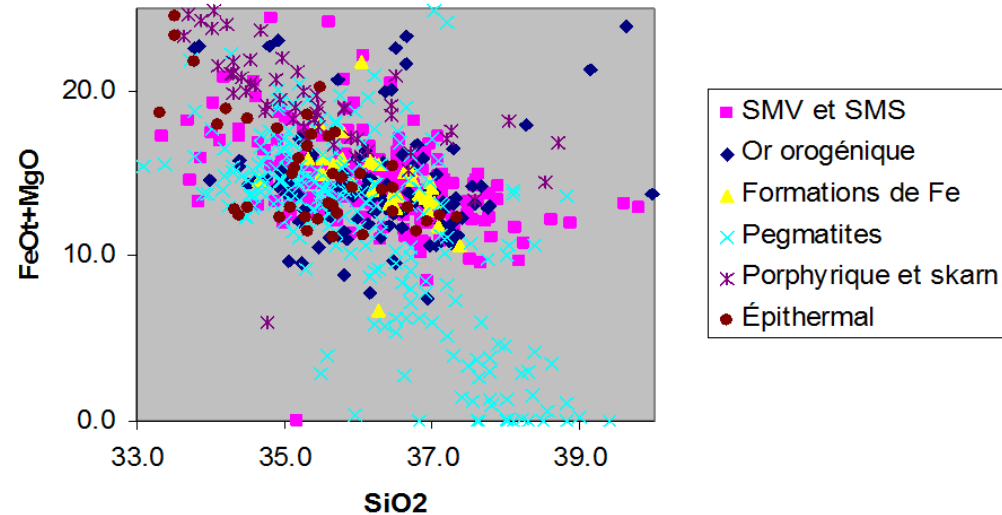
- Les analyses chimiques de minéraux sont généralement représentées dans des diagrammes dont les axes correspondent à un élément censé représenter un pôle pur.

Voicu (2003) - Consorem



Heimann et al. (2005)

Tourmalines: type de minéralisation



- Cependant, face à un groupe aussi complexe que celui des tourmalines, ce type d'approche n'est pas toujours pertinente.

Classification des MI – exemple des olivines

Compilation de données chimiques

Minéral	SiO2	Al2O3	CaO	FeOT	MgO	MnO	TiO2
olivine 1	43	0.05	0.1	0.43	57.7	0.4	0.07
olivine 2	42.4	0.03	0.11	0.71	57.7	0.34	0.03

...



Calcul des proportions des espèces minérales présentes à partir des analyses chimiques

Minéral	fayalite_MI	forsterite_MI	olivineCA_MI	tephroite_MI	lahunite_MI	etc.
olivine 1	1.01	99.05	0	0	0	0
olivine 2	2	98.04	0	0	0	0

...

Classification des minéraux en fonction du type de roche hôte dont ils proviennent

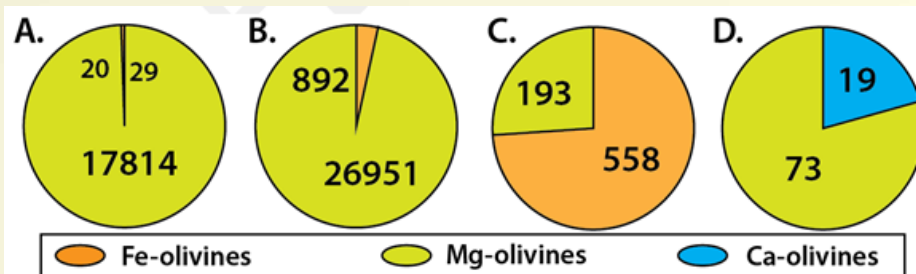
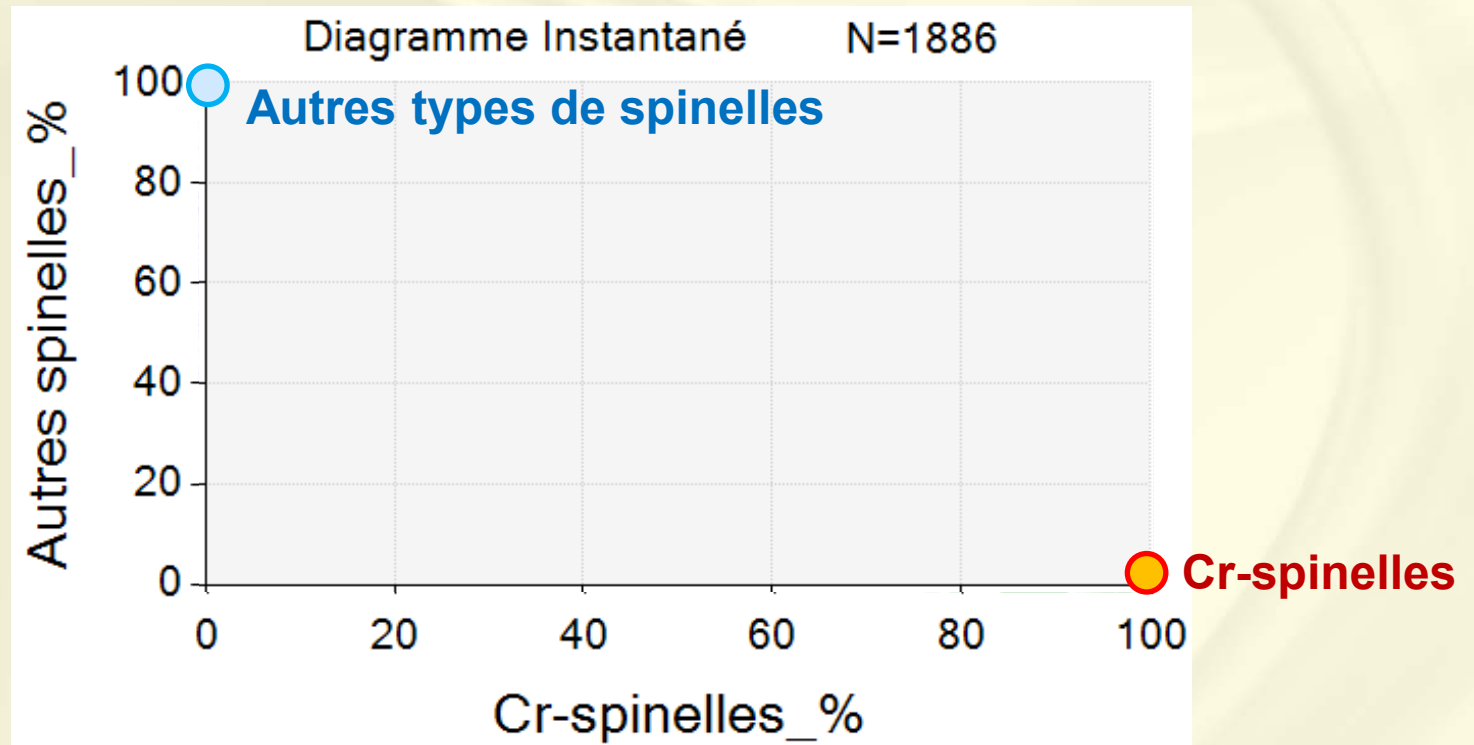


Figure 2: Fe-, Mg- et Ca-olivines, classées selon la composition de leurs roches hôte; A) roches ultramafiques, péridotites et pyroxénites; B) roches mafiques et intermédiaires; C) roches felsiques; D) carbonatites.

Test de la validité du calcul des proportions des espèces minérales

Graphique: spinelles du GEOROC identifiés comme « chromite » ou « chrome-spinel »



cf. annexe B du rapport 2013-01 (12 graphiques disponibles)

Classer les MI

- Les classes KIM*, PCIMS*, MMSIM*, etc. n'ont pas été utilisées
- Les minéraux ont été classés selon leur particularités cristallographiques (cf. classification de Dana version 8), et selon les 2 groupes suivants:

MI « spécifiques »

- Minéraux qu'il suffit de reconnaître, et pour lesquels une analyse chimique n'est pas absolument nécessaire. Formule chimique souvent simple.
- **Minéraux:** Au, PGM, topaze, scheelite (etc.), sulfures, oxydes simples AX₂ (rutile, wolframite, cassitérite, quartz, etc.)

Autres types de MI

- Minéraux qui ne servent pas à grand-chose s'ils sont identifiés dans le till. La détermination de leurs compositions chimiques, ou au moins de l'espèce à laquelle ils appartiennent, est indispensable.
- **Minéraux:** 18 groupes (olivine, grenat, pyroxène, spinelle, etc.)

*MMSIM = Magmatic /Metamorphosed Massive Sulfide Indicator Minerals

*PCIMS = Porphyry Copper Indicator Minerals / *KIM = Kimberlite Indicator Minerals

Sommaire

1. Éléments de réflexion
2. Problématique
3. Méthodologie
- 4. Classification des MI**
5. Recommandation et conclusions

Fiches au format .pdf (16) : exemple du groupe du grenat

Grenat (groupe)

1. Formule chimique: $X_3Y_2Si_3O_{12}$

- Site X: Mg, Fe²⁺, Mn, Ca
- Site Y: Al, Fe³⁺, Ti, Cr, V, Sn, Zr
- Espèces communes : almandin, pyrope, grossulaire, andradite (Fe³⁺), spessartine (Mn), uvarovite (Cr), knorringite (Cr)

2. Occurrence

2.1. Association aux minéralisations

- Le grenat a été massivement étudié pour sa présence dans les enclaves mantelliques remontées par les kimberlites diamantifères. Il est également souvent observé dans les halos d'altération hydrothermale métamorphisés. Certains grenats peuvent indiquer la présence d'intrusions ultramafiques (cf. Ni-Cu-PGE).
- Classification : KIM (« Kimberlite Indicator Mineral »; Morris et Kaszycki 1997): almandine-pyrope (Cr-pauvre), Ti-pyrope, uvarovite, low-Ca-grenat.
- Classification : PCIM (« Porphyry Cu Indicator Mineral »; Avrill 2007).

2.2. Autres occurrences

Le grenat est l'une des principales phases alumineuses du manteau. Il est aussi très commun dans les roches métamorphiques de relativement haut grade, bien que la présence de certains éléments comme le Mn puisse réduire la P-T minimal nécessaire à la formation de grenat.

- Magmatique: manteau, magmas ultramafiques à mafiques, magmas felsiques pour le Fe-grenat. Le grenat cristallise dans des conditions de P-T élevées (cf. magmas situés dans le manteau ou dans la croûte inférieure).
- Métamorphique : tous types de roches, nombreux grades
- Sédimentaire : détritique seulement

3. Données de la littérature scientifique

3.1. Halo d'altération hydrothermal

Les grenats sont très souvent associés aux halos d'altération hydrothermale peu à intensément métamorphisés. La composition en éléments traces de ces grenats à le potentiel de renseigner sur le caractère métamorphisé, ou non, de leurs roches hôtes. Les grenats recherchés sont le grossulaire (skarn), l'andradite, la spessartine et l'almandin (minéralisations associées aux granites, fluides riches en Mn), et peut-être le pyrope (contextes mafiques).

1

- Zn : dans les skarns, les grossulaires et autres sont pauvres en Zn (cf. Zn se substitue plus volontiers au Fe qu'au Ca). Pour d'autres types de grenats (almandin en particulier), les concentrations en Zn pourraient être plus élevées (Somarin 2004).

- Ag : le grenat n'incorpore pas facilement l'Ag

- Cu, Co, Ni : Cu se corréle au Fe (substitution?), Co et Ni ont parfois un comportement similaire (Somarin 2004).

3.2. Kimberlites et minéralisations diamantifères

Le grenat a principalement été étudié pour caractériser la fertilité des pipes kimberlitiques. Les grenats recherchés proviennent soit du manteau (retrouvés sous forme d'enclaves), soit du magma kimberlitique (phénocristaux, « megacrysts »).

Le diamant forme dans des conditions de P-T-fO2 et de compositions mantelliques particulières, sur lesquels certains grenats peuvent renseigner (d'après Gurney 1984, McCandless et Gurney 1989, Fipke et al. 1995, Grütter et Quadling 1999, Gurney et Zweistra 1995, Grütter et al. 2004):

- Cr-pyrope (Ca-pauvre) – G10: xénolites (éclogite, péridotite de type harzburgite, dunite) (> 0.5 wt% Cr2O3)
- Cr-pyrope, un peu plus riche en Ca – G9 : xénolites (lherzolite) pas forcément associées aux kimberlites.
- Ca-grenat, uvarovite – G12 : xénolites (péridotites de type wherlite),
- Cr-pauvre almandin-pyrope – G3: xénolites (éclogite), sont souvent plus riches en Na (< 0.5 wt% Cr2O3, > 0.07 wt% Na2O, Ti-pauvre)
- Cr-pauvre Ti-pyrope – G1 : méga-cristaux, qui indiquent la présence de magma kimberlitique mais ne permettent pas de juger de sa fertilité (< 2-4 wt% de Cr2O3, > 0.4 wt% TiO2, Na-pauvre).

Tableau 1 : classification de Grütter et al. (2004)

Type	Roche hôte	Utile pour diamant?
G12	wherlite	(OUI)
G11	Ti-péridotite	
G10	harzburgite, dunite	(OUI)
G10D	péridotite diamantifère	OUI
G9	lherzolite	NON
G5	éclogite? croûte? (Fe-riche)	
G4	pyroxénite, webstérite, éclogite	
G3	éclogite	
G3D	éclogite diamantifère	OUI
G1	magma kimberlitique	(OUI)

2

Fiches au format .pdf (16)

Organisation des fiches

- Formule chimique, liste des espèces du groupe étudié
- Roches minéralisées où le MI est observé
- Roches non minéralisées où le MI est observé
- Composition chimique: données de la littérature
- Minéralisations documentées: données de la littérature
- Liste des diagrammes de discrimination publiés

- Particularité des bases de données utilisées
- Résultat de l'analyse des bases de données
- **Résumé**: éléments de **classification** des minéraux étudiés, et discussion de leurs potentiels en tant que MI
- Références

- Annexe I: formules structurales des espèces du groupe étudié
- Annexe II: densité de chaque espèce
- Annexe III: test des diagrammes de discrimination

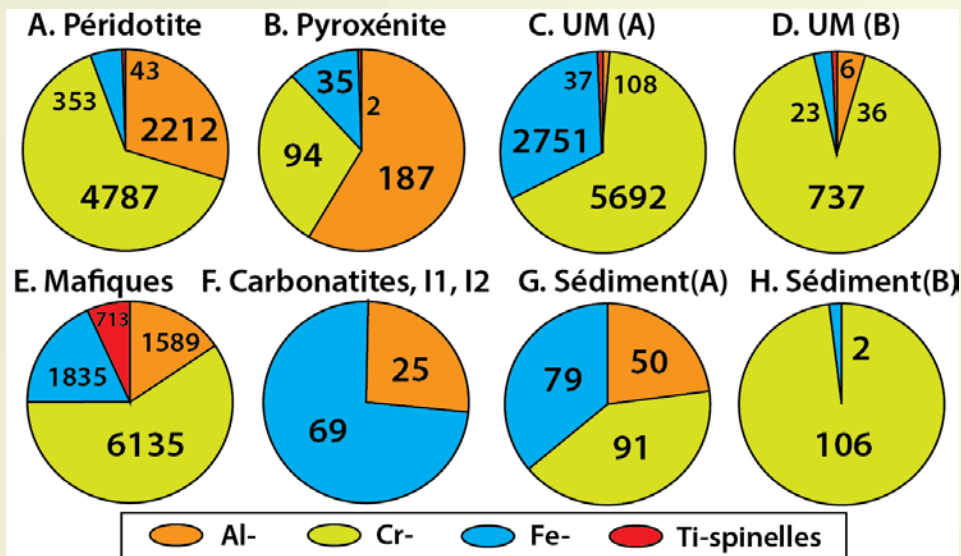
Exemple choisi: le groupe des spinelles (XY_2O_4)

- **Espèces d'intérêt:** gahnite (sulfures à Zn), chromite (gisements de Cr ou de ÉGP), magnétite (altérations associées aux SEDEX, IOCG, etc.)
- **Roches non-minéralisées:** Les spinelles présentent une grande variabilité chimique et sont stables à haute P-T. Elles sont donc potentiellement présentes dans la quasi-totalité des roches de la croûte. Dans le manteau, elles font partie des rares phases capables d'incorporer Al et Cr.
- De nombreux diagrammes de discrimination publiés. Ils ont été testés mais ne permettent pas une classification satisfaisante des spinelles de la croûte et du manteau supérieur.
- Développement d'une classification permettant de mieux décrire la chimie des spinelles en fonction de la composition de leurs roches hôtes.

Spinelle – XY₂O₄

- **Bases de données utilisées:** GEOROC (n= 21061) et littérature, incluant la base de données de Barnes et Roeder (2001) (n= 28152).
- Calcul des proportions des espèces présentes
- Puis, classification :

Minéral	Roche	spinelle	hercynite	gahnite	magnetite	chromite	chromiteMG	ulvospinel	TOTAL	Espèce dominante
spinelle 1	UM	56	34	5	2	3	0	0	100	Al-spinelle
spinelle 2	Pérido.	5	20	0	0	62	13	0	100	Cr-spinelle



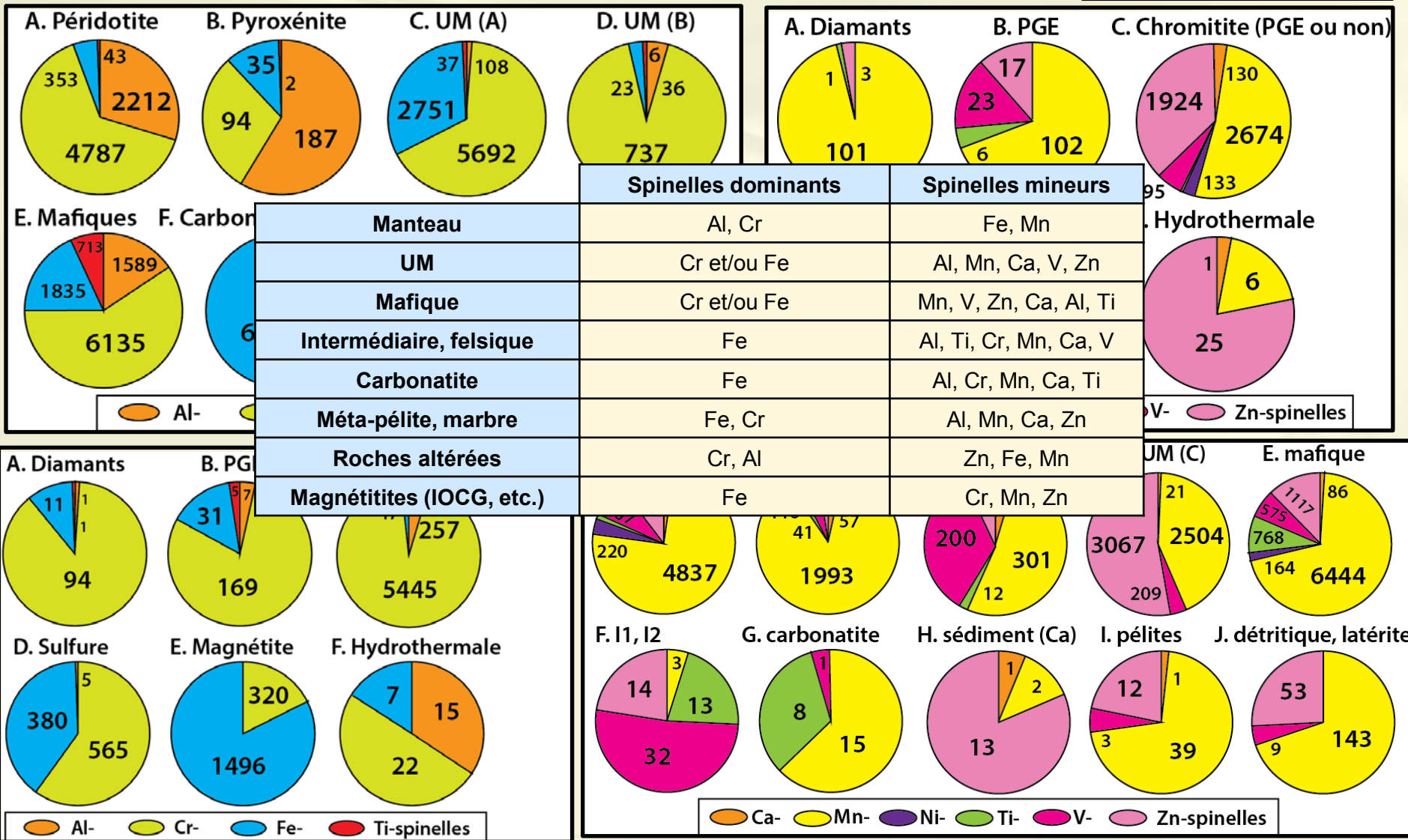
Al-spinelles
Fe-spinelles
Cr-spinelles

- spinel
- galaxite
- hercynite
- gahnite
- dmitryivanovite
- chrysoberyl
- taaffeiteMG
- taaffeiteFE
- magnésioferrite
- jacobsite
- magnetite
- franklinite
- trevorite
- cuprospinel
- chromiteMG
- chromiteMN
- zincchromite
- nichromite
- cochromite
- chromite
- hausmannite
- hetaerolite
- hetaeroliteH
- marokite
- iwakiite
- filipstadite
- vuorelainenite
- coulsonite
- coulsoniteMG
- qandilite
- ulvospinel
- kusachiite
- minium
- yafsoanite

Spinelle - XY_2O_4

Phases principales

Phases mineures

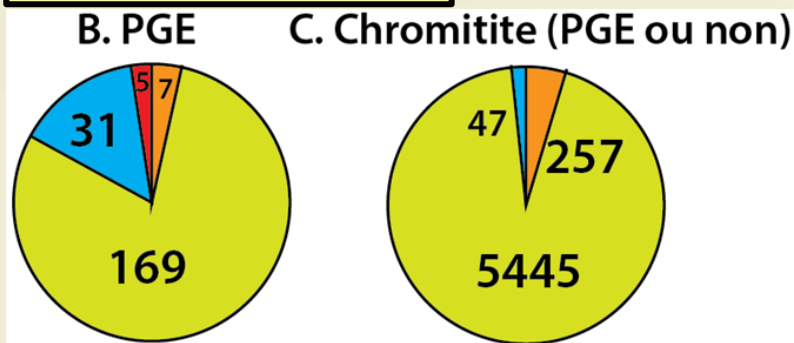


Spinelle – XY_2O_4

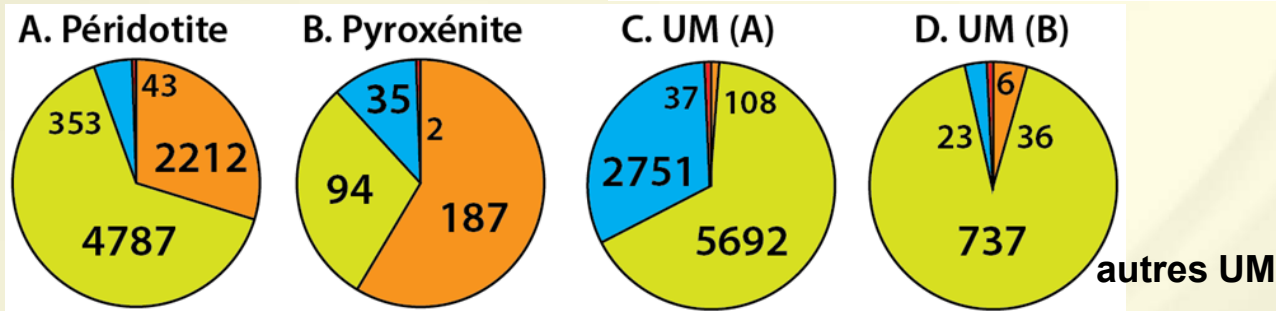
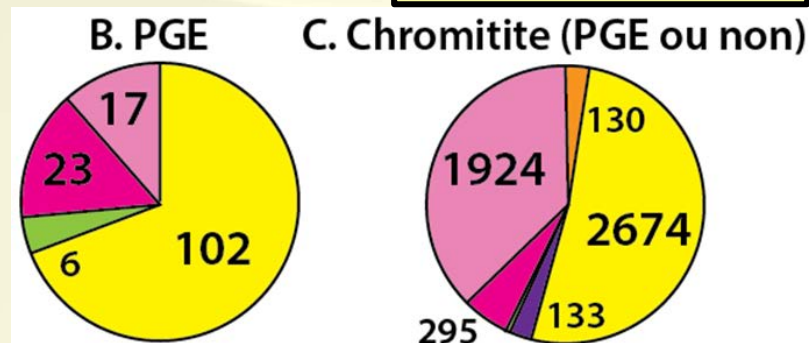
Classification : faits saillants

- Gîte de **Ni-Cu-ÉGP**, **diamants**, **gisement de Cr (ophiolites)**: rechercher des roches UM (manteau ou magma de la croûte).

Phases principales



Phases mineures



Lamprophyres + komatiites

Al- Cr- Fe- Ti-spinelles

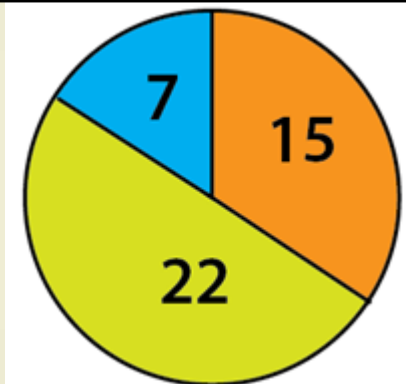
Ca- Mn- Ni- Ti- V- Zn-spinelles

Spinelle – XY_2O_4

Classification : faits saillants

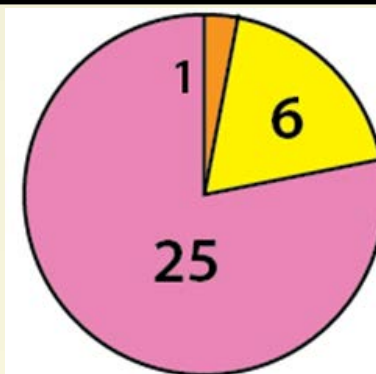
- **Roches altérées**: se distinguent par leurs richesses en Al-spinelle, qui est très rare dans la croûte, et par une surabondance de Zn-spinelles.

Phases principales



Les péridotites présentent un signal similaire.

Phases mineures



Certaines roches sédimentaires riches en Ca présentent un signal similaire.



Les autres MI documentés

Minéraux	Fiche	Analyses compilées (n données)	
		GEOROC	autres sources
Au (cf. projet 2011-05)	non	0	0
PGM	non	0	0
Topaze	non	0	3
Scheelite, etc.	non	0	0
Sulfures	non	2424	0
Oxydes simples (AX ₂) : quartz, cassitérite, rutile, wolframite, etc.	oui	1612	0
Tourmaline	oui	0	1300
Épidote	oui	0	119
Grenat	oui	4975	2088
Pyroxène	oui	50793	481
Olivine	oui	52325	66
Spinelle	oui (x4)	21061	28152
Apatite	oui	916	326
Zircon	oui	23256	119
Titanite (= sphène)	oui	517	63
Oxydes simples (A ₂ X ₃) : ilménite, corindon (saphir, rubis), hématite, pérovskite	oui	4266	118
Monazite, xénotime	oui	0	184
Staurotide, aluminosilicates	oui	0	109
Diaspore, goéthite, etc.	non	0	0
Chloritoïde	non	0	41
Axinite	non	0	0
Pyrochlore	non	0	0
Barite, etc.	non	0	28
Högbomite	non	0	0

Résumé

- Les zones minéralisées sont très rarement les seuls médias dans lesquels un MI peu cristalliser (cf. ceci est plus ou moins le cas seulement pour les PGM ou pour l'or par exemple).
- Ainsi, reconnaître un groupe minéral est insuffisant. Reconnaître l'espèce minérale apporte plus d'informations, mais n'est pas forcément toujours satisfaisant. L'analyse chimique semble être un incontournable pour la majeure partie des MI.
- Associer un MI avec un type de minéralisation: complexe (sauf, dans une certaine mesure, pour les kimberlites), demande l'utilisation de classifications complexes qui pourront être utilisées uniquement si l'échantillon est analysé avec **suffisamment de détails**.

Sommaire

1. Éléments de réflexion
2. Problématique
3. Méthodologie
4. Classification des MI
- 5. Recommandation et conclusions**

Analyse des échantillons de MI (cf. fraction 0.25-2 mm)



« hand-picking »



Analyses chimique

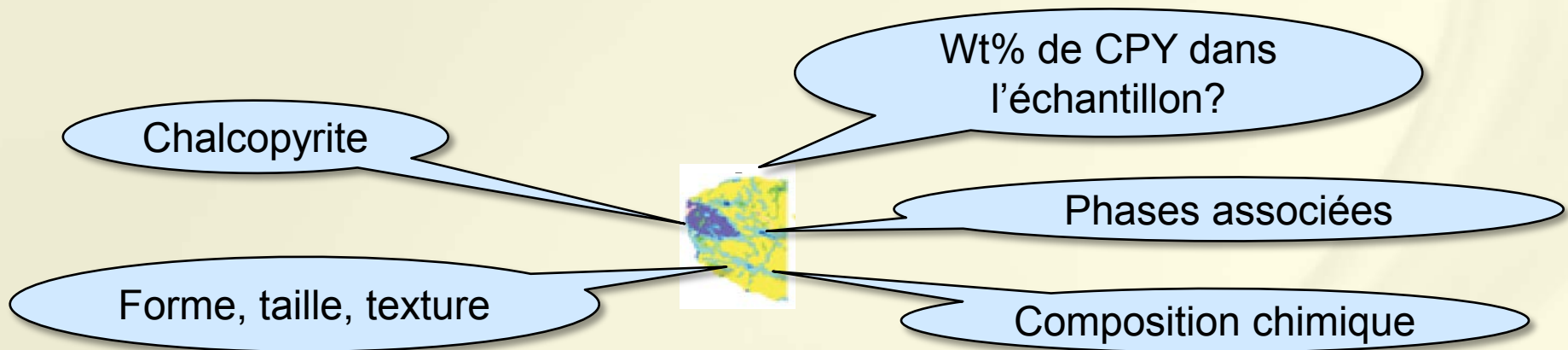
- Séparation selon les propriétés physiques (densité, etc.)
- **CHOIX** : ne reconnaître que les KIM, ou autres
- Séparation visuelle (reconnaissance des espèces/groupes minéraux) – collecte de 0 à <10 grains par espèces souvent (rarement 1 000s).
- **CHOIX** : recherche des grenats G10D par exemple
- Analyse chimique de quelques grains

Quantité de grains insuffisante : impossible d'utiliser les classifications proposées.

Ne collecter que des KIM en négligeant le reste de l'échantillon, c'est comme essayer de caractériser la chimie d'un gabbro en analysant les enstatites au lieu d'effectuer une analyse « roche totale ».

Recommandation : utiliser d'autres méthodes d'analyse

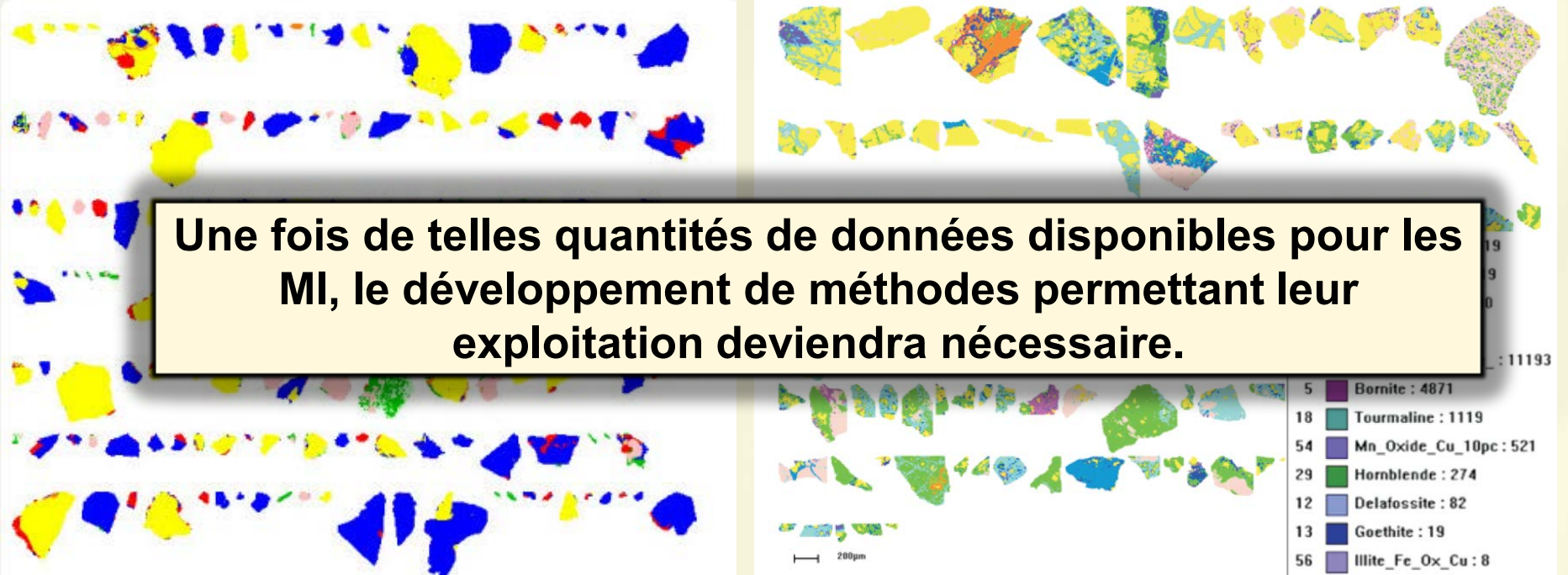
- **But:** Analyser un plus grand nombre de grains et collecter plus d'informations pour chaque grain.
- **L'innovation des nouveaux appareils:** intégrer une série d'analyseurs pour extraire un maximum d'informations de l'échantillon. Ces analyses sont ensuite « traduites » par des logiciels intégrés.
 - **QEMSCAN** (Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscopy) : SEM* + EDSs* + logiciel - compagnie FEI
 - **MLA** (Mineral Liberation Analyser) : idem, logiciel différent - compagnie FEI
 - **RIMSCAN** (Rapid Indicator Mineral Scan) - compagnie SGS (QEMSCAN)



*SEM : Scanning Electron Microscopy; EDS: Energy Dispersive x-ray Spectroscopy

Conclusions

- **KIM:** méthodes connues, bonnes performances parce que ce que l'on recherche contraste énormément avec la composition du reste de la croûte.
- Pour les autres gisements: le signal est plus subtil, il nécessite l'utilisation de classifications plus complexes des minéraux, qui ne seront opérationnelles que lorsque l'on disposera d'une documentation performante des échantillons.
- Recommandation: améliorer la mesure des échantillons.



Une fois de telles quantités de données disponibles pour les MI, le développement de méthodes permettant leur exploitation deviendra nécessaire.

Images: sites internet des compagnies Actlab, ALS minerals, FEI

Merci de votre attention