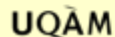
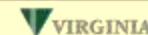
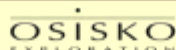


Projet 2012-03

Exploration des gîtes magmatiques cuprifères dans la Province de Grenville

11 novembre 2013, Québec

Lucie Mathieu, Ph.D.



- **Origine du projet**

- Les gisements magmatiques sont plutôt exploités pour le Ni et les PGE, et ces gîtes sont abondamment documentés.
- Le pôle Cu est moins documenté, et le Cu est très rarement la substance principale.
- Projet: Quels facteurs permettent l'enrichissement en Cu?

Sulfures massifs magmatiques – Ni-Cu-(PGE)

Oxydes (chromite, ...) – PGE-(Ni-Cu)

Sommaire

1. Introduction
2. Outil géochimique, méthodes I et II
3. AMCG de Grenville, description et application des guides d'exploration
4. Conclusions

1. Introduction

- **Sulfures massifs magmatiques - définition**

- Gisements formés par des processus magmatiques.
- Gisements assez rares, mais pouvant avoir une grande valeur.
- Surtout exploités pour le Ni et les PGE.

- **Guide d'exploration, un défi**

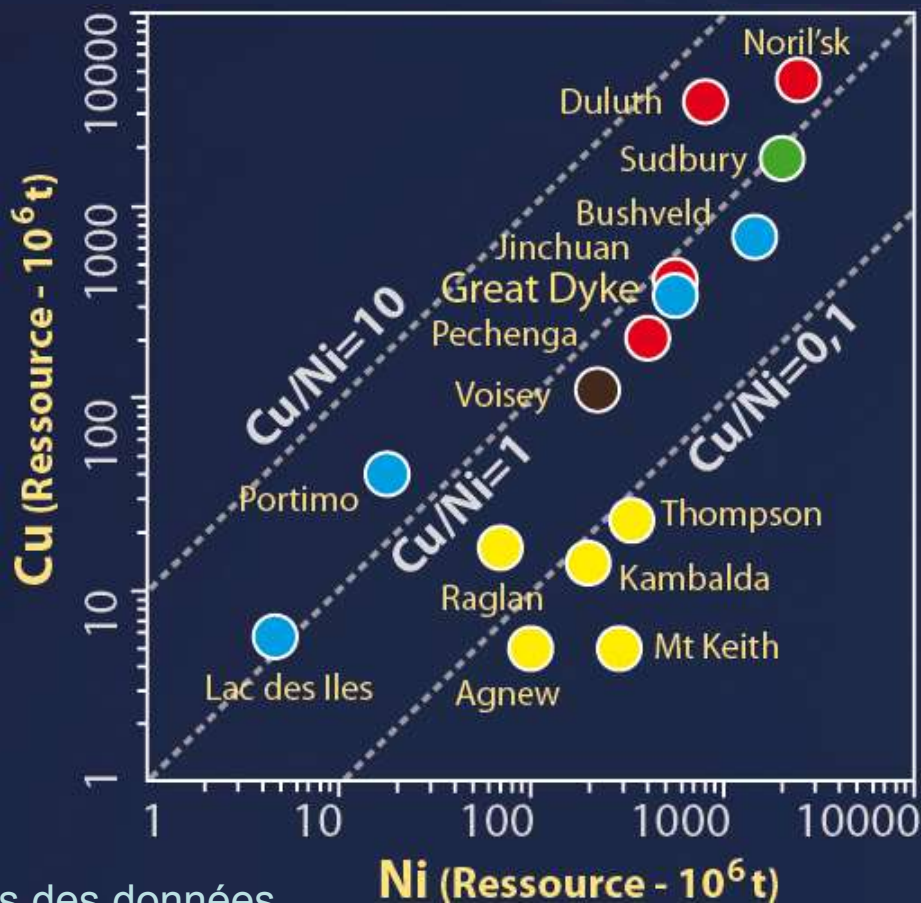
- Contrairement aux gisements hydrothermaux, aucun halo d'altération ne peut-être utilisé.
- La seule entité utilisable qui soit plus volumineuse que le gisement est l'intrusion magmatique – comment s'en servir?

- **But du projet**

- Documenter les facteurs permettant l'enrichissement en Cu.
- Géochimie: Rehausser les anomalies en Cu-Ni à partir d'analyses « roche totale » d'intrusions magmatiques.

1. Introduction

- Composition des gîtes magmatiques Ni-Cu-PGE



● Gites riches en PGE

● Komatiites

● Basaltes de Plateau

● AMCG

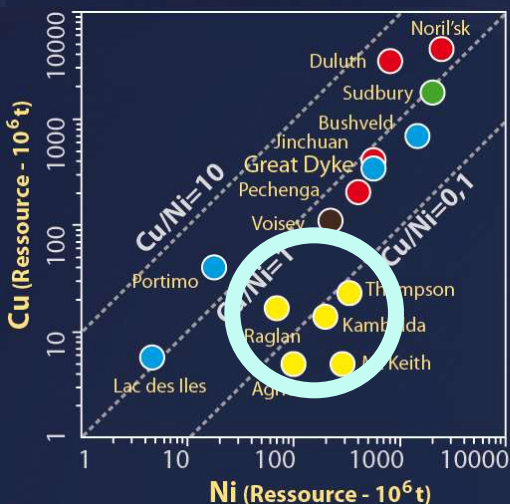
● Sudbury

- Sudbury: particulier

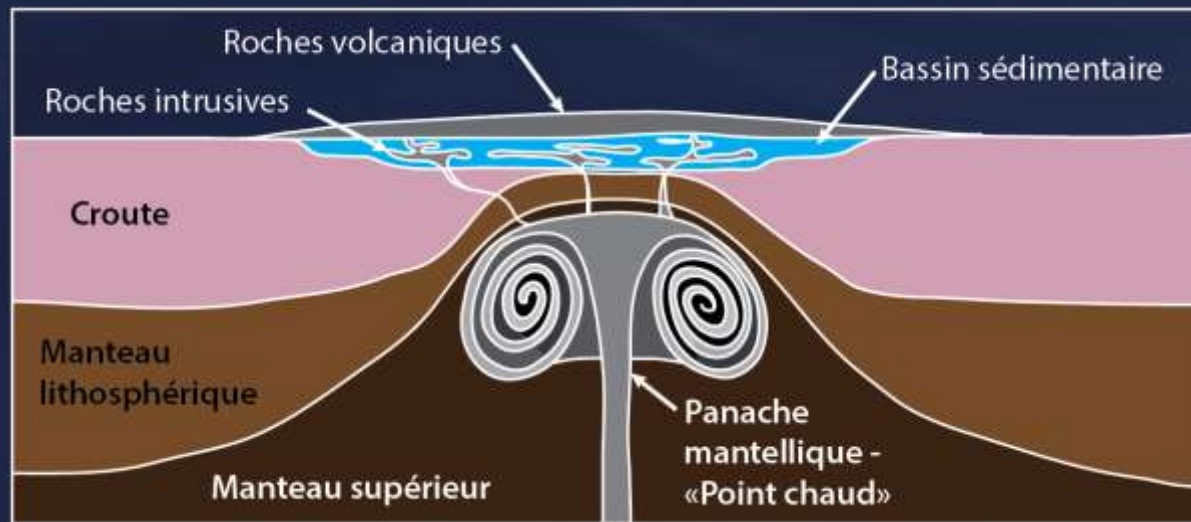
- PGE: pauvres en (Ni)-Cu

(D'après des données de Naldrett 2004)

1. Introduction



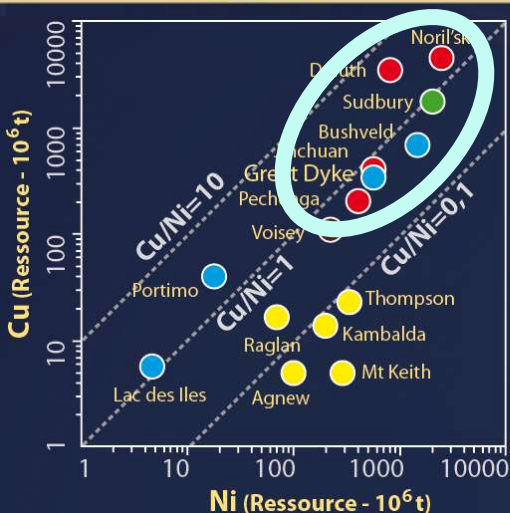
- Gites riches en PGE
- Komatiites
- Basaltes de Plateau
- AMCG
- Sudbury



Cu/Ni << 1

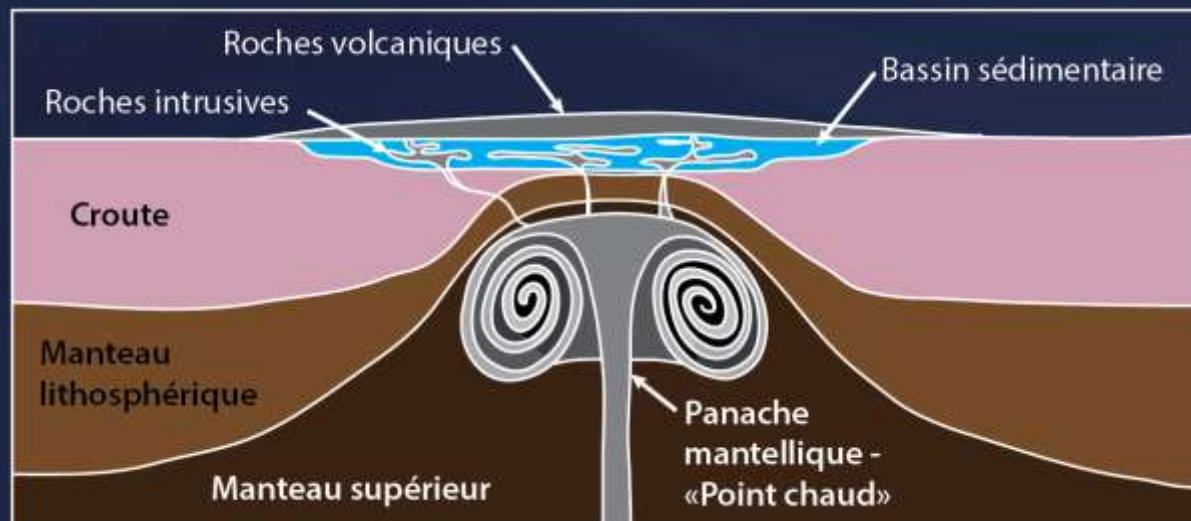
- Magmatisme de type Point Chaud (ou arrière-arc?)
 - Important volume de magma mafique
 - Remontée facile du magma, dans un contexte d'extension crustale
 - En contact avec une grande quantité de sédiments
- Komatiites
 - Degré extrême de fusion partielle (fonte des olivines et libération d'un maximum de Ni – dilution du Cu)
 - Magmas primitifs

1. Introduction



Cu/Ni ~ 1

- Gites riches en PGE
- Komatiites
- Basaltes de Plateau
- AMCG
- Sudbury

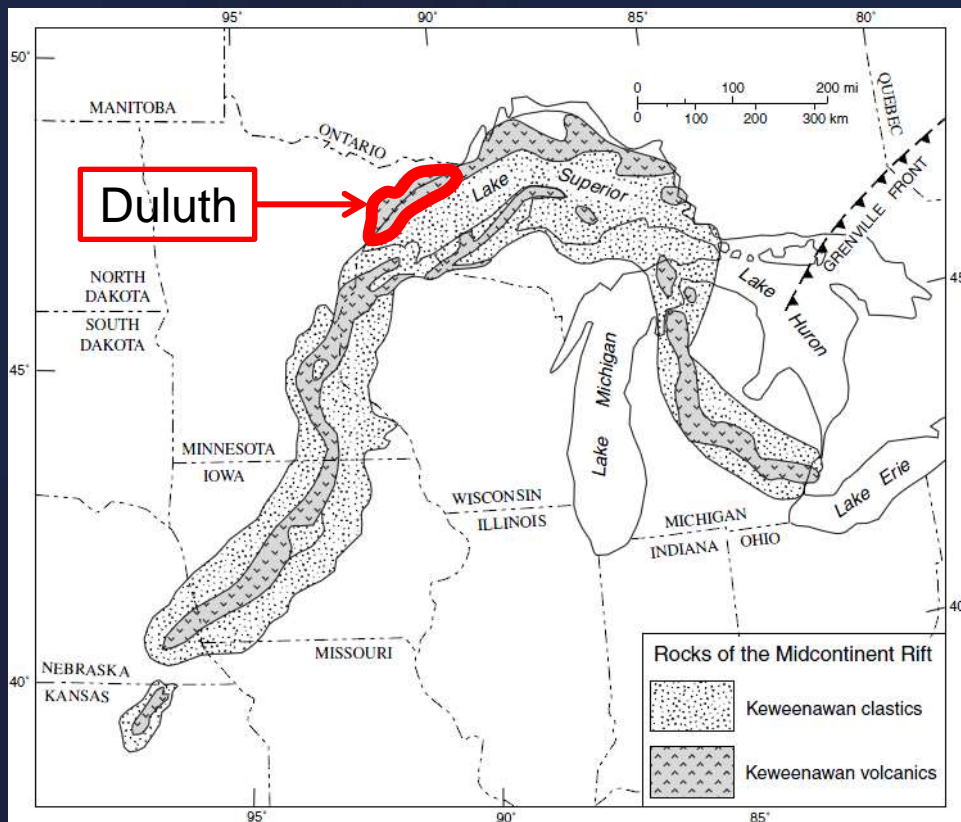


- Magmatisme de type Point Chaud (ou arrière-arc?)
 - Important volume de magma mafique
 - Remontée facile du magma, dans un contexte d'extension crustale
 - En contact avec une grande quantité de sédiments
- Basaltes de Plateau
 - Degré de fusion partielle d'environ 10-20% (fonte des alliages et du soufre – enrichissement maximum du magma en Cu).
 - Magmas évolués (?)

1. Introduction

• « Point Chaud »

- Gisements avec Cu/Ni $\ll 1$ (cf. komatiites – Cape-Smith)
- Gisements avec Cu/Ni ~ 1 (cf. basaltes de plateau – Noril'sk)
- Rares gisements avec Cu/Ni $\gg 1$ (cf. Duluth)

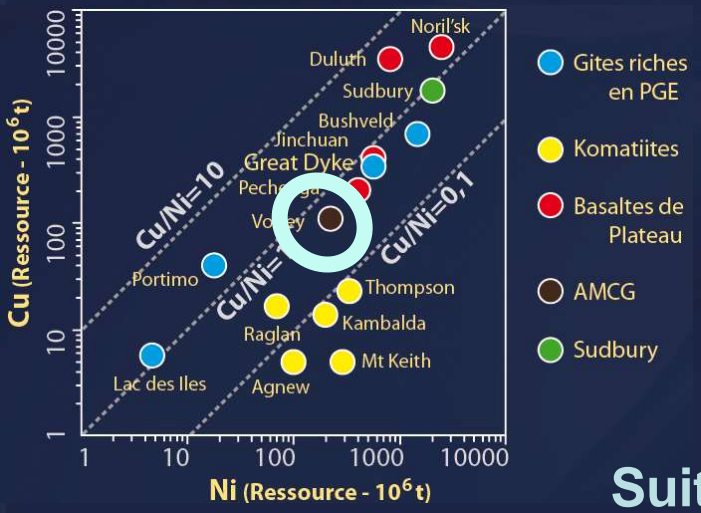


- Babbitt : 4,5 Mt @ 1,9% Cu, 0,6% Ni
- Dunka road, NorthMet, Wetlegs, etc.
- Total: 4 Gt @ 0,6% Cu et 0,2% Ni (Severson et al. 2002)

Midcontinent Rift
(Ojakangas et al. 2001)

1. Introduction

- Suites AMCG (Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite)



Cu/Ni ~ 1

Suite du Nain

• Intrusions de Voisey's Bay

- roches mafiques / magma primitif ?
- contamination par des roches méta-sédimentaires
- conduit (dyke)
- 21,8 Mt @ 2,5% Ni, 1,38% Cu, 0,12% Co (31 décembre 2012)

Cu/Ni ~ 1



(Kerr 1999)

Teneur versus Taille



- Les avantages d'une bonne tuyauterie:
 - Gisement de petite taille et haute teneur
 - Conduits = sills, coulées de lave (chenaux), dykes

- Mais on peut faire sans:
 - Duluth, faible teneur mais très gros volume
 - Absence de mécanisme permettant de concentrer les sulfures?

1. Introduction

- **En résumé, ingrédients pour les sulfures massifs magmatiques:**
 - Magma riche en métaux - contamination - collecte des métaux - collecte des gouttelettes de liquide sulfuré.
- **Les paramètres favorables pour le pôle Cu pourraient être:**
 - Degré de fusion partielle relativement élevé
 - Magma évolué/différencié, mais encore mafique
 - Caractéristiques qui se retrouvent dans les « points chauds » et les AMCG.
- **Zone choisie pour l'étude:**
 - AMCG de Grenville

AMCG – suite d'Anorthosite-Mangérite-Charnockite-Granite

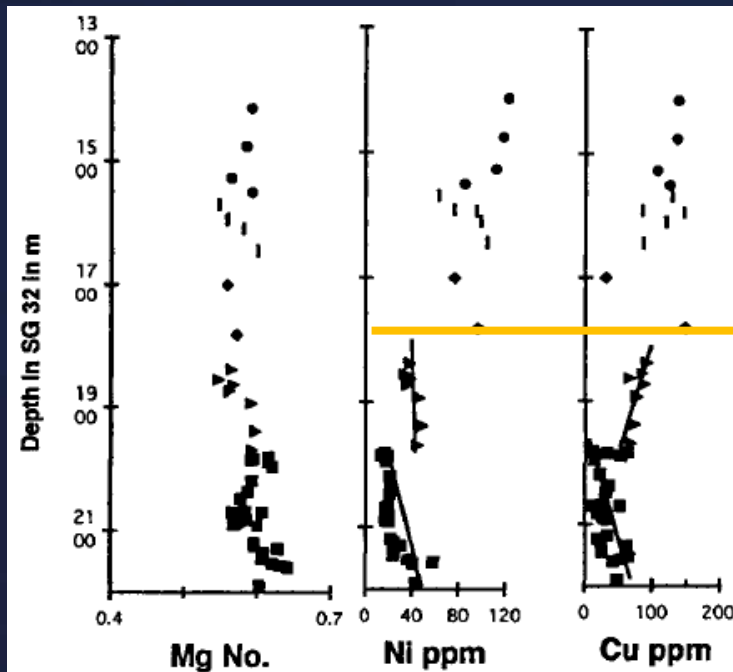
Sommaire

1. Introduction
2. Outil géochimique, méthodes I et II
3. AMCG de Grenville, description et application des guides d'exploration
4. Conclusions

2. Outil géochimique, méthode I et II

- **Guides d'exploration couramment utilisés:**

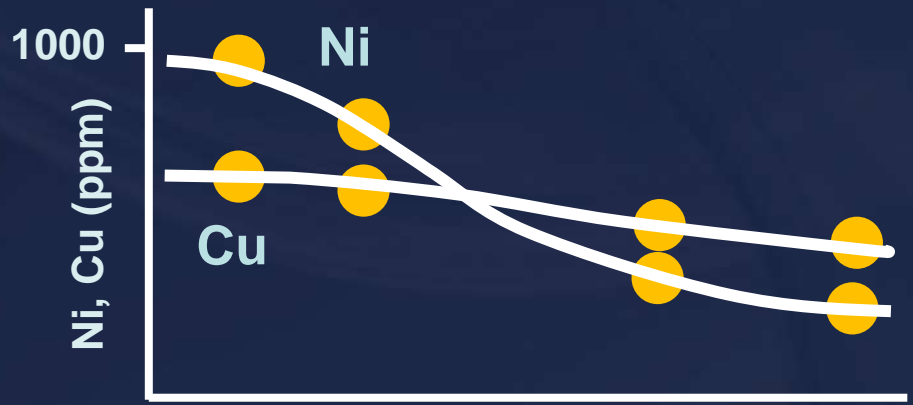
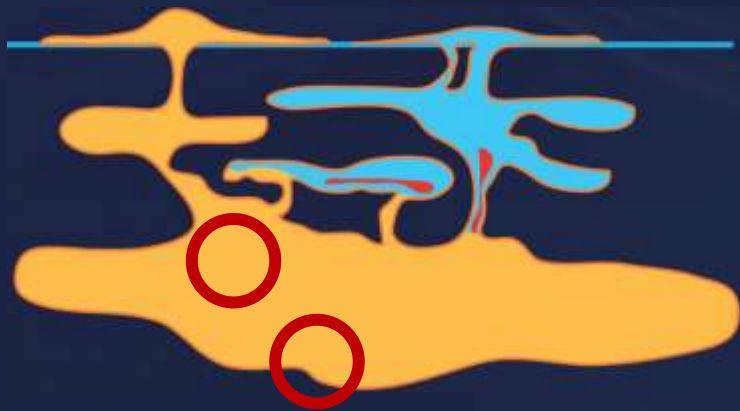
- Contextes géodynamiques fertiles (attention, souvenons-nous de Voisey's Bay et de Lac des Îles).
- Roches mafiques à ultra-mafiques (roches à olivines, et les autres?)
- Géophysique (sulfures massifs, et les disséminés?)
- Géochimie – recherche des magmas les plus riches en métaux



Sommet des coulées de laves:
concentrations normales en Ni-Cu

Base des coulées de laves:
concentrations faibles en Ni-Cu
(perte de 75 % de leurs Cu-Ni et
de 90% de leurs PGE)

2. Outil géochimique, méthode I et II

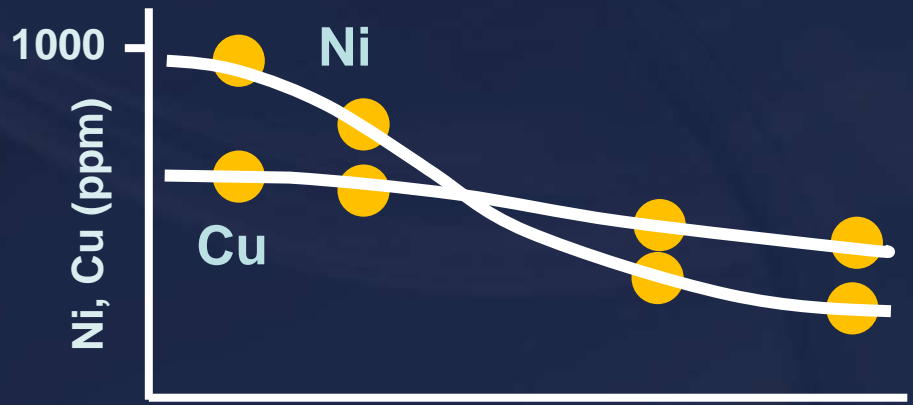


Série magmatique différenciée par CF

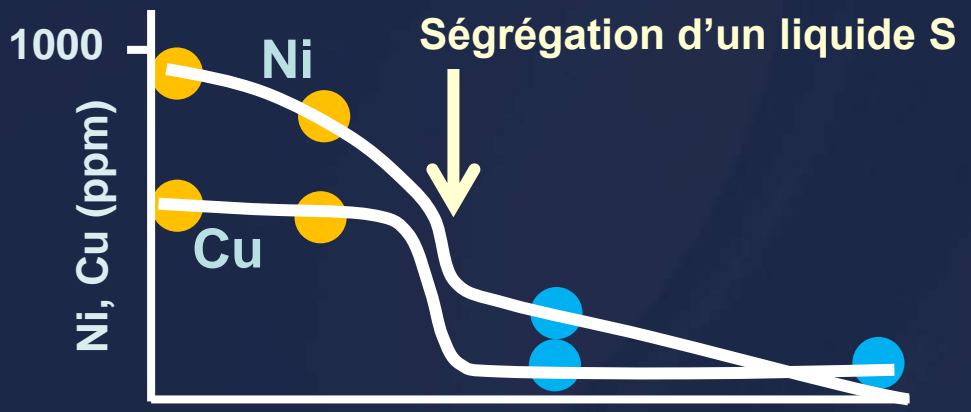


Série magmatique différenciée par CF

2. Outil géochimique, méthode I et II



Série magmatique différenciée par CF



Série magmatique différenciée par CF

2. Outil géochimique, méthode I et II

- **Méthode:** comparer les échantillons étudiés à des **standards** pour identifier les concentrations anormalement hautes et basses en Ni-Cu.
- **Méthode I:** standard = modèle (cristallisation à l'équilibre)
- **Méthode II:** standard = GEOROC (échantillons de la littérature)
- **Méthode I:** non-décrite en détail ici (cf. rapport 2012-03)
 - Résultat: prometteur, mais difficile à appliquer sur roche totale
 - Recommandation: analyser des minéraux (olivine, pyroxène)

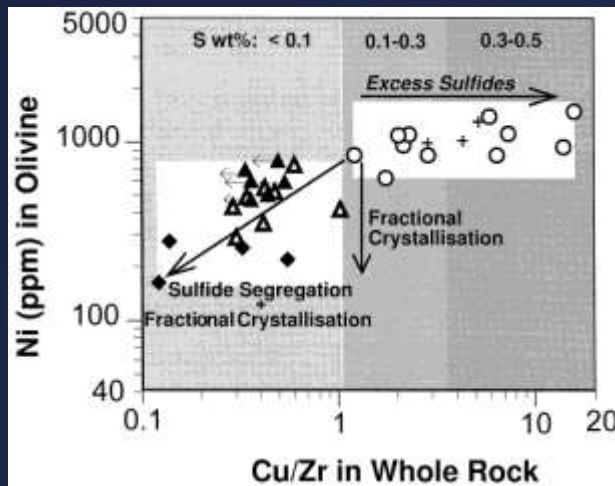


Figure présentant la composition d'olivines situées à proximité du gisement de Voisey's Bay (Li et Naldrett 1999)

2. Outil géochimique, méthode I et II

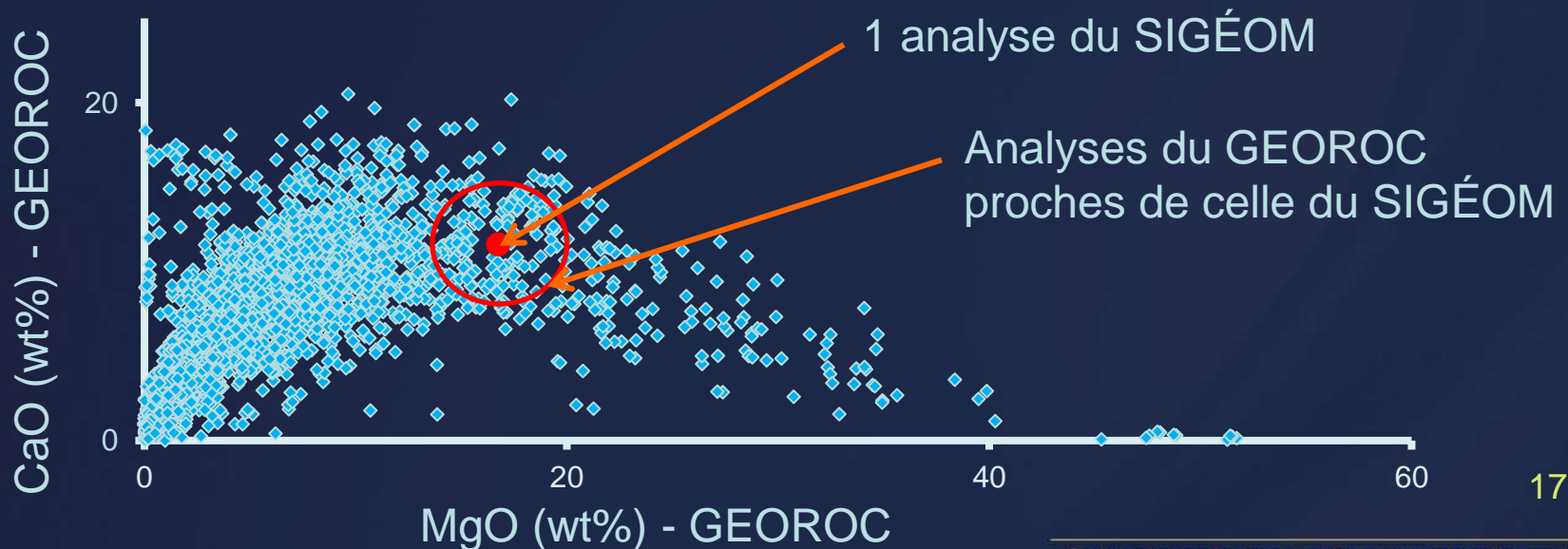
- But: détecter les concentrations anormalement élevées et basses en Ni et Cu des analyses faites sur roche totale
- **Méthode II:** comparer les données du SIGÉOM (cf. analyses de roches des suites AMCG) à des données standards (cf. intrusifs du GEOROC)
- Opérations sur les données du SIGÉOM et du GEOROC (cf. rapport 2012-03)
- Élimination des valeurs anomales en Ni-Cu du GEOROC (cf. rapport 2012-03)
- Contrôles de qualité (cf. rapport 2012-03)
- Comparer le SIGÉOM au GEOROC avec les concentrations en éléments majeurs (test 1) et les proportions de minéraux normatifs-CIPW (test 2)
- SIGÉOM (n= 1709) et GEOROC (n= 4645)

2. Outil géochimique, méthode I et II

- **Test 1:** comparer le SIGÉOM au GEOROC avec les oxydes principaux
- **But:** Identifier les 20 analyses du GEOROC dont la composition en majeurs est la plus proche de celle de l'analyse SIGÉOM considérée.
- **Méthode:** distance Euclidienne entre les analyses (cf. algorithme KNN).

$$\text{Distance}^2 = \sum_{n=1}^{10} (X_{\text{SIGÉOM}} - X_{\text{GEOROC}})^2$$

- Les 20 analyses ainsi identifiées ont été moyennées (calcul de Ni_{GEOROC} et de Cu_{GEOROC})



2. Outil géochimique, méthode I et II

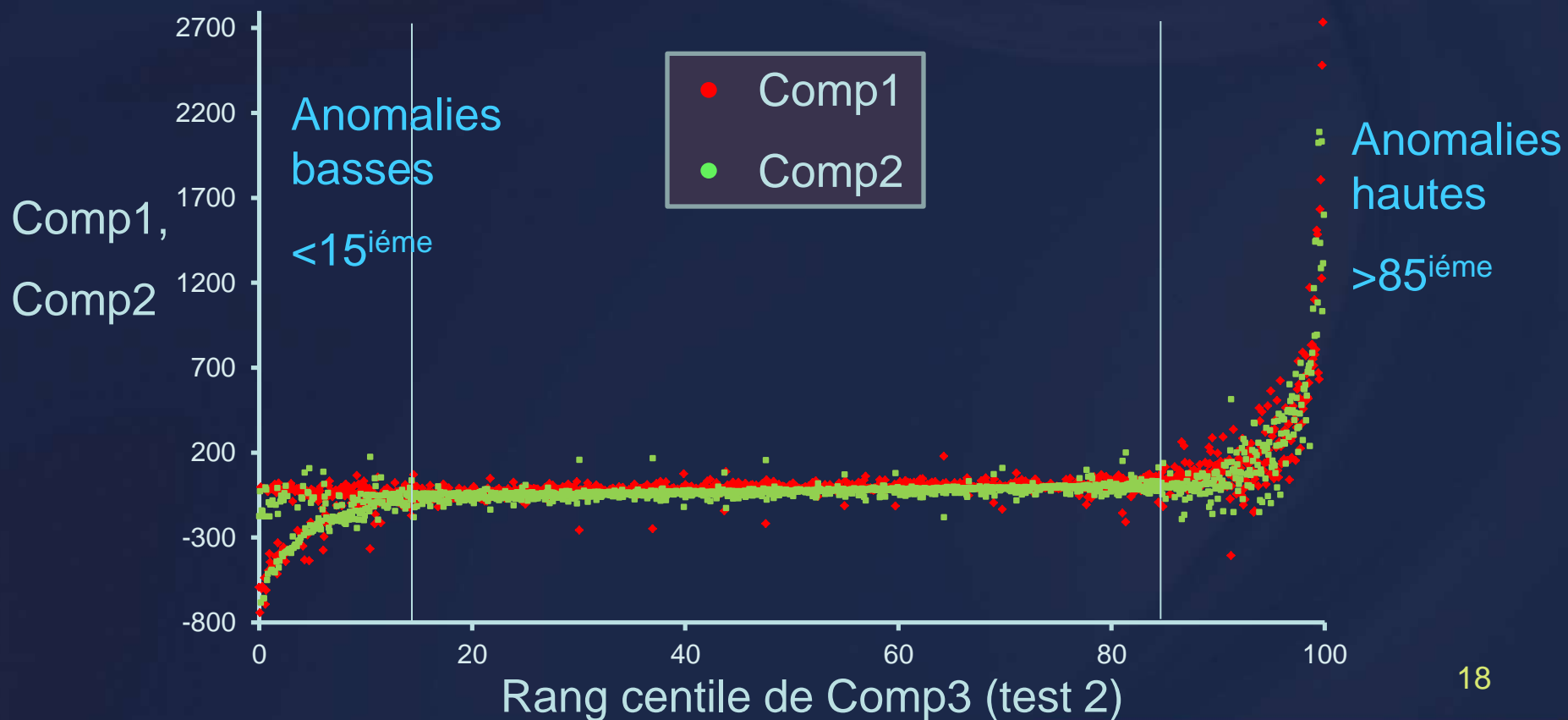
- Résultats:

$$\text{Comp1} = \text{Ni}_{\text{SIGÉOM}} - \text{Ni}_{\text{GEOROC}}$$

$$\text{Comp2} = \text{Cu}_{\text{SIGÉOM}} - \text{Cu}_{\text{GEOROC}}$$

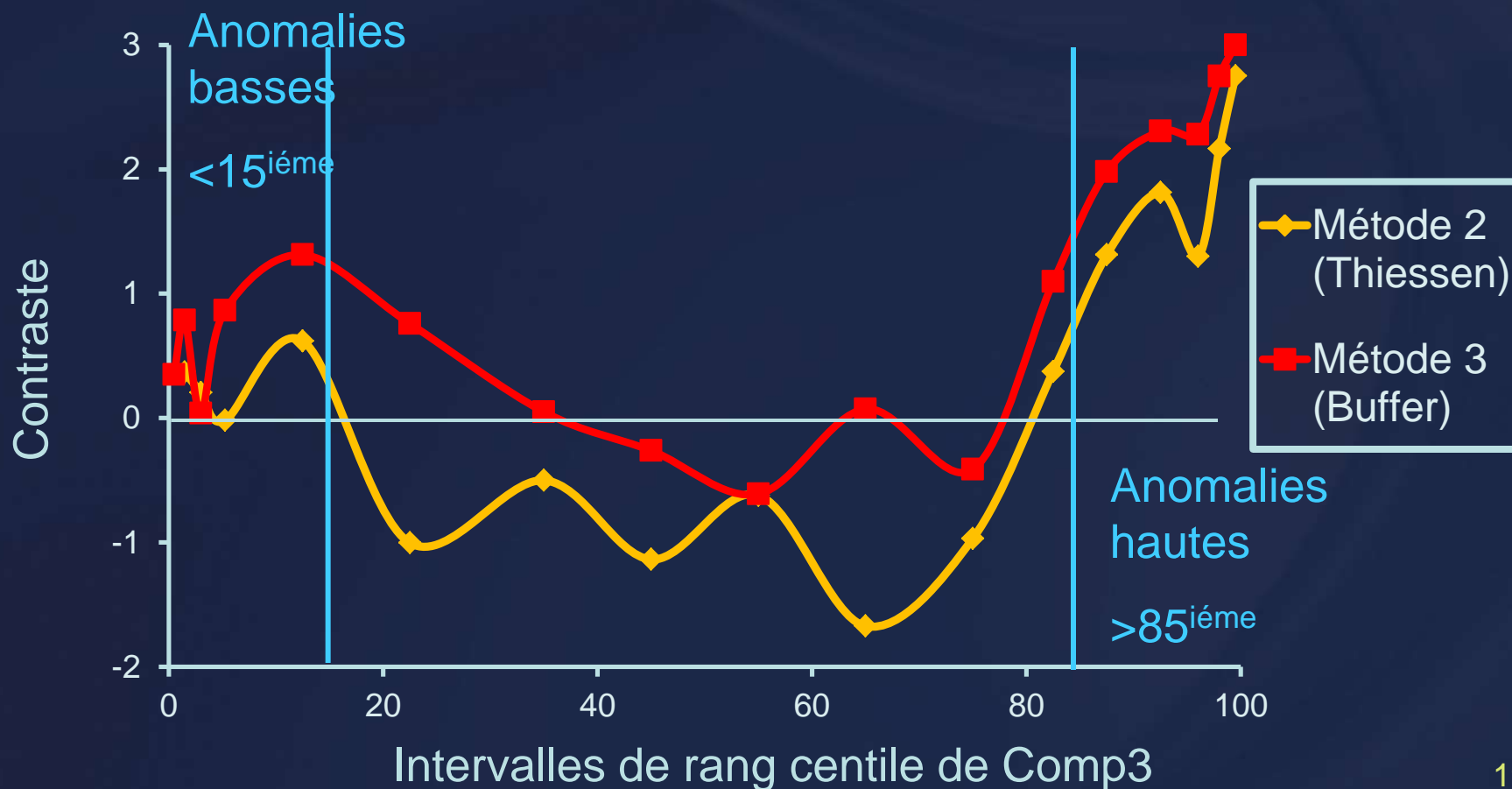
} Résiduelles

$$\text{Comp3} = ((\text{Comp1} - \text{moyenne})/\text{écart type}) + ((\text{Comp2} - \text{moyenne})/\text{écart type})$$



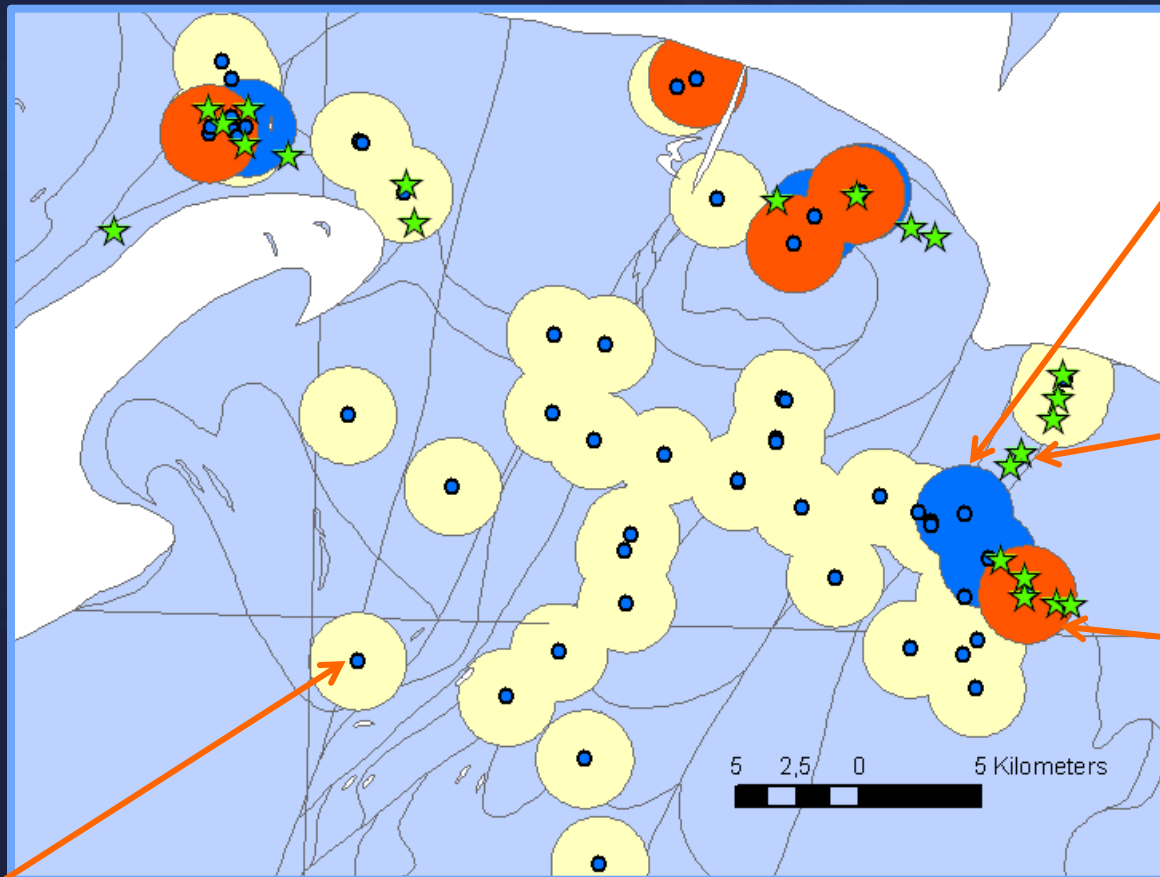
2. Outil géochimique, méthode I et II

- Exploitations des résultats: calculs de contraste (cf. rapport 2012-03)
- Résultat: les anomalies hautes et basses sont proches des indices Ni-Cu



2. Outil géochimique, méthode I et II

- **Résultats:** Les indices sont très proches des anomalies hautes en Ni-Cu et assez proches des anomalies basses en Ni-Cu.



Anomalie basse entourée par un buffer de 2 km (< 10^{ième} centile)

Indice Ni-Cu

Anomalie haute entourée par un buffer de 2 km (> 80^{ième} centile)

Pas d'anomalie Ni-Cu

2. Outil géochimique, méthode I et II

- **Conclusions de la partie I**

- Rechercher les concentrations **HAUTES** et **BASSES** en Ni-Cu

Weakly mineralized variable troctolites of the Eastern Deeps are **Ni-, Cu-, and PGE-depleted** and formed from magmas that had either previously equilibrated with sulfide or from sources where the base and precious metal inventory was retained in the mantle source during melting.

Gîte de Voisey's Bay – Labrador (tiré de Lightfoot et al. 2012)

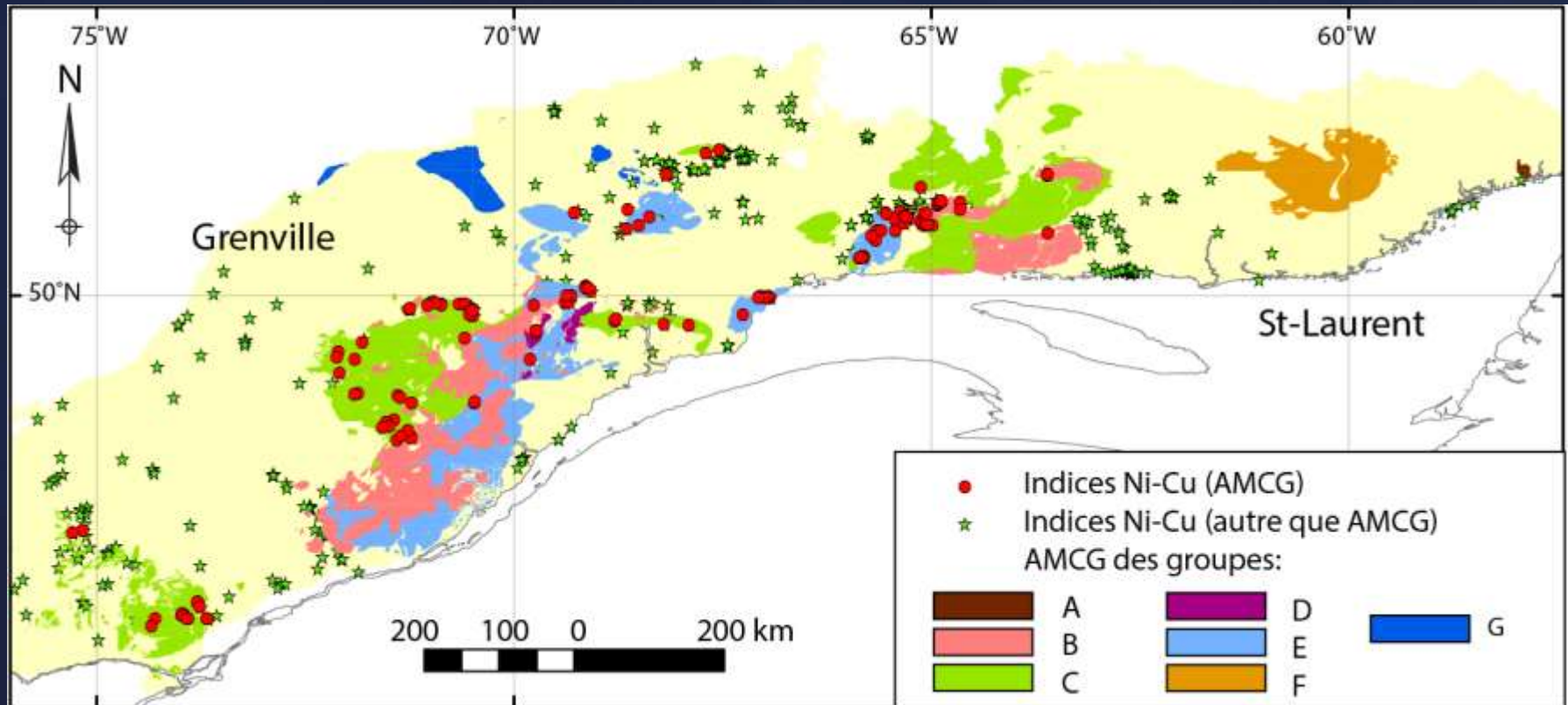
- **Méthode II:** le rehaussement des anomalies fonctionnent sur « roche totale ».
- **Méthode I:** l'idéal serait de cartographier les variations des concentrations en Ni-Cu (utilisation du XRF sur le terrain?).

Sommaire

1. Introduction
2. Outil géochimique, méthodes I et II
3. AMCG de Grenville, description et application des guides d'exploration
4. Conclusions

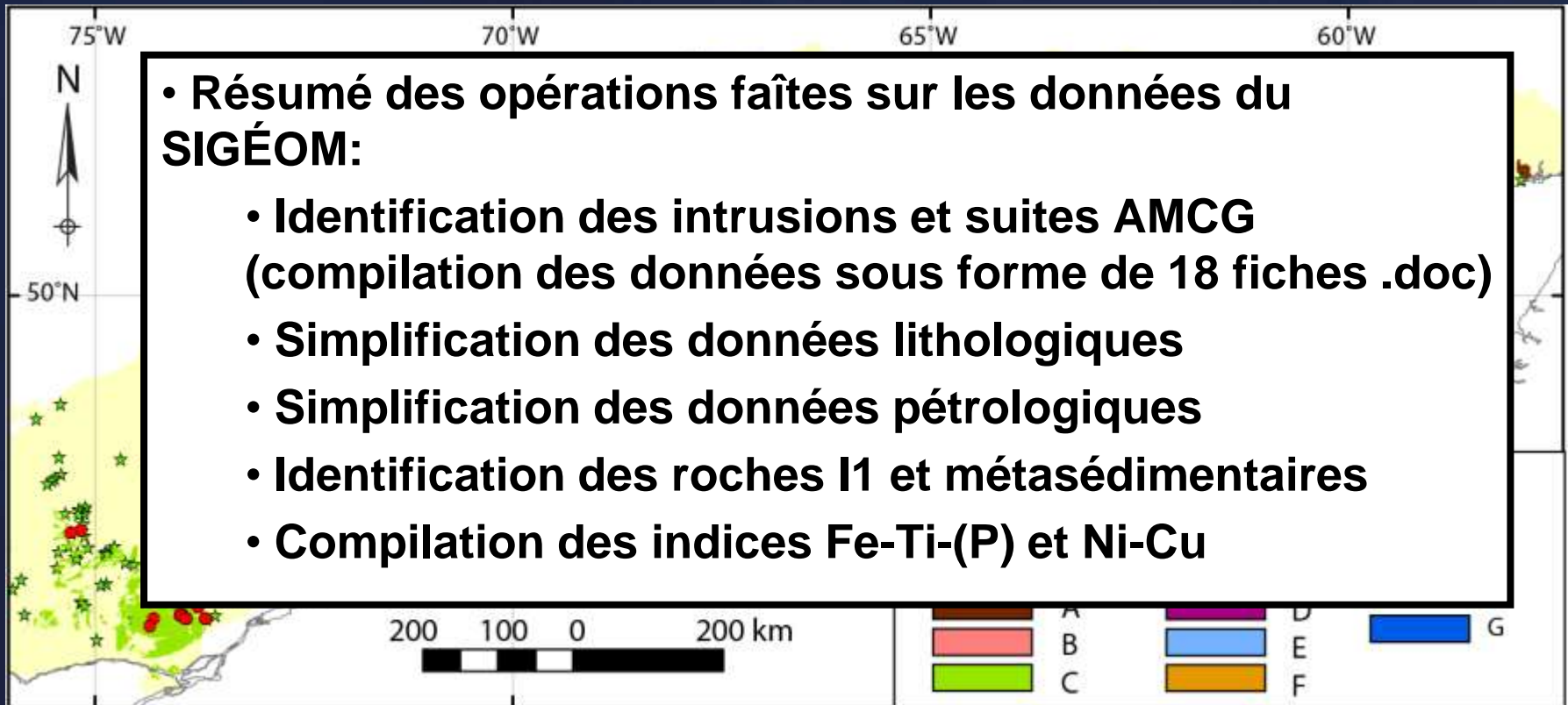
3. AMCG de Grenville

- **Partie I:** développement d'un outil géochimique
- **Partie II:** application de cet outil sur les AMCG de Grenville, et utilisation d'autres guides de prospection connus (lithologies, etc.)



3. AMCG de Grenville

- **Partie I:** développement d'un outil géochimique
- **Partie II:** application de cet outil sur les AMCG de Grenville, et utilisation d'autres guides de prospection connus (lithologies, etc.)



3. AMCG de Grenville

- **Paramètres explorés:**

- Géochimie (cf. partie I)
- Lithologie (carte du SIGÉOM)
- Relation avec la pétrologie (cf. affleurements de compilation)
- Relation avec les roches les plus mafiques (MgO wt%)
- Relation avec les indices Fe-Ti-(P)
- Relation avec les roches méta-sédimentaires et les roches felsiques de l'encaissant
- Relation avec la bordure des intrusions mafiques
- Relation avec les faciès de bordure cartographiés

**Position des
I3-I4**

Contaminant

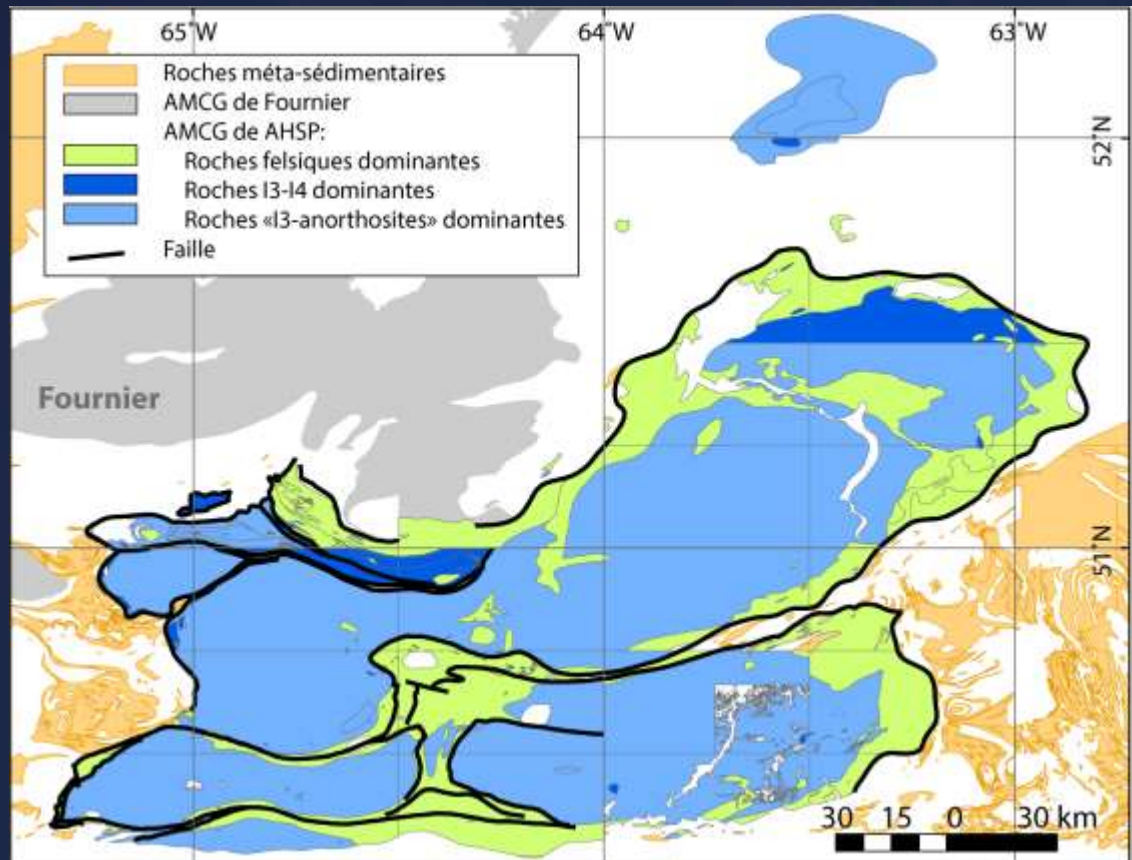
Bordures

3. AMCG de Grenville

- **Méthode:**

- Documentation (carte, littérature, rédaction de fiches sur les AMCG)
- Calculs de contraste

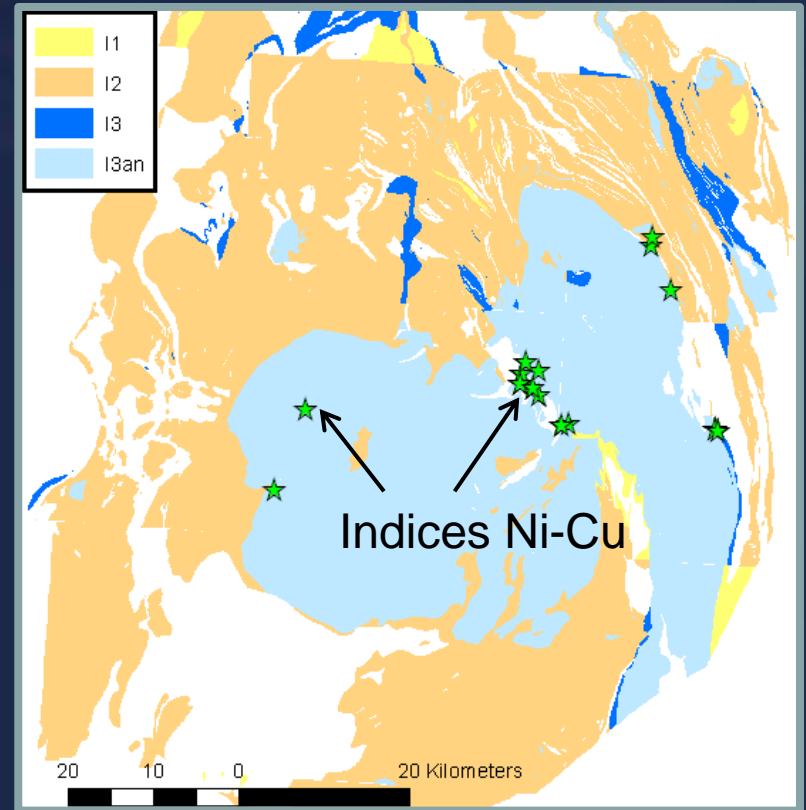
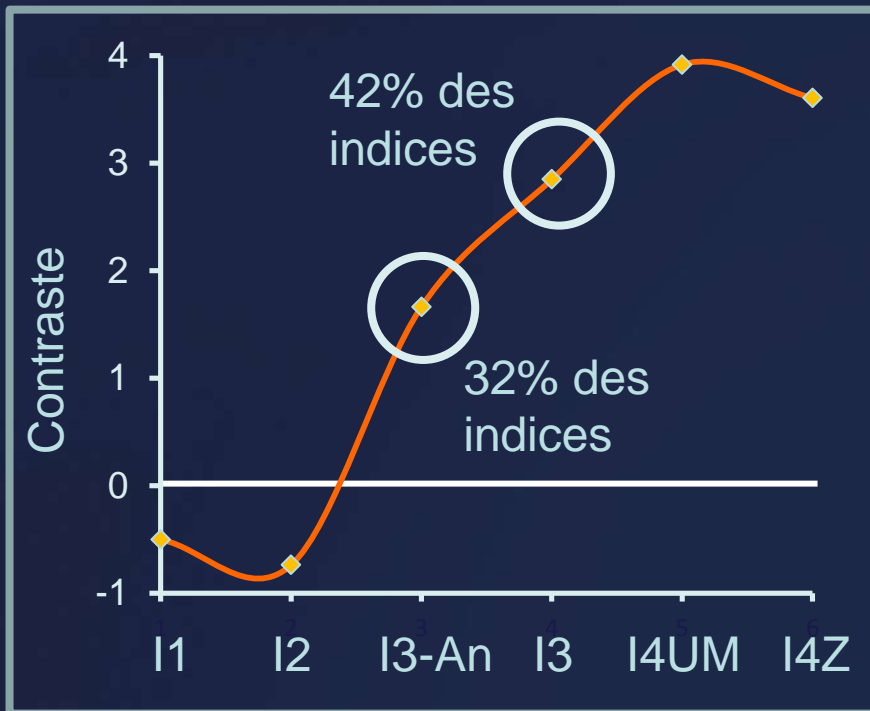
- **Exemple 1 - lithologie:**



Deux fiches rédigées sur l'AMCG de AHSP

3. AMCG de Grenville

- **Exemple 1** - Relation entre les indices Ni-Cu et la lithologie
- Les indices sont situés dans les roches mafiques et ultra-mafiques



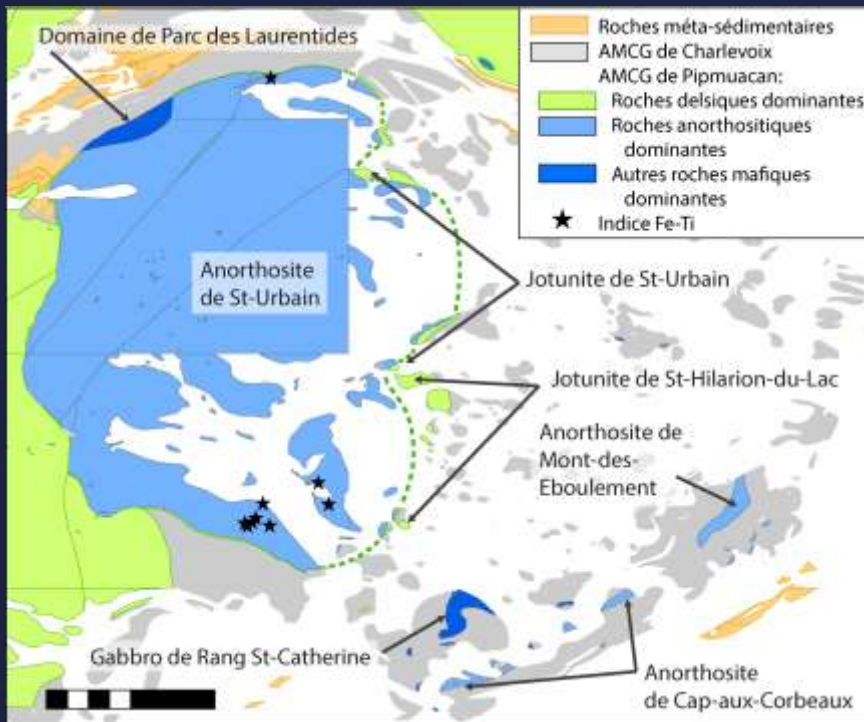
AMCG de Morin

Pour plus de détails sur les calculs de contraste: cf. rapport 2012-03

3. AMCG de Grenville

- **Exemple 2 - faciès de bordure:**

- Bordure figée? – non, pas d'après leur composition
- Magma résiduel ayant concentré des éléments incompatibles avec le plagioclase: Fe, P, Ti et, peut-être, Cu?

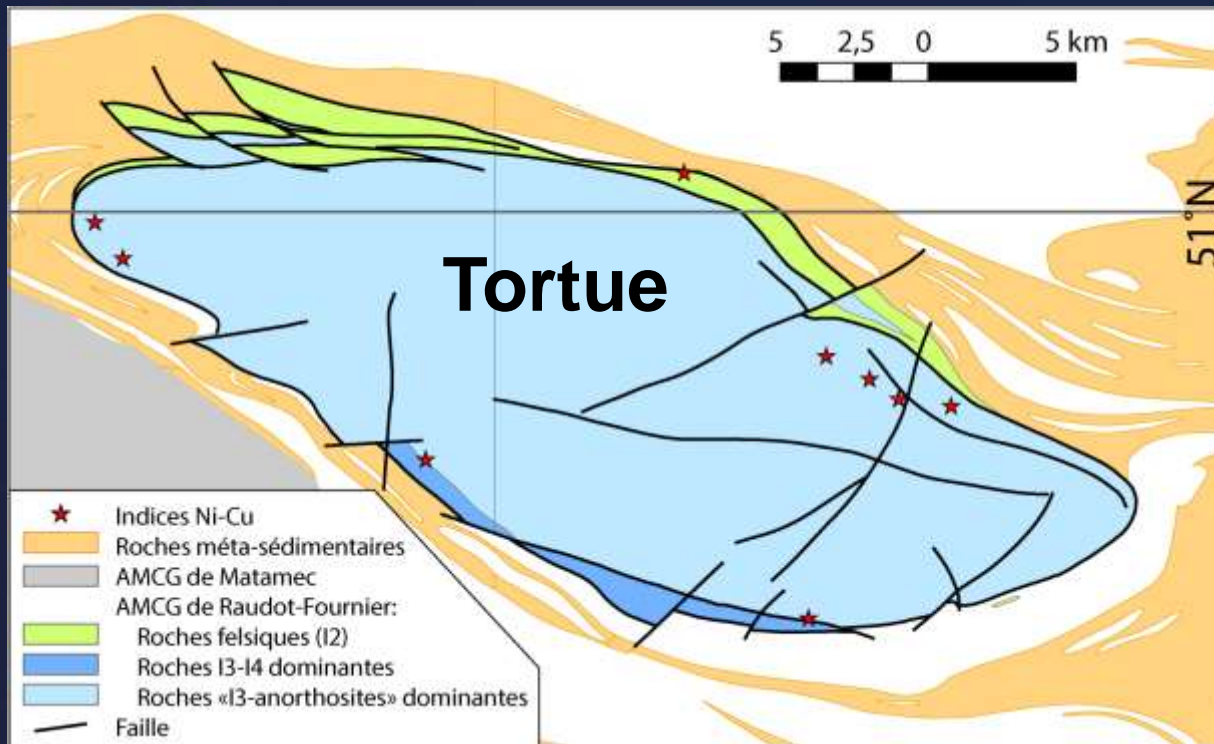


Jotunite: roches très pauvres en Ni-Cu – mais riches en Fe-P (Owens et al. 1993)

3. AMCG de Grenville

- **Exemple 2 - faciès de bordure:**

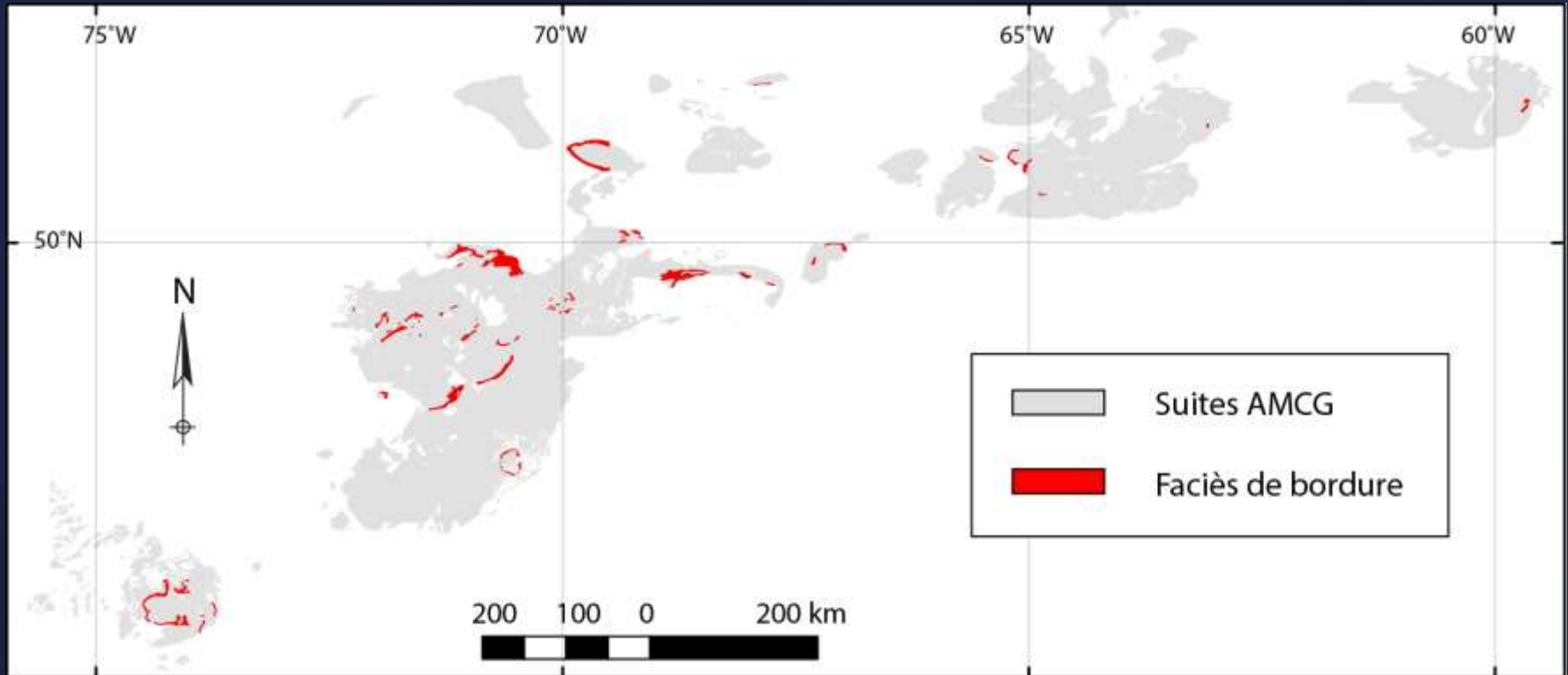
- Bordure figée? – non, pas d'après leur composition
- Magma résiduel ayant concentré des éléments incompatibles avec le plagioclase: Fe, P, Ti et, peut-être, Cu?



Roches 13-14:
meilleur potentiel
pour les
minéralisations
Cu-Ni

3. AMCG de Grenville

- Exemple 2 - faciès de bordure:
- Contraste = 3,37 (AMCG) ou 2,79 (roches mafiques)



3. AMCG de Grenville

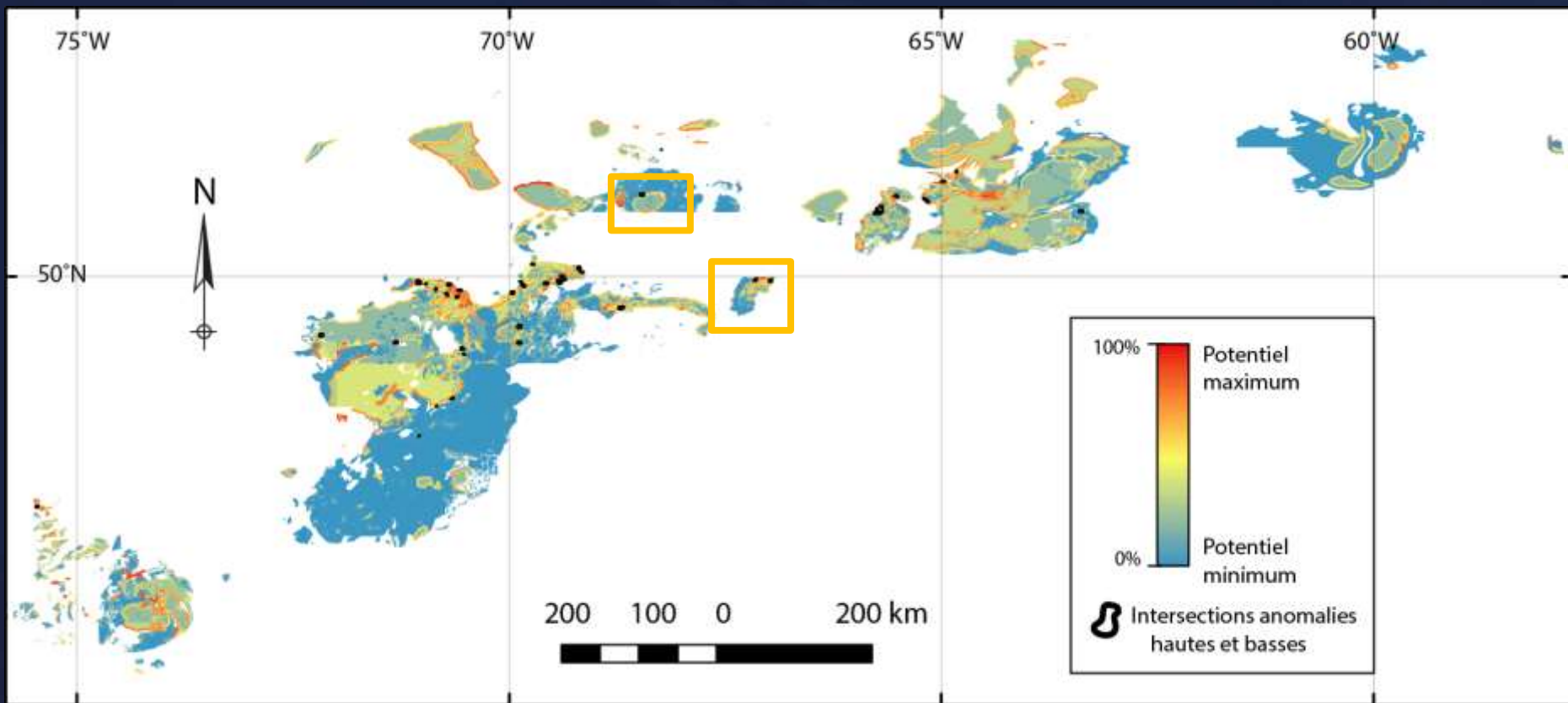
- **En résumé, pour la partie II:**

- La documentation a permis d'identifier les paramètres pertinents.
- Les calculs de contraste ont permis de leur affecter des facteurs, pour juger de l'importance de chacun des paramètres.

Nom	Facteur	Description
Lithologie	-1	I1, I2
	1,5	I3-anorthosite
	3	I3-autres
	4	I4-UM
	3,5	I4Z
Pétrologie	2	Sulfure et sulfosels
	1	Olivine et/ou apatite
MgO	1	MgO > 8,5 wt%
Proximité aux sédiments	1	Buffer de 2 km
Faciès de bordure	3	faciès de bordure cartographiés
	2	autres roches I3 situées à < 1 km des bordures des intrusions
Géochimie - anomalie Cu-Ni	3	intersection anomalies hautes et basses
	2,5	anomalies hautes
	1	anomalies basses
	-1	autres

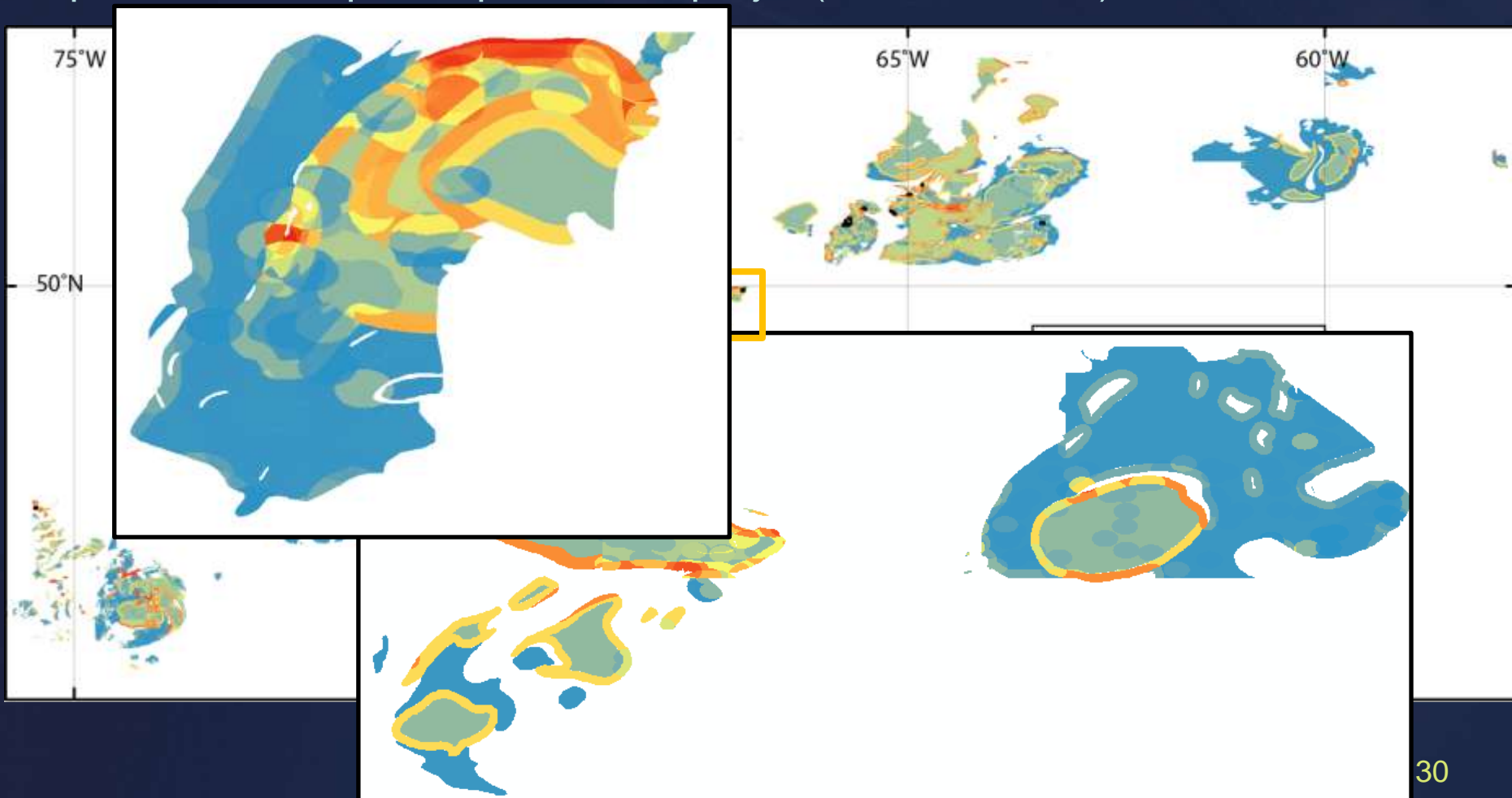
3. AMCG de Grenville

- Carte combinant les valeurs de contraste calculées pour les paramètres explorés pendant le projet (cibles zonales).



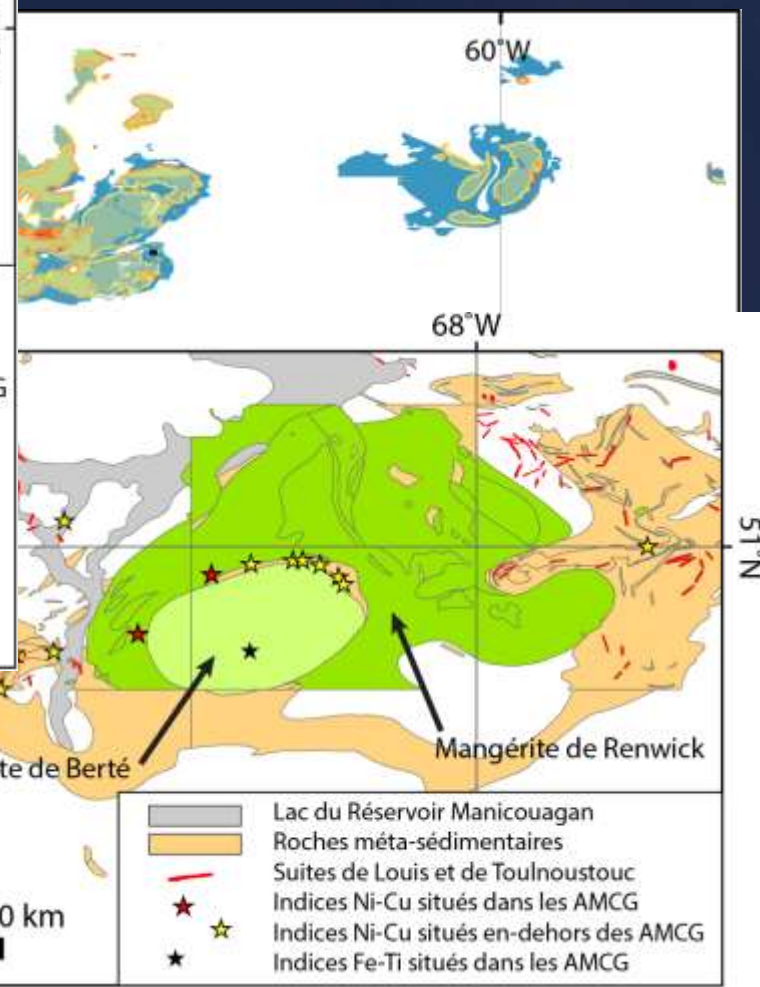
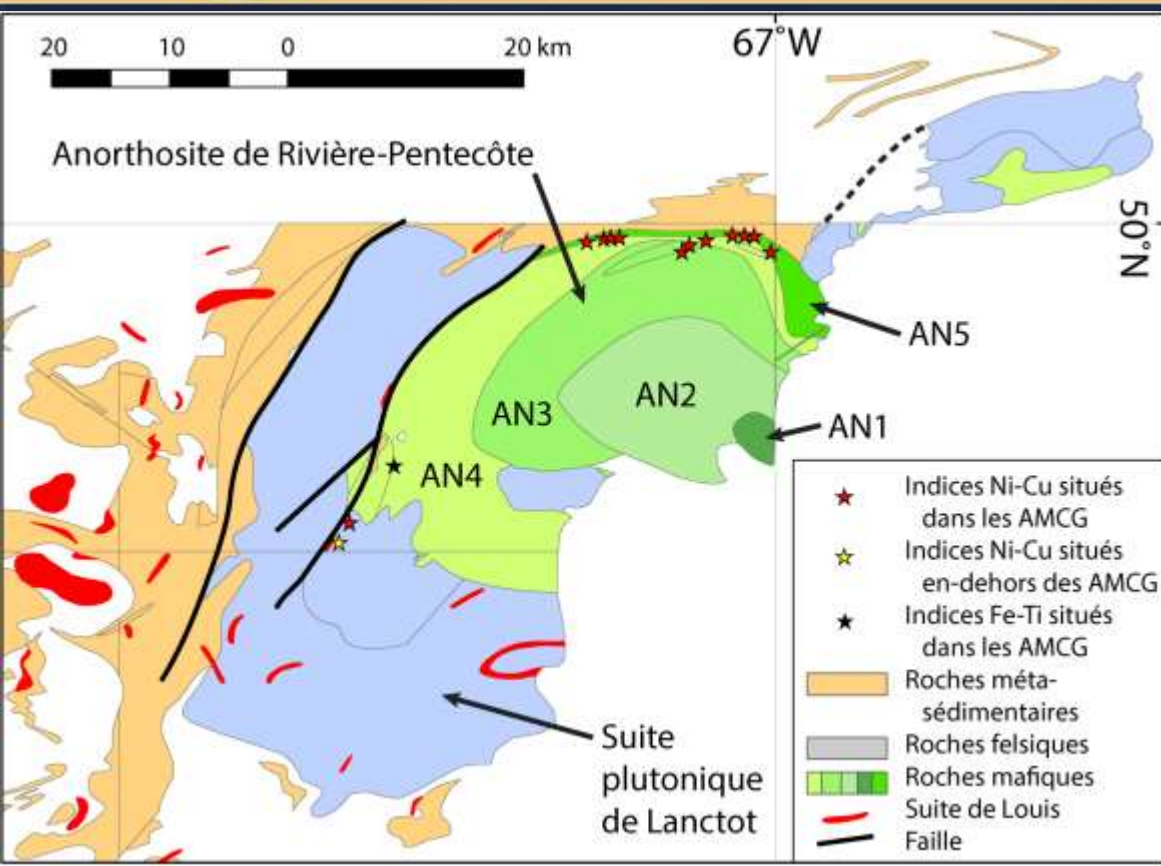
3. AMCG de Grenville

- Carte combinant les valeurs de contraste calculées pour les paramètres explorés pendant le projet (cibles zonales).



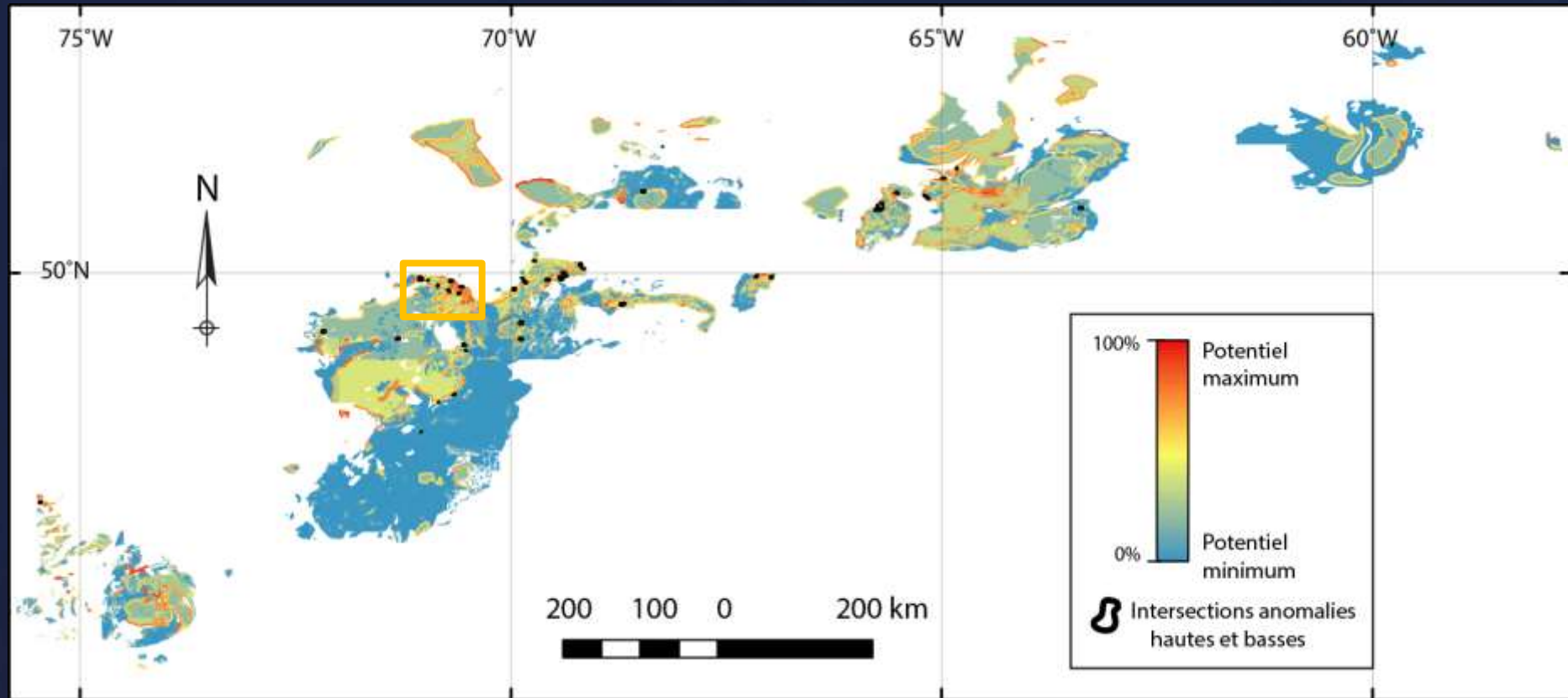
3. AMCG de Grenville

calculées pour les zones).

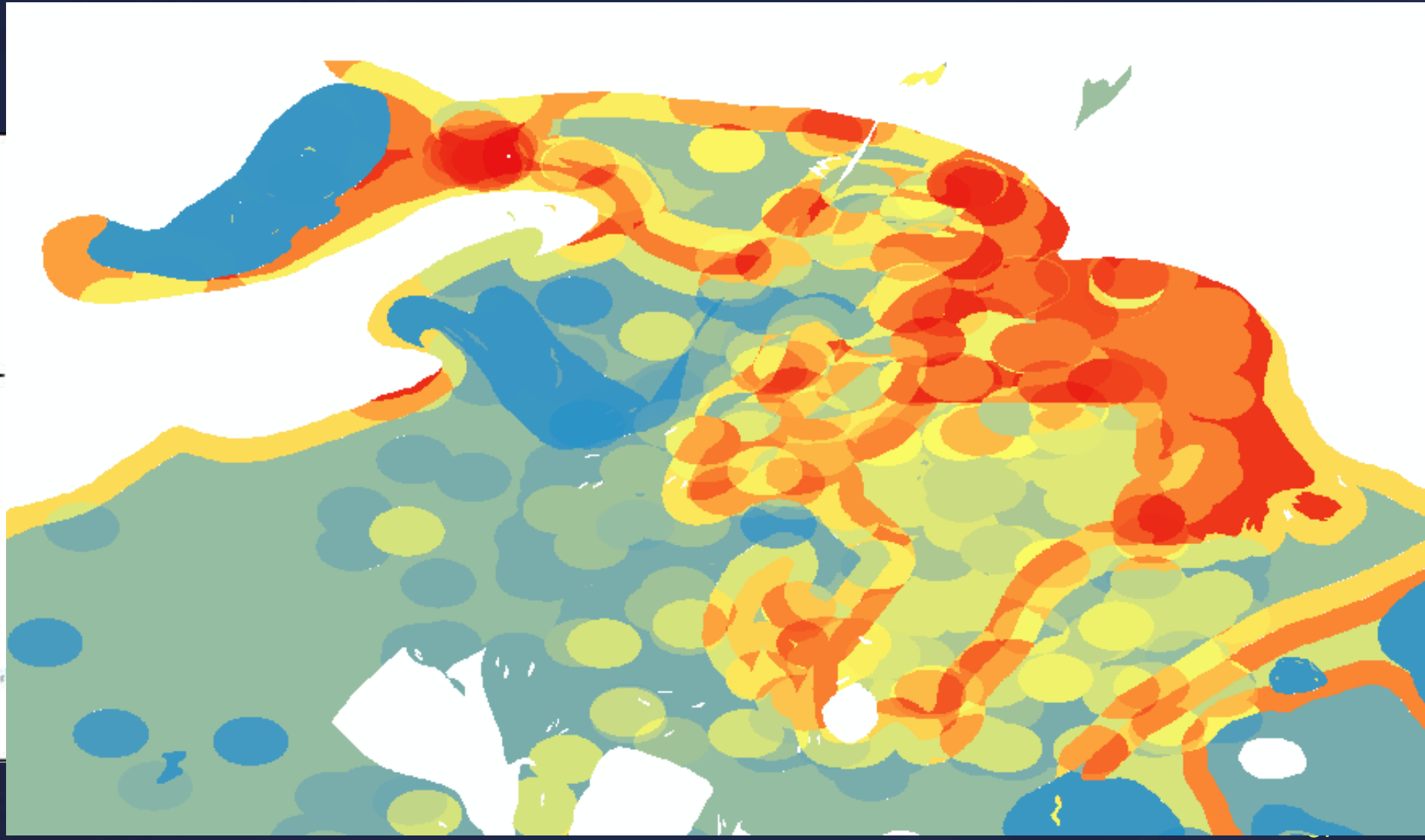


3. AMCG de Grenville

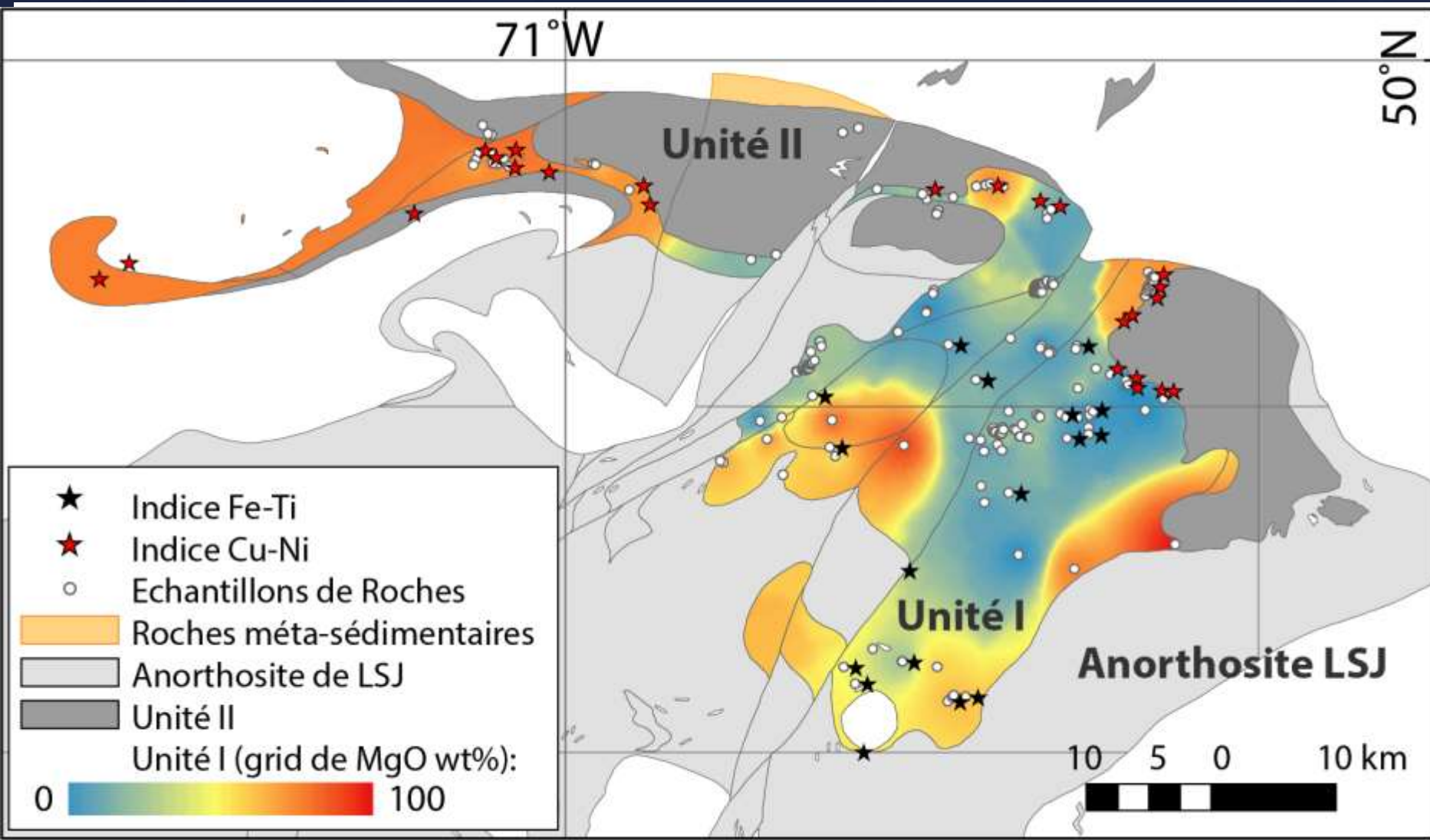
- Carte combinant les valeurs de contrastes calculées pour les paramètres explorés pendant le projet (cibles zonales).



3. AMCG de Grenville



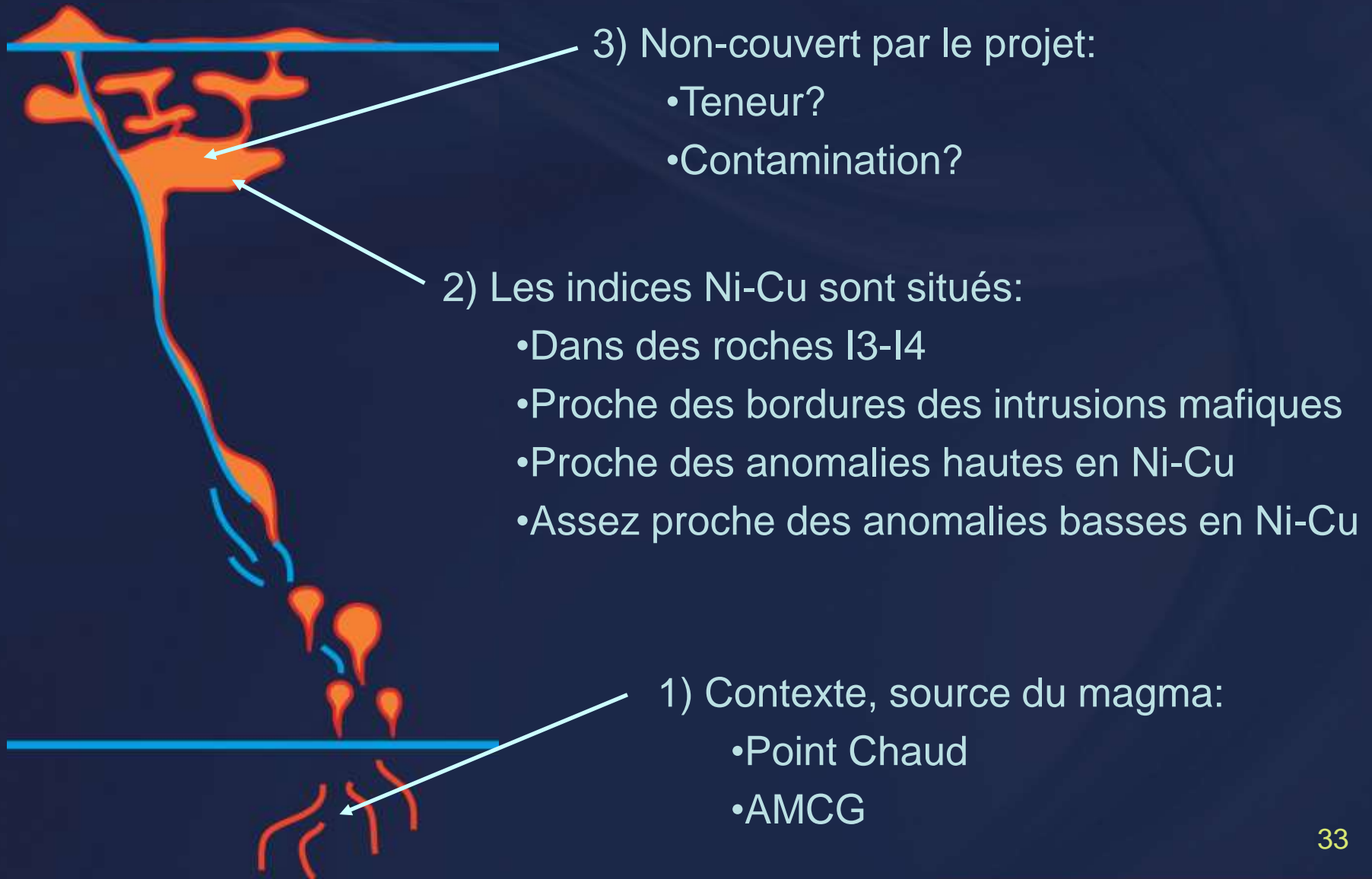
3. AMCG de Grenville



Sommaire

1. Introduction
2. Outil géochimique, méthodes I et II
3. AMCG de Grenville, description et application des guides d'exploration
4. Conclusions

4. Conclusions



Merci de votre attention