

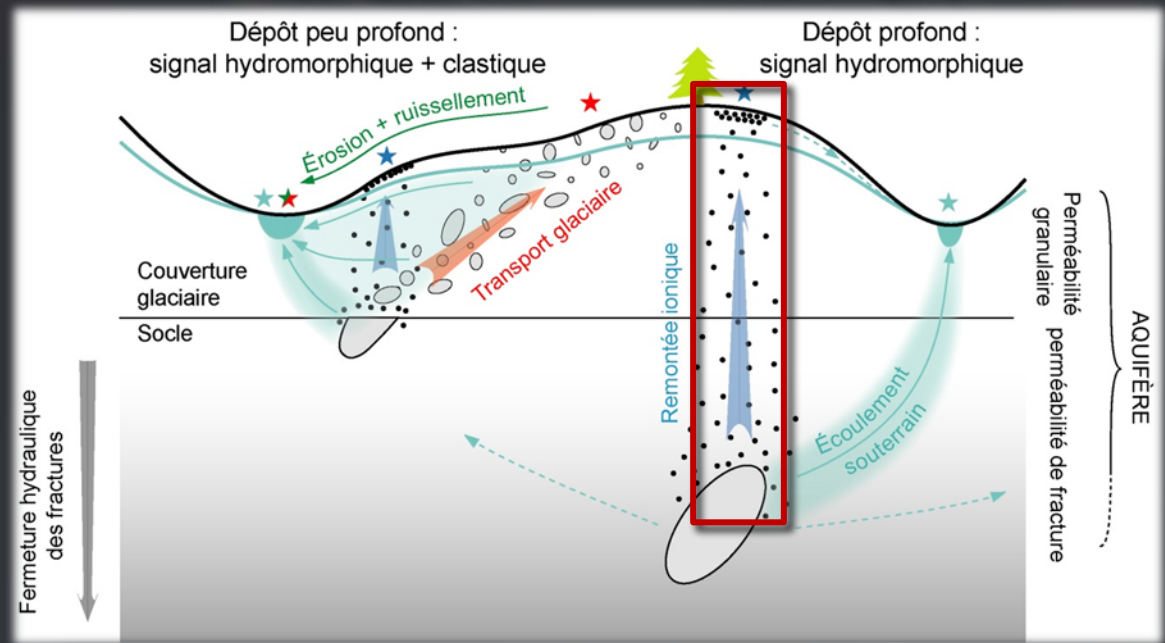
Détection de gisements sous couverture glaciaire par la méthode MMI :

synthèse, études de cas, perspectives

Projet Consorem 2010-07

Silvain Rafini, PhD

Forum technologique 2012
Rouyn-Noranda



PARTENAIRES

OSISKO
EXPLORATION

AURIZON

Cameco

RICHMONT

Ressources d'ARIANNE

MDN

SOQUEM

CARTIER
RESSOURCES

xstrata
ZINC

VIRGINIA

AGNICO-EAGLE

ANGLO AMERICAN

ALEXIS

Développement économique, Innovation et Exportation

Québec



Développement économique Canada

FOCUS
GRAPHITE



Donner Metals Ltd

Ressources naturelles et Faune

Québec

ONHYM

UQAM

URSTM/UQAT



CONFÉRENCE RÉGIONALE DES ÉLUS
SAGUENAY - LAC SAINT JEAN

Québec



Développement économique Canada

CERT

Québec

UQAC

PLAN

- Qu'est-ce que le MMI ?
- Problèmes spécifiques à l'utilisation du MMI au Québec : quel type de signal mesure-t-on ?
- Anomalies directes vs. indirectes : le contrôle du pH sur les anomalies de sol
- Traitement des levés MMI : rehaussement du signal exogène (le cas échéant)
- Conclusions : ***est-ce ça marche (au Québec) ?***

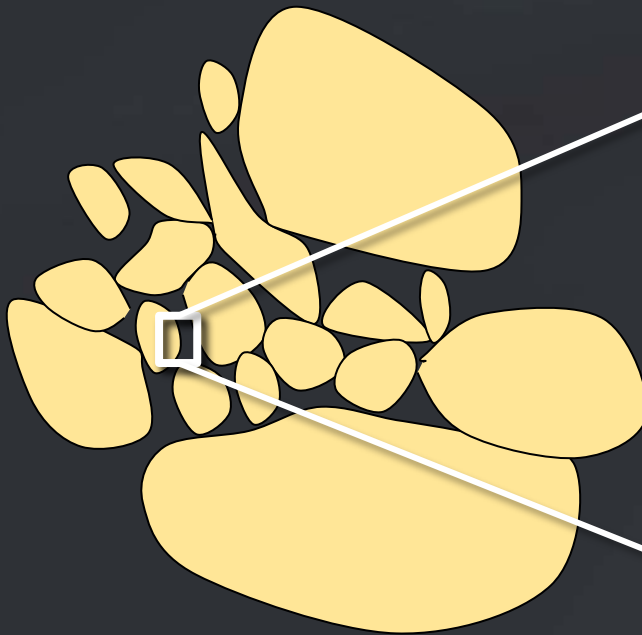


Qu'est-ce que le MMI ?

Le MMI (*Mobile Metal Ions*) est une méthode d'extraction qui **cible les métaux faiblement liés dans les sols**

Sol

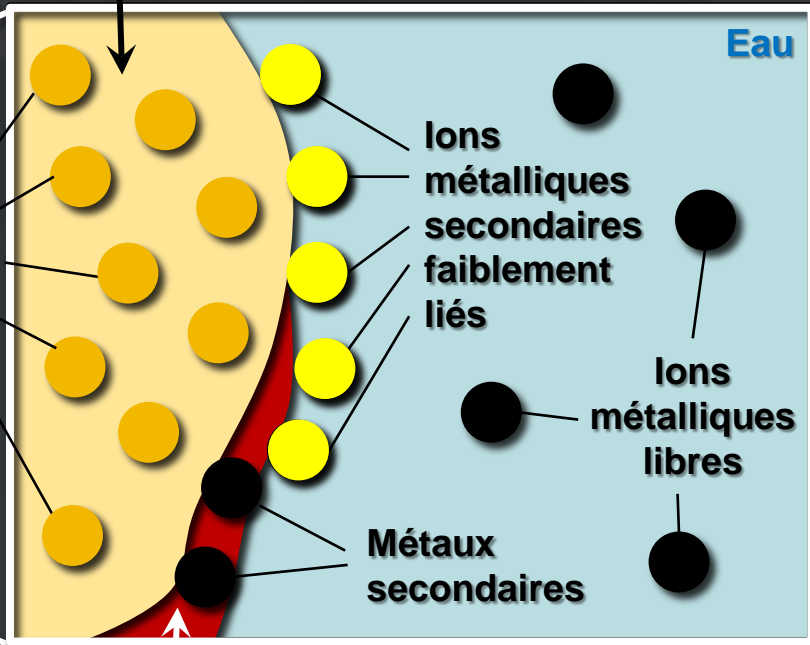
Phase solides (minéraux)
Phase aqueuse (porosité)



Sol (échelle microscopique)

Minéraux primaires (ex : biotite, chlorite etc.)

Métaux primaires



Eau

Ions métalliques secondaires faiblement liés

Ions métalliques libres

Métaux secondaires

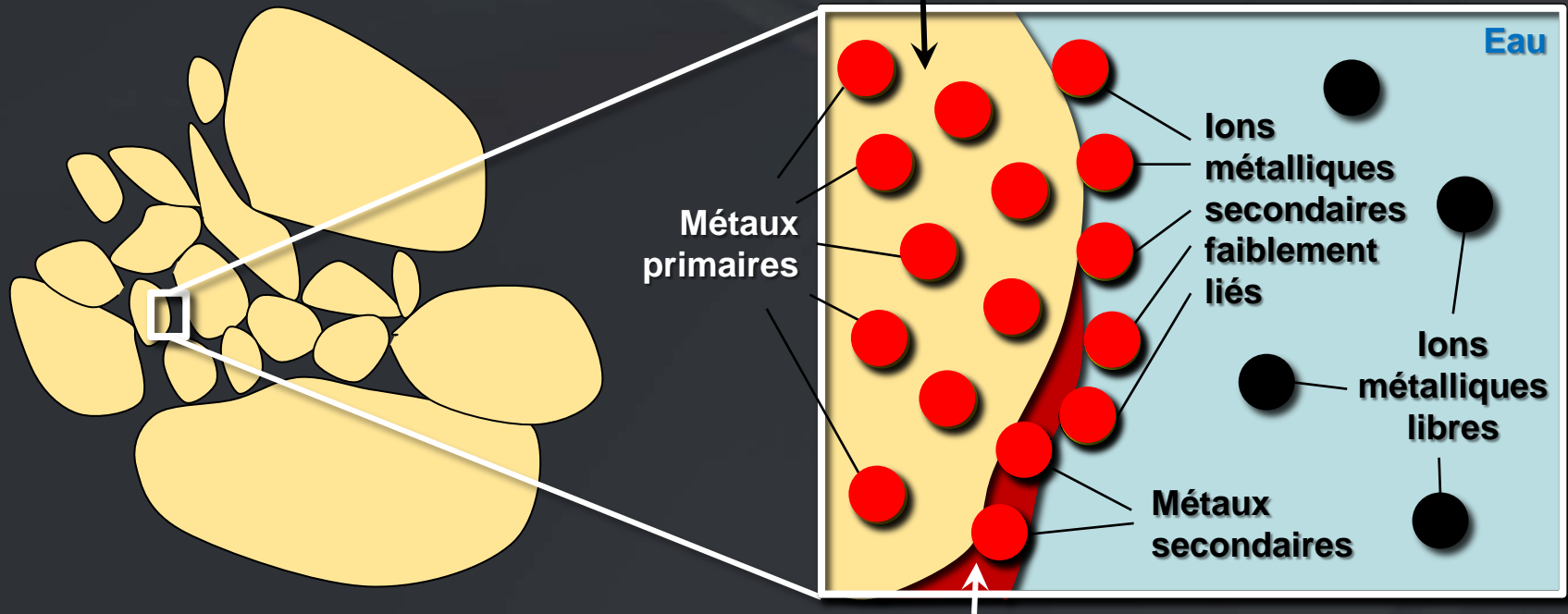
Minéraux secondaires (ex : oxydes Fe-Mn amorphes)

● Métaux ciblés par MMI : faiblement liés (adsorbés)



Typiquement, les valeurs MMI en métaux de base et précieux sont 100 à 1000 x inférieures aux valeurs aqua regia (teneurs MMI limitées par capacité adsorption des minéraux)

Phase solides (minéraux)
Phase aqueuse (porosité)

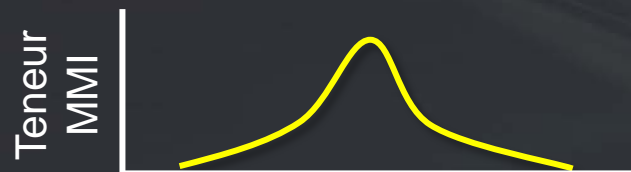


● Métaux ciblés par MMI : faiblement liés (adsorbés)

● Métaux extraits par méthodes conventionnelles quasi-totale type aqua-regia

Qu'est-ce que le MMI ?

Le MMI (*Mobile Metal Ions*) est une méthode d'extractions sélective qui **cible les métaux faiblement liés dans les sols**



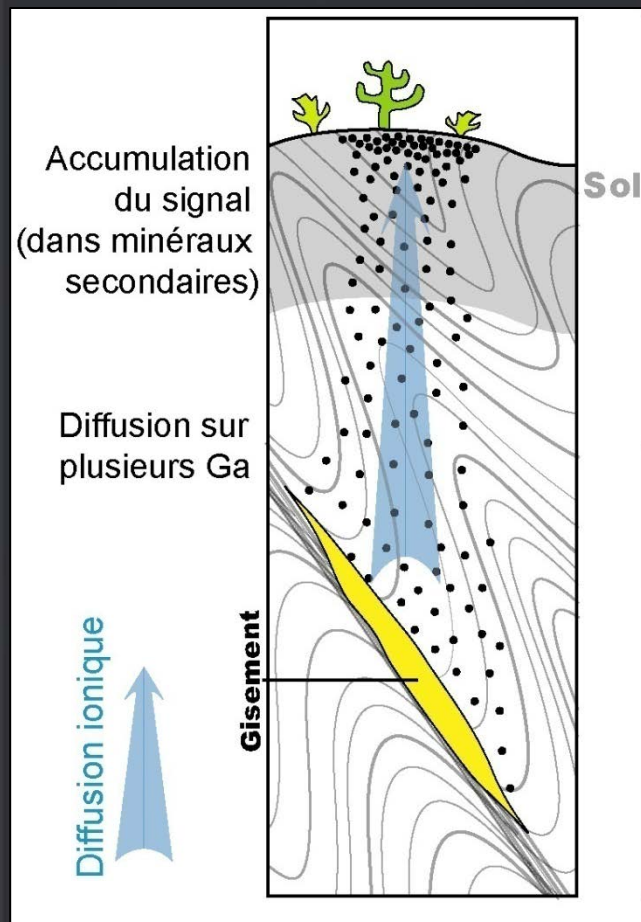
Anomalies abruptes très contrastées à l'aplomb des gisements

Théorie en amont du MMI :

Migration verticale de métaux sous forme ionique depuis la source enfouie jusqu'au sol, par diffusion chimique ou électrochimique

Refs : Smee, 1998, 2003 ; Cameron et al, 2004 ; Hamilton, 2004 ; Skillicorn et Cohen, 2004 ; Mann et al 2005

→ En théorie : signal exclusivement exogène (i.e., non dérivé de l'environnement local)



PLAN

- Qu'est-ce que le MMI ?
- Problèmes spécifiques à l'utilisation du MMI au Québec : quel type de signal mesure-t-on ?
- Anomalies directes vs. indirectes : le contrôle du pH sur les anomalies de sol
- Traitement des levés MMI : rehaussement du signal exogène (le cas échéant)
- Conclusions : ***est-ce ça marche (au Québec) ?***



Méthodes efficaces en Australie (socle affleurant, climat aride)

Exportation au Canada : problèmes de reproductibilité, efficacité non avérée

Problème :

- Couverture glaciaire jeune
- Diffusion ionique est un processus très lent

→ Accumulation de concentrations détectables dans le sol en 8000 ans ?

→ Quelle ordre d'épaisseur glaciaire critique ? Dans till ? Dans argile ?

Épaisseurs critiques*

➤ Argile : $H^+ \approx 1m$; Cu, Zn, Au et Ag : $< 1m$

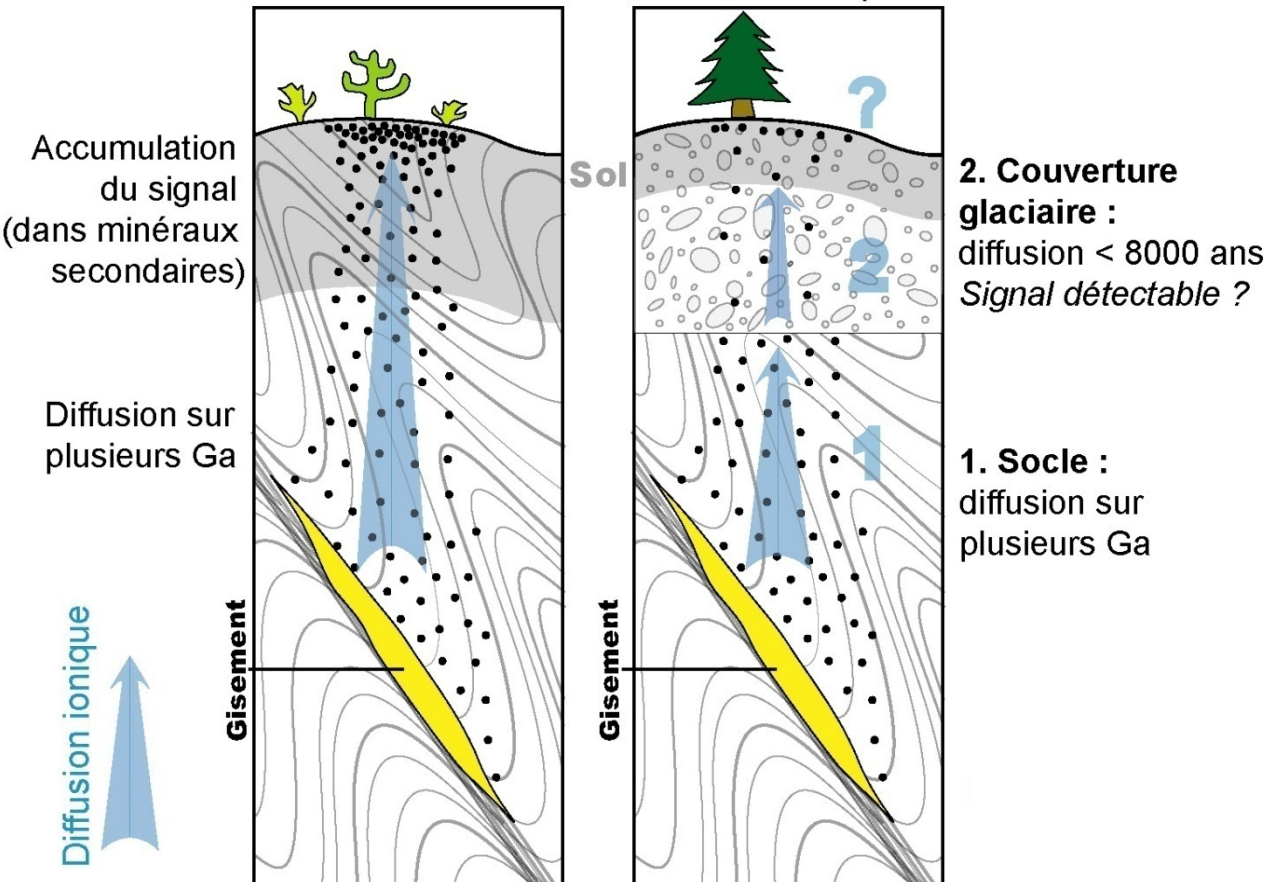
➤ Sédiments perméables : $H^+ > 10m$; métaux de base $\approx 1 - 5 m$; Au, Ag : aucune donnée

→ Valeurs très controversées, seul H^+ fait l'unanimité

* Réfs. page précédente

Milieu aride avec socle affleurant

Milieu boréal avec jeune couverture transportée





Méthodes efficaces en Australie (socle affleurant, climat aride)

Exportation au Canada : problèmes de reproductibilité, efficacité non avérée

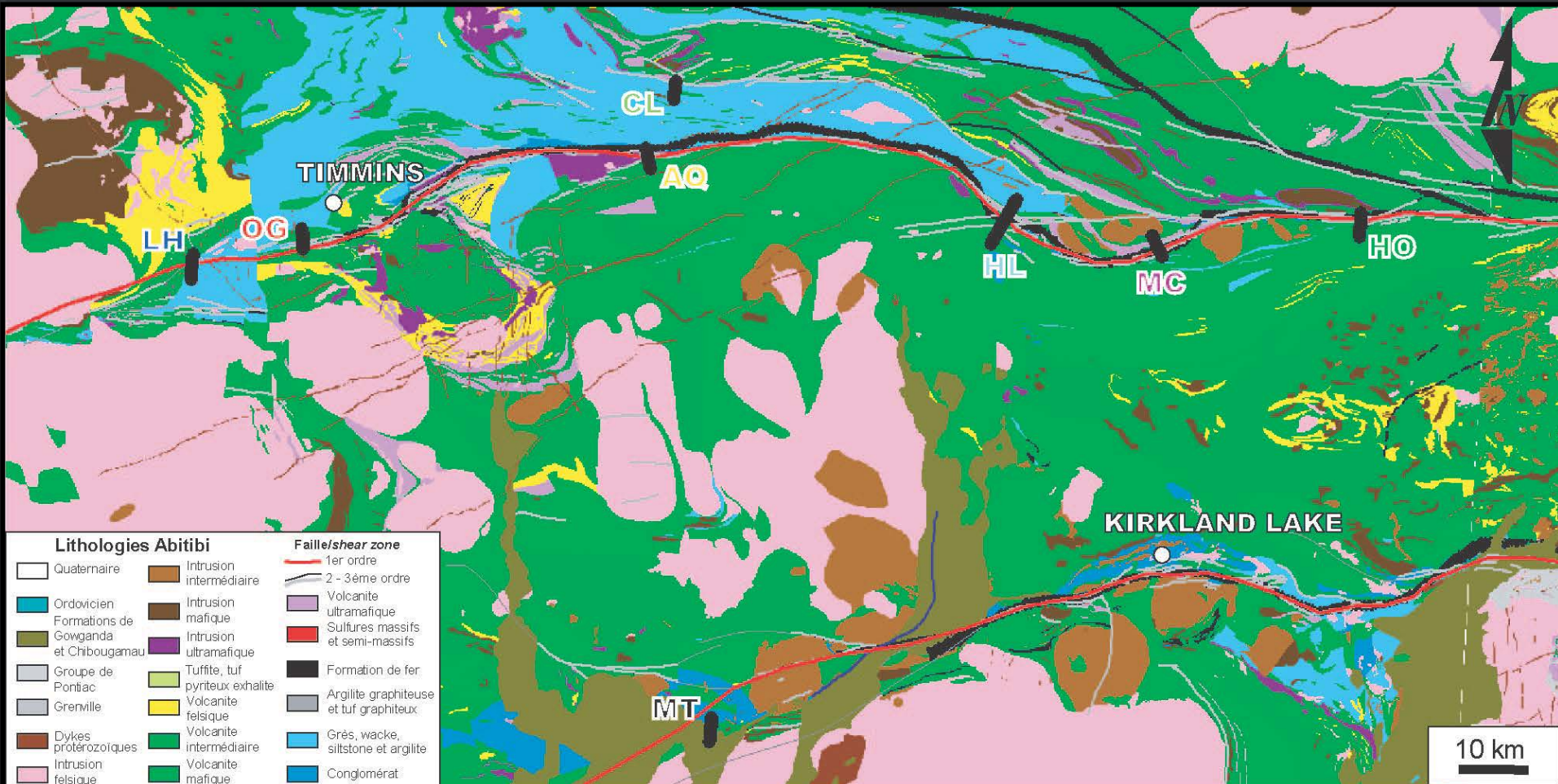
Problème :

- Couverture glaciaire jeune
- Diffusion ionique est un processus très lent

Si réponse est *non*, c.a.d. signal de migration ionique est non-déTECTABLE après 8 000 ans à travers plusieurs mètres de sédiments glaciaires...

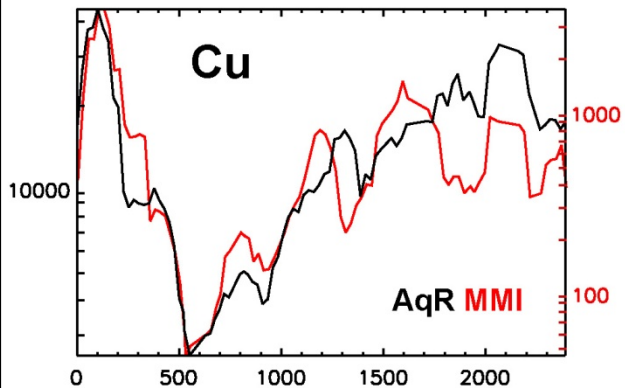
Alors les métaux mesurés par MMI traduisent principalement l'environnement local : amont hydraulique, remobilisations *in-situ* (pédogénèse etc.)

→ Il y aurait dans ce cas une corrélation visible entre les signaux MMI et les signaux d'extraction quasi-totale conventionnels type aqua regia

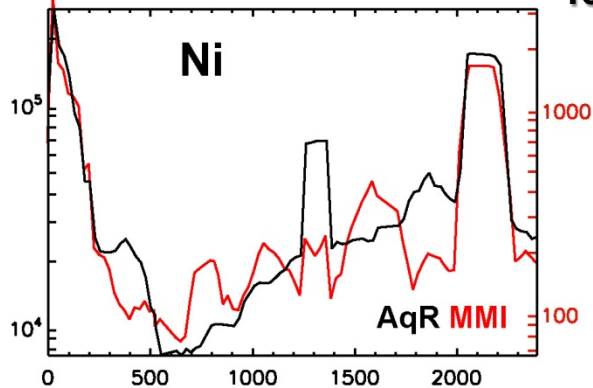


814 échantillons (8 traverses) :
analyses MMI et aqua regia dans le même horizon (10 – 25 cm
sous humus)

traverseOG



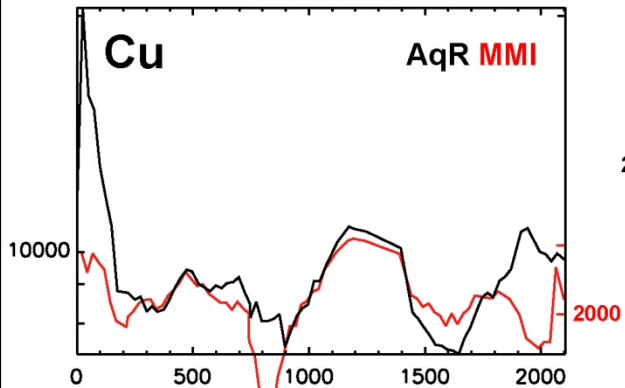
traverseOG



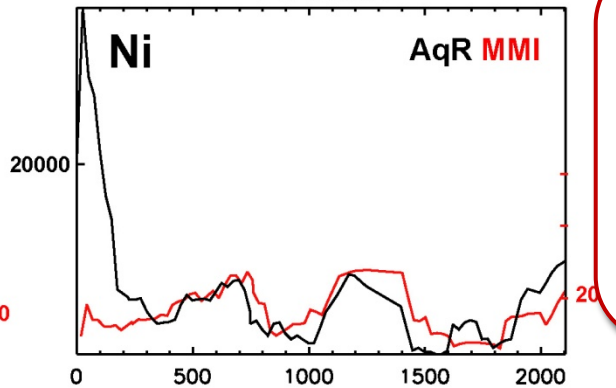
Teneurs en ppb, distances en mètres

Profils MMI et AqR en Cu, Ni, (Zn) sur trois traverses (région Timmins). Courbes lissées.

traverseCL

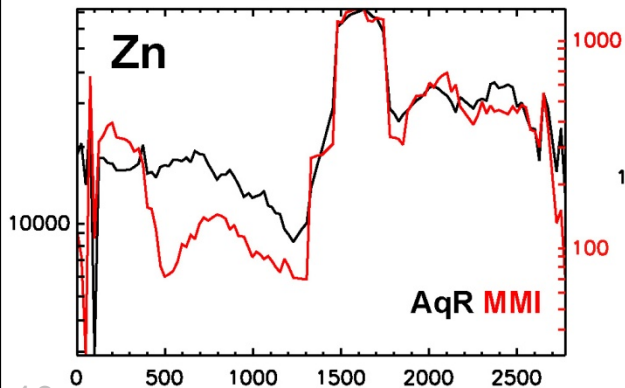


traverseCL

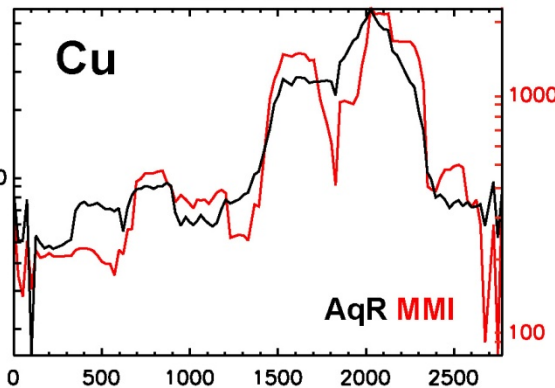


Les signaux MMI et aqua regia (AqR) sont très clairement corrélés sur les traverses

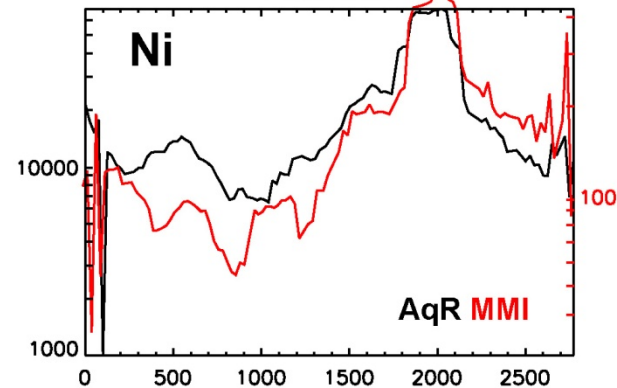
traverseMT



traverseMT



traverseMT





Comparaison des teneurs MMI et AqR Analyse en composantes principales

Principe : quantifie les corrélations entre plusieurs variables

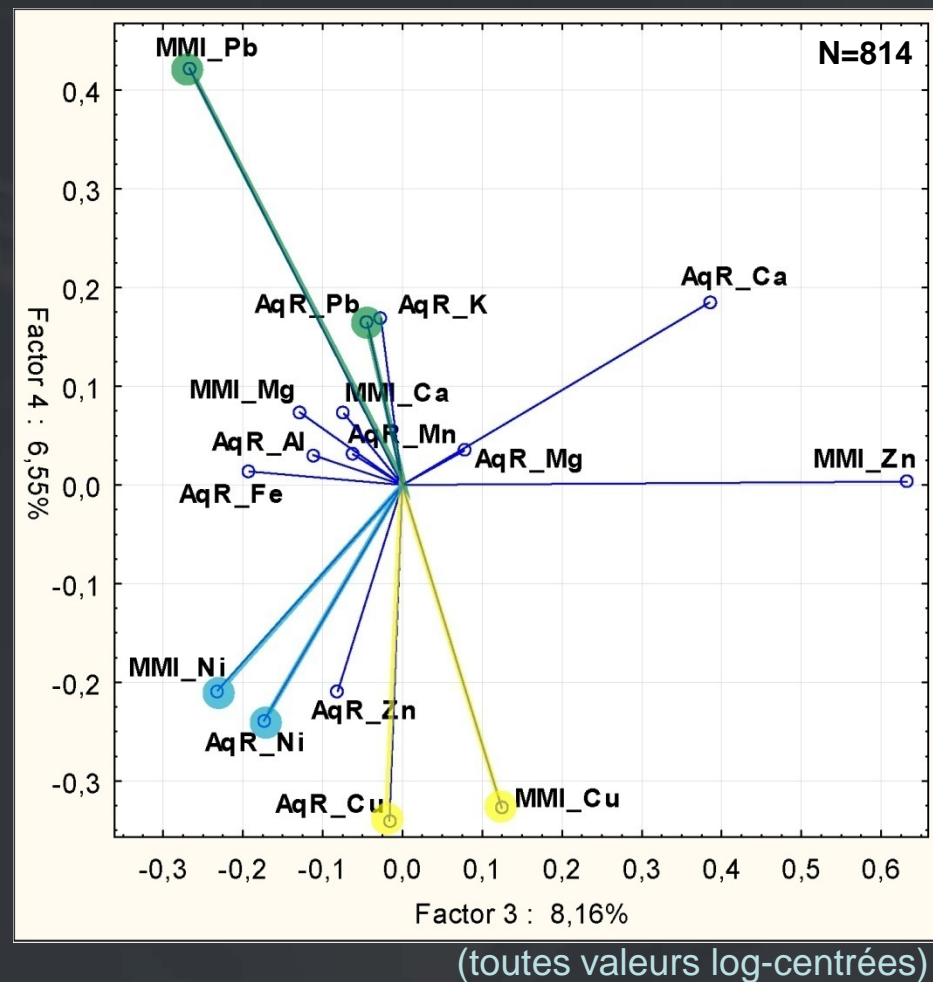
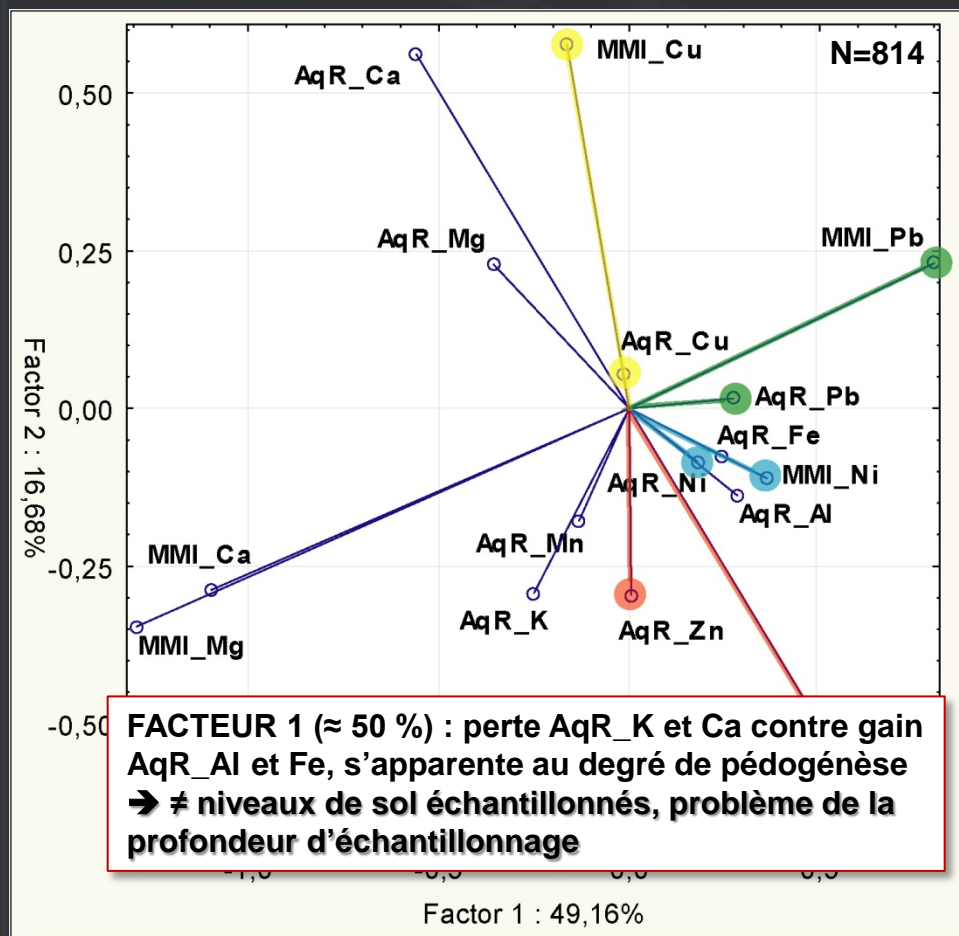
Si variables sont indépendantes : pas de facteur dominant, aucune tendance

Si variables au moins partiellement interdépendantes : l'ACP fait apparaître les *facteurs* exprimant les tendances communes de ces variables

Comparaison des teneurs MMI et AqR

Analyse en composantes principales

Valeurs MMI et aqua regia en métaux de base + Al, K, Ca, Mg, Fe, Mn

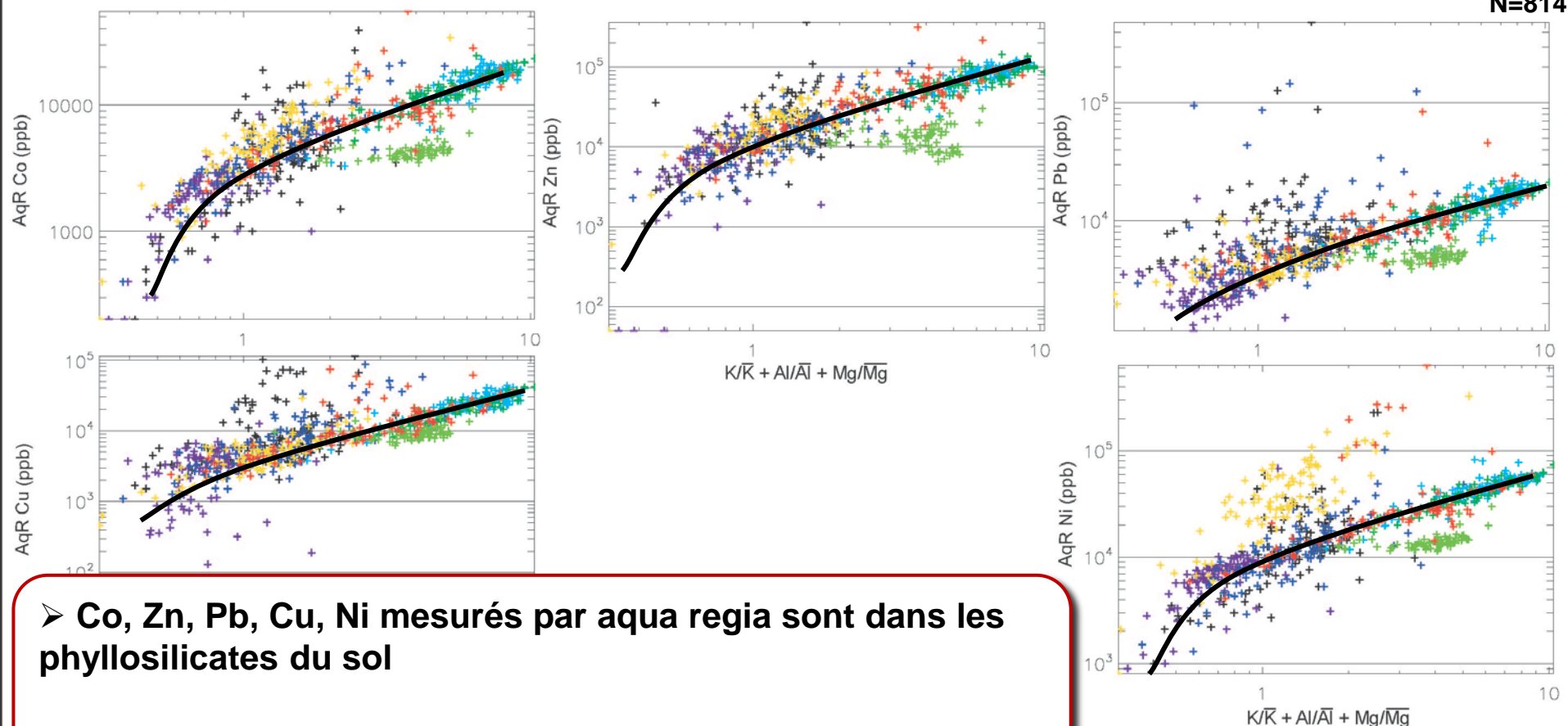


➤ Les 4 premiers facteurs (80% de la variabilité) expriment une **corrélation très visible** entre les teneurs aqua regia et MMI

Localisation des métaux mesurés par aqua regia dans les sols

Corrélations métaux AqR – indice phyllosilicates

$$\text{Indice phyllosilicates} = \text{Al}/\text{Al}_{\text{moy}} + \text{K}/\text{K}_{\text{moy}} + \text{Mg}/\text{Mg}_{\text{moy}}$$

N=814


➤ Co, Zn, Pb, Cu, Ni mesurés par aqua regia sont dans les phyllosilicates du sol

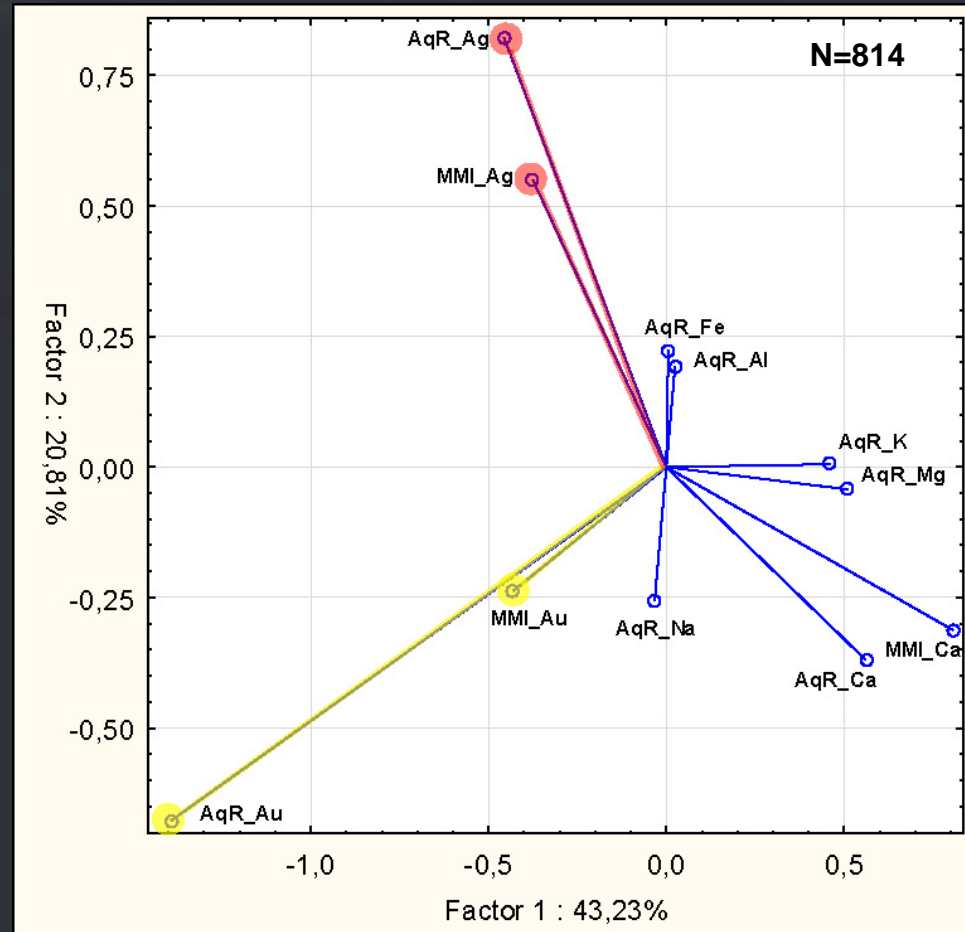
➤ Rejoint les observations faites sur le till (projet 2010-05)

Comparaison des teneurs MMI et AqR

Analyse en composantes principales

Valeurs MMI et aqua regia en Ag, Au, Al, K, Ca, Mg, Fe, Mn

(toutes valeurs log-centrées)



Au et Ag : la variabilité des teneurs MMI est en très grande partie liée à la variabilité des teneurs aqua regia

→ En première approximation, **ces deux méthodes mesurent le même signal !!**

- **Corrélations très claires entre les signaux MMI et aqua regia pour les métaux de bases et précieux**
 - La composition métallique du sol (valeurs aqua regia) a une influence dominante sur le signal MMI brut → pas avantageux vs. méthodes conventionnelles
 - **Ce résultat suggère fortement que le signal MMI brut traduit l'environnement local → *pas exogène***

- Métaux aqua regia sont situés dans les phyllosilicates du sol
 - Si signal exogène existe dans les teneurs MMI, il pourrait être rehaussé grâce à la normalisation du signal brut par la teneur en phyllosilicates du sol (Al/Almoy + K/Kmoy)
 - Traite les fausses anomalies causées par des sols riches en phyllosilicates

PLAN

- Qu'est-ce que le MMI ?
- Problèmes spécifiques à l'utilisation du MMI au Québec : quel type de signal mesure-t-on ?
- Anomalies directes vs. indirectes : le contrôle du pH sur les anomalies de sol
- Traitement des levés MMI : rehaussement du signal exogène (le cas échéant)
- Conclusions : ***est-ce ça marche (au Québec) ?***

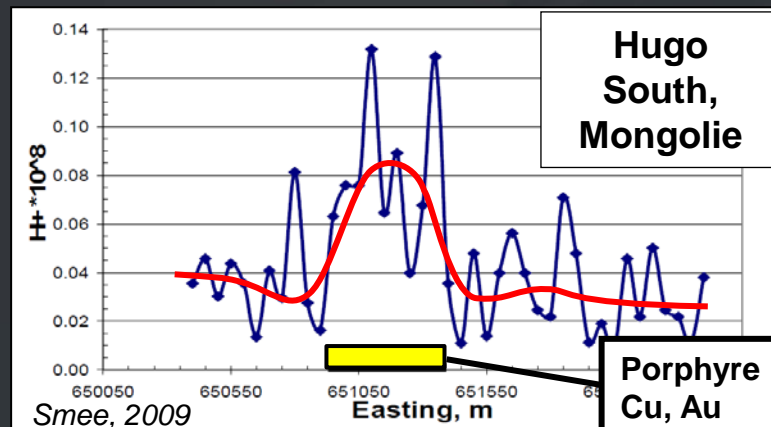
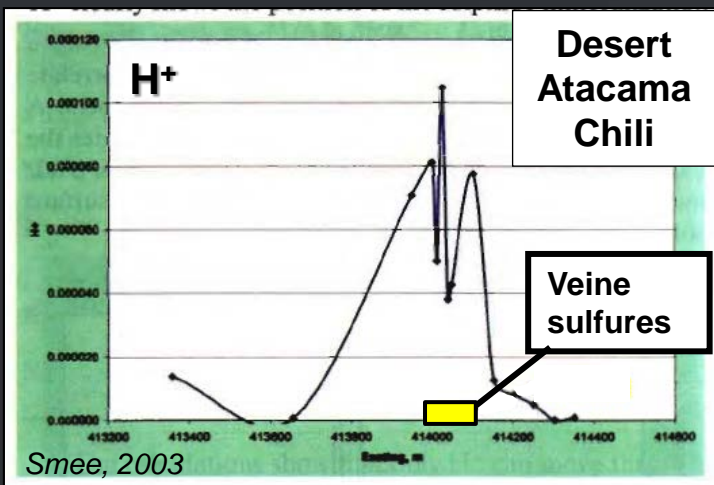
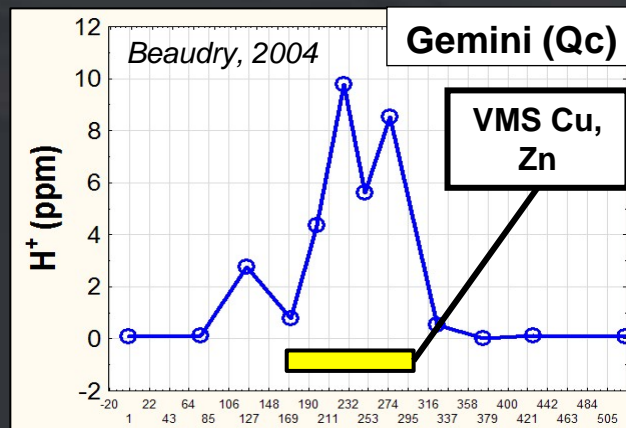
Accumulation H^+ dans le sol à l'aplomb des gisements sulfurés : phénomène très fréquent, voir modèle convection électrochimique Hamilton (2004)

- pH
 - Eh
- Très fort impact sur la mobilité des métaux**



Redistribution métalliques *in situ* : anomalies métalliques indirectes

Les anomalies pH-(Eh) dans le sol constituent un outil d'exploration en soi (Smee, 2003, 2009)

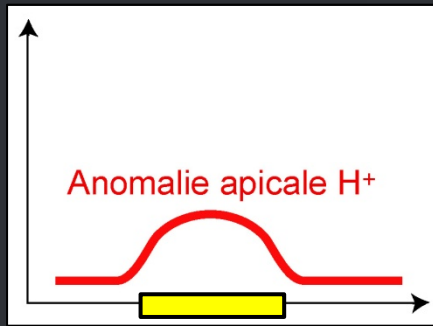


**Cross Lake (Ont.) : VMS Zn, Pb
Subaffleurant sous 30-50 m de
sédiments glaciolacustres**

Modification du profil
pédogénétique : horizon B
épaissi et affleurant

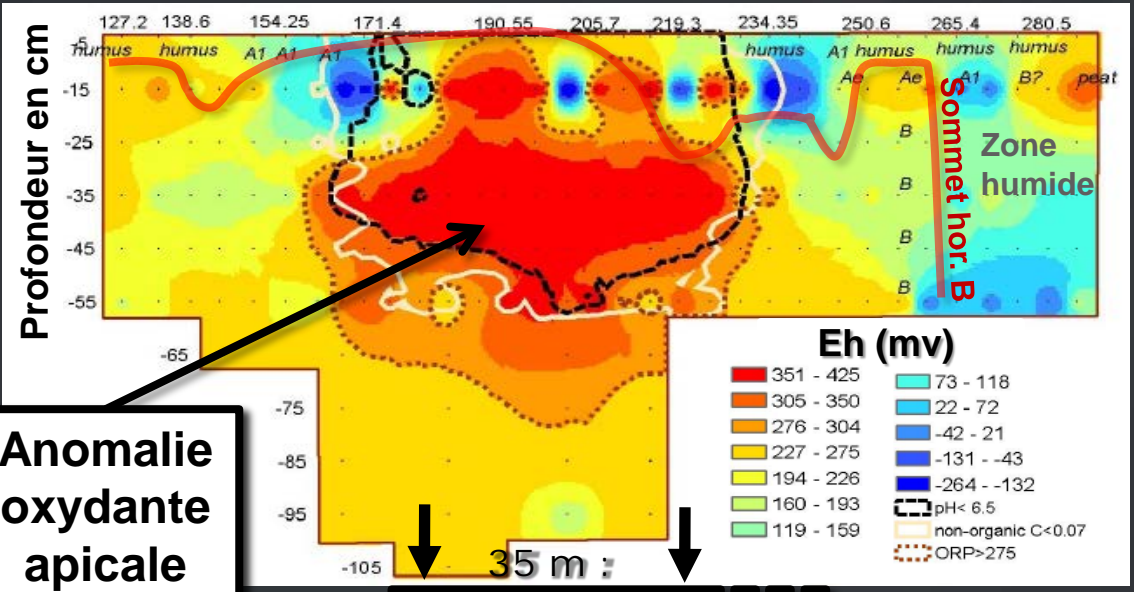
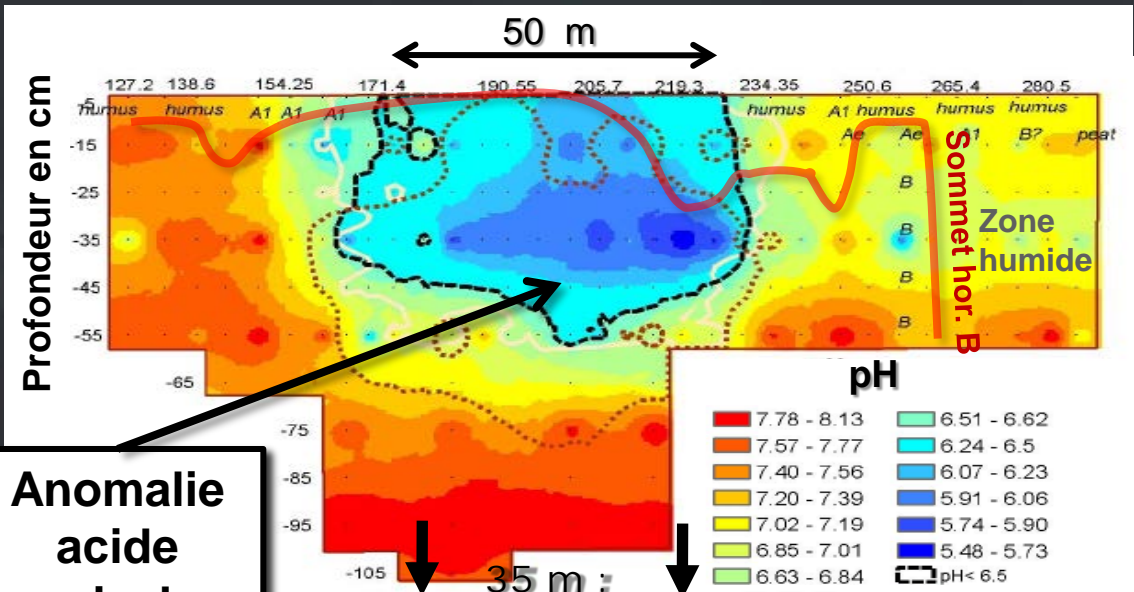
Anomalies indirectes

Remobilisations des
éléments dans le sol
causées par modifications
pH-Eh (et effet
secondaires...)



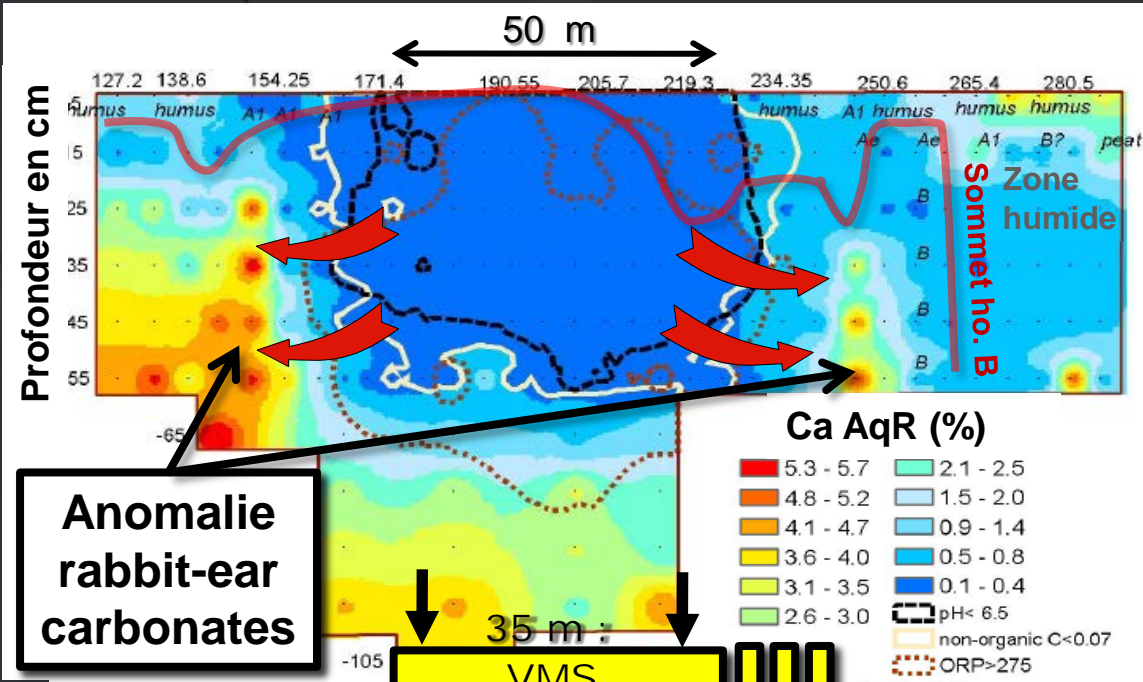
**Anomalie
acide
apicale**

**Anomalie
oxydante
apicale**

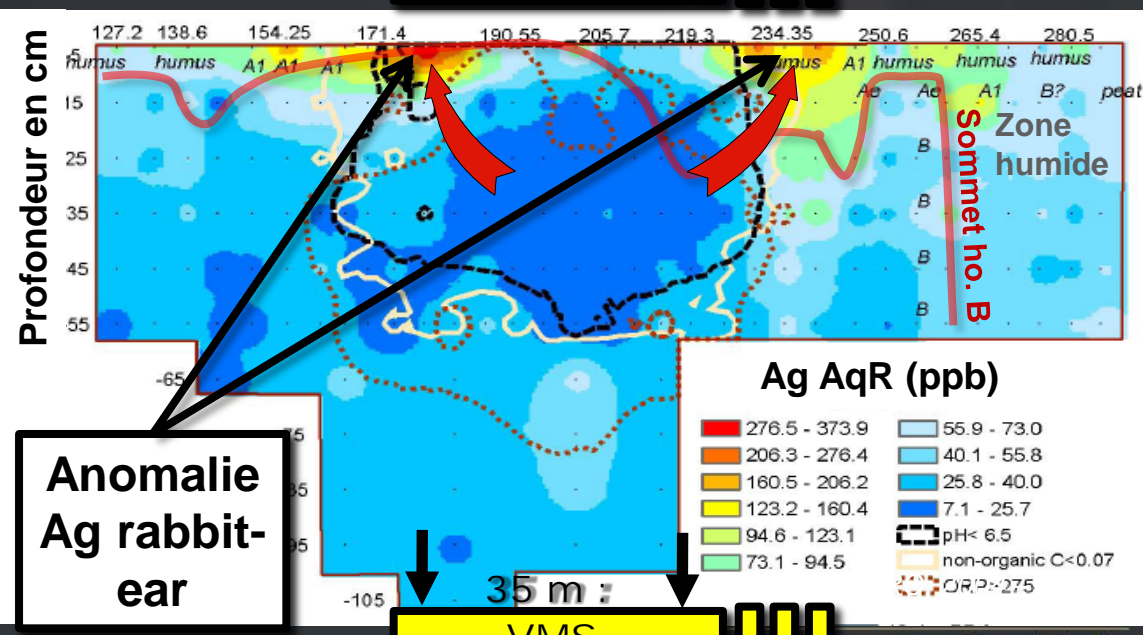




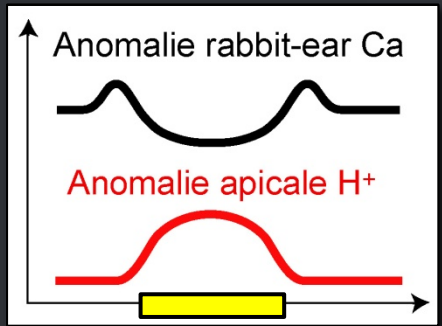
**Cross Lake (Ont.) : VMS Zn, Pb
Subaffleurant sous 30-50 m de
sédiments glaciolacustres**



**Anomalie
rabbit-ear
carbonates**



**Anomalie
Ag rabbit-
ear**



Dissolution dans la zone acide oxydante et précipitation en périphérie
→ Anomalies indirectes rabbit-ear Ag (et Ca)



Bases données : *Geoscience BC* (n=107) ; *CAMIRO* (Cross Lake, Ont., n=129)

Coefficients de corrélation R^2

	pH		
	Kwanika	Mt Mulligan	CrossLake
MMI-Cu_LC	0,265404	0,315775	0,575626
MMI-Ni_LC	0,132618	0,177426	0,521178
MMI-Pb_LC	-0,251155	-0,261897	-0,791584
MMI-Zn_LC	-0,190048	-0,128025	-0,625666

- Corrélations positives avec MMI Cu et Ni
- Corrélations négatives avec MMI Pb et Zn

➔ **Effet du pH non-universel : fonction du métal considéré**

PLAN

- Qu'est-ce que le MMI ?
- Problèmes spécifiques à l'utilisation du MMI au Québec : quel type de signal mesure-t-on ?
- Anomalies directes vs. indirectes : le contrôle du pH sur les anomalies de sol
- Traitement des levés MMI : rehaussement du signal exogène (le cas échéant)
- Conclusions : ***est-ce ça marche (au Québec) ?***

Métaux de base Rehaussement du signal exogène (le cas échéant)

- Facteur contrôlant 1 : les métaux endogènes. Fausses anomalies potentielles causées par sols riches en phyllosilicates
 - ➔ Détection anomalies exogènes : normalisation par la teneur aqua regia

- Facteurs contrôlant 2 : pH et carbonates. Signal MMI très sensible au pH (mesure les ions *mobiles*) → traitement recommandé pour discriminer anomalies *directes* et *indirectes*

Problème !! : relations non-universelles, non-linéaires, interdépendantes

➔ Détection anomalie exogène directe : faire régression multivariée sur environnement local

Variable dépendante

MMI-X

Variables indépendantes

AqR-Al, AqR-X

AqR-Ca, AqR-Mg

pH, MMI-Ca, MMI-Mg

FACTEURS CORRIGÉS

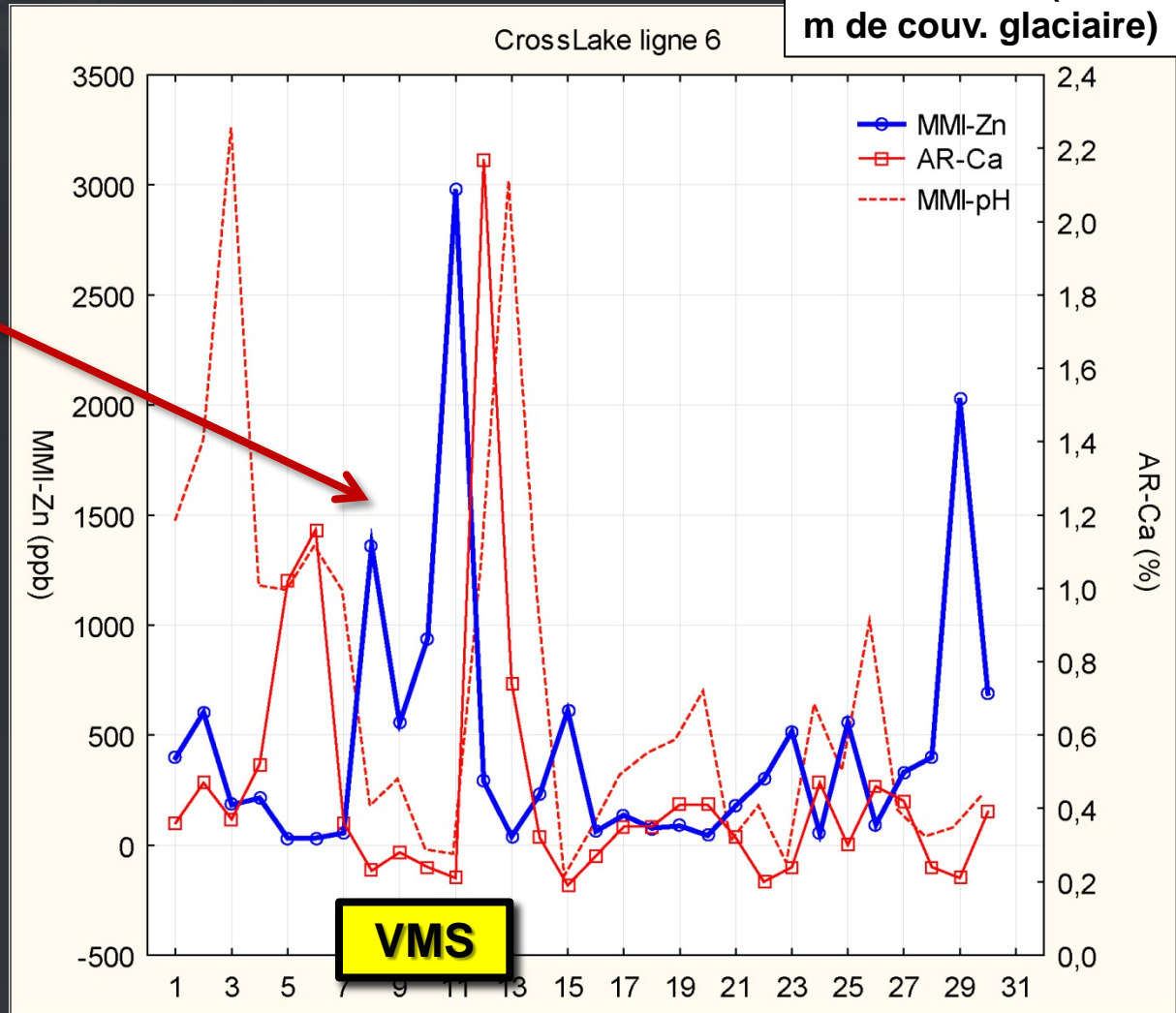
Argiles, métaux endogènes

Carbonates

pH, compétition cationique



VMS zincifère (30 - 50 m de couv. glaciaire)



Anomalie très nette en MMI-Zn à l'aplomb du gisement

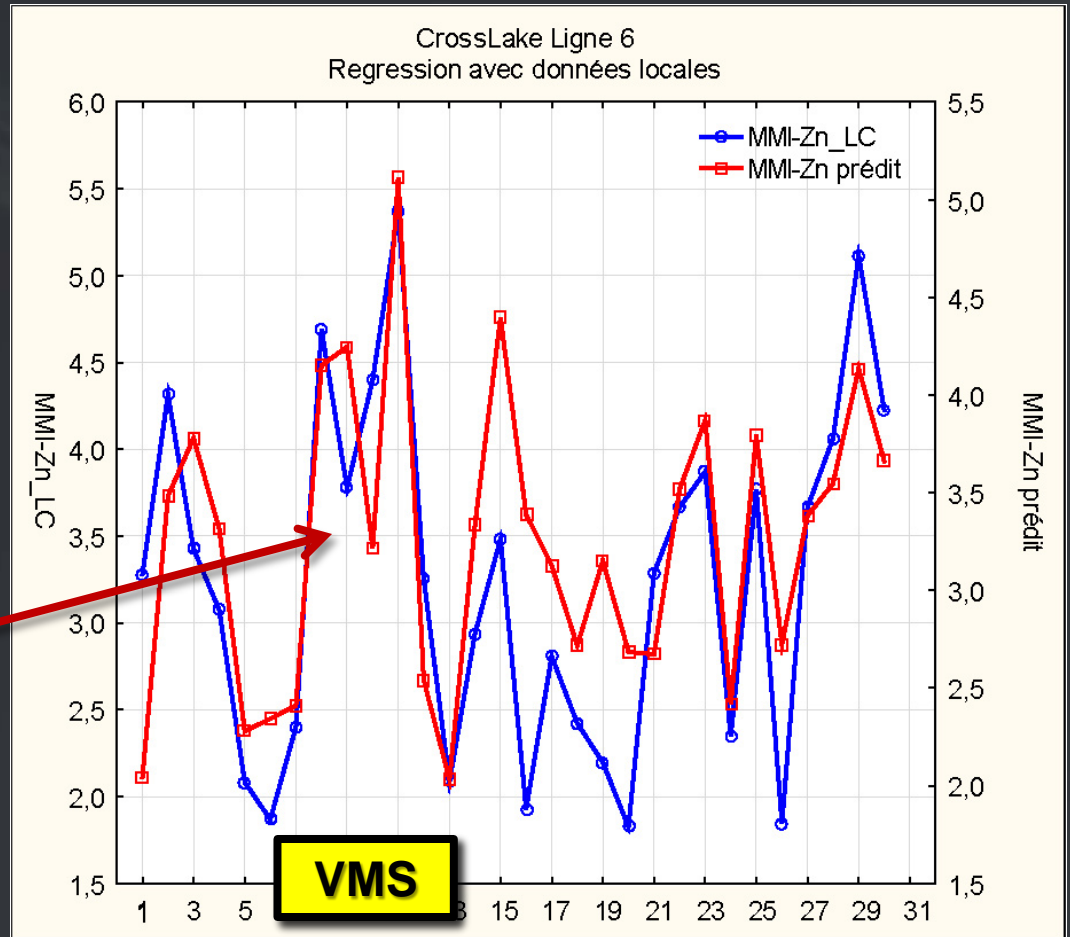
Pas d'anomalie en Zn par aqua regia

Fortes anomalies négatives (+ rabbit ear) pH et carbonates → anomalie Zn indirecte ?



Regression multivariée sur données locales uniquement avec variables de composition du sol : valeurs AqR pour Al, K, Ca, Mg, Zn

Les valeurs prédites par la composition du sol reproduisent parfaitement l'anomalie



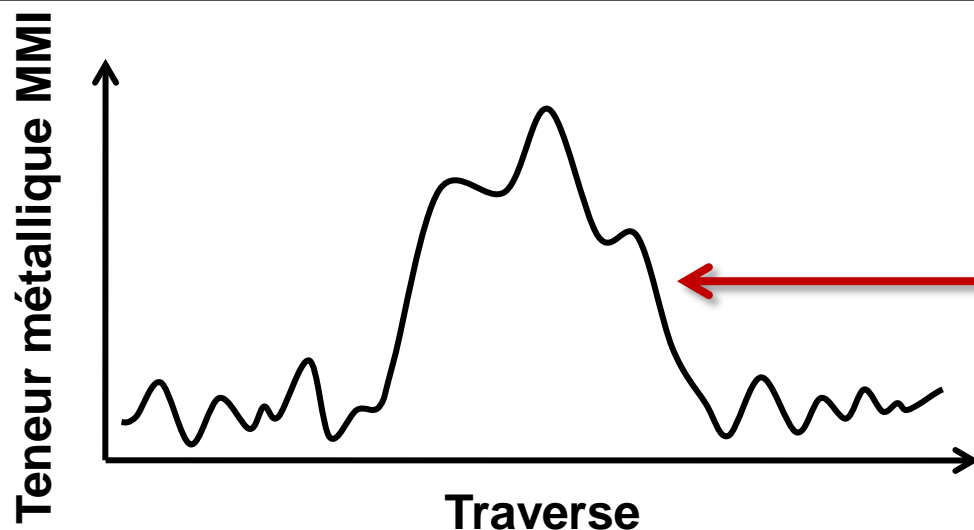
→ Suggère fortement qu'il s'agit d'une anomalie indirecte, explicable par les changements de la composition du sol : carbonates (+ teneur phyllosilicates)

PLAN

- Qu'est-ce que le MMI ?
- Problèmes spécifiques à l'utilisation du MMI au Québec : quel type de signal mesure-t-on ?
- Anomalies directes vs. indirectes : le contrôle du pH sur les anomalies de sol
- Traitement des levés MMI : rehaussement du signal exogène (le cas échéant)
- Conclusions : ***est-ce ça marche (au Québec) ?***

- En milieu à couverture transporté, le signal métallique MMI brut est corrélé de façon dominante au signal métallique mesuré par les méthode conventionnelle (aqua regia)
- De part les faible teneurs typiquement mesurées en MMI, il y a un risque élevé de fausses anomalies produites par des sols riches en phyllosilicates
- Le signal métallique MMI est très sensible au pH su sol → anomalies *indirectes* dans les sols très acides qui se développent à l'aplomb des gisements sulfurés
- Proche des minéralisations (peu de données), les levés MMI traités ne font pas ressortir le signal exogène théoriquement attendu traversant la couverture glaciaire par migration ionique verticale
→ Avantages MMI vs. méthodes conventionnelles non démontrés

En milieu à couverture transportée, les relevés MMI ne sont pas interprétables comme tel (signaux bruts) → un traitement est requis



Signal MMI anomal :

- ✓ Anomalie clastique (sulfures...)?
- ✓ Sol à forte teneur en phyllosilicates (indice argile)?
- ✓ Anomalie indirecte (pH-Eh, carbonates)?
- ✓ Changement de milieu superficiel (conditions de drainage, MO)?
- ✓ **Anomalie exogène (migration ionique verticale)?**

1. Métaux de base : utiliser les méthodes conventionnelles (aqua regia) avec les relevés MMI (dans le même intervalle de sol)
2. Mesurer en routine le pH, (Eh, perte au feu, conductivité) du sol
3. Rehausser le signal exogène par une régression multivariée sur métaux aqua regia, teneur en phyllosilicates (Al, K, Mg), carbonates et pH

Merci

Plus de détails dans le rapport en ligne
<https://consorem.uqac.ca/>

