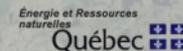
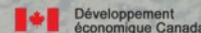
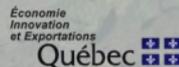
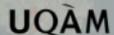


Hydrogéochimie des eaux de surface appliquée à l'exploration minière

Silvain Rafini
CONSOREM UQAC

*Forum CONSOREM-DIVEX 2017
23 mai 2017 – Val d'Or*



1. Mise en contexte et problématique du projet

2. Revue littéraire d'études de cas

3. Hydrogéochimie des eaux de surface

- Recherche de bases de données
- Analyse du bruit de fond : identification des facteurs dominants
- Signature hydrogéochimique des zones minéralisées
- Rehaussement d'anomalies et tests de performance pour l'exploration minérale

4. Conclusions et perspectives

De la source métallique à l'anomalie secondaire...

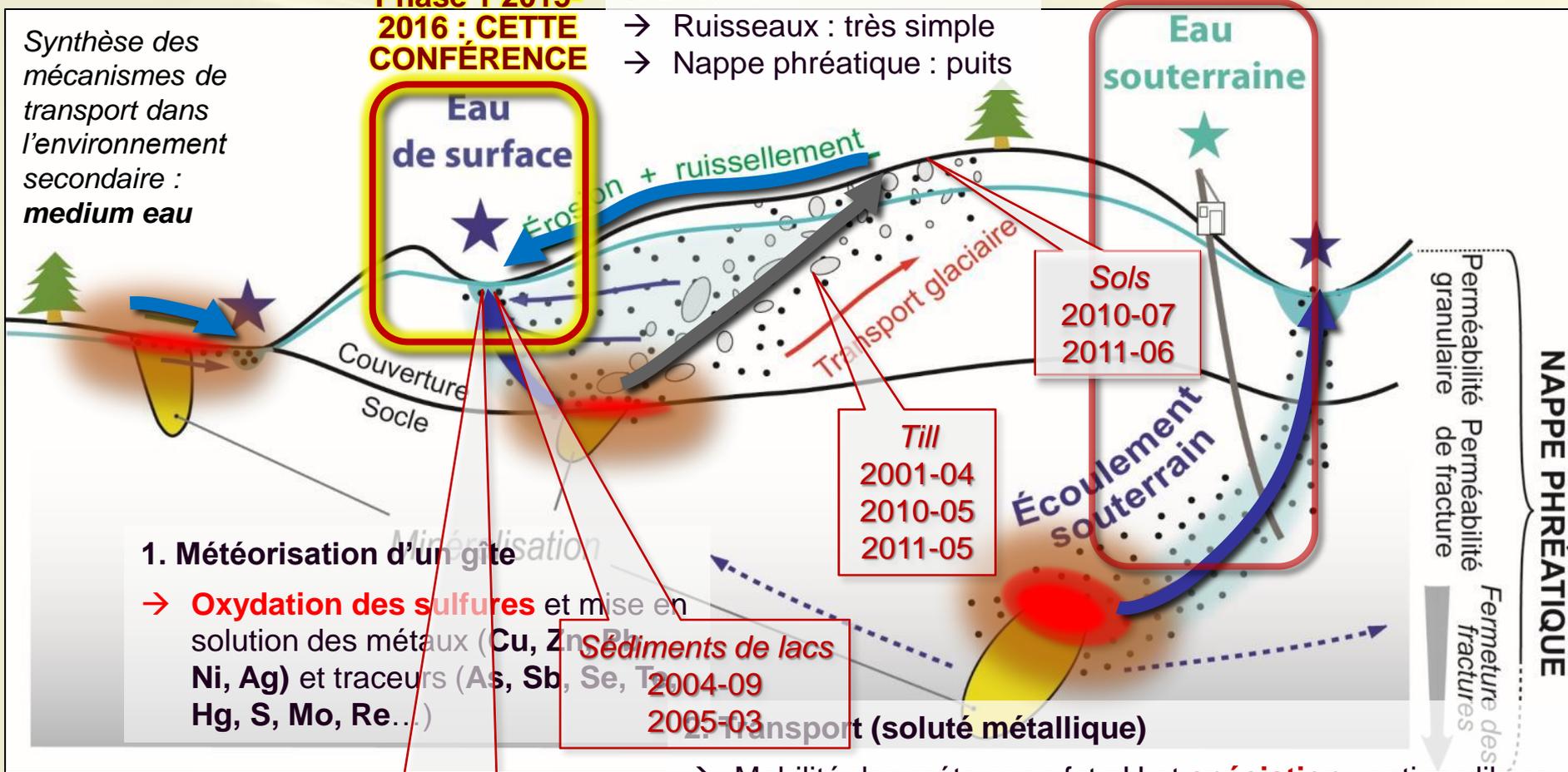
Phase 2 (2016-2017)
et phase 3 (*en cours*)

Phase 1 2015-2016 : **CETTE CONFÉRENCE**

3. Détection

- Ruisseaux : très simple
- Nappe phréatique : puits

Synthèse des mécanismes de transport dans l'environnement secondaire : **medium eau**



1. Météorisation d'un gîte

- **Oxydation des sulfures** et mise en solution des métaux (Cu, Zn, Pb, Ni, Ag) et traceurs (As, Sb, Se, Tl, Hg, S, Mo, Re...)

Sédiments de lacs
2004-09
2005-03

Sédiments de ruisseaux
2008-09
2009-02

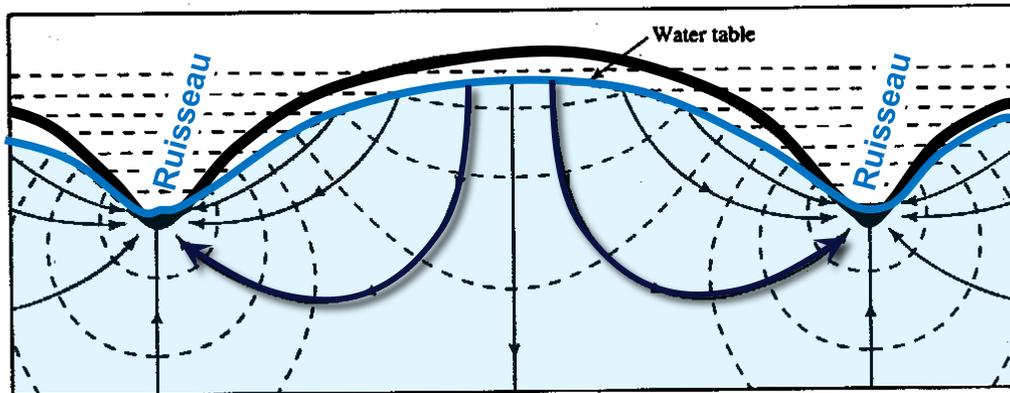
Till
2001-04
2010-05
2011-05

Sols
2010-07
2011-06

- Mobilité des métaux en fct pH et **spéciation** : cations libres (Ag^+ , Cu^{2+} , Zn^{2+} ...) ou complexes chlorurés, sulfatés, oxyanions ($H_2AsO_4^-$ ou $HAsO_4^{2-}$, $HMoO_4^-$ ou MoO_4^{2-} , SeO_4^{2-} , CrO_4^{2-} ...), etc.

- Dissipation des anomalies par **dilution géochimique : 1 km ? 5 km ?**

Les eaux superficielles : un échantillonnage profond



Surface piézométrique

Équipotentielles (traits pointillés)

Lignes d'écoulement (trait plein) :
perpendiculaire aux équipotentielles
(milieu isotrope)

Convergence des lignes d'écoulement → remontée vers l'exutoire de surface (rivière)

L'exploration minérale et le medium « eau »

- Utilisé dans les années 70 pour l'exploration uranifère
 - Limites analytiques de l'époque sont rédhibitoires : les concentrations métalliques de l'eau sont trop faibles (typiquement, ppb)

Avènement de l'ICPMS (années 90) + ICP Haute Résolution (années 2000-2010): regain d'intérêt

- Grands projets académiques et gouvernementaux (USGS, OGS, CSIRO, LEME)
 - Montrent les performances de ce medium pour l'exploration
- Début des levés régionaux systématiques d'eau de lacs dans le Supérieur Ontarien, à des fins d'exploration
- Intérêt grandissant...

→ **Méthodes « novatrices », en plein essor**

→ **Plusieurs avantages pratiques : faible coût**

→ **S'intègrent dans la problématique de l'exploration profonde**

1. Mise en contexte et problématique du projet

2. Revue littéraire d'études de cas

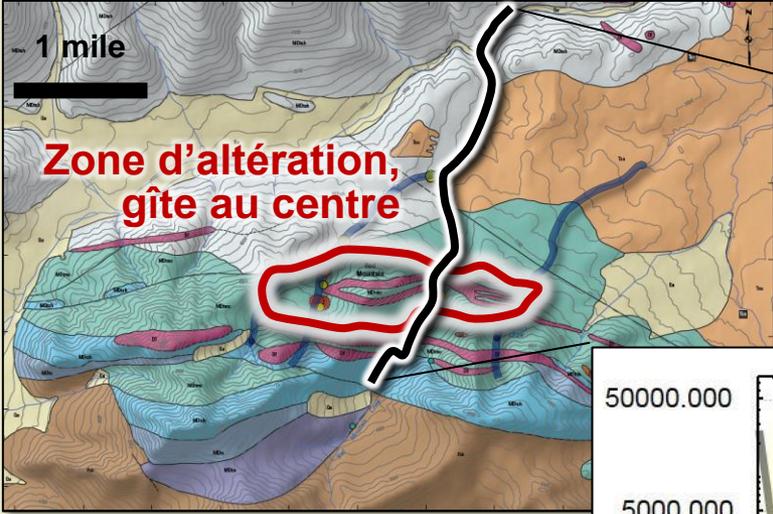
3. Hydrogéochimie des eaux de surface

- Recherche de bases de données
- Analyse du bruit de fond : identification des facteurs dominants
- Signature hydrogéochimique des zones minéralisées
- Rehaussement d'anomalies et tests de performance pour l'exploration minérale

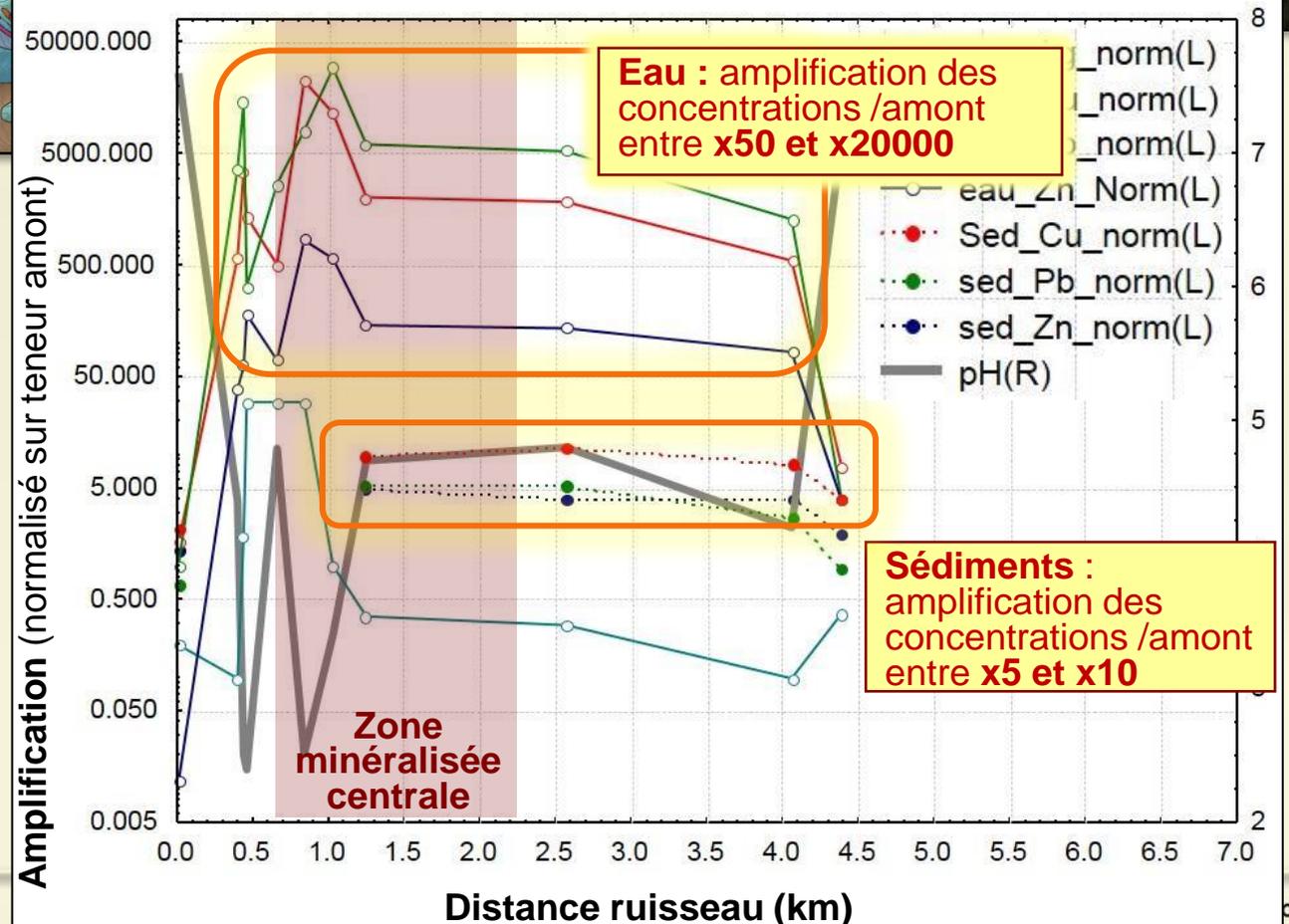
4. Conclusions et perspectives



Eppiner et al (2007) :
USGS report 2007-2589-1



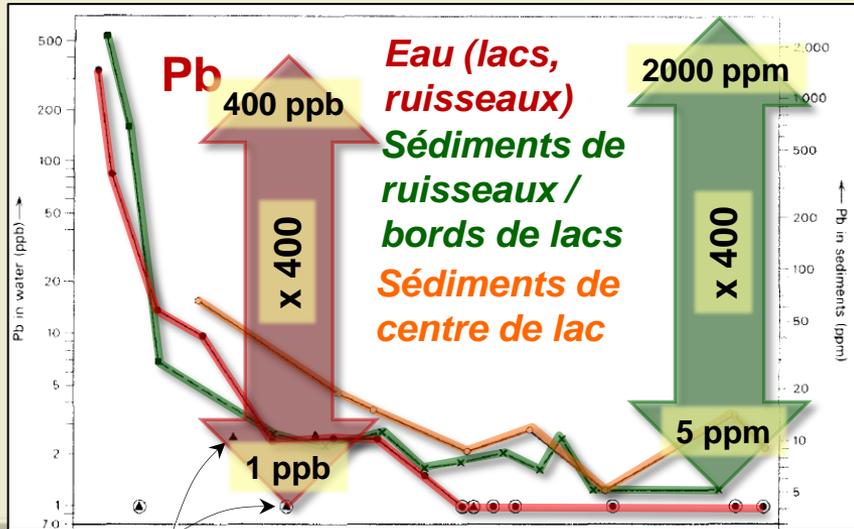
- Anomalies métalliques en aval du gîte sont nettement plus amplifiées l'eau que dans les sédiments
- Conditionné par les pH acides
- Ag ne fonctionne pas...



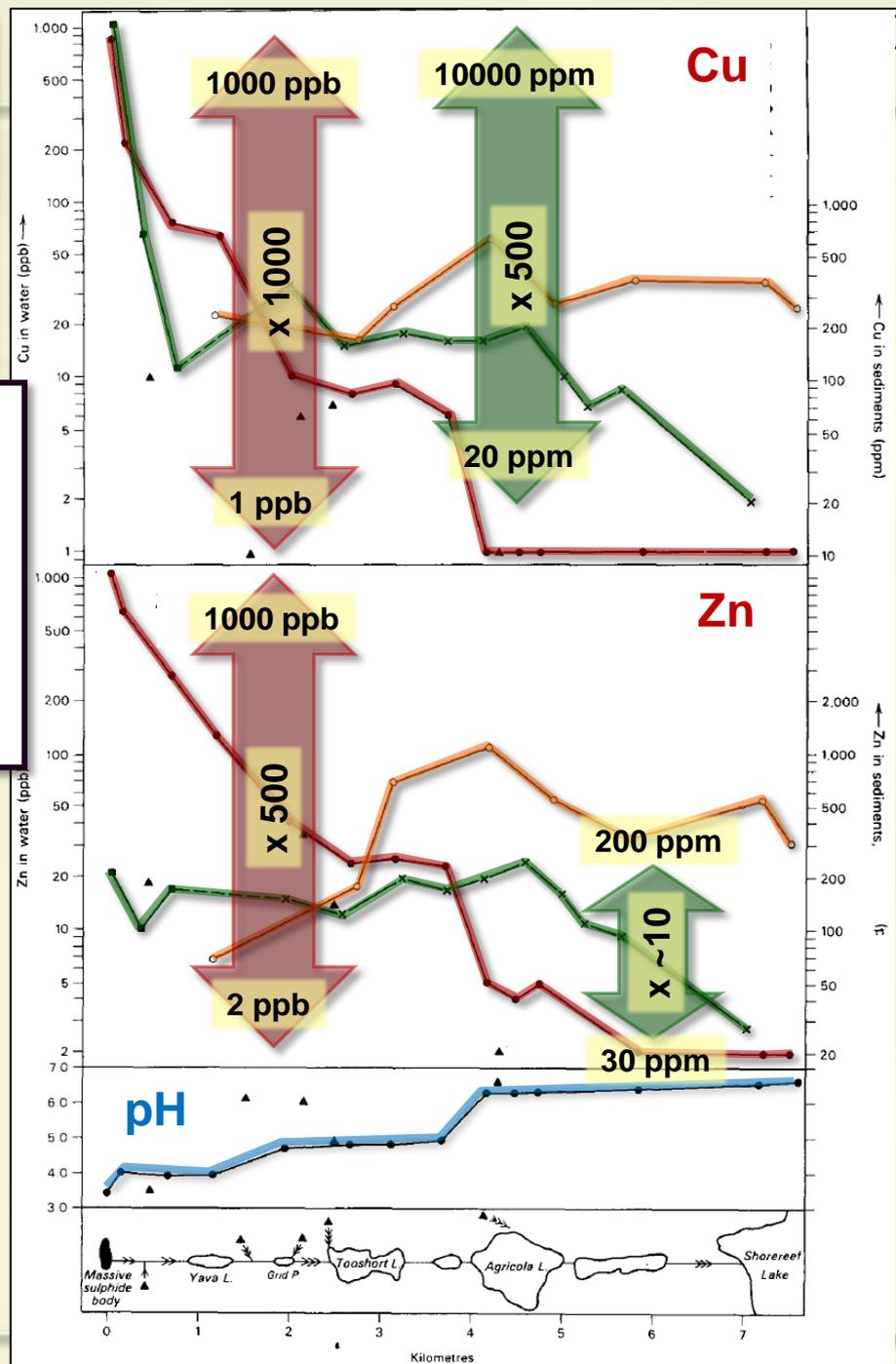
SM
1.3
4.9



- Le medium le plus performant pour la détection du VMS est l'eau de surface
 - Performant pour Pb, Zn et Cu
 - Facteur d'enrichissement supérieur
- Distance de dispersion = mobilité des éléments : Zn-Cu-Cd > Pb-Ag-As
- Eau très acide et sulfatée



Eau sur un autre réseau (non connecté au VMS)



1. Mise en contexte et problématique du projet

2. Revue littéraire d'études de cas

3. Hydrogéochimie des eaux de surface

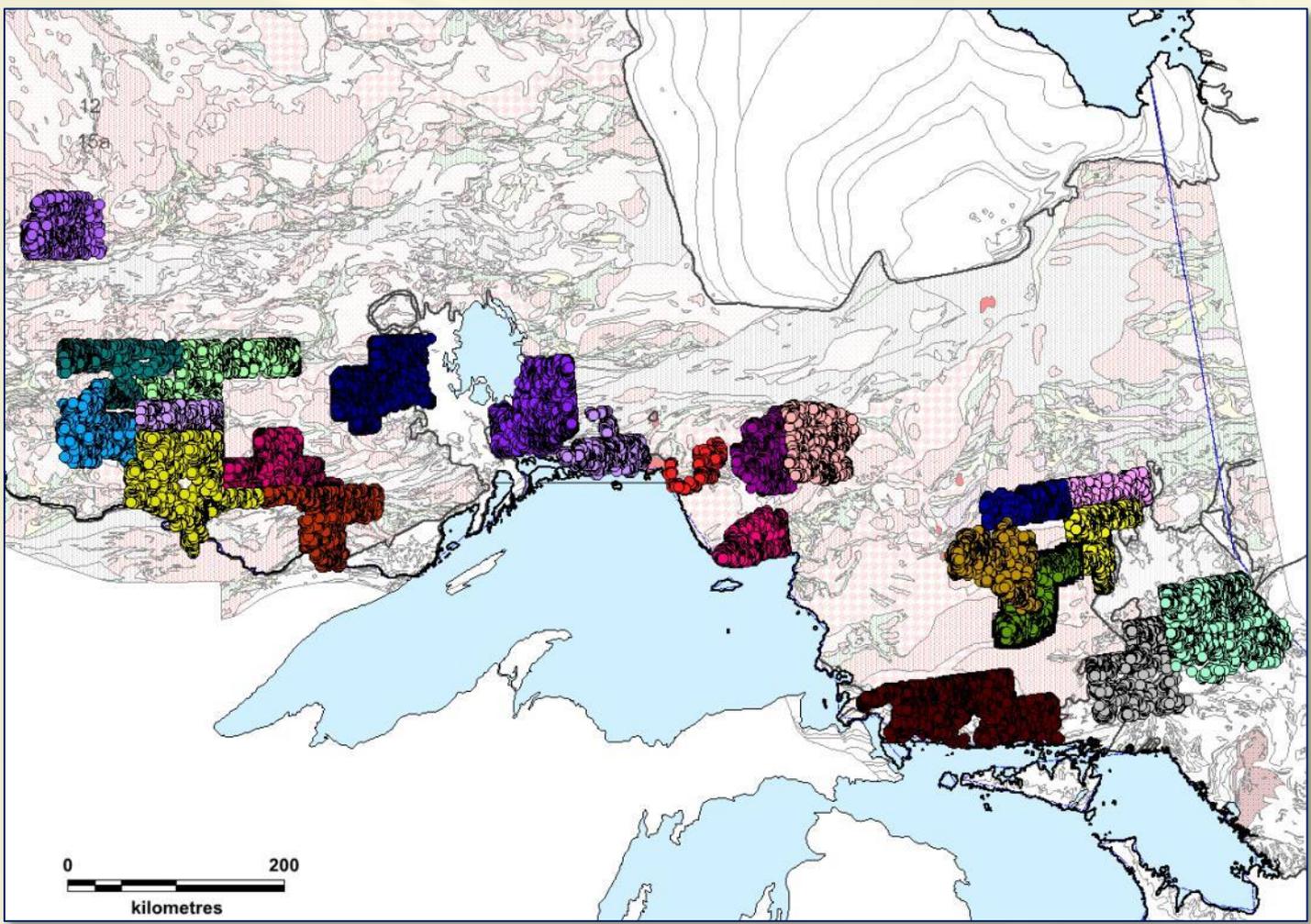
- Recherche de bases de données
- Analyse du bruit de fond : identification des facteurs dominants
- Signature hydrogéochimique des zones minéralisées
- Rehaussement d'anomalies et tests de performance pour l'exploration minérale

4. Conclusions et perspectives

OGS : 24 MRD* publiées depuis 1995, contenant chacune **plusieurs 100aines à 1000iers d'analyses ICP-MS complètes des eaux ET sédiments de lacs** (sites multi-media), avec pH et conductivité, majeurs + mineurs + traces etc.

- MRD243
- MRD225
- MRD206
- MRD201
- MRD145
- MRD137
- MRD131
- MRD110
- MRD116
- MRD218
- MRD188
- MRD150
- MRD225
- MRD267
- MRD296

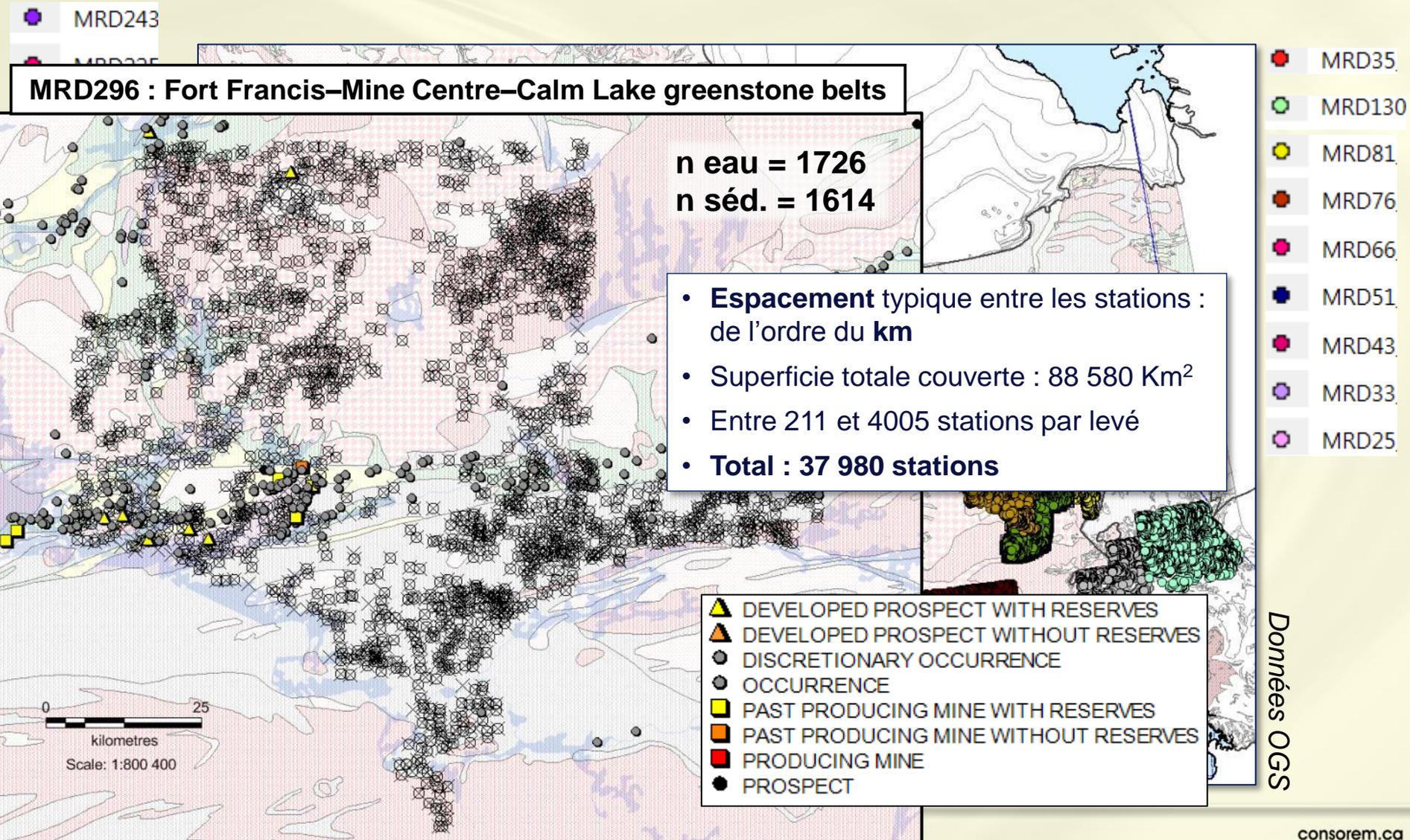
- MRD35
- MRD130
- MRD81
- MRD76
- MRD66
- MRD51
- MRD43
- MRD33
- MRD25



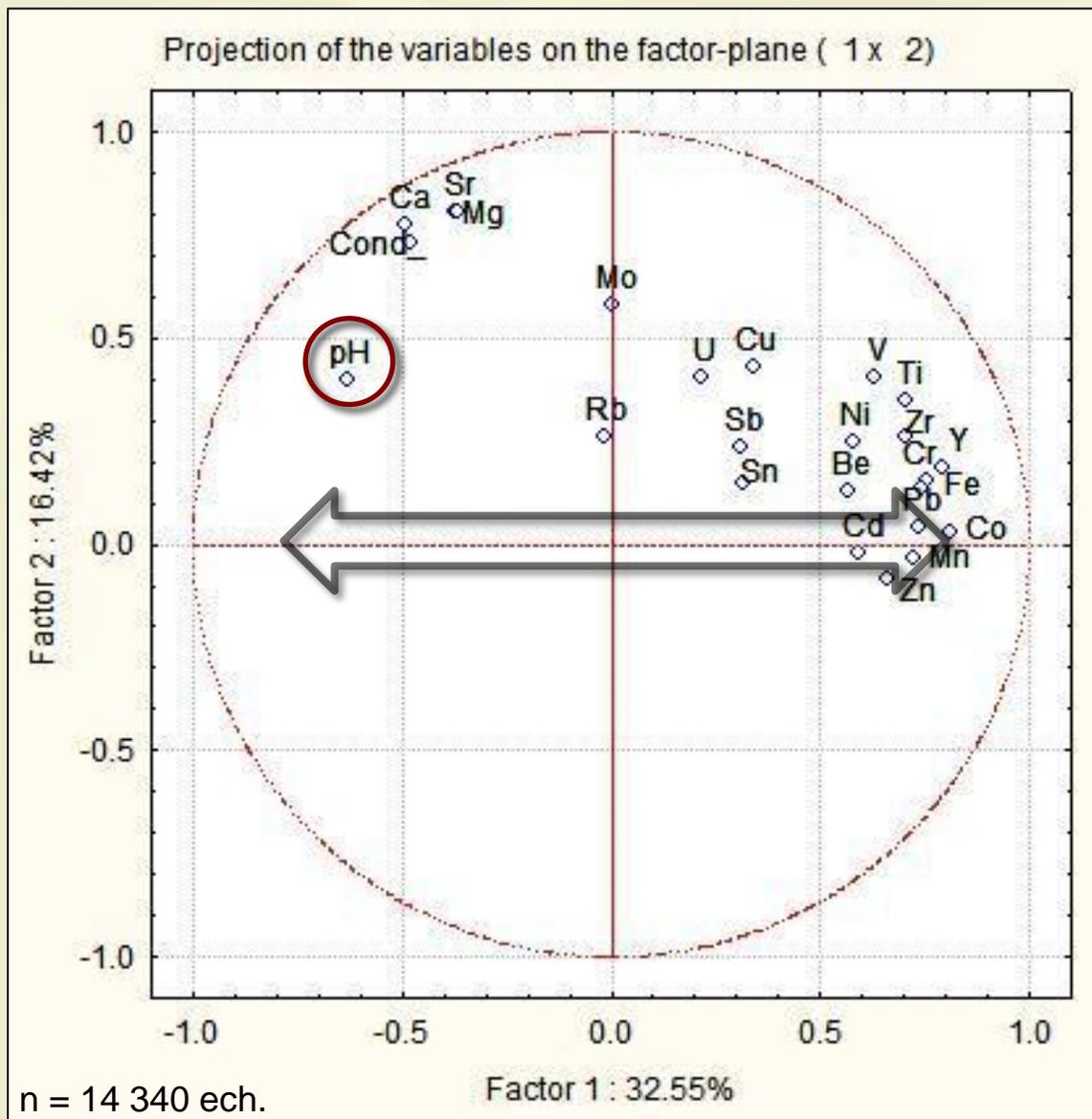
Données OGS

*Miscellaneous Release Data

OGS : 24 MRD* publiées depuis 1995, contenant chacune **plusieurs 100aines à 1000iers d'analyses ICP-MS complètes des eaux ET sédiments de lacs** (sites multi-media), avec pH et conductivité, majeurs + mineurs + traces etc.



Analyse en composantes principales : 1. beaucoup d'éch., peu d'éléments



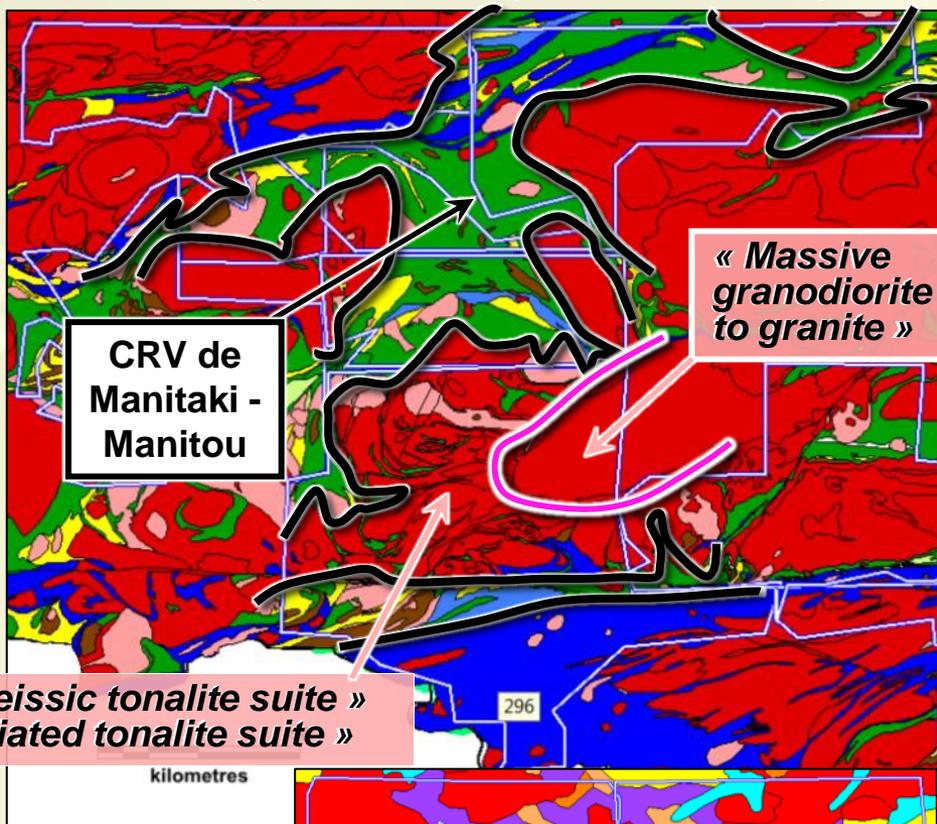
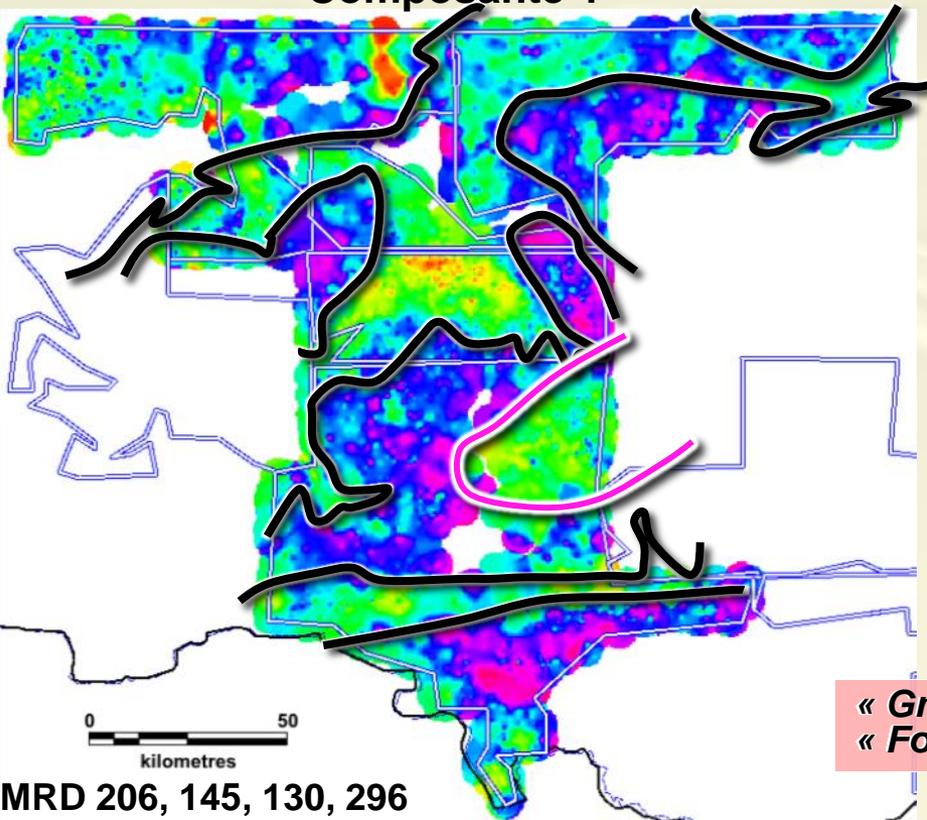
COMPOSANTE 1
32.5 % de la variance

pH
(conductivité, charge minérale)

Opposé aux concentrations en éléments traces (métaux de base et de transition)

Composante 1

Géologie détaillée (2011, MRD 126)



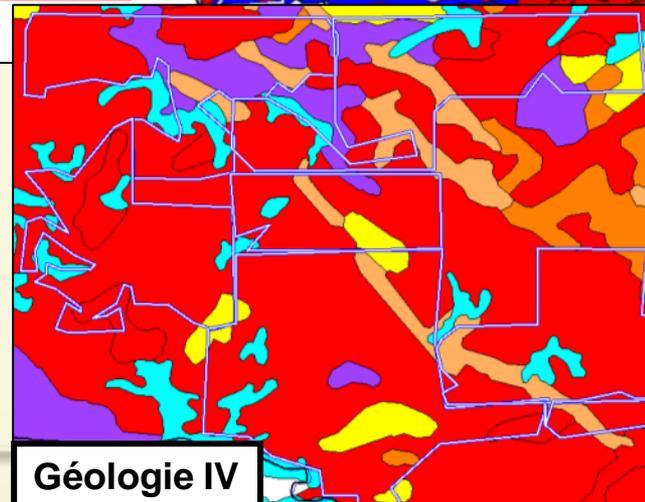
Premier facteur déterminant l'hydrogéochimie des lacs :

la géologie du socle

- CRV de Manitaki et de Manitou
- Granites post-tectoniques vs TTG

→ Domaines hydrogéochimiques

Géologie IV : essentiellement roc affleurant



MRD 188, 150
Swaize Area

Comp 1

0 50
kilometres

Géologie socle

CRV de
Swaize

0 50
kilometres

Géologie IV

0 50
kilometres

Domaines hydrogéochimiques très marqués malgré la couverture de till épais au NO :

1. CRV de Swaize + intrusions post-tectoniques
2. TTG (suites tonalitiques foliées ou gneissiques)

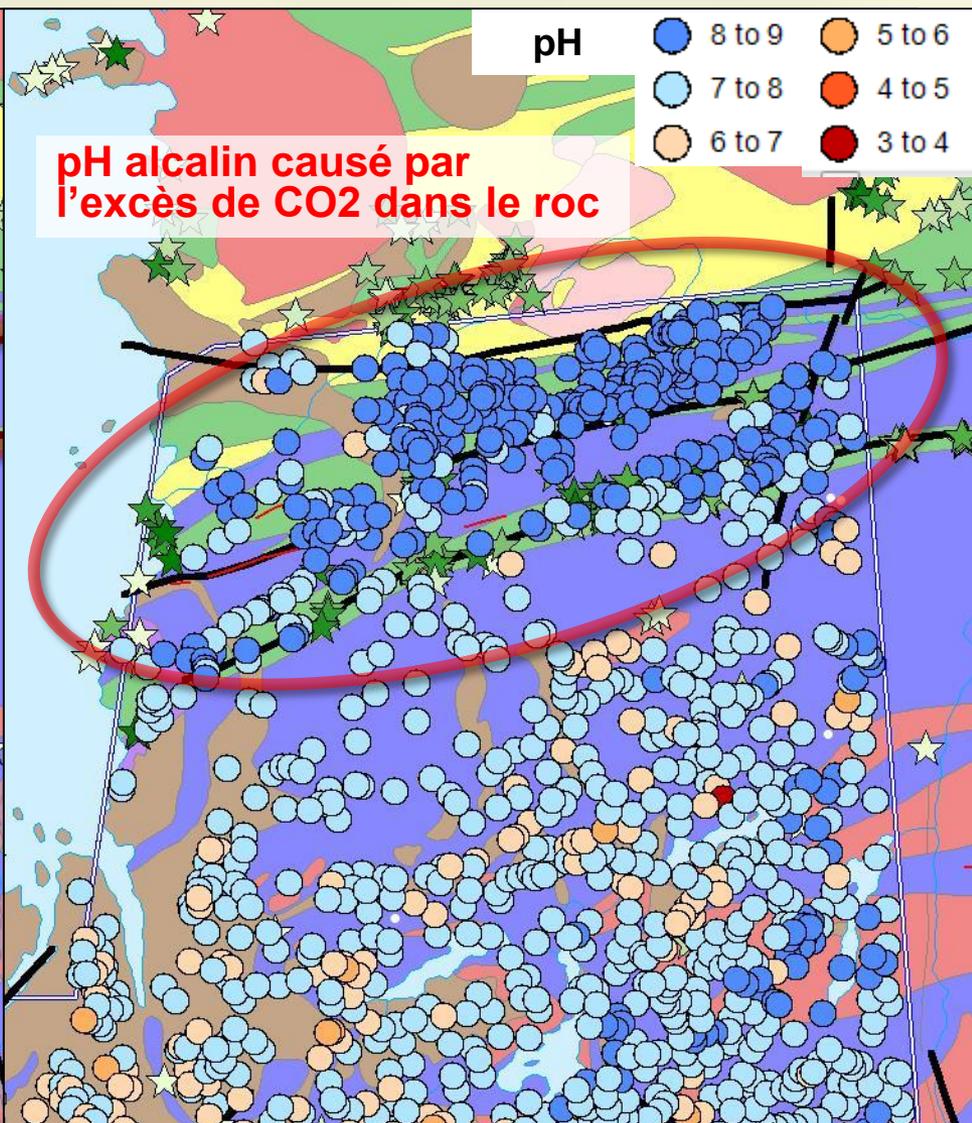
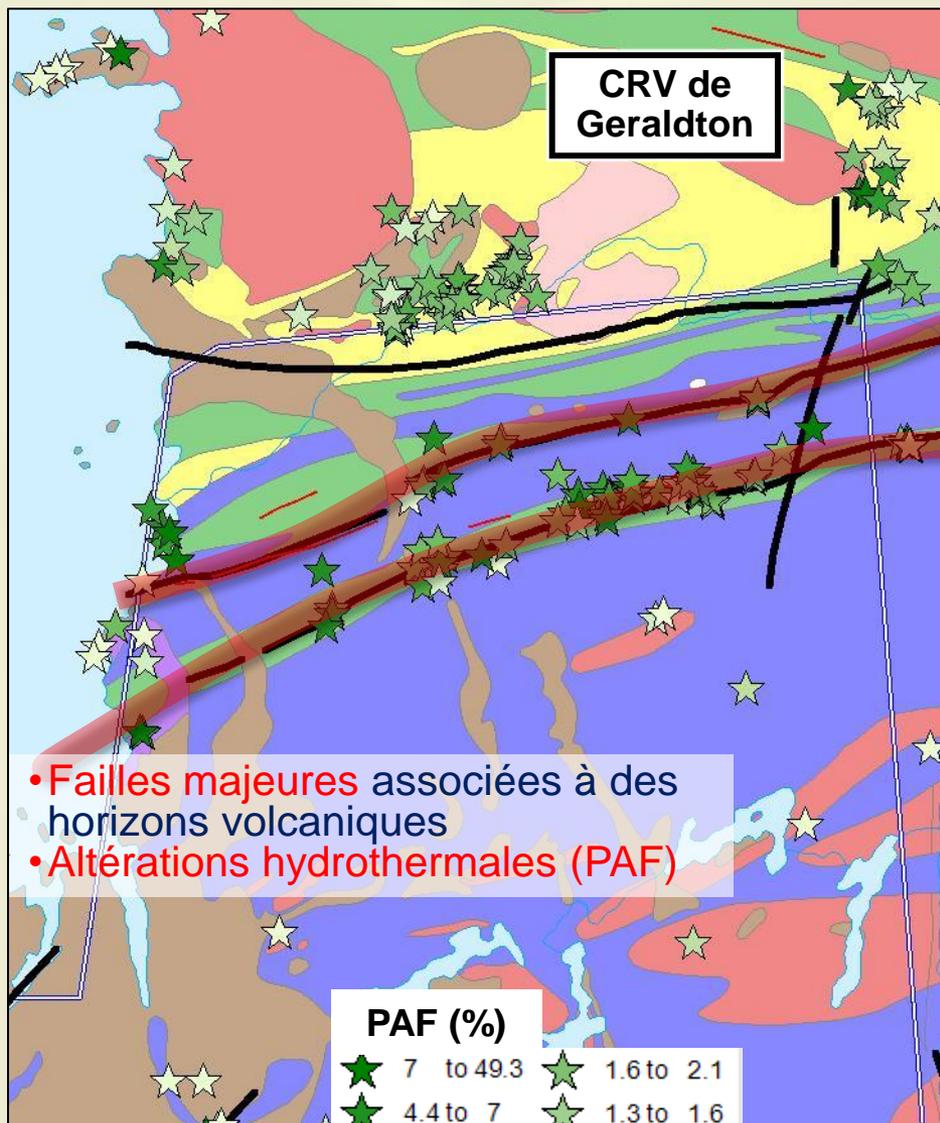
= géologie du socle, aptitude des roches à tamponner le pH de l'eau

Roches à capacité de tampon supérieure :

- **Intrusions alcalines**, roches carbonatées, **mafiques/ultramafiques** (Ca, Mg), ou zones à forte **altération hydrothermale** (apport CO₂)
→ **CRV** (exemples Swaize, Manitou)
- Sédiments IV épais et/ou carbonatés

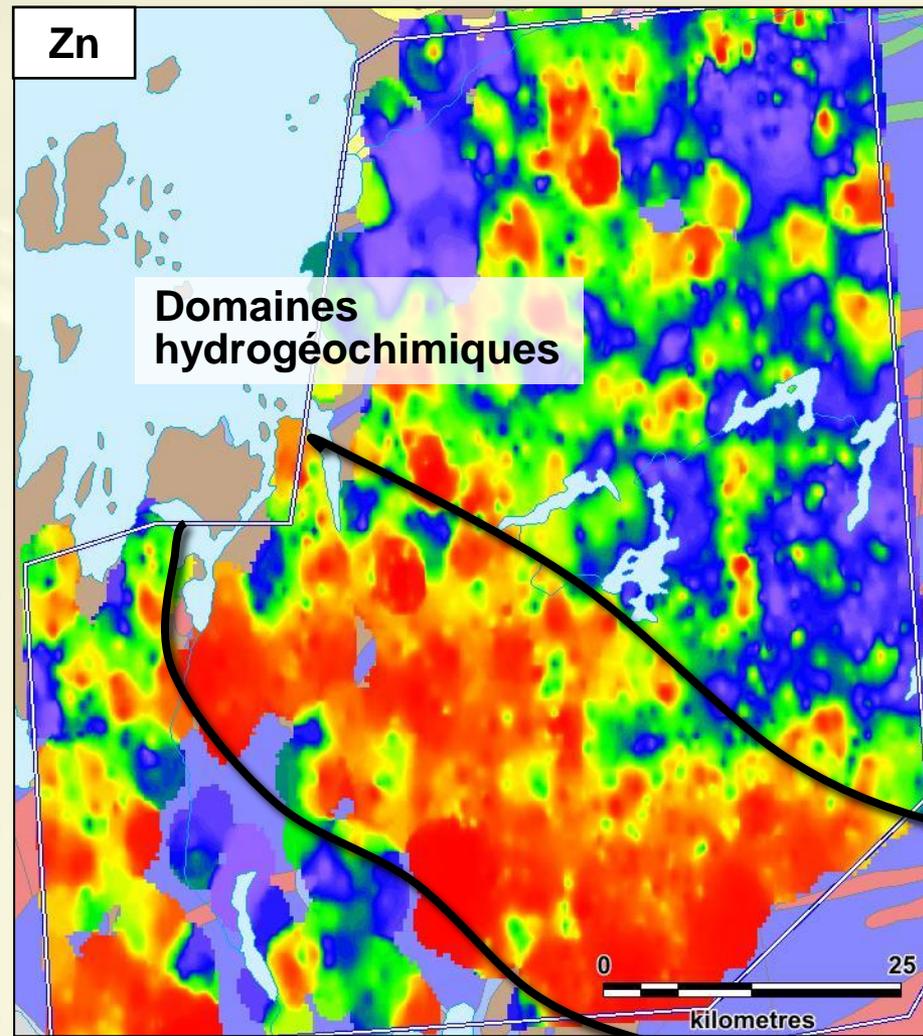
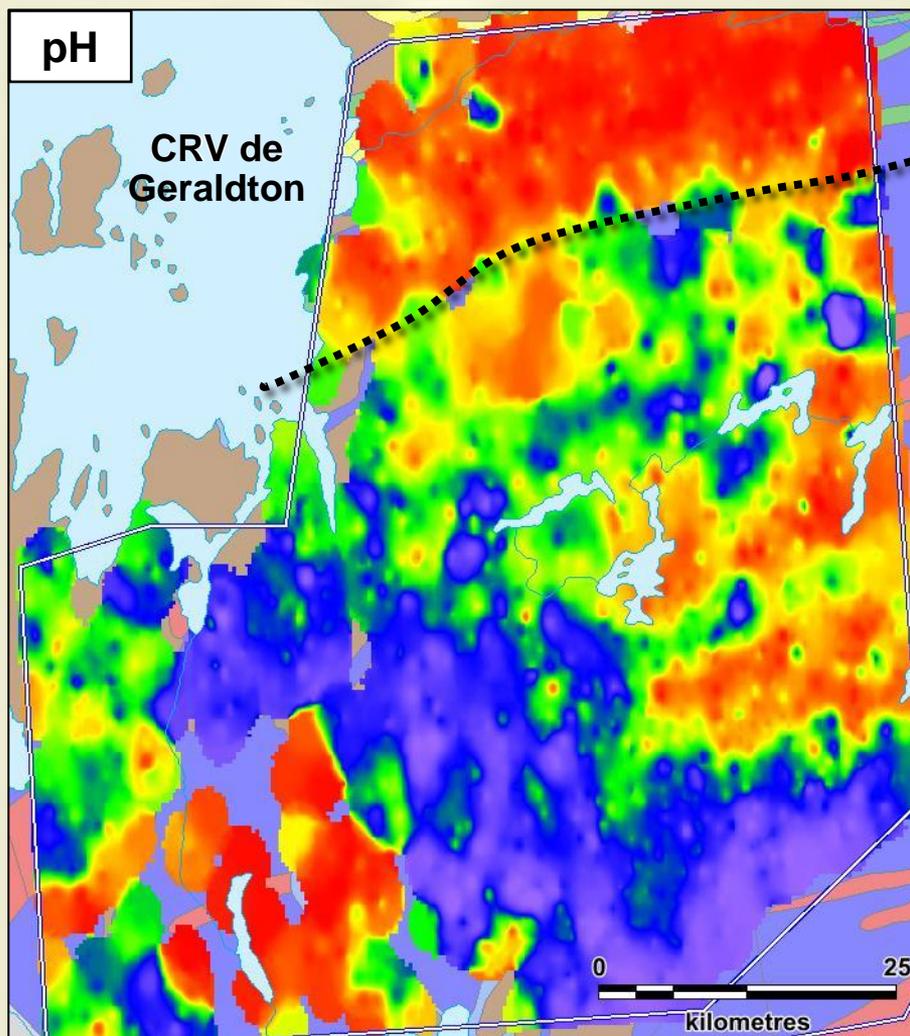
Échantillons de roche (PETROCH2010)

Échantillons d'eau (MRD243)



Données OGS

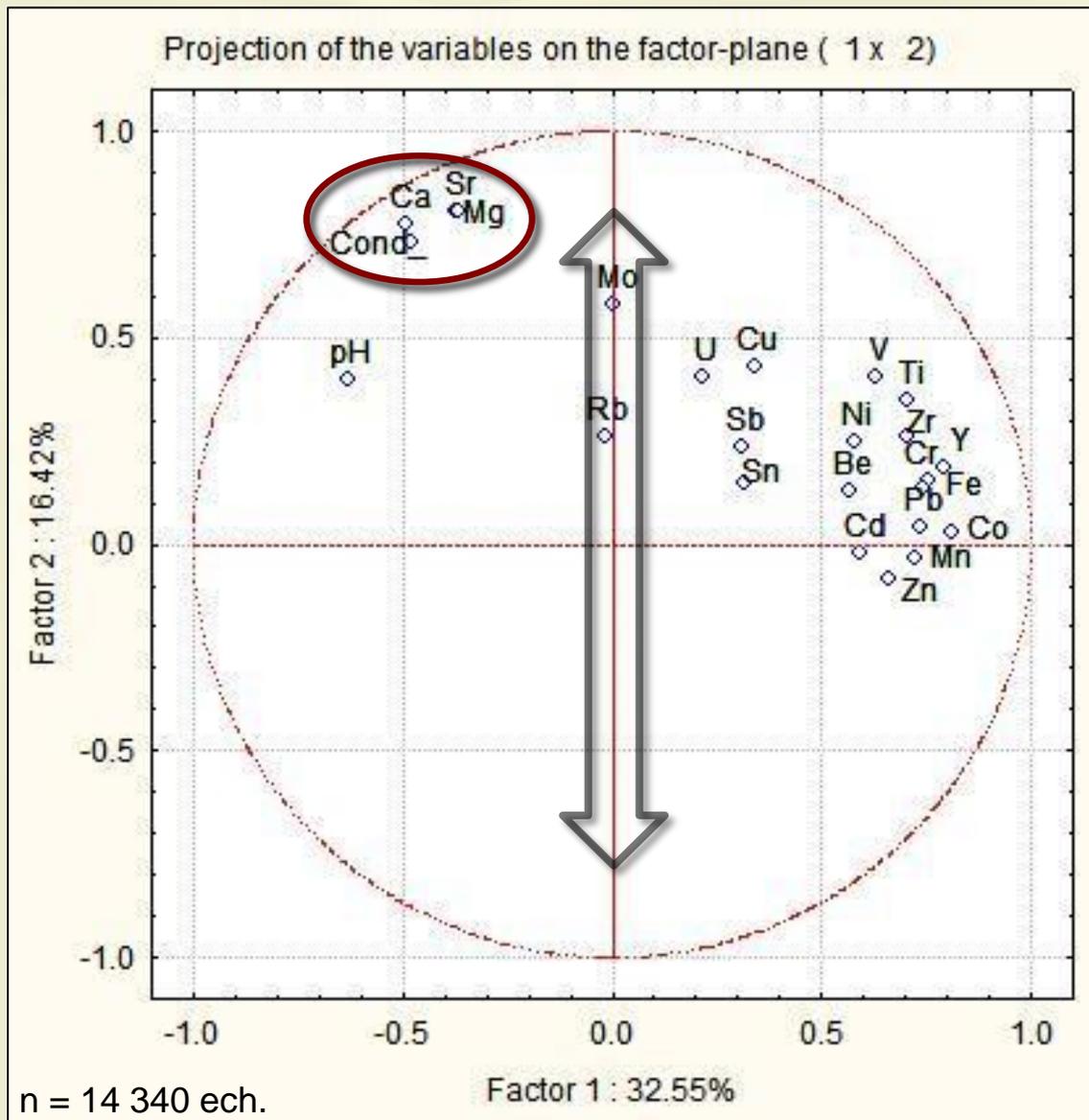
Échantillons d'eau (MRD243)



Anti-corrélation très nette entre le pH et Zn

→ Zn dans l'eau est faible au dessus de la CRV en dépit d'un niveau de base plus élevé dans la roche...

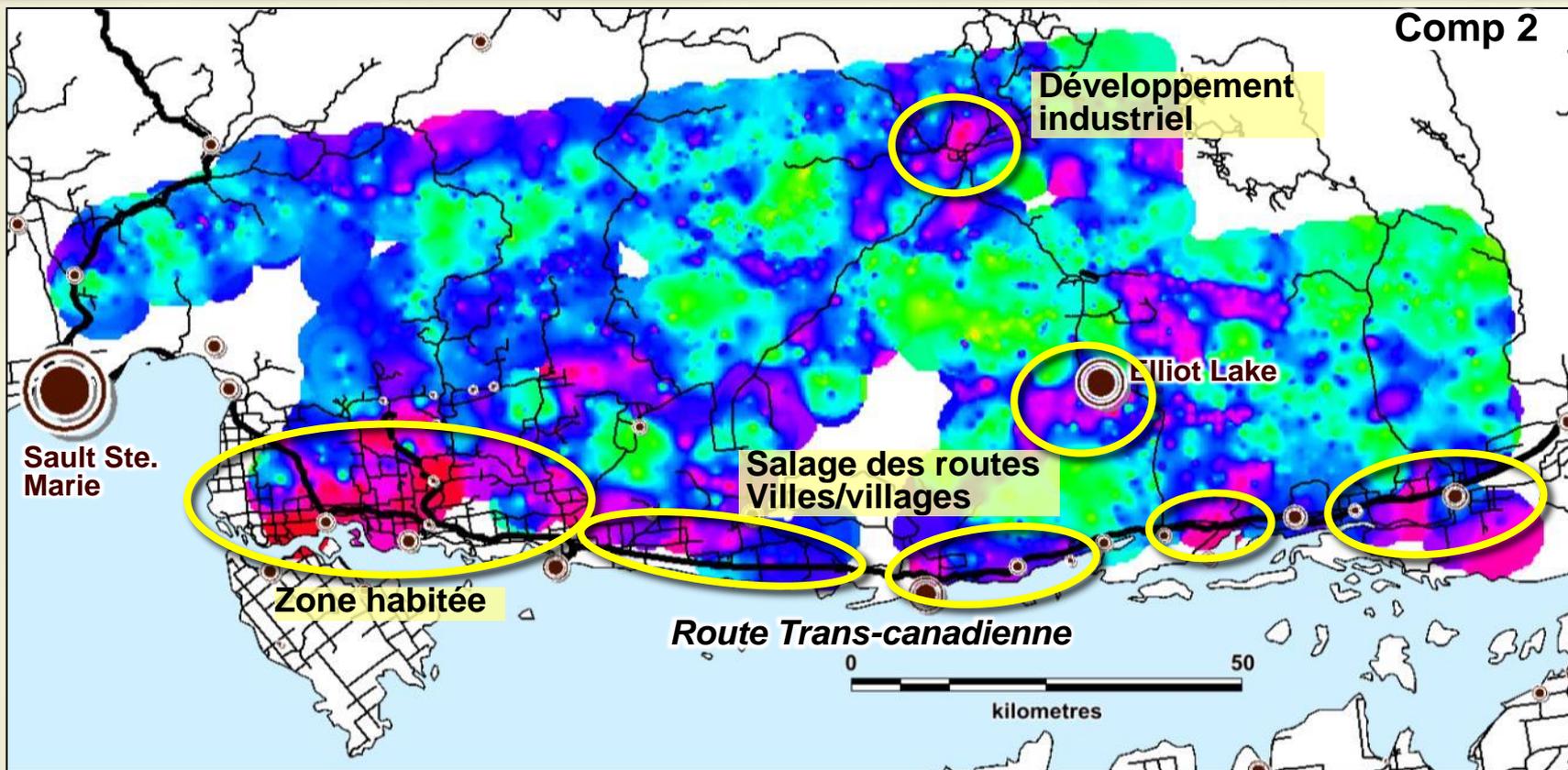
Analyse en composantes principales : 1. beaucoup d'éch., peu d'éléments



COMPOSANTE 2
16.4 % de la variance

**Conductivité, Ca, Mg, pH,
 Mo, Cu, (U, V)**

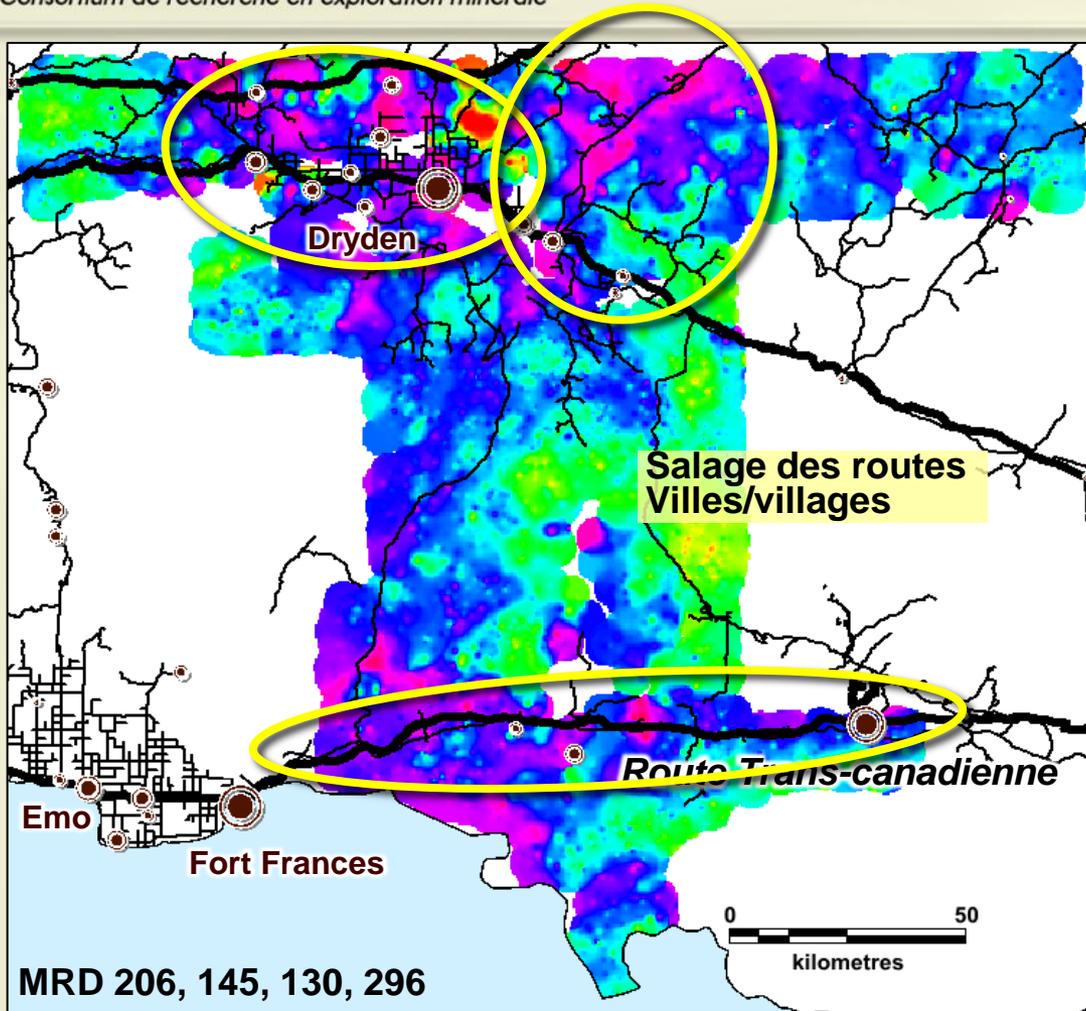
→ « Salinité » de l'eau (i.e.,
 charge minérale, ou *TDS*)



MRD 267 Elliot Lake Sault Ste Marie

Deuxième composante principale (16.4 %) : facteurs anthropiques

Développements industriels, habitations, salage des routes



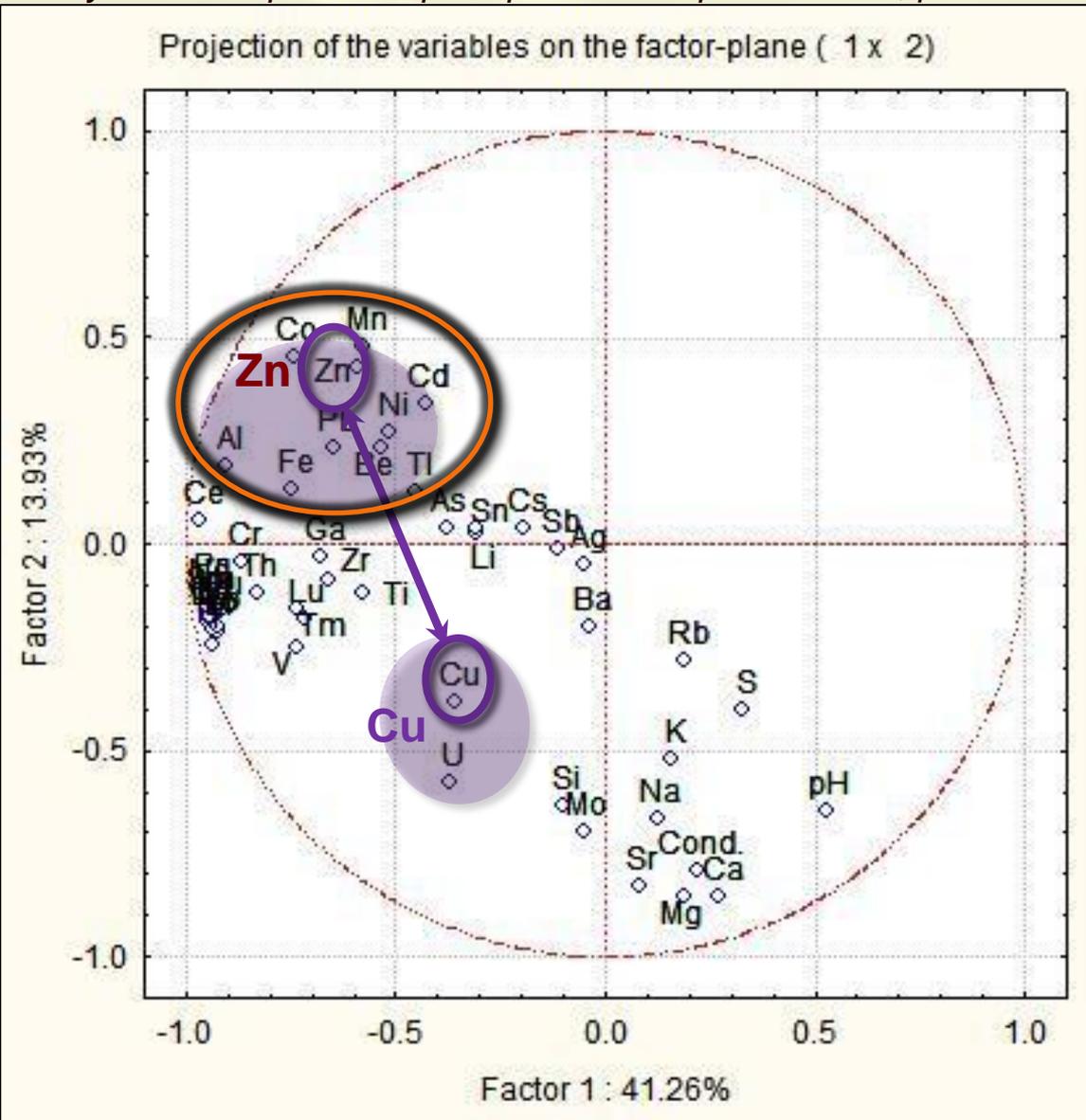
Comp 2

Deuxième composante principale (16.4 %) : facteurs anthropiques

Développements industriel, habitations, salage des routes

Principe : suppression de l'influence des facteurs dominants, i.e., contrôle niveau de base

Analyse en composantes principales : 2. bcp d'éléments, peu d'éch.



Rehaussement par anomalies multi-éléments

- Groupe d'éléments qui ne peuvent être anomaux tous ensemble que dans des contextes de minéralisations
→ Ne doivent pas avoir la même sensibilité aux facteurs dominants

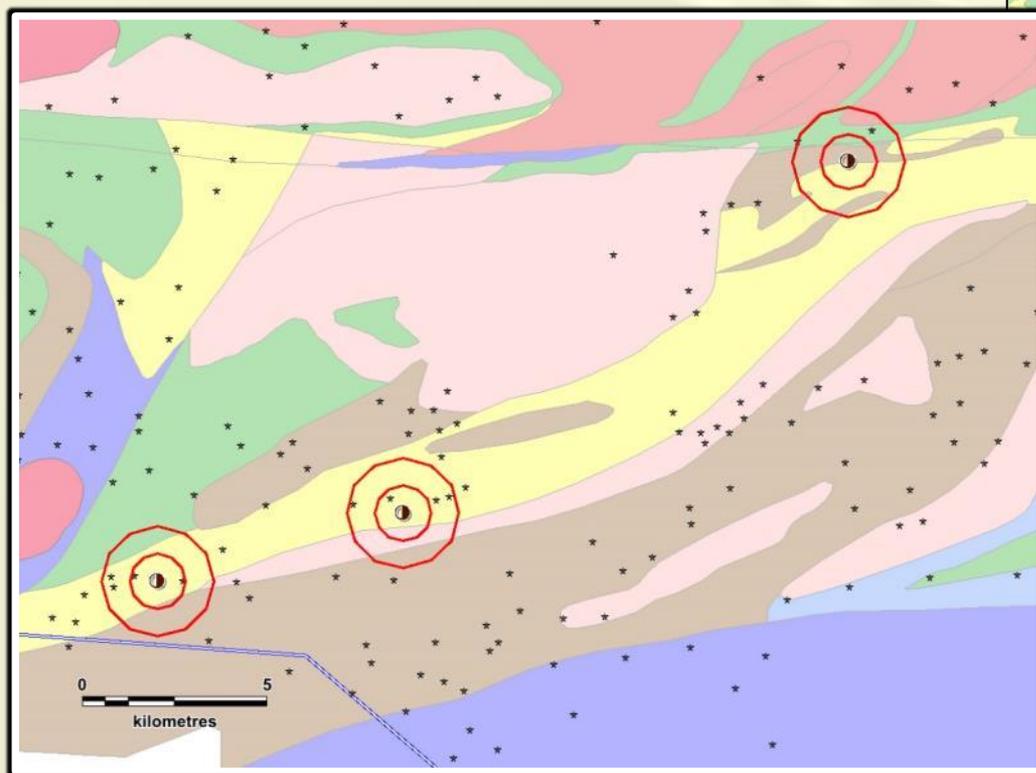
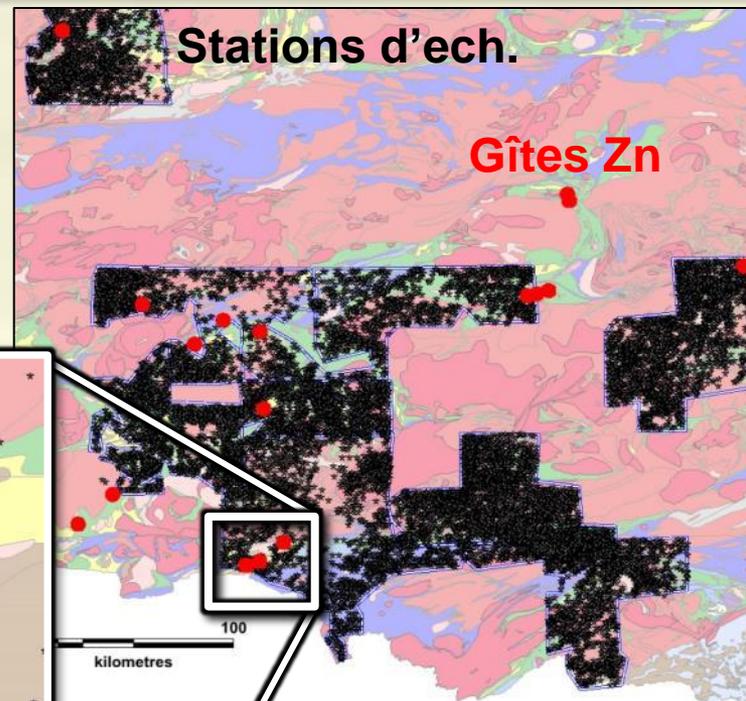
Rehaussement par ratios d'éléments

- Ratios d'éléments ayant les mêmes tendances globales mais un comportement opposé en contexte de minéralisation

Quel ratio ?

Quels éléments sont **anomaux** dans l'environnement des gîtes ?

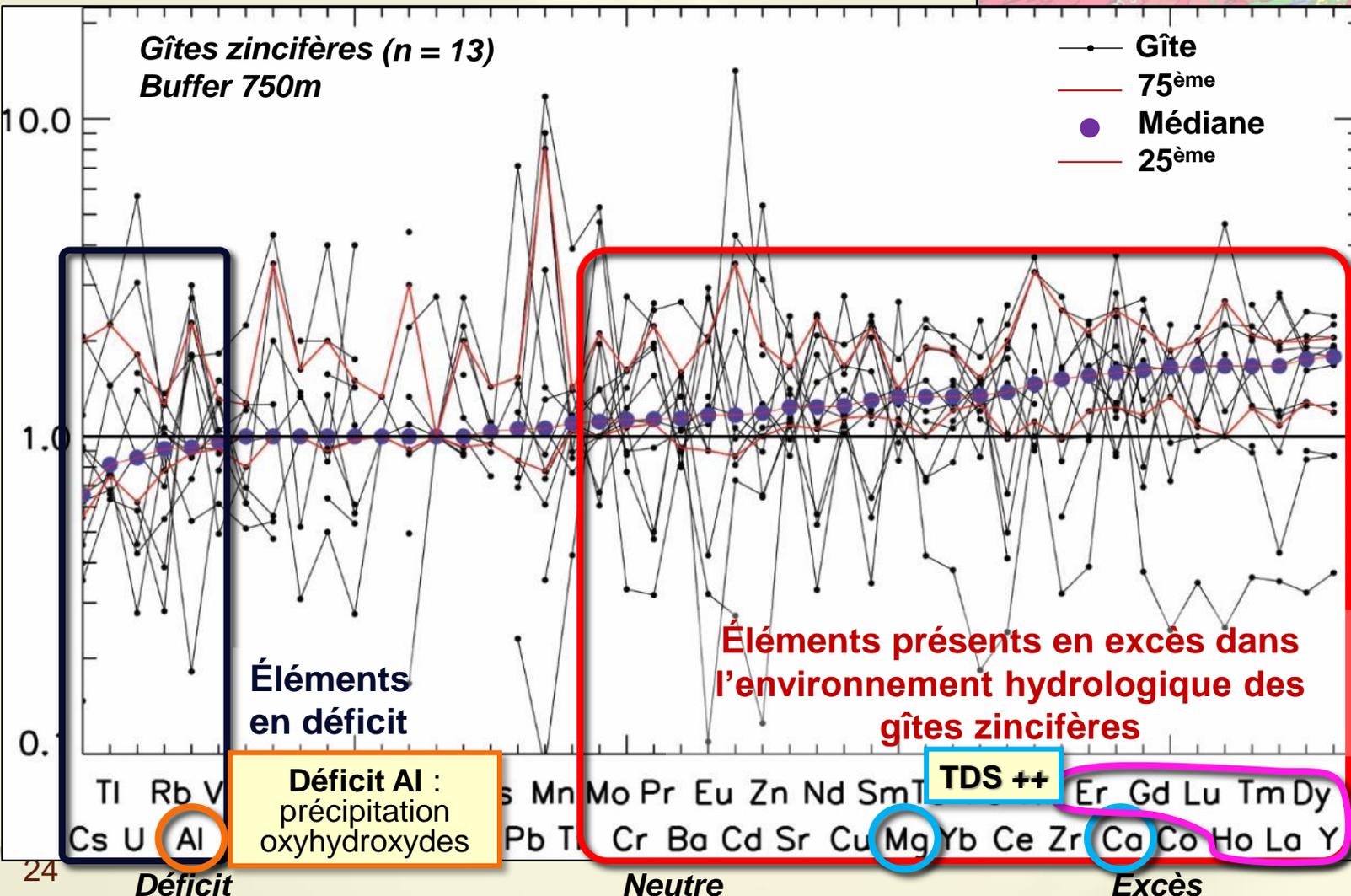
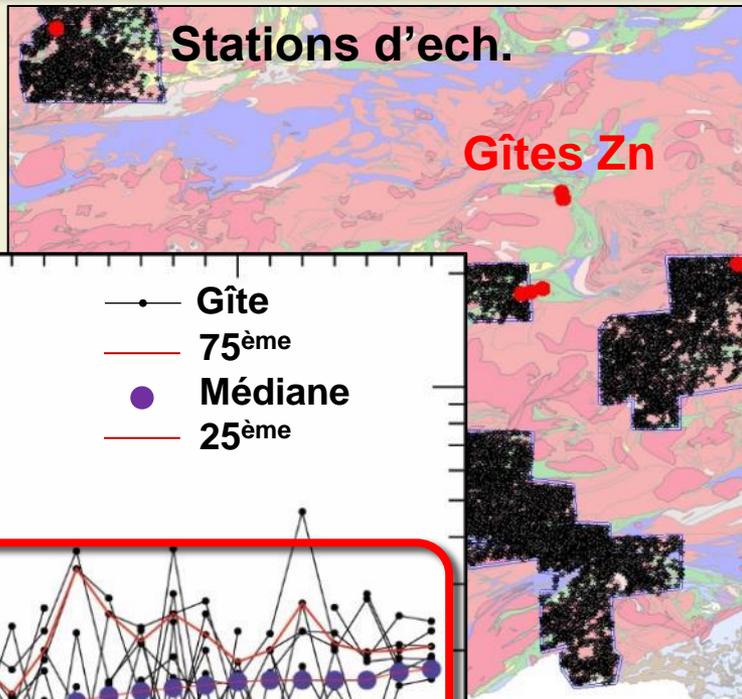
$$\text{Ratio} = \frac{\text{Concentration moyenne}_{\text{éch. situés à proximité du gîte}}}{\text{concentration moyenne}_{\text{levé complet}}}$$



Quels éléments sont **anomaux** dans l'environnement des gîtes ?

Concentration moyenne_éch. situés à proximité du gîte

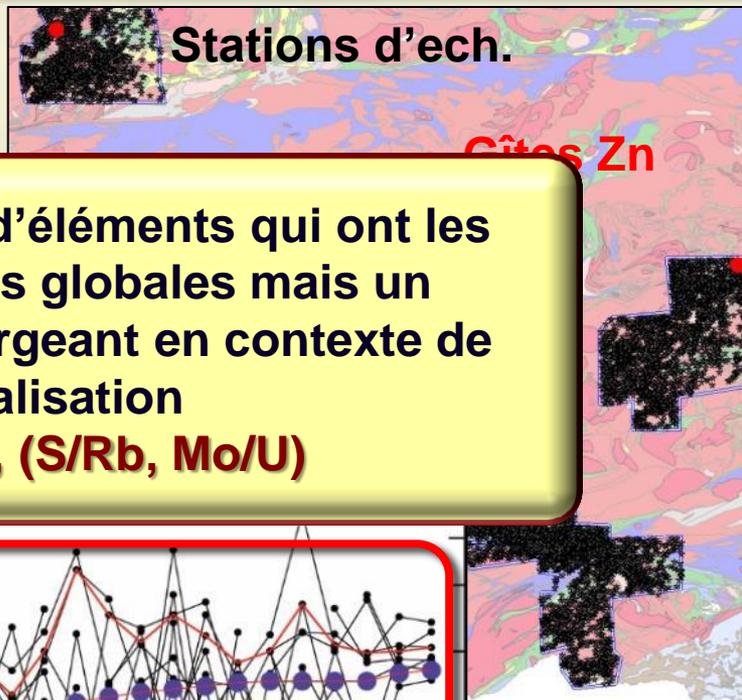
$$\text{Ratio} = \frac{\text{concentration moyenne_éch. situés à proximité du gîte}}{\text{concentration moyenne_levé complet}}$$



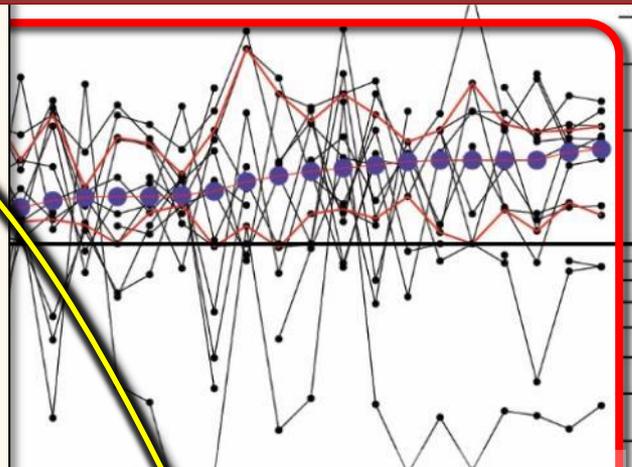
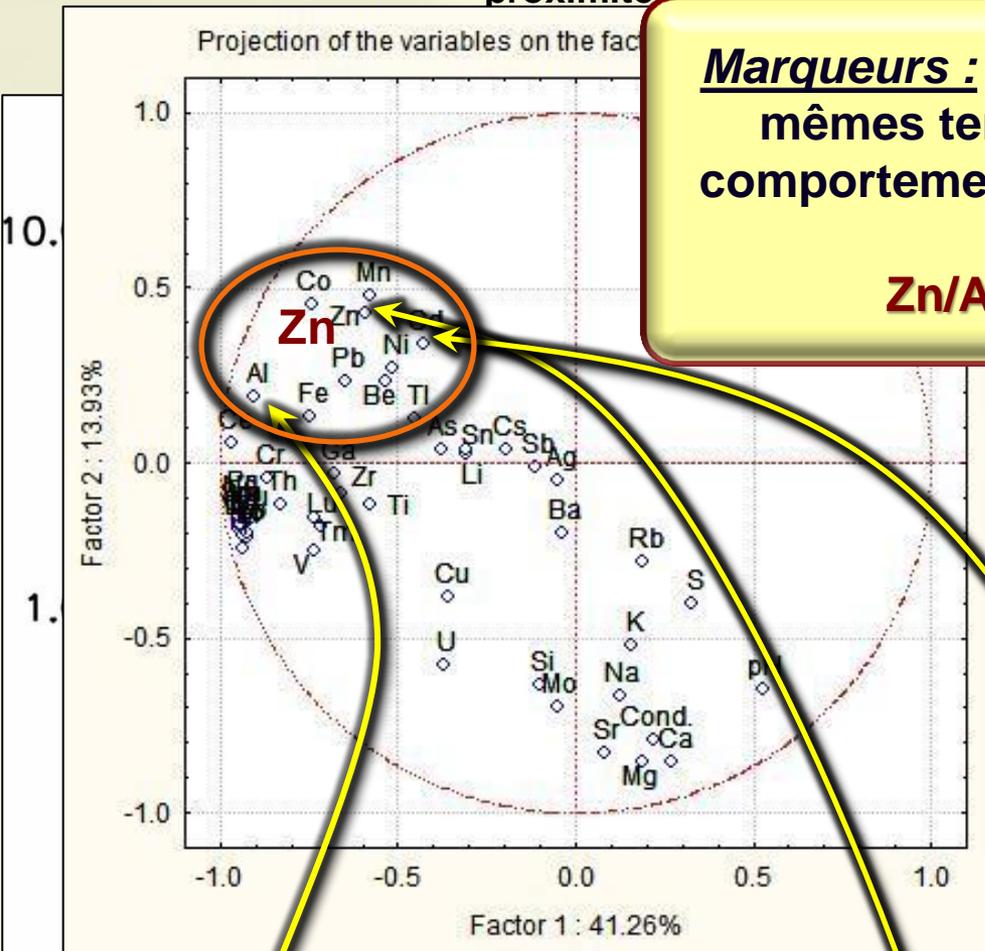
REE : très enrichis

Quels éléments sont **anomaux** dans l'environnement des gîtes ?

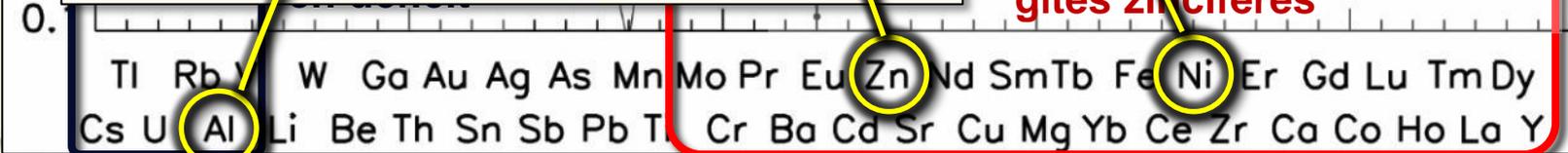
Concentration moyenne_éch. situés à proximité du gîte



Marqueurs : ratios d'éléments qui ont les mêmes tendances globales mais un comportement divergeant en contexte de minéralisation
Zn/Al, Ni/Al, (S/Rb, Mo/U)



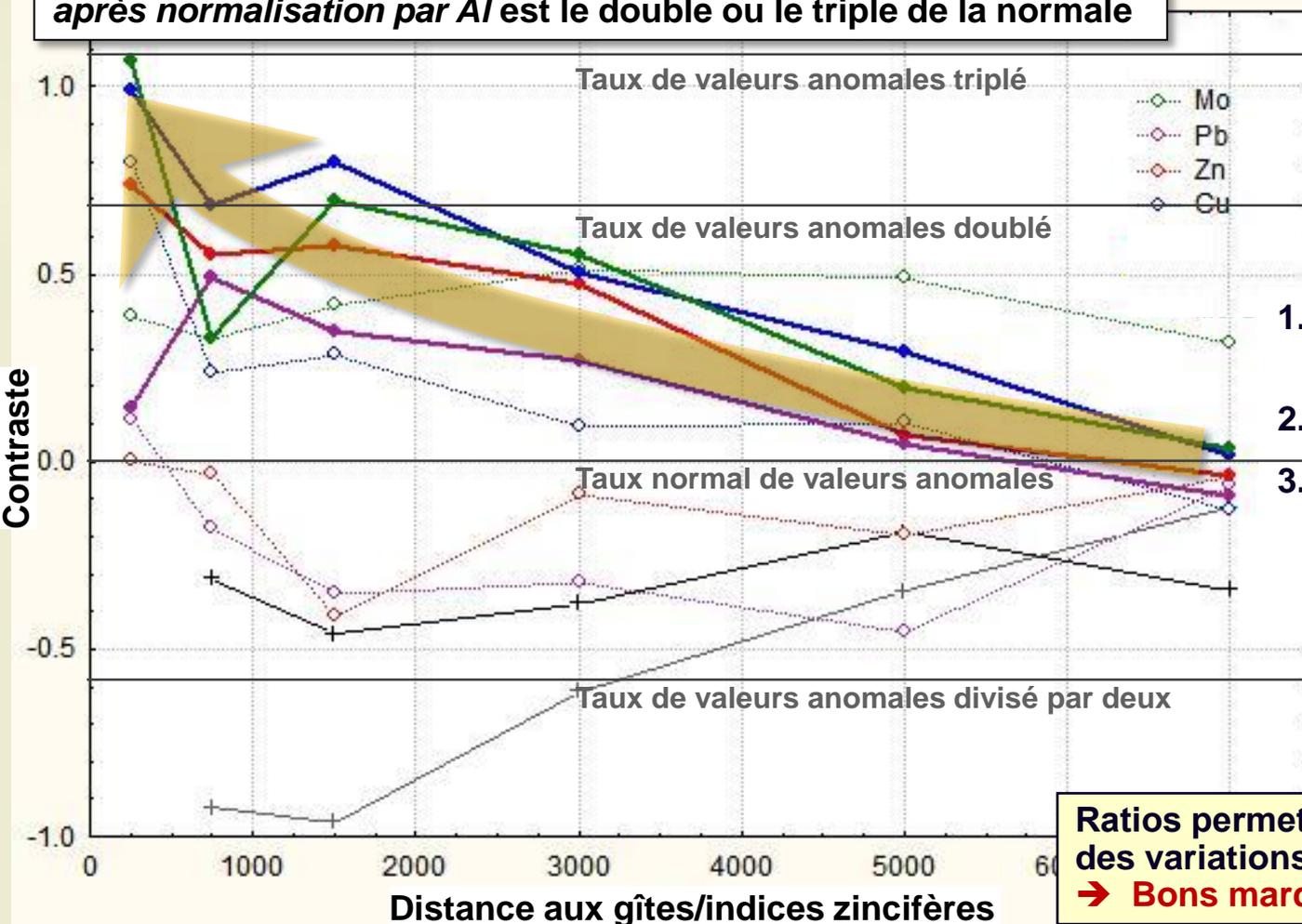
éléments présents en excès dans l'environnement hydrologique des gîtes zincifères



Tests sur les gîtes/indices connus en Ontario (données OGS)

Contraste = $\ln(\text{proba_ano_in} / \text{proba_ano_out})$

À proximité des minéralisations : fréquence des valeurs anormales après normalisation par AI est le double ou le triple de la normale



n ech total = 29 605

0 – 250 m = 141

250 – 500 m = 376

500 – 1500 m = 1200

1500 – 3000 m = 3178

3000 – 5000 m = 3273

5000 – 7000 m = 3176

>7000 m = 18261

n gîtes et indices Zn = 26

1. **Éléments en excès (Zn, Cu, Mo, Pb...)**

2. **Éléments en déficit (Al, U)**

3. **Ratios**, en prenant des éléments ayant une sensibilité semblable aux variations dominantes

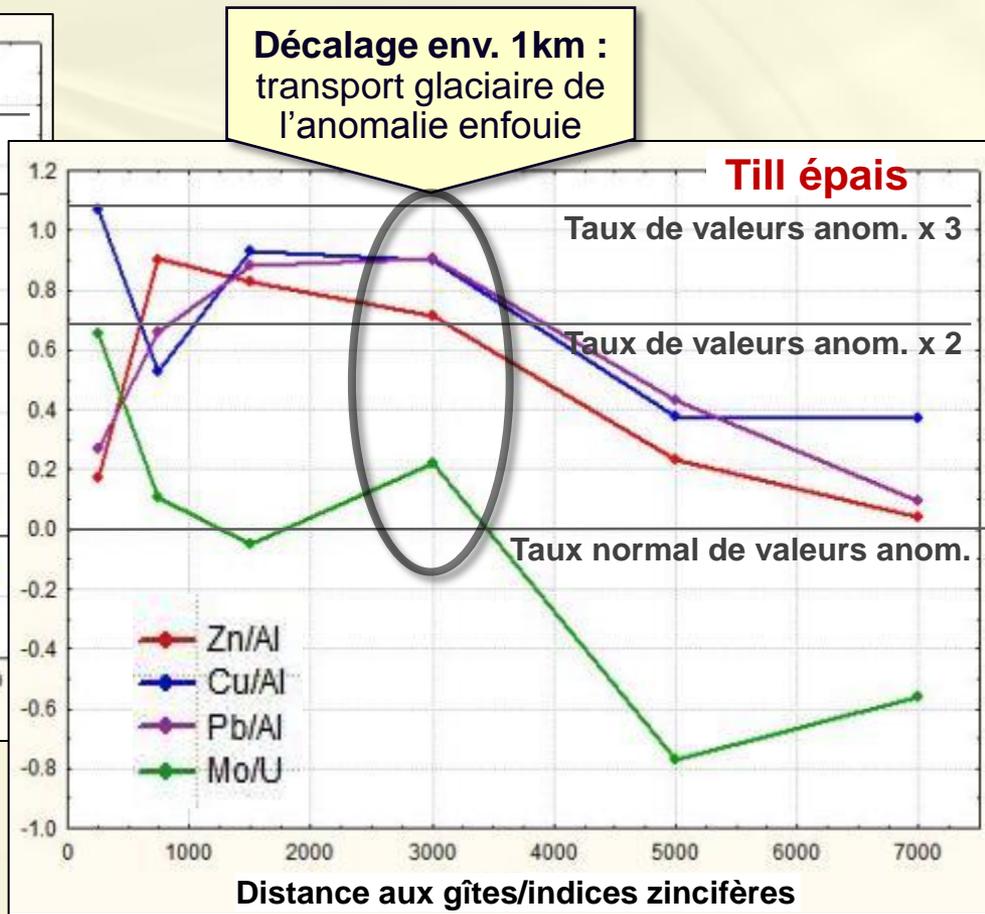
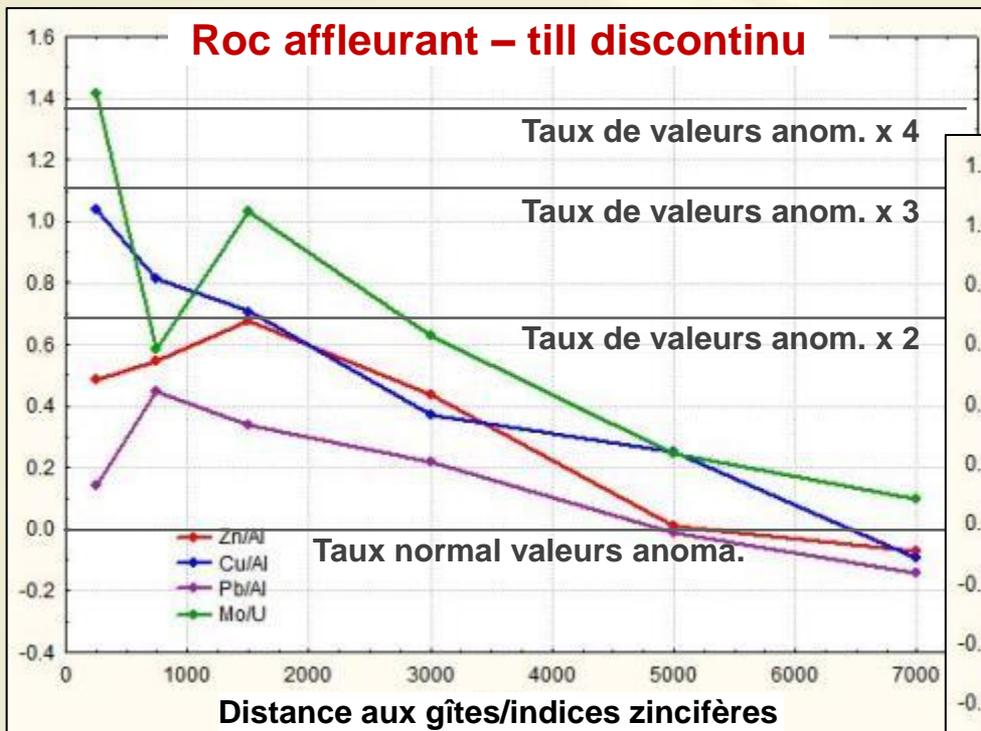
Ratios permettent d'annuler l'effet des variations dominantes (pH, TDS)

→ **Bons marqueurs**

Tests sur les gîtes/indices connus en Ontario (données OGS)

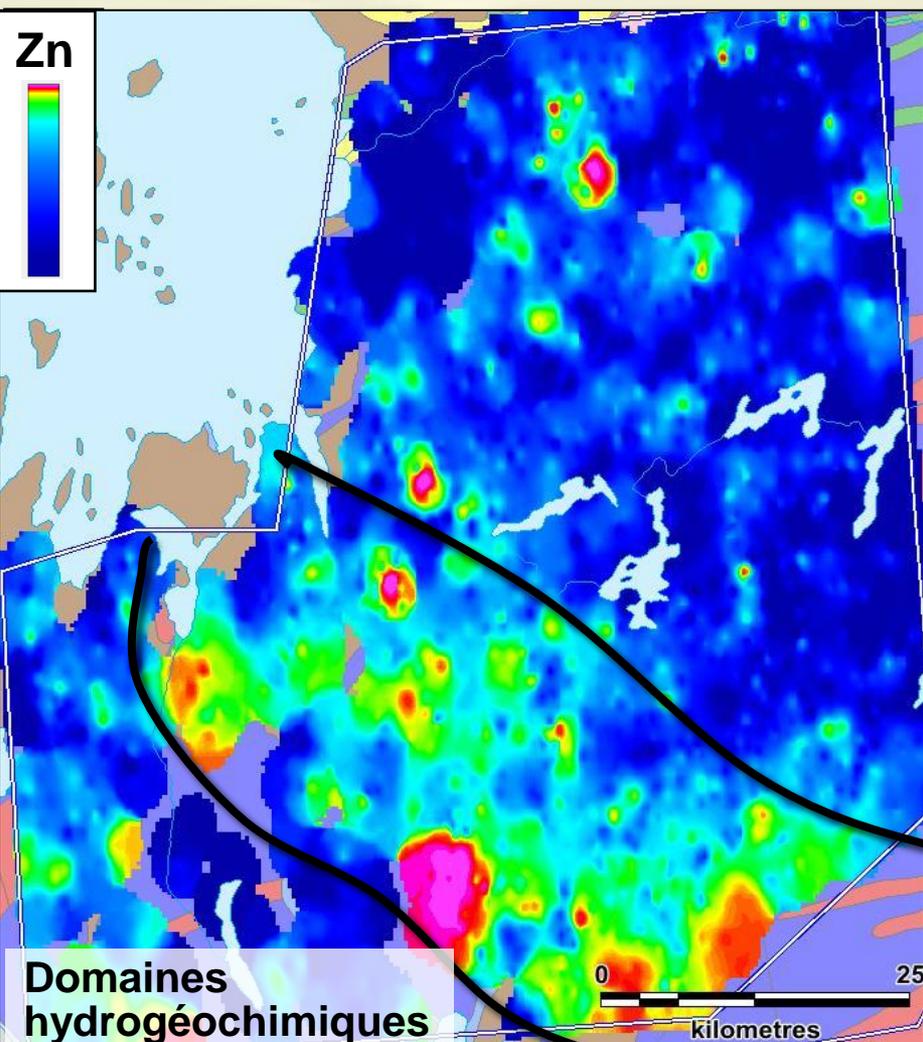
n ech total = 29 605

Influence de la couverture IV

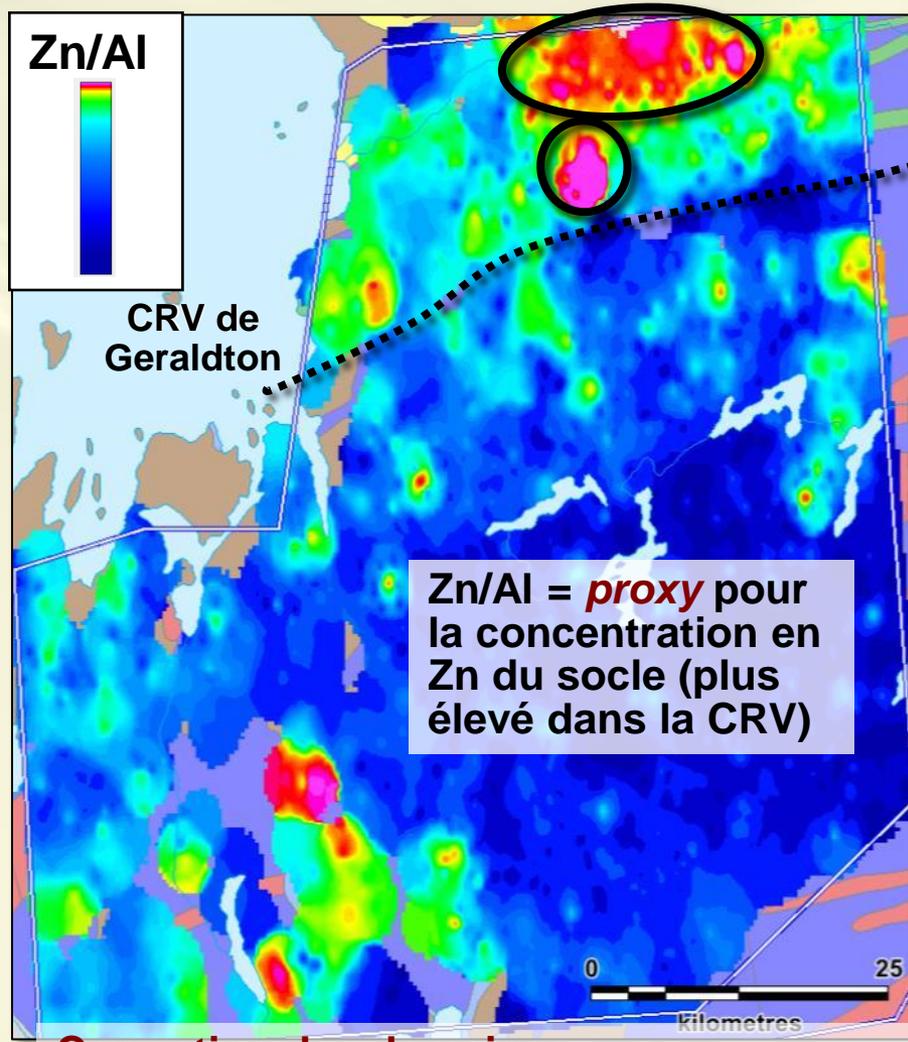


Les performances de la méthode ne sont pas significativement diminuées par la présence de till épais
Excepté Mo/U

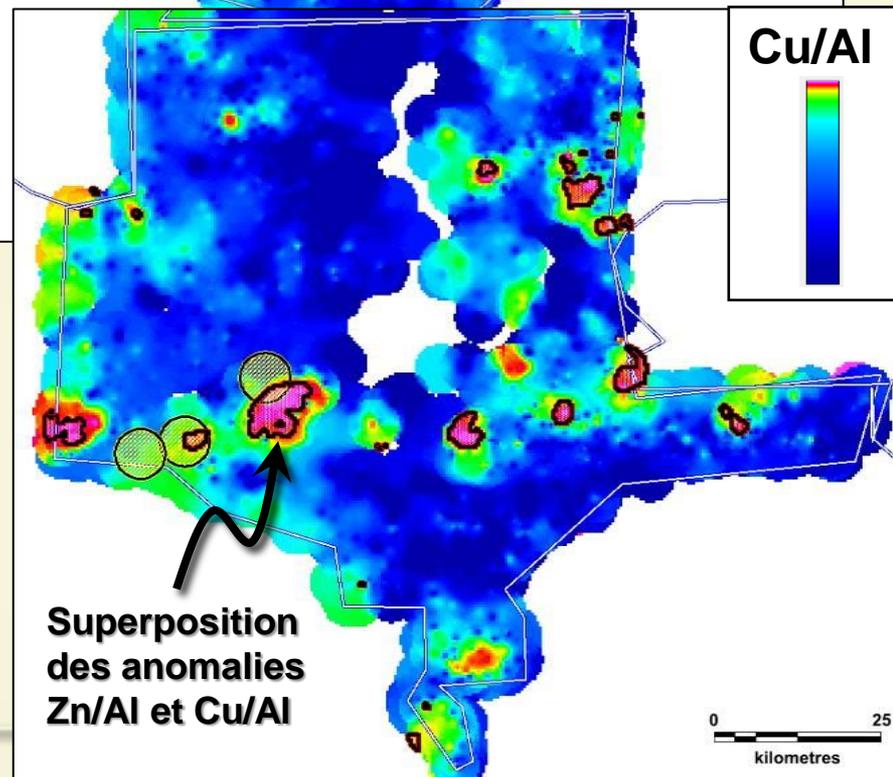
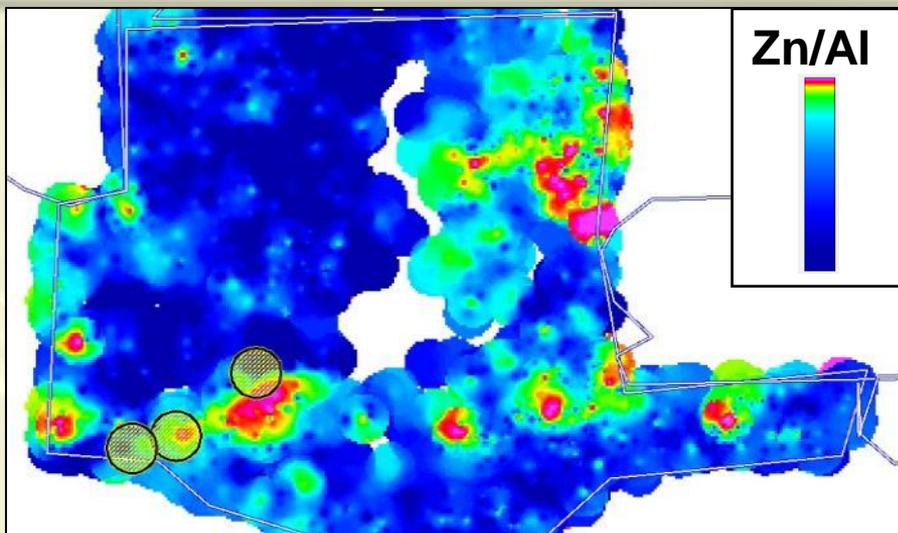
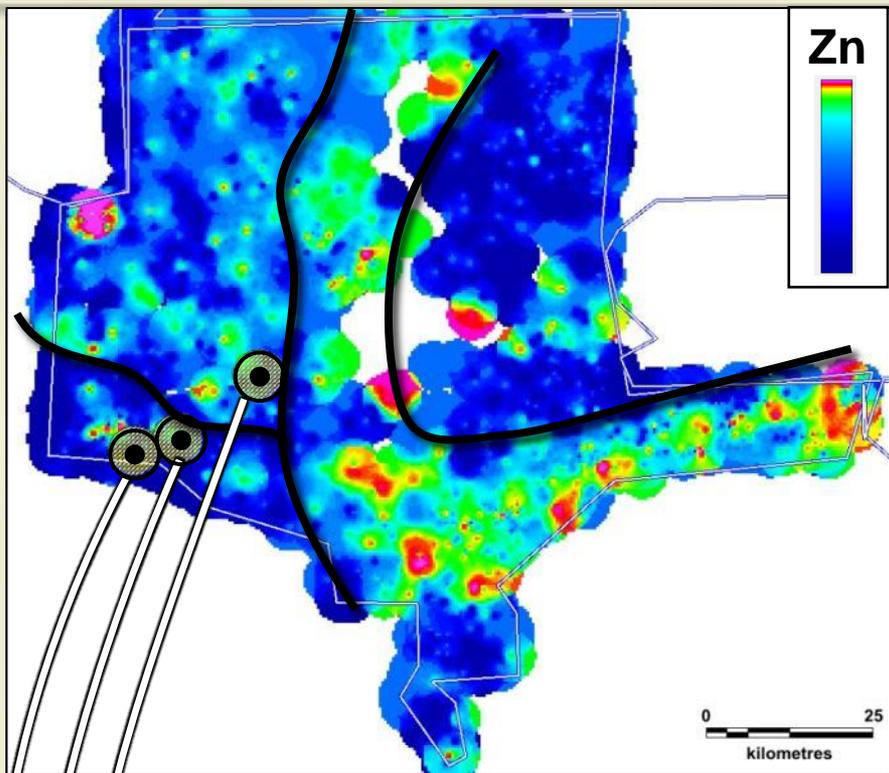
Échantillons d'eau (MRD243)



Domaines hydrogéochimiques liées au contrôle du pH par le socle et aux effets anthropiques



Correction des domaines hydrogéochimiques par ratio Zn/Al → rehaussement des anomalies vraies, c.a.d. liées à un enrichissement en Zn dans le socle



	DéTECTÉ par Zn	DéTECTÉ par normal. sur Al
Gîte Olive : Au, Cu, Zn, Co, Ag	Non	Oui
Gîte Lockhart Lake 0.2% Zn sur 3 m	Non	Oui
Gîte Wind Bay 1.79 Mt 1.5% Zn et 0.2% Cu	Non	Non

1. Mise en contexte et problématique du projet

2. Revue littéraire d'études de cas

3. Hydrogéochimie des eaux de surface

- Recherche de bases de données
- Analyse du bruit de fond : identification des facteurs dominants
- Signature hydrogéochimique des zones minéralisées
- Rehaussement d'anomalies et tests de performance pour l'exploration minérale

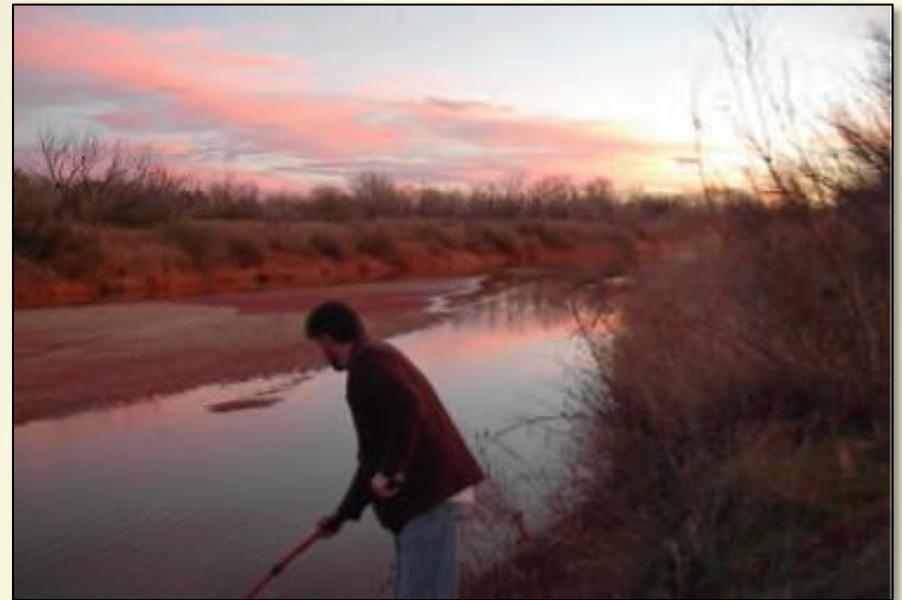
4. Conclusions et perspectives

- La composition chimique de l'eau de surface montre un bon potentiel pour vectoriser l'exploration zincifère : **statistiquement prouvée** dans les CRV de l'Ontario (26 gîtes, 29 605 analyses d'eau ICP-MS)
- Contextes de **roc affleurant et de till épais**
- Cette étude est une première évaluation : les caractéristiques spécifiques des gîtes ne sont pas considérées, pas d'étude de cas
- Les performances obtenues sont des **sous-estimations** (car buffers sont non-directionnels)
- La méthode présente **plusieurs avantages majeurs** pour des **performances vraisemblablement équivalentes** sinon supérieures aux méthodes traditionnelles (sédiments)
- Valeurs métalliques brutes indiquent essentiellement le pH de l'eau (CO₂ socle) et la salage des routes (salinité)
 - **Proxy des minéralisations** est obtenu après normalisation par l'élément conservateur Al **Zn/Al, Cu/Al, Mo/Al**
- Échantillonnage très simple, **levés à moindre coût**
 - Très intéressant pour levés régionaux

Merci de votre attention



Leybourne 2007



Leybourne 2007

Autres traitements et tests effectués :

- Performance de **Zn résiduel d'une régression linéaire sur le pH**
 - Localement très efficace mais globalement peu performant
 - Fonction de la présence de *sulfures massifs* dans le gîte
- Performance de **Zn résiduel d'une régression linéaire multivariée sur les deux premières composantes de l'analyse en composantes principales**
 - Efficace pour ciblage régional à partir de levés régionaux
- **Gîtes aurifères :**
 - Caractérisation de l'hydrogéochimie en contexte de minéralisation aurifère (éléments enrichis vs en déficit)
 - Proposition de ratios de correction des domaines hydrogéochimiques : As/Cs, As/Tl, Sb/Cs, Sb/Tl, performances non-établies

= effets anthropiques

Salage des routes

Zones habitées, routes, développements industriels

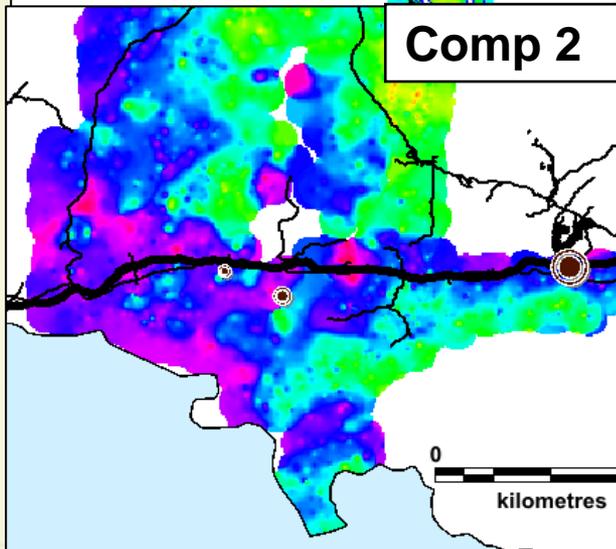
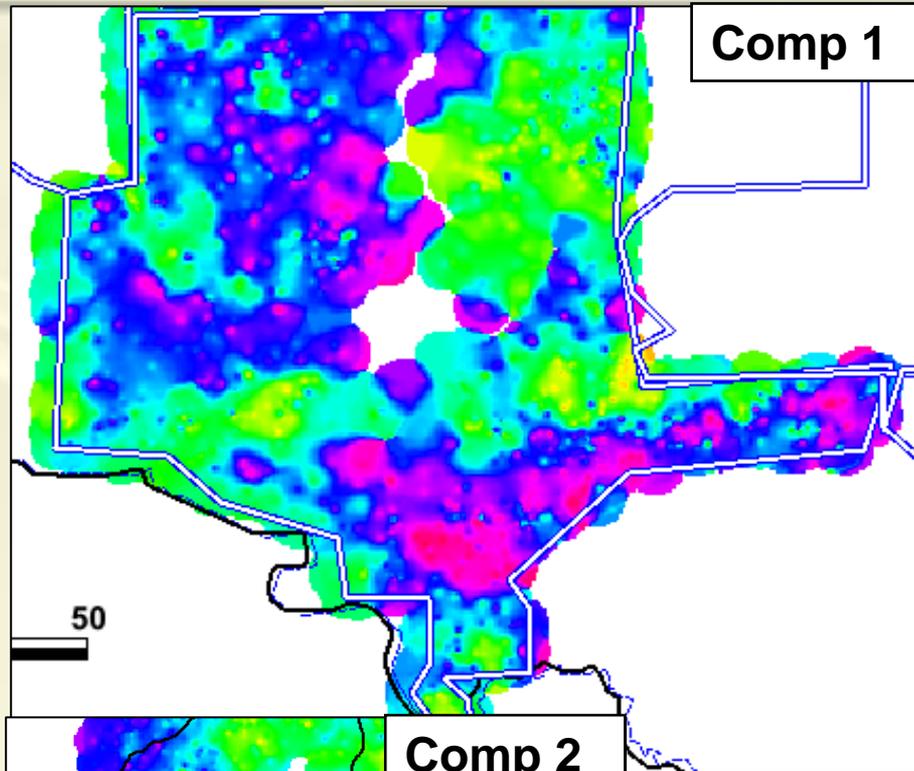
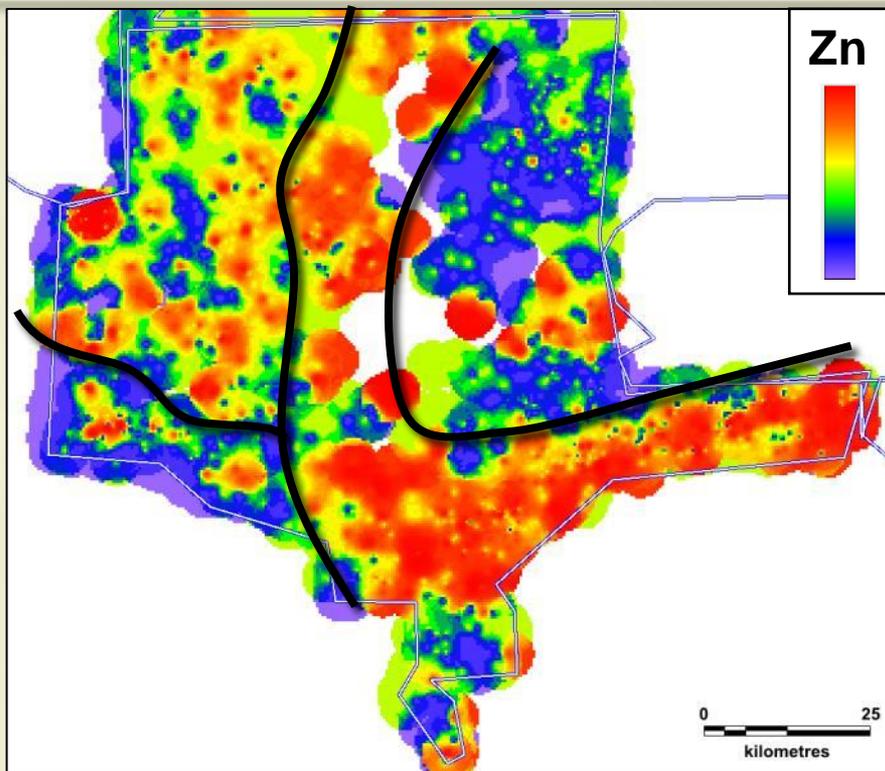
Corrélation très forte : charge minérale totale de l'eau (TDS), conductivité

Relation variable avec les éléments traces :

Corrélation positive **Cu, U**, V, Ti, Ba, Rb, S

Corrélation négative ou nulle Mn, Fe, **Zn, Pb**, Al, Cd, Co, **As**, Sn, **Sb, Ag**

→ Fractionnement des métaux



**Domaines hydrogéochimiques
liées au tampon du pH par les
roches du socle (COMP 1) et aux
effets anthropiques (COMP 2)**