



# CONSOREM

Consortium de recherche en exploration minière

consorem.ca

NOTRE MISSION: CONTRIBUER AU SUCCÈS DE L'EXPLORATION MINÉRALE

# POTENTIEL DE L'HYDROGÉOCHIMIE DES EAUX DE SURFACE POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

Silvain Rafini (CONSOREM)

silvain.rafini@gmail.com

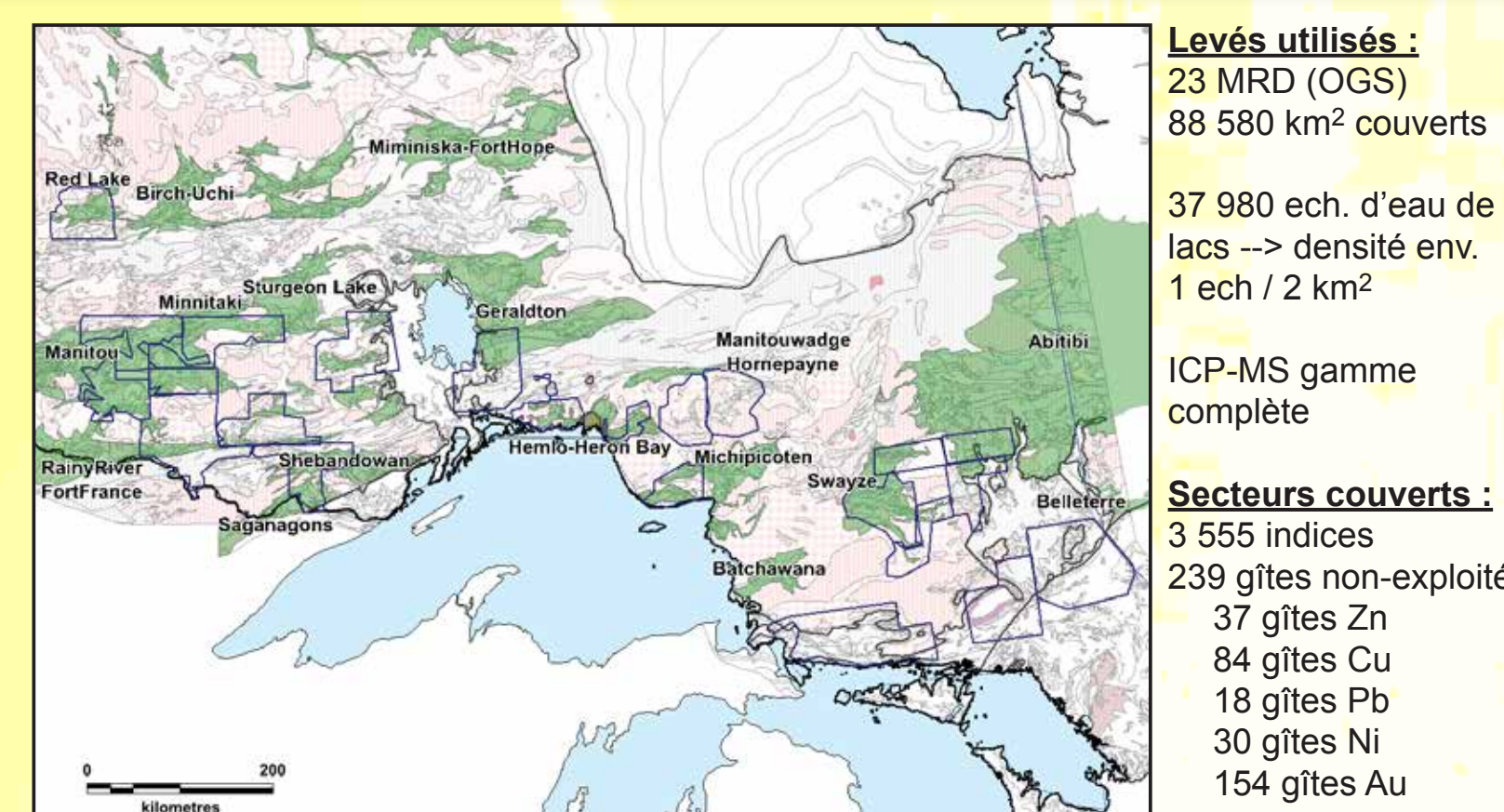
## Mise en contexte

Les empreintes secondaires des minéralisations dans l'environnement sont plus larges et diffusées que les gîtes eux-mêmes et sont de ce fait plus faciles à détecter. La recherche de ces anomalies géochimiques secondaires constitue donc un moyen d'exploration de première importance au Canada depuis plusieurs décennies.

Dans cette optique, la géochimie des media suivants est traditionnellement analysée : sols, sédiments de ruisseaux et de lacs, sédiments glaciaires. L'utilisation de la géochimie du medium eau présente un retard de développement très net, malgré une période d'expansion pour l'exploration uranifère. La méthode a été peu utilisée par la suite en raison des limites analytiques restrictives jusque à la généralisation de l'ICP-MS puis plus récemment de l'ICP-MS Haute Résolution. Elle connaît depuis une demi-décennie un nouvel essor, manifesté notamment par les études expérimentales de grande ampleur menées par les agences gouvernementales (USGS Data Serie 608 ; Eppinger et al, 2012).

L'hydrogéochimie des eaux de surface appliquée à l'exploration minière présente plusieurs avantages potentiels majeurs : facilité d'échantillonnage permettant de produire des levés à moindre coût, potentiel pour l'exploration profonde (détection de l'empreinte superficielle de gîtes enfouis).

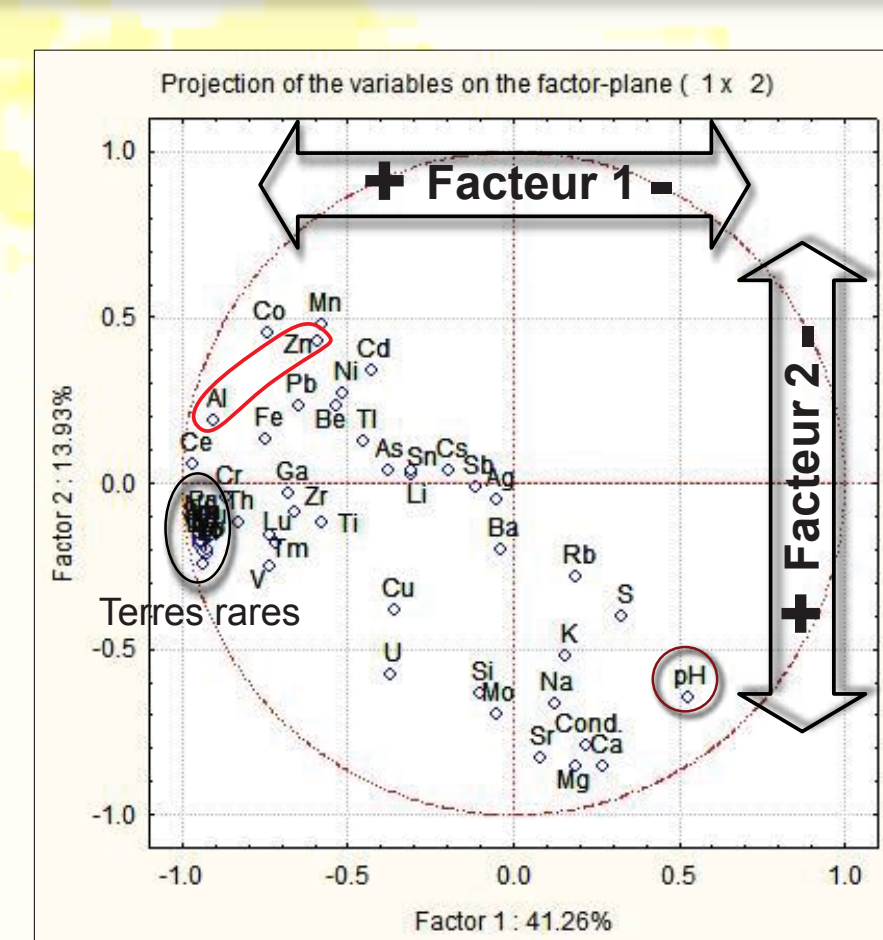
Ce projet de recherche avait le mandat de documenter le potentiel de cette méthode dans les contextes québécois. Il constitue la première phase (2015-2016) d'une étude de deux années ; la deuxième phase, en cours de réalisation, s'intéresse plus spécifiquement aux eaux souterraines.



Levés utilisés : 23 MRD (OGS), 88 580 km<sup>2</sup> couverts, 37 980 éch. d'eau de lacs -> densité env. 1 éch / 2 km<sup>2</sup>, ICP-MS gamme complète, Secteurs couverts : 3 555 indices, 239 gîtes non-exploités, 37 gîtes Zn, 94 gîtes Cu, 18 gîtes Pb, 30 gîtes Ni, 154 gîtes Au

## Méthodologie et données utilisées Les performances globales de la méthode pour l'exploration ont été évaluées en analysant son aptitude à retracer les minéralisations connues à l'échelle régionale, dans un terrain analogue au contexte québécois.

Les données utilisées sont des levés régionaux réalisés par l'Ontario Geological Survey entre 1995 et 2004 : 23 Miscellaneous Release Data contenant chacun plusieurs centaines à milliers d'analyses ICP-MS complètes d'échantillons d'eau ET de sédiments de lacs, ainsi que les facteurs limnologiques (pH, Eh, conductivité, total dissolved solids (TDS), oxygène dissous, etc.). Les levés sont localisés dans la Province du Supérieur, dans un contexte géologique identique au nord québécois. Ils ciblent principalement les ceintures de roches vertes (CRV) et débordent aussi sur les provinces environnantes gneissiques et tonaliques. 69,3 % de la surface couverte est dénuée de sédiments quaternaires, les 30,7 % restants étant composés aux 2/3 de till épais continu et de sédiments fluvioglaciaires. Les argiles ou silts lacustres et marins sont très faiblement représentés. Ces CRV ont toute été explorées à différents degrés et contiennent plusieurs camps miniers de maturité variable (Wawa, Red Lake, Swaize, etc.). Les secteurs couverts contiennent donc un grand nombre d'indices et gîtes caractérisés, permettant de tester adéquatement la méthode. On note cependant un certain déficit en sulfures massifs volcanogènes décrits comme tels. Traitement : une analyse en statistiques multivariées a été réalisée sur ces données régionales afin de comprendre 1) les relations entre la géochimie des eaux de surface et les minéralisations du socle sous-jacent ; 2) les facteurs conditionnant ces relations : géologie socle et couverture, facteurs limnologiques.



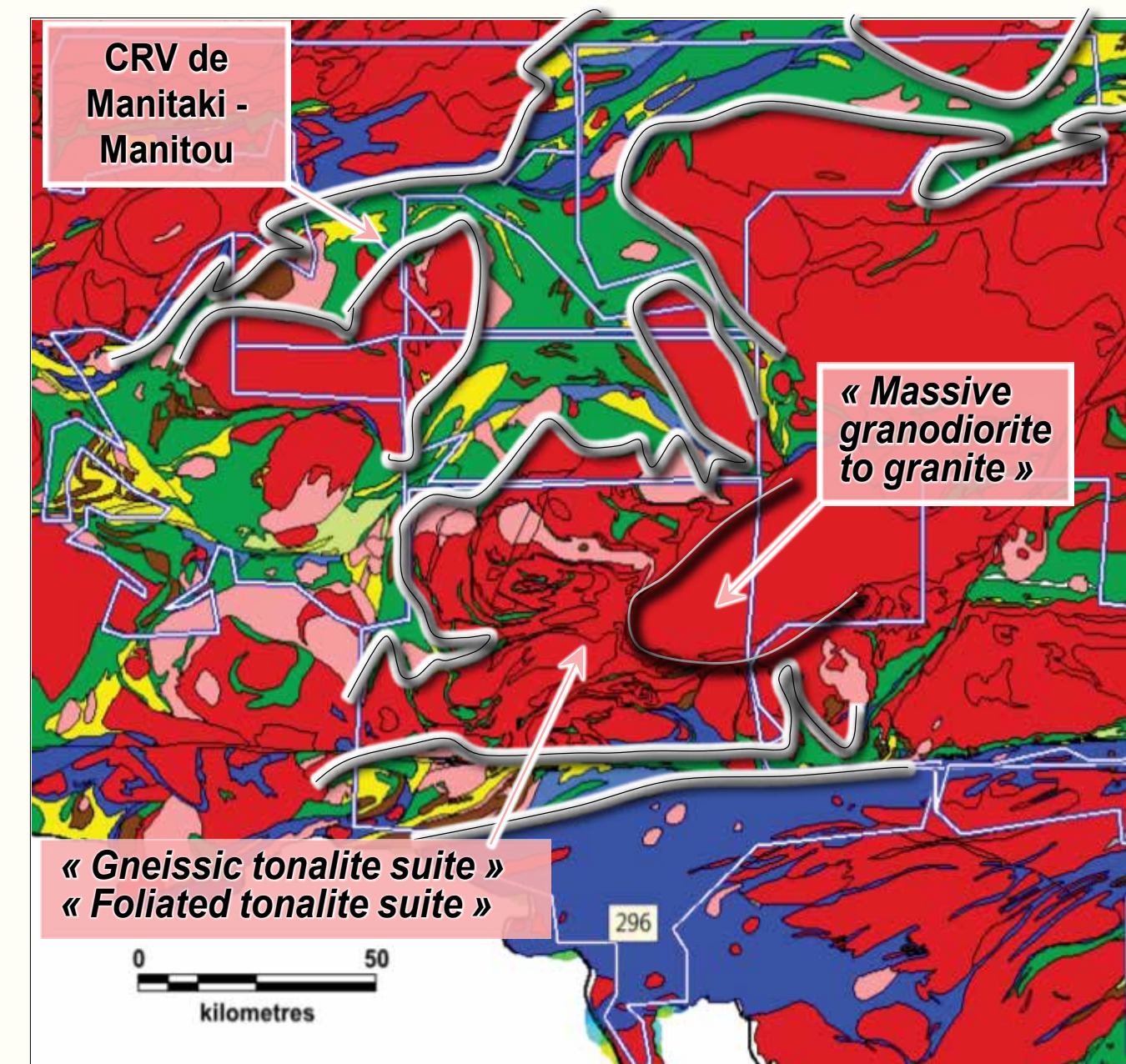
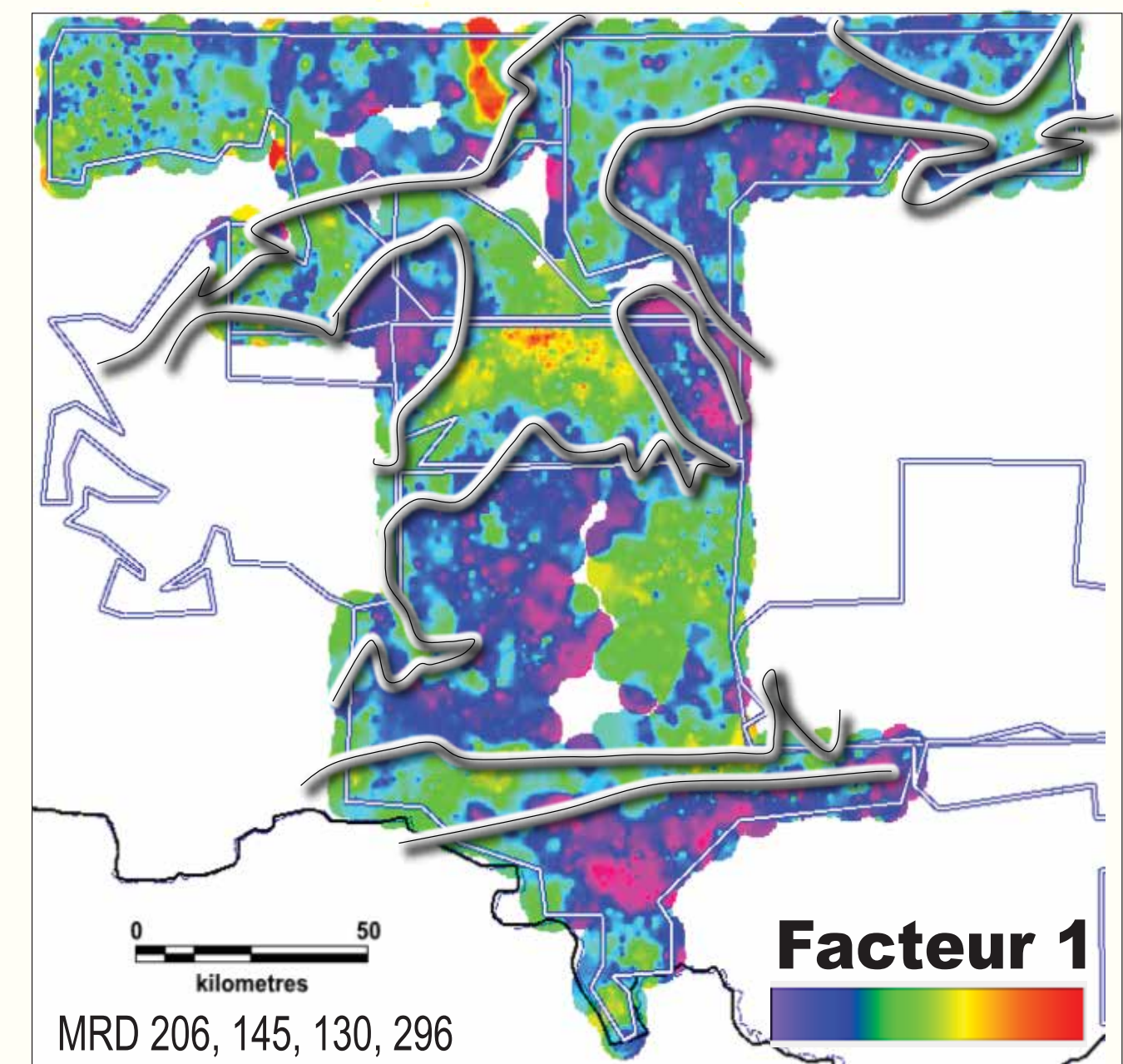
## Analyse statistique multivariée des variations de fond : domaines hydrogéochimiques

L'analyse en composantes principale (ACP) est un traitement statistique détectant les tendances communes dans une population de données. On quantifie ainsi plusieurs facteurs expliquant chacun une partie de la variabilité totale de la population. Le facteur 1 est le plus important, c.a.d. qu'un grand nombre de variables (ici, les concentrations géochimiques) va être fortement corrélé ou anti-corrélé à ce facteur. À ce stade, la nature des différents facteurs est inconnue.

Résultats des ACP. Deux ACP ont été réalisées, pour comparaison : l'une favorisant le nombre d'éléments, l'autre le nombre d'échantillons. Les résultats obtenus sont identiques :

- Le facteur 1 (32,5 et 41,3 % de la variabilité totale) oppose le pH aux éléments traces. Il suggère les conclusions suivantes : 1) La charge minérale totale (TDS, = somme des majeurs) est corrélée au pH (libération de Ca lors de la neutralisation) et anti-corrélée à la plupart des traces ; 2) La sensibilité des éléments traces au pH est très variable : Sb, Ag, Mo, Cu, U, As, Ba sont peu ou pas sensibles, tandis que les terres rares, Zn, Ni, Pb, Co, Mn, Fe sont trouvés en plus forte concentrations dans les eaux de plus faible pH ; Le facteur 2 (13,9 et 16,4 % de la variabilité totale) est la dureté de l'eau (Ca + Mg), sensiblement identique à la TDS et la conductivité. Il fractionne les métaux traces.

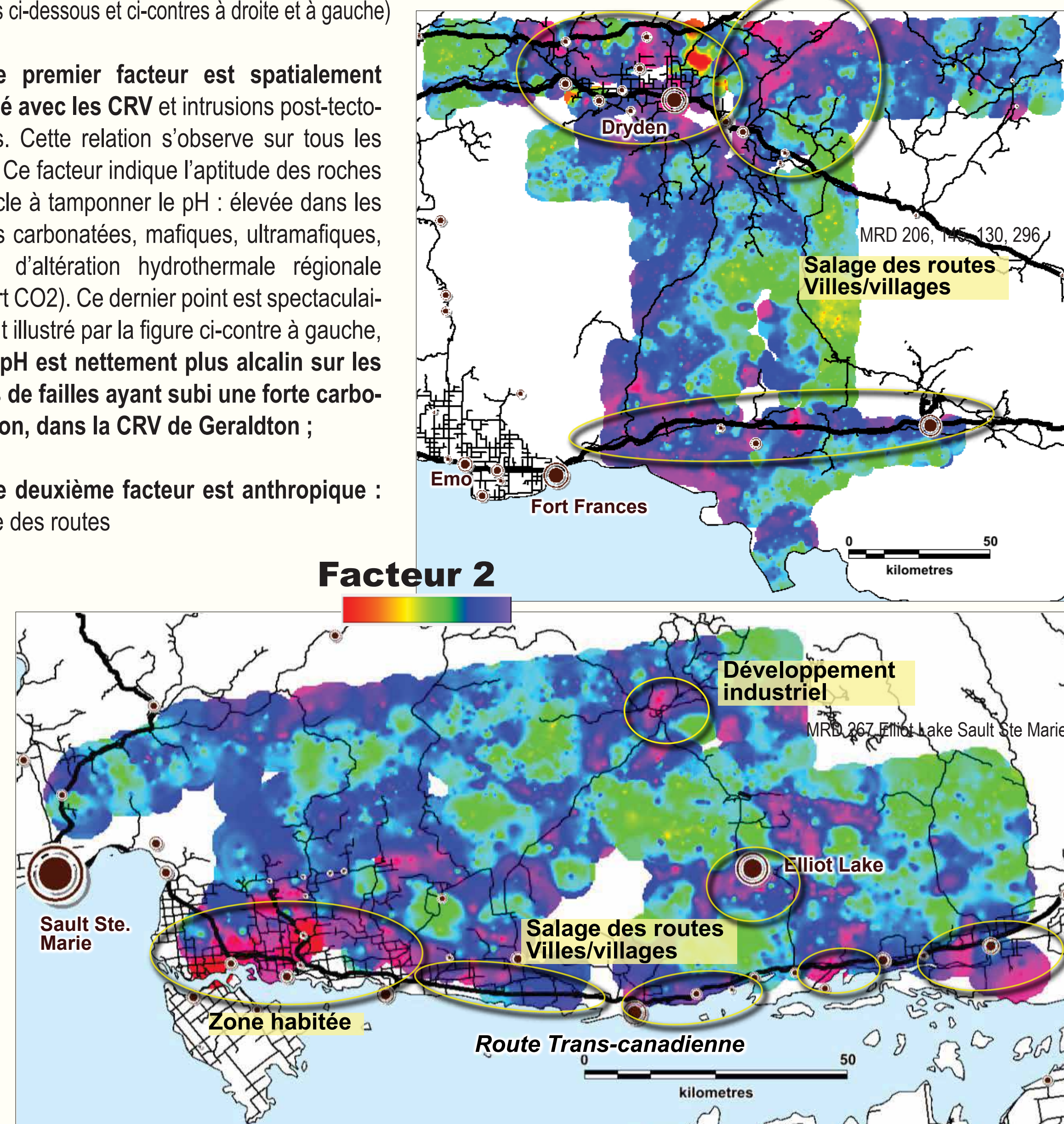
Ces deux principaux facteurs contrôlent de façon dominante la variabilité de base des éléments d'intérêt potentiel pour l'exploration (substances et traceurs). Leur nature peut-être reconnue par leur mise en carte (figures ci-dessous et ci-contre à droite et à gauche)



Géologie détaillée (MRD 126, 2011)

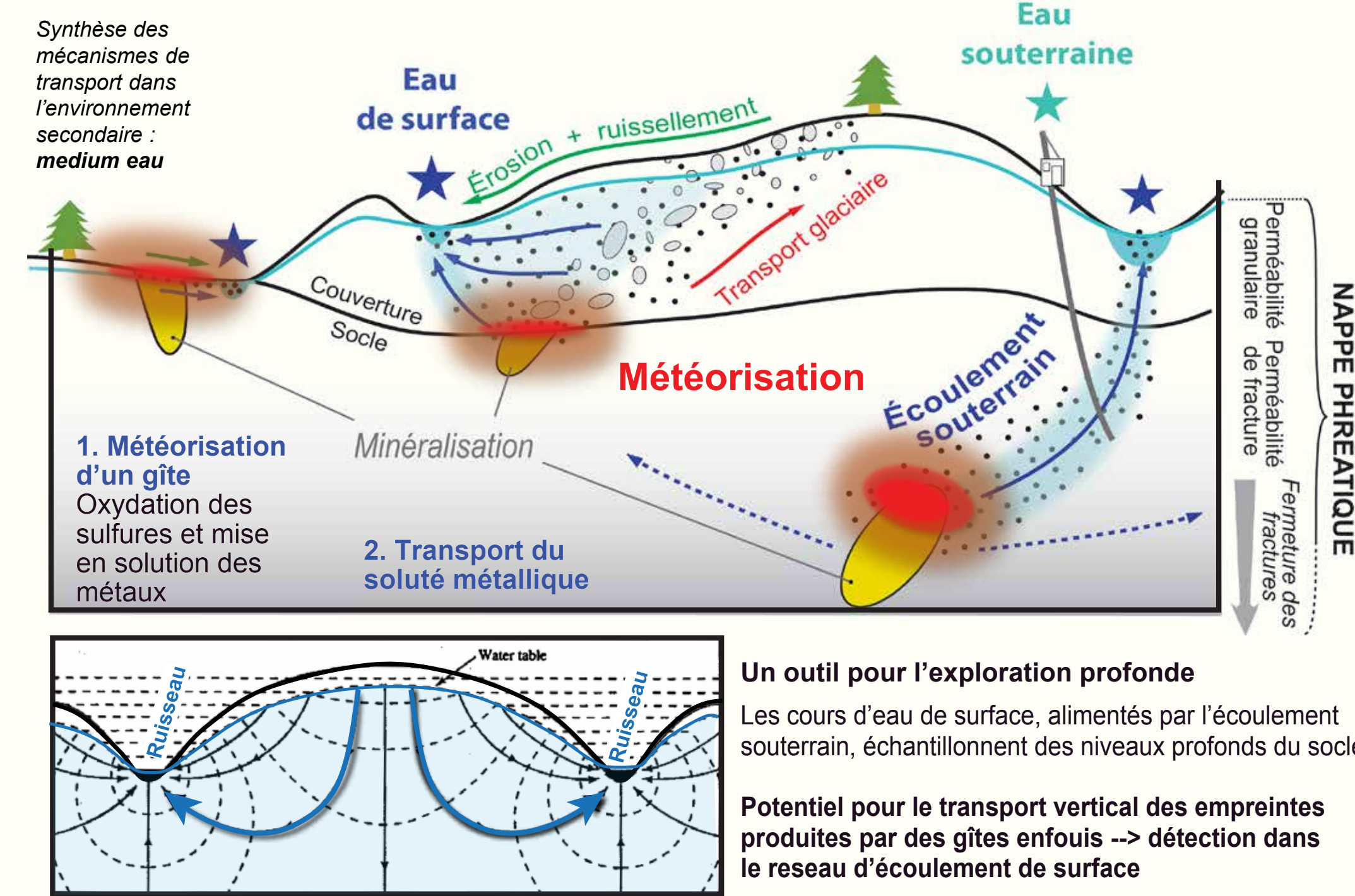
Le premier facteur est spatialement corrélé avec les CRV et intrusions post-tectoniques. Cette relation s'observe sur tous les levés. Ce facteur indique l'aptitude des roches du socle à tamponner le pH : élevé dans les roches carbonatées, mafiques, ultramafiques, zones d'altération hydrothermale régionale (apport CO<sub>2</sub>). Ce dernier point est spectaculairement illustré par la figure ci-contre à gauche, où le pH est nettement plus alcalin sur les zones de failles ayant subi une forte carbonatation, dans la CRV de Geraldton ;

Le deuxième facteur est anthropique : salage des routes



## Problématique.

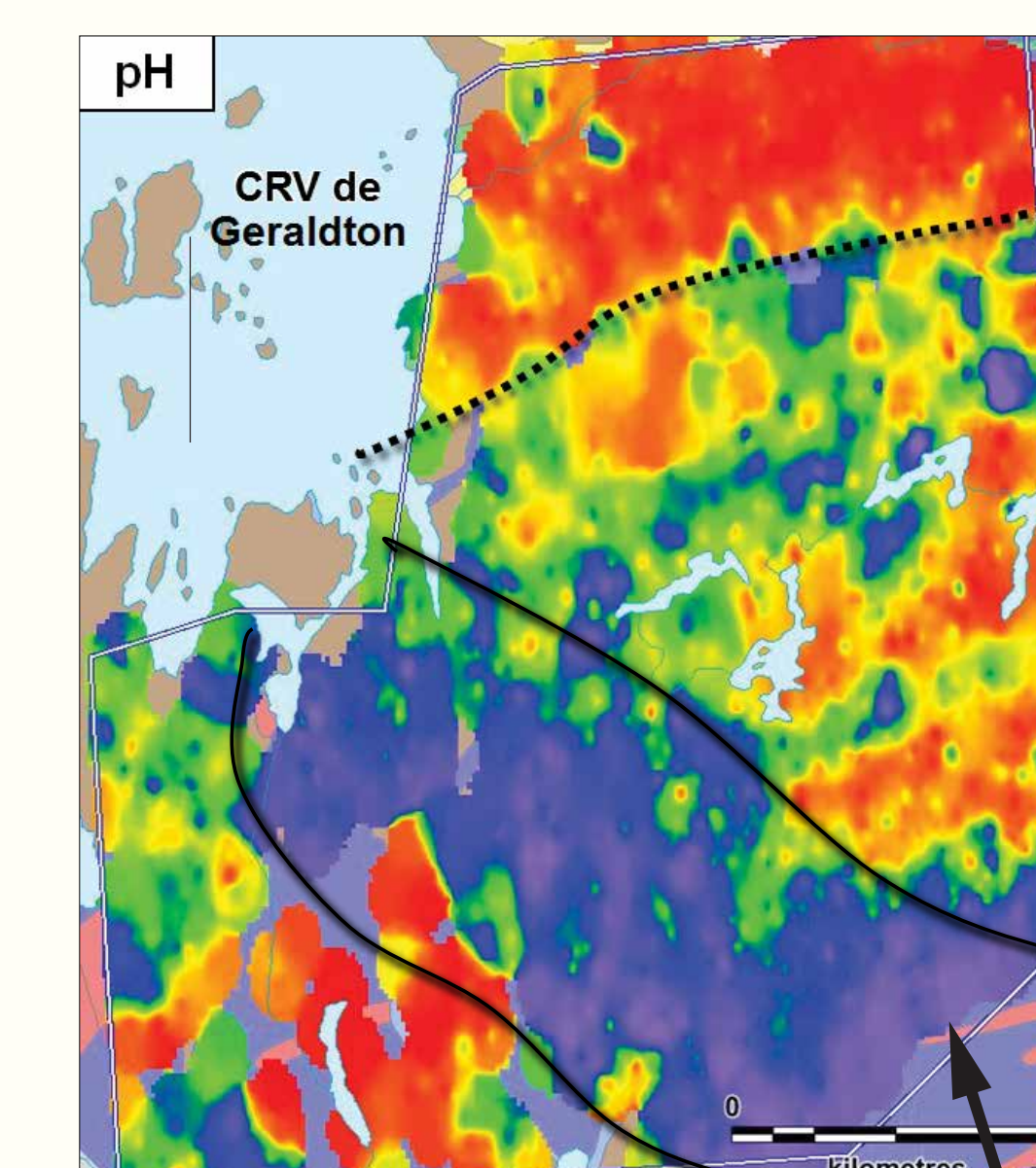
Les échanges eau-roche se produisant au contact prolongé des gîtes métallifères avec l'eau de l'environnement introduisent dans l'eau des éléments en concentrations anormales par rapport aux backgrounds régionaux.



Cette signature hydrogéochimique singulière est ensuite transportée, par advection et par diffusion, dans le réseau d'écoulement depuis la source enfouie ou affleurante vers la surface. Elles forment des larges halos qui pourront ultimement être détectés dans les eaux de surface.

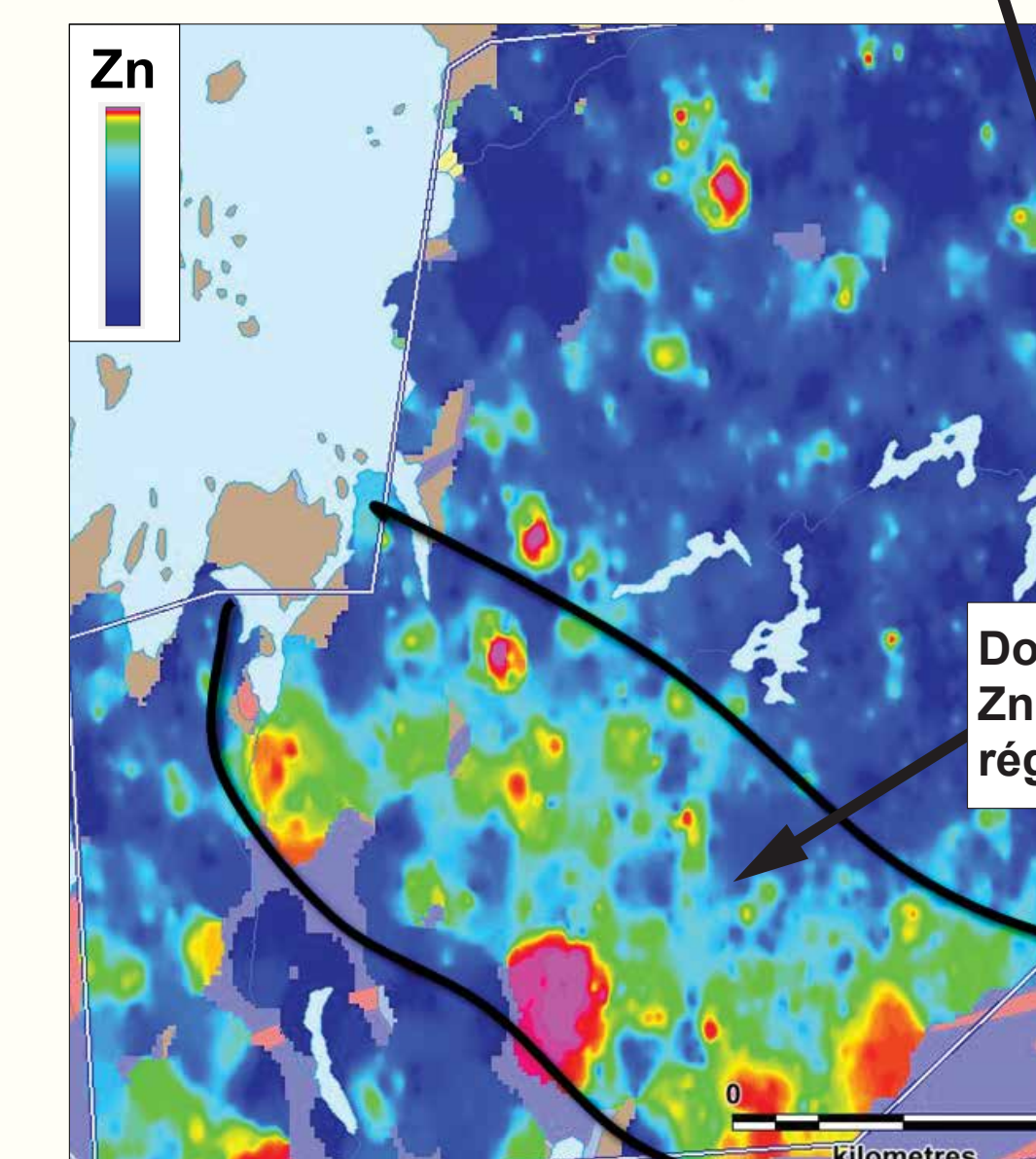
La distance de cette dispersion, tant verticale qu'horizontale, la nature des signatures géochimiques à rechercher (substances, proxys), les fractionnements se produisant durant le transport, les contrôles de premier ordre sur le signal de base dans le milieu naturel (pH, géologie du socle, géologie quaternaire etc.) sont autant d'inconnus qu'il faudra contraindre pour un usage de la méthode en contexte d'exploration.

## Rehaussement d'anomalies hydrogéochimiques Zn

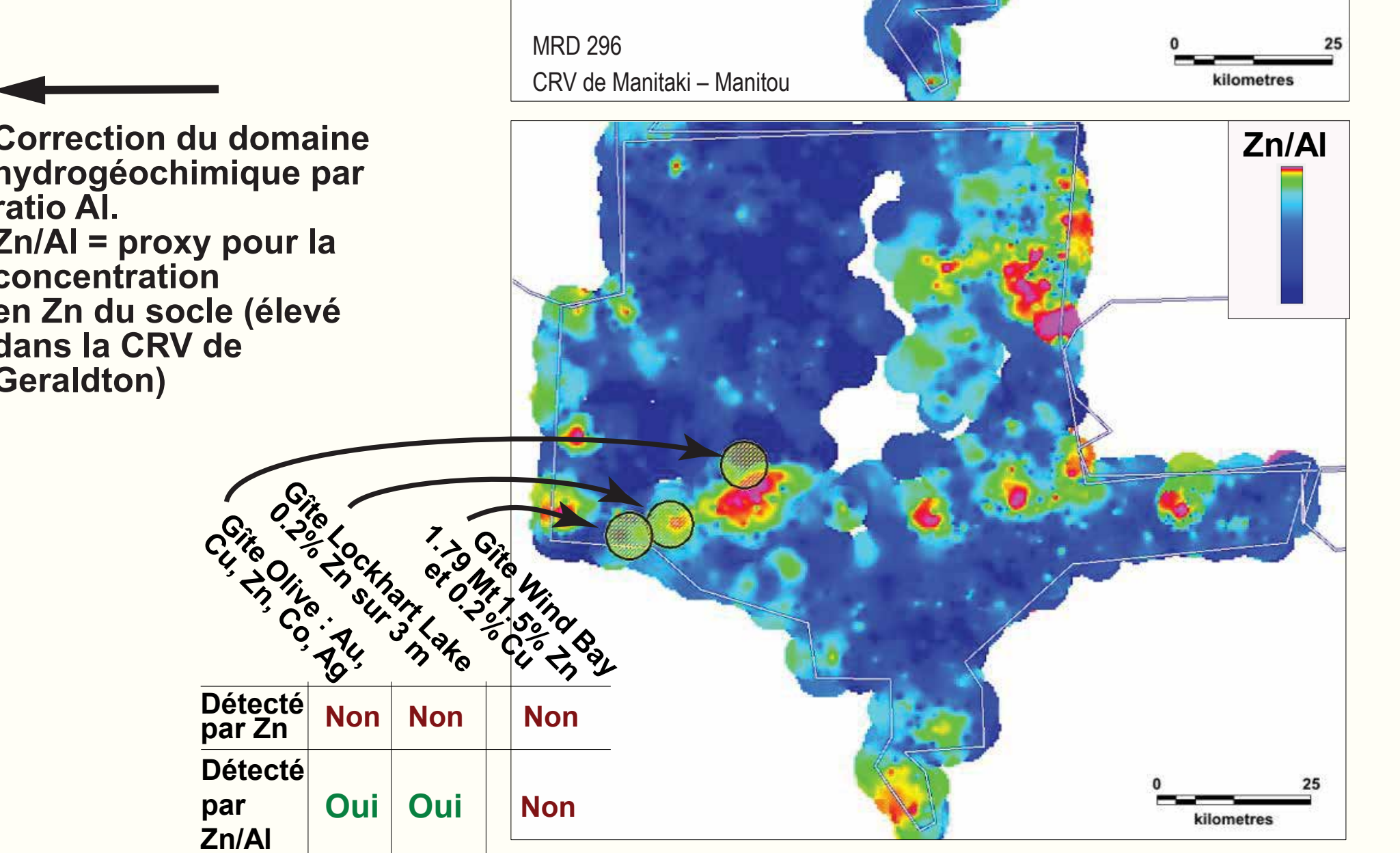
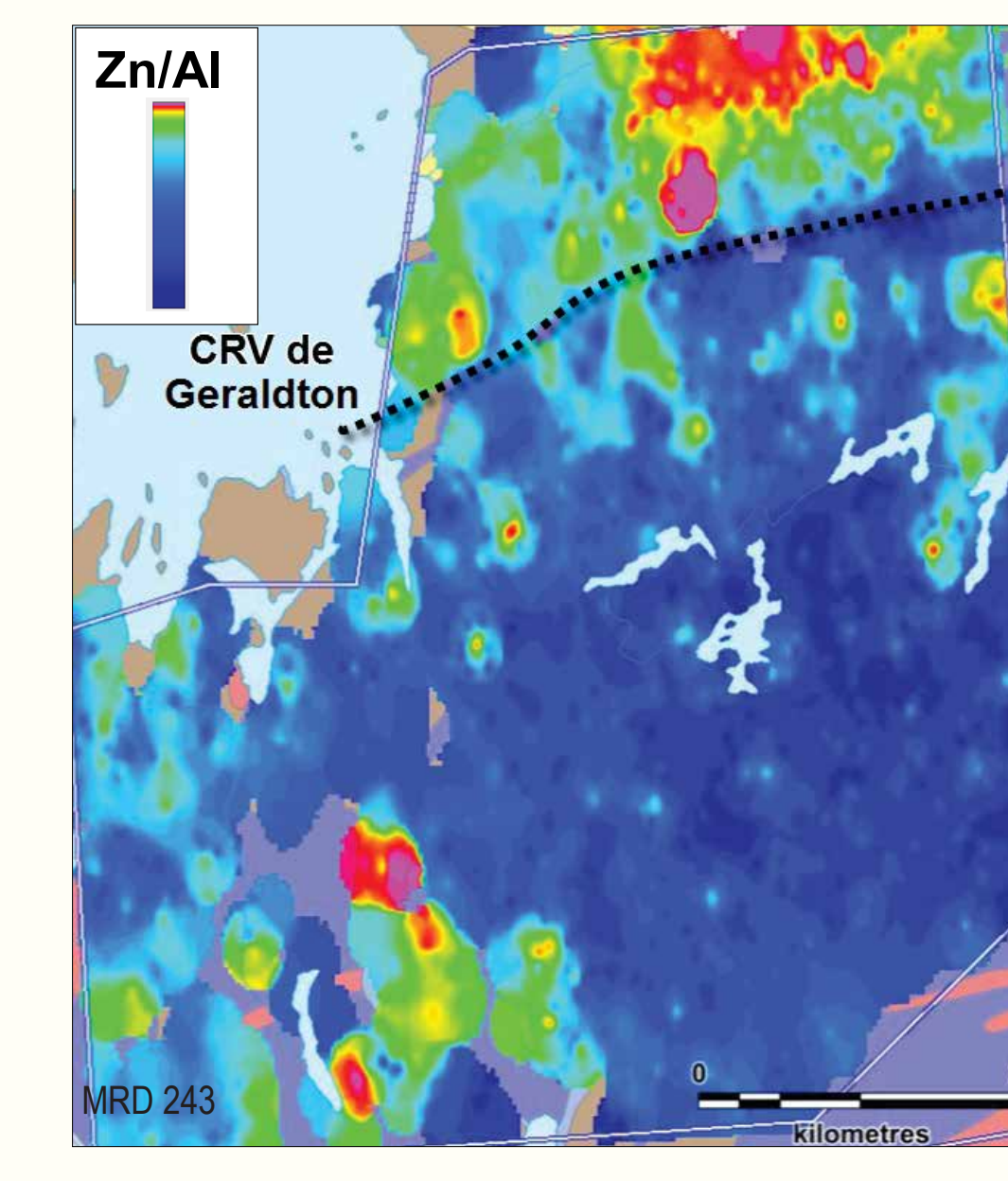


Le rehaussement des anomalies consiste à supprimer les variations du niveau de base afin de faire ressortir les vraies anomalies, c.a.d., des augmentations locales anormales de Zn reliées à des minéralisations dans le socle sous-jacent. Les concentrations en Zn sont donc normalisées par un élément représentant les variations du niveau de base. Cet élément doit avoir les caractéristiques suivantes : 1) ne présenter aucune corrélation, ou une corrélation négative, avec les corps minéralisés du socle ; 2) avoir une sensibilité aux facteurs principaux semblable à celle de Zn. Les ACP montrent que ces caractéristiques sont offertes par l'élément Al.

Ces figures illustrent la correction obtenue par normalisation sur Al. On voit qu'elle supprime efficacement les domaines régionaux reliés aux variations de fond contrôlées par l'effet tampon du socle (facteur 1 ; pH sur la figure de gauche), et par les activités anthropiques (facteur 2). Le ratio Zn/Al fait ressortir adéquatement la CRV de Geraldton, marquant ainsi le niveau régional plus élevé dans ce secteur. Les sensibilités au facteur 1 de Al et de Zn étant relativement semblables (voir ACP), ce ratio corrige dans une large mesure les variations dues au pH.



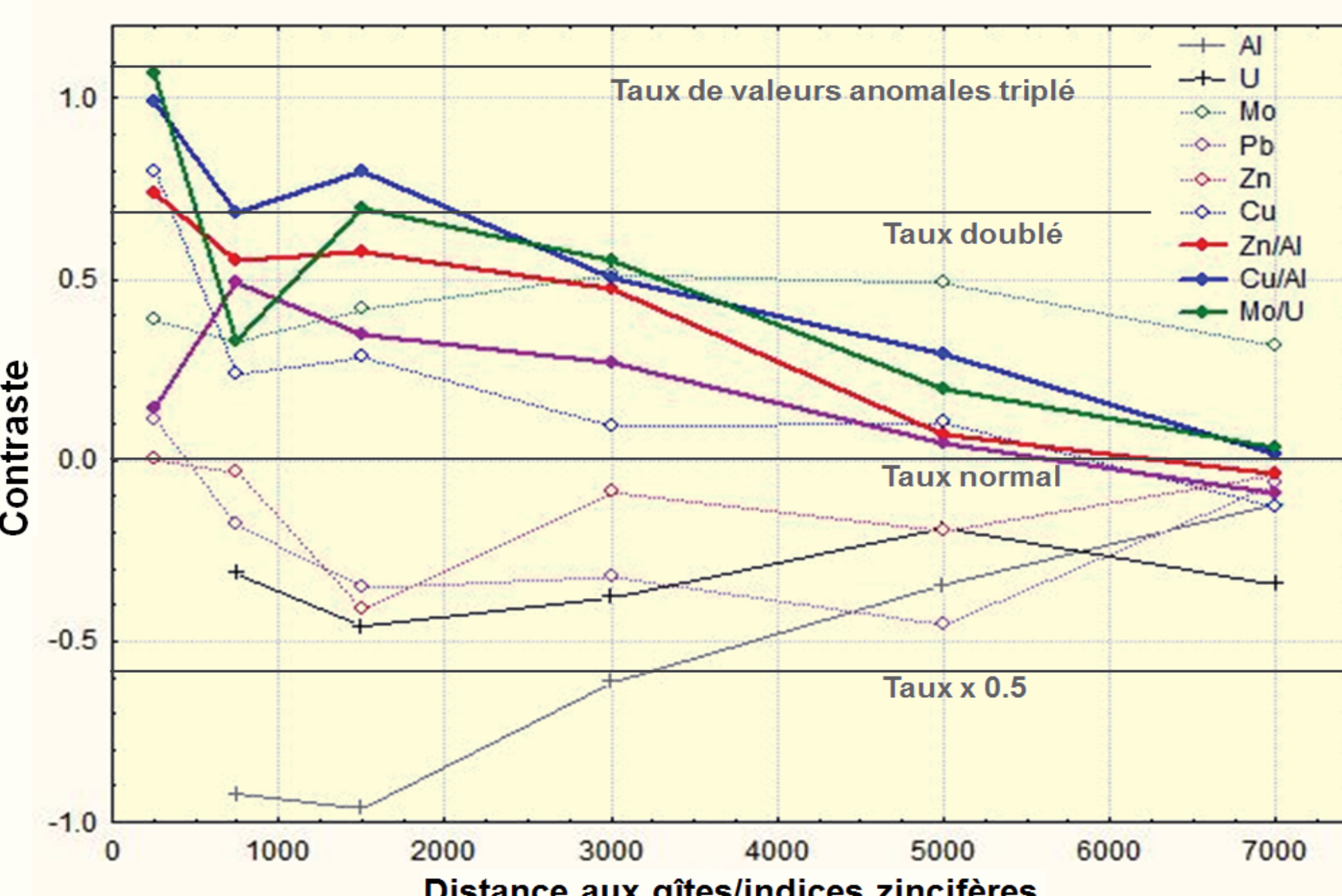
La figure de droite illustre comment cette correction améliore les performances de Zn pour l'exploration : aucun des gîtes Olive, Lockhart Lake et Wind Bay ne produisent des anomalies visibles en Zn brut, tandis que les ratios Zn/Al permettent de détecter deux de ces trois gîtes (une anomalie est aussi visible au niveau du troisième gîte, Wind Bay, mais moins marquée).



Détecté par Zn	Détecté par Zn/Al	Non	Oui	Non	Oui
Site Lockhart Lake		Non	Oui	Non	Oui
Gîte Wind Bay		Non	Oui	Non	Oui

## Tests de performances pour l'exploration minière

Les tests régionaux de performances sont réalisés par la méthode statistique standard des contrastes, qui compile les probabilités d'anomalies à différentes distances des gîtes connus. Si la variable testée est efficace pour la détection des gîtes, son contraste devrait augmenter à proximité des gîtes. Ces tests sont présentés sur le diagramme ci-dessous, pour Zn, Cu, Mo, Pb, ainsi que pour les valeurs rehaussées Zn/Al, Cu/Al et Mo/Al. Les concentrations en Al et U sont aussi indiquées. Il démontre que :



- 1) les concentrations brutes en Zn, Cu, Pb, Mo ne sont pas des bons proxys pour la minéralisation : aucune augmentation significative n'est enregistrée à proximité des gîtes connus ;
- 2) ces performances sont améliorées après normalisation par Al : des augmentations progressives sont visibles en se rapprochant des gîtes. Ces performances demeurent relativement faibles (contrastes < 1).

On note par ailleurs que les performances de la méthode ne sont pas affectées par le type de couvert glaciaire. La distance de dispersion en contexte de till épais est toutefois plus grande, vraisemblablement en raison du transport glaciaire des anomalies avant leur libération dans le réseau hydrographique.

n éch = 29 065 ; 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

## Conclusions. Discussions.

Les études de cas de la revue littéraire montrent que les performances de l'hydrogéochimie comme proxy des sulfures massifs sont supérieures à celles des sédiments de fonds de lacs et de ruisseaux (SMV Yava, TNO : Cameron, 1977 ; SMV Red Mountain, Alaska : USGS OFR 2014-1037 ; Giles et Eppinger, 2014). Toutefois, ces études considèrent un niveau de base local, ce qui n'est possible qu'a posteriori, lorsque le corps minéralisé est localisé. La présente étude se propose de produire une analyse des performances globales de la méthode à l'échelle régionale, ce qui implique de documenter les variations du niveau de base.

Des variations majeures régionales de la signature hydrogéochimique des eaux de surface ont été mises en évidence, constituant des domaines hydrogéochimiques. L'analyse statistique multivariée de levés régionaux de très bonne qualité en Ontario (données OGS), dans un contexte identique au contexte québécois, démontre que ces domaines sont contrôlés 1) par la capacité tampon des roches du socle sous-jacent, 2) par les effets anthropiques (salage des routes).

Ces variations de fond contrôlent la distribution des métaux de base, de sorte que les concentrations brutes en métaux dans les eaux de surface ne sont pas des bons proxys pour la minéralisation. Cet aspect, vérifié statistiquement par les simples calculs de contrastes, impose un rehaussement des anomalies.

Les méthodes « traditionnelles » de rehaussement d'anomalie développées au CONSOREM (projets 2004-09 et 2005-03) pour les sédiments ne sont pas inutilisables pour l'eau en raison de l'extrême réactivité du medium : tous les éléments sont liés par des corrélations partielles, notamment à travers le pH, qui n'est pas indépendant des minéralisations. D'autres approches ont été élaborées : normalisation par Al. Les performances des ratios Zn/Al et Cu/Al comme proxys des corps minéralisés ont été démontrées statistiquement sur les gîtes connus par le calcul des contrastes. Les performances sont ici des sous-estimations en raison du manque de d'informations sur les caractéristiques des gîtes zincifères utilisées comme références, et du fait que les buffer (tranches de distances) utilisés sont non-directionnelles. On montre toutefois qu'à l'échelle des minéralisations, la fréquence des valeurs anormales de Zn/Al est du double au triple de la normale, ce ratio est donc un proxy utilisable en exploration minière.