

Atelier CONSOREM
Québec Exploration 2009

Méthodes de traitement et d'interprétation des sédiments de lacs

Présenté par: *Sylvain Trépanier*
CONSOREM

ALEXIS

AURIZON



xstrata
copper

MDN



SOQUEM

xstrata
zinc

VIRGINIA

ONHYM

CFRM

CRÉ CONFÉRENCE RÉGIONALE DES ÉLUS
ASSEMBLÉE LAO ÉRIE 2009

Ministère
du Développement
économique,
de l'Innovation
et de l'Exportation
Québec

Ressources naturelles
et Faune
Québec

Canada Développement
économique Canada

UQAM
Université de Québec à Montréal

URSTM/UQAT

UQAC

Introduction

- Un collègue (débutant), qui s'intéresse à l'altération en chlorite dans les roches volcaniques, vous demande quelle est la teneur normale en magnésium (MgO) dans une roche volcanique, et à partir de quelle teneur on peut considérer une anomalie?
- Bien sûr, vous lui répondez que la teneur moyenne des roches volcaniques dépend du type de roche. Et que le seuil pour considérer une anomalie devra donc dépendre du type de roche également
 - Ex: teneur moyenne de 7% MgO pour une tholéiite, 3.5% pour une andésite, 1% pour une rhyodacite, etc.
- C'est exactement la même chose pour les teneur en métaux dans les sédiments de lacs! La teneur moyenne des différents métaux dépend du type de sédiment, et donc les teneurs des anomalies aussi!

Géochimie des sédiments de lacs en exploration

1. Méthodes de traitement des données de géochimie de l'environnement secondaire
2. Géochimie des sédiments de lacs en bref
3. Uniformisation des données régionales
4. Étude des données de sédiments de lacs du Grand Nord du Québec
5. Méthodes d'identification d'anomalies et concept signal/bruit appliqué a la geochimie

Informations à utiliser

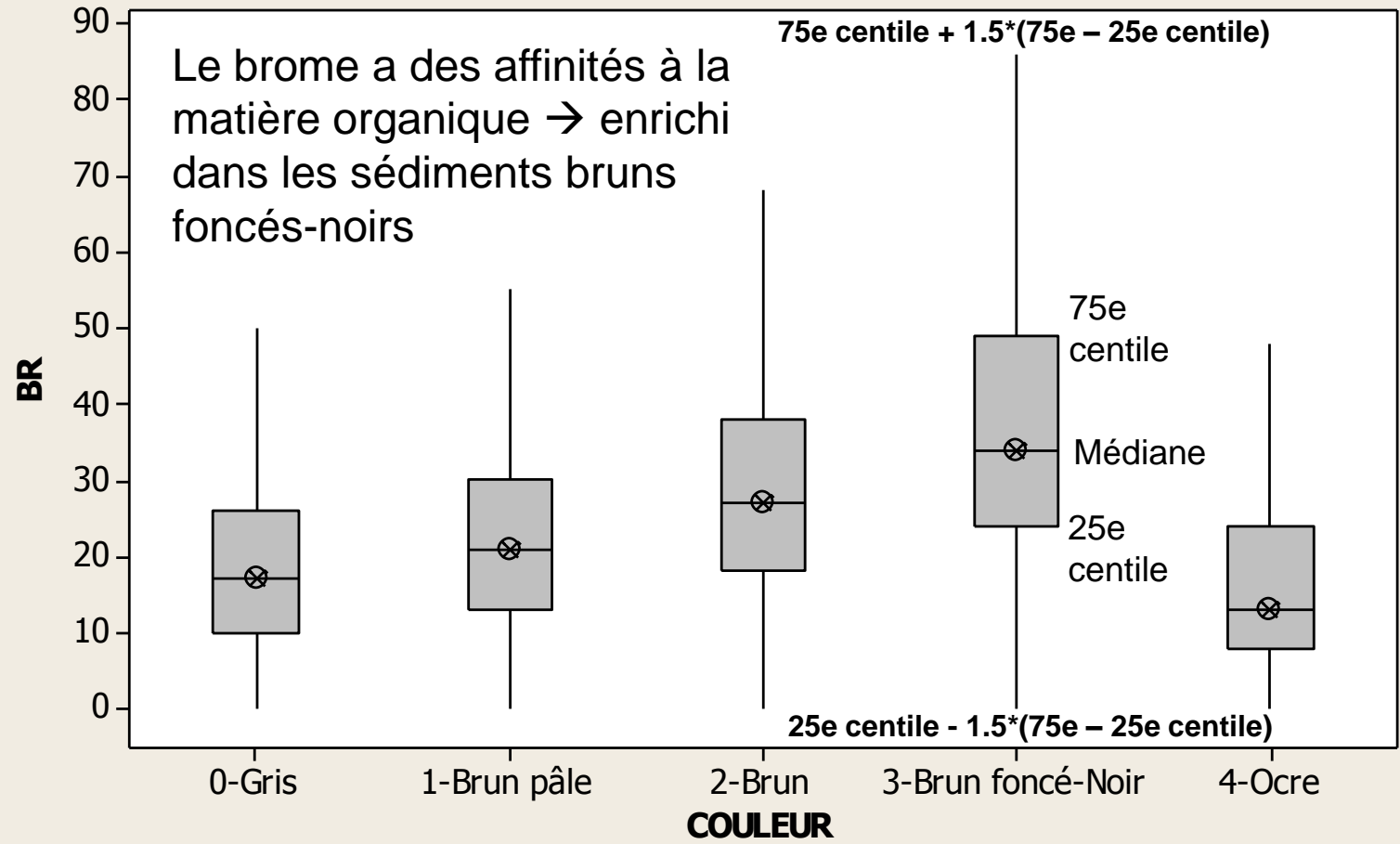
- On doit utiliser le plus d'information possible, chimique ou autres. Exemples d'informations que l'on peut compiler
 - Éléments chimiques analysés + Perte au feu
 - Autres informations recueillies lors de l'échantillonnage. Ex:
 - Couleur de l'échantillon
 - Contamination
 - Granulométrie
 - Environnement (ex: présence d'un champ, taille du lac, etc)
 - Lithologie telle que vue sur les cartes géologiques ou sur les cartes de dépôts de surface
 - Présence de champs, de forêts sur les cartes topographiques
 - Altitude sur les MNE
 - Etc. (faire preuve d'imagination!)

Statistiques et géochimie secondaire

- Cinq méthodes seront examinées
 - « **Box-plots** »
 - Corrélations dans les données compositionnelles
 - Analyse factorielle
 - Analyse par grappe
 - Analyse des variogrammes (géostatistiques)
- Ces méthodes seront illustrées par la suite par l'application sur les données des sédiments de lacs du Grand Nord

“Box-plots”

Boîte à moustaches de BR



Inorganique



Organique

Oxydes de Fer

Statistiques et géochimie secondaire

- Cinq méthodes seront examinées
 - « Box-plots »
 - **Corrélations dans les données compositionnelles**
 - Analyse factorielle
 - Analyse par grappe
 - Analyse des variogrammes (géostatistiques)
- Ces méthodes seront illustrées par la suite par l'application sur les données des sédiments de lacs du Grand Nord

Coefficient de corrélation et covariance

- Le coefficient de corrélation permet de calculer la relation entre deux variables continues
 - 1: corrélation parfaite, positive
 - -1: corrélation parfaite, négative
 - 0: pas de corrélation
- Covariance: comme corrélation mais pas limité à -1 à 1

Corrélations et données compositionnelles

- Les données compositionnelles ferment 100% (ex: géochimie, lithogéochimie)
- La fermeture à 100% cause de fausses corrélations

SiO ₂ (g)	TiO ₂ (g)	Al ₂ O ₃ (g)	Fe ₂ O ₃ (g)	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %
500	100	150	200	52.63	10.53	15.79	21.05
500	100	150	250	50.00	10.00	15.00	25.00
500	100	150	300	47.62	9.52	14.29	28.57
500	100	150	350	45.45	9.09	13.64	31.82

- La corrélation et covarianve entre Fe₂O₃ et SiO₂ est négative
- On pourrait interpréter cela en disant que Fe₂O₃ est ajouté en même temps que SiO₂ est enlevé.
- En réalité, il n'y a pas vraiment de lien entre Fe₂O₃ et SiO₂; Fe₂O₃ est ajouté et SiO₂ n'est pas enlevé mais simplement dilué

Corrélations et données compositionnelles

- Aitchison (1985) a proposé des solutions mathématiques au problème des fermetures.
- Une solution est de calculer de nouvelles variables « ouvertes » de la façon suivante (valeurs « log-ratio »):
 - Valeur « Log-ratio » d'un élément = $\text{Log} (\text{Valeur initiale d'un élément} / \text{Valeur d'un des éléments choisi})$
 - On doit sacrifier un élément comme diviseur. Ex: TiO_2 ici.

SiO2%	TiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	SiO2_LR	AL2O3_LR	Fe2O3_L R
52.63	10.53	15.79	21.05	1.60944	0.40547	0.69315
50.00	10.00	15.00	25.00	1.60944	0.40547	0.91629
47.62	9.52	14.29	28.57	1.60944	0.40547	1.09861
45.45	9.09	13.64	31.82	1.60944	0.40547	1.25276

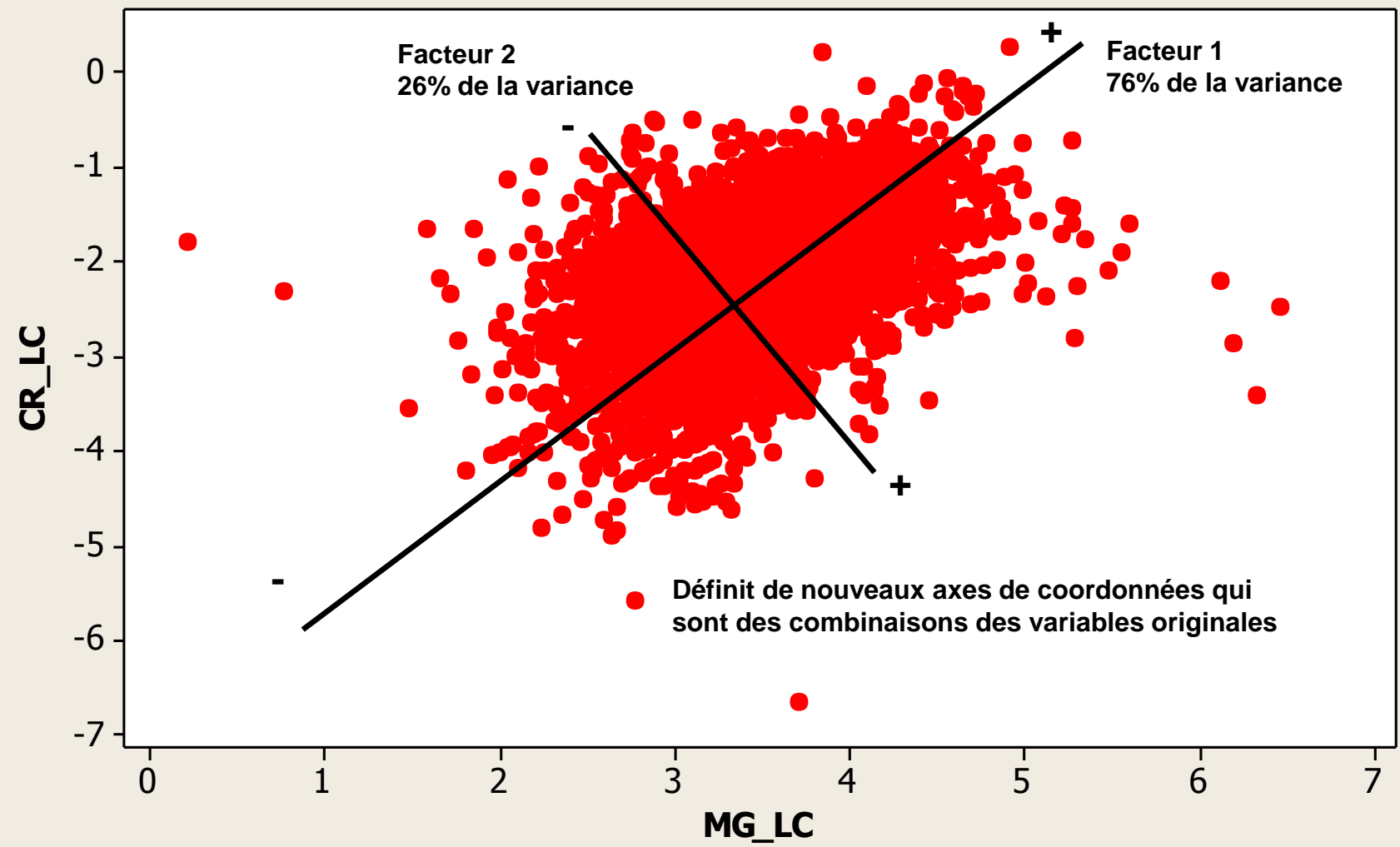
- La covariance entre SiO_2 et Fe_2O_3 pour les valeurs « log-ratios » est alors de 0.
- Similaire à ce qu'on fait dans l'analyse PER

Statistiques et géochimie secondaire

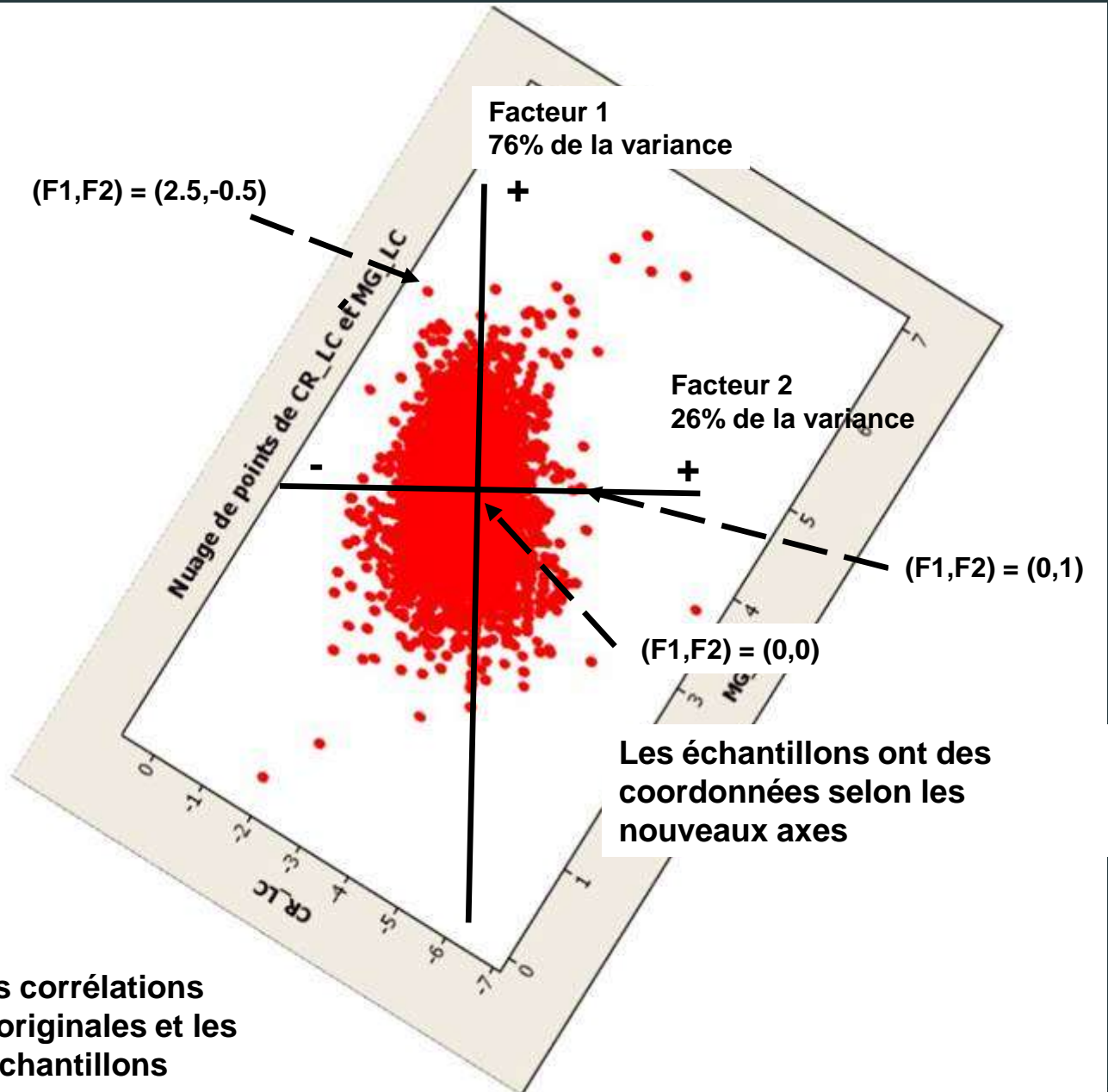
- Cinq méthodes seront examinées
 - « Box-plots »
 - Corrélations dans les données compositionnelles
 - **Analyse factorielle**
 - Analyse par grappe
 - Analyse des variogrammes (géostatistiques)
- Ces méthodes seront illustrées par la suite par l'application sur les données des sédiments de lacs du Grand Nord

Analyse factorielle

Nuage de points de CR_LC et MG_LC

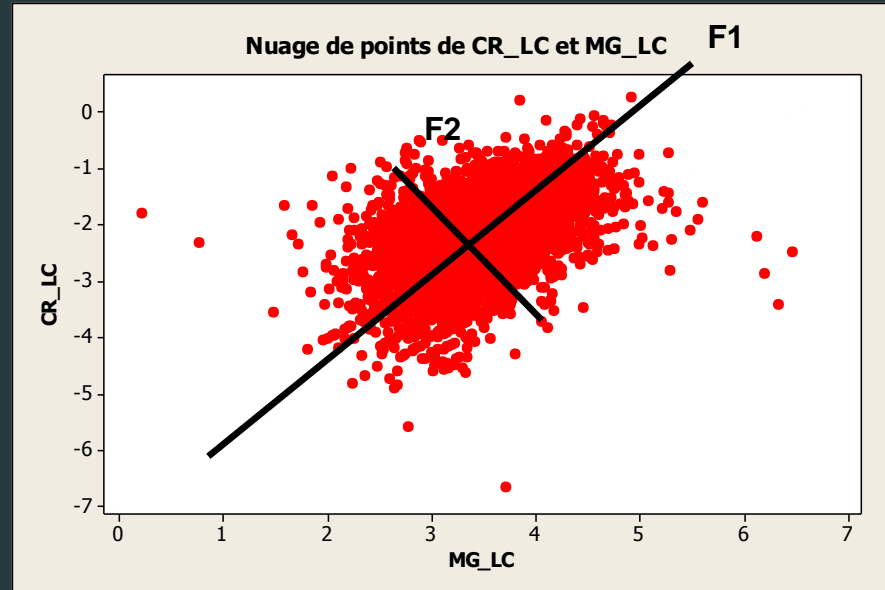


Analyse factorielle



On peut calculer les corrélations entre les variables originales et les coordonnées des échantillons

Analyse factorielle



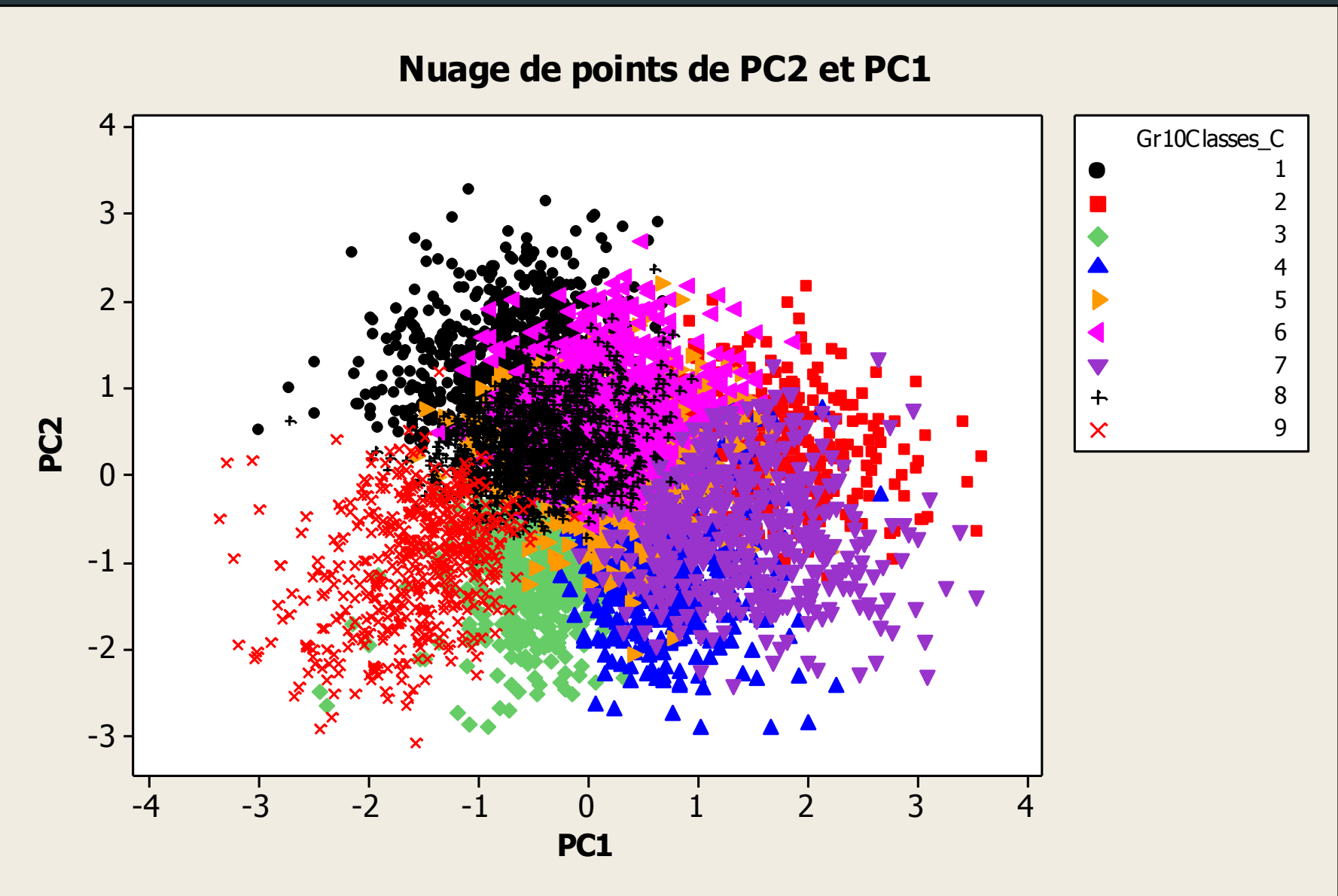
- Basé sur les covariances → Les valeurs brutes ont été transformées avant l'analyse factorielle par la méthode « log-centrée » de Aitchison (1985) pour enlever l'effet de la fermeture à 100% des analyses sur les covariances

Statistiques et géochimie secondaire

- Cinq méthodes seront examinées
 - « Box-plots »
 - Corrélations dans les données compositionnelles
 - Analyse factorielle
 - **Analyse par grappe**
 - Analyse des variogrammes (géostatistiques)
- Ces méthodes seront illustrées par la suite par l'application sur les données des sédiments de lacs du Grand Nord

Analyses par grappes

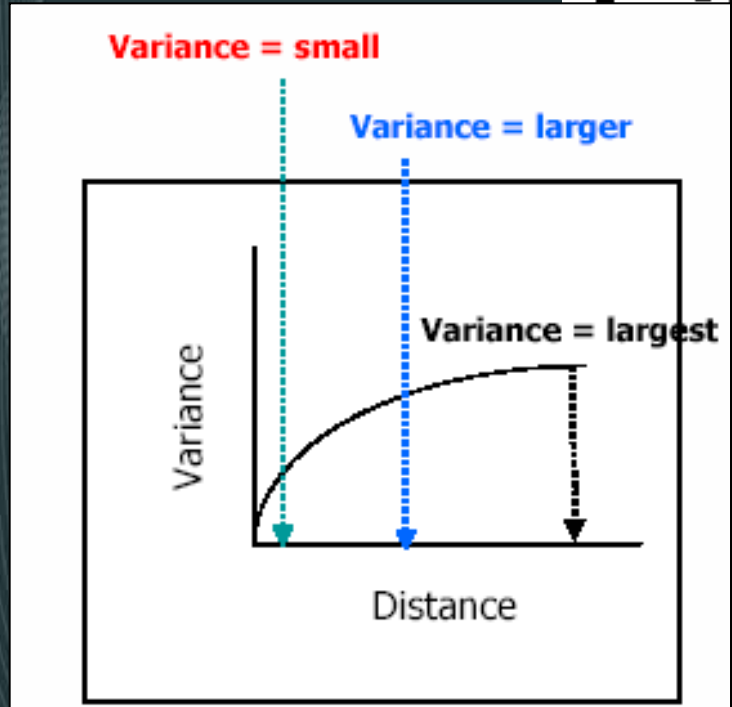
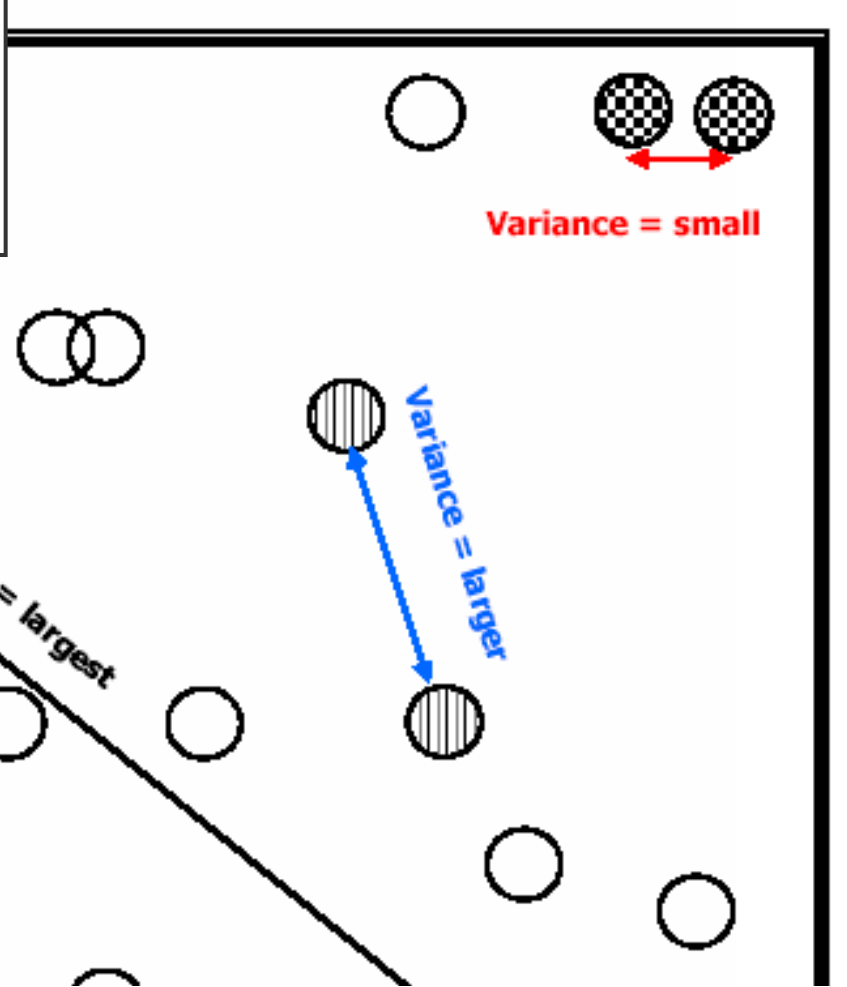
- L'idée est de séparer une banque de données multivariable en plusieurs catégories
- Plusieurs méthodes existent:
 - Analyse hiérarchique (« arbres de classification »)
 - K-moyennes
- Classer statistiquement les échantillons en catégories



- Cinq méthodes seront examinées
 - « Box-plots »
 - Corrélations dans les données compositionnelles
 - Analyse factorielle
 - Analyse par grappe
 - **Analyse des variogrammes (géostatistiques)**
- Ces méthodes seront illustrées par la suite par l'application sur les données des sédiments de lacs du Grand Nord

Méthodes géostatistiques

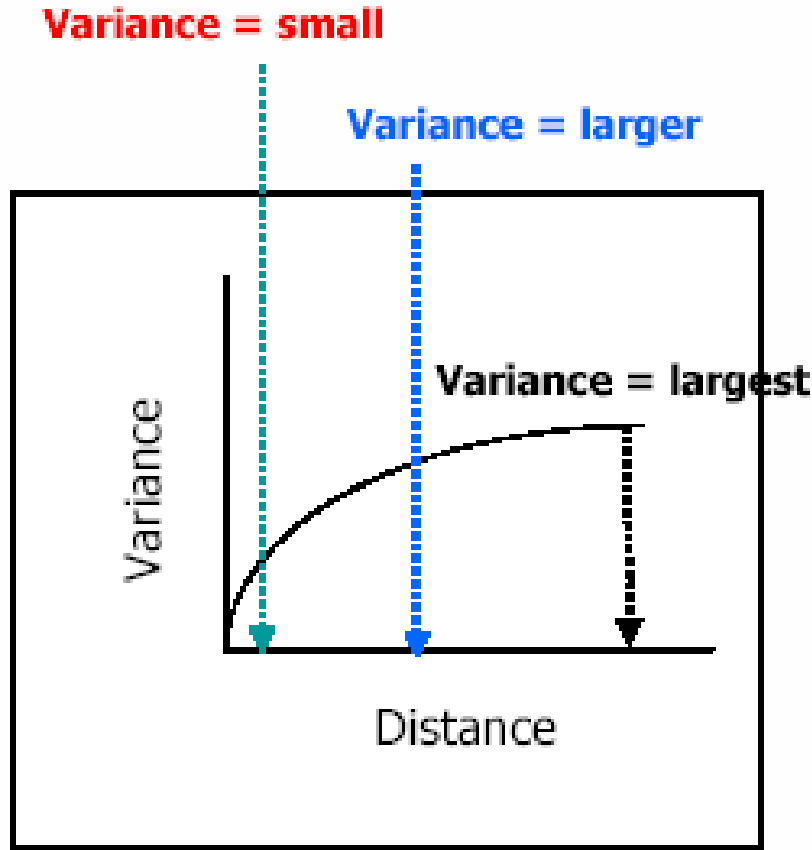
Les objets qui sont rapprochés dans l'espace ont tendance (mais pas toujours!) à se ressembler alors que ceux qui sont éloignés sont plus différents



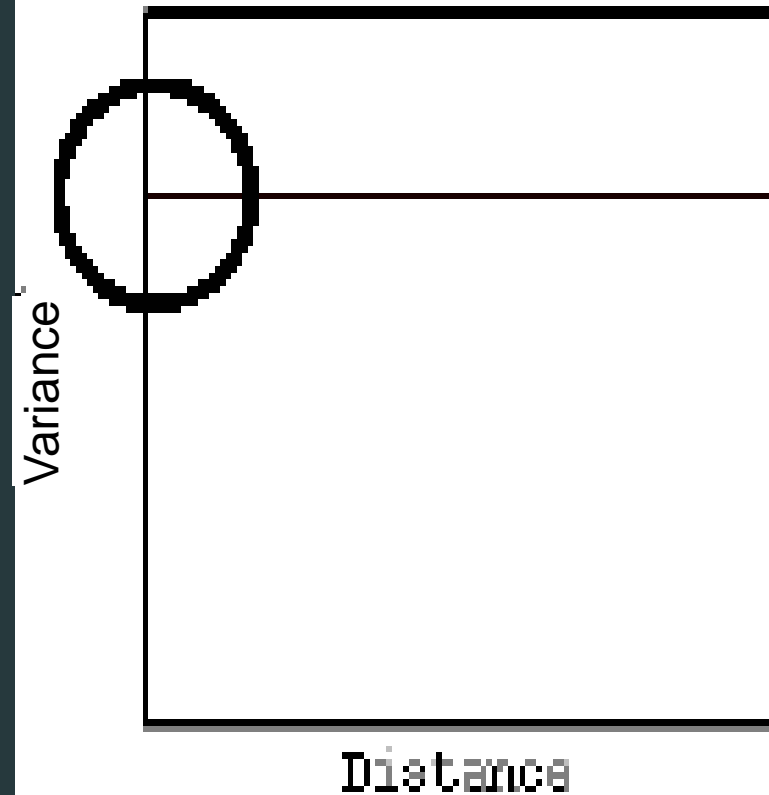
VARIOGRAMME

VARIOGRAMME : CALCUL DE LA VARIATION MOYENNE D'UNE VARIABLE POUR TOUTES LES PAIRES D'ÉCHANTILLONS SÉPARÉS PAR DES DISTANCES SUCCESSIVES

Corrélation spatiale vs. non-corrélation

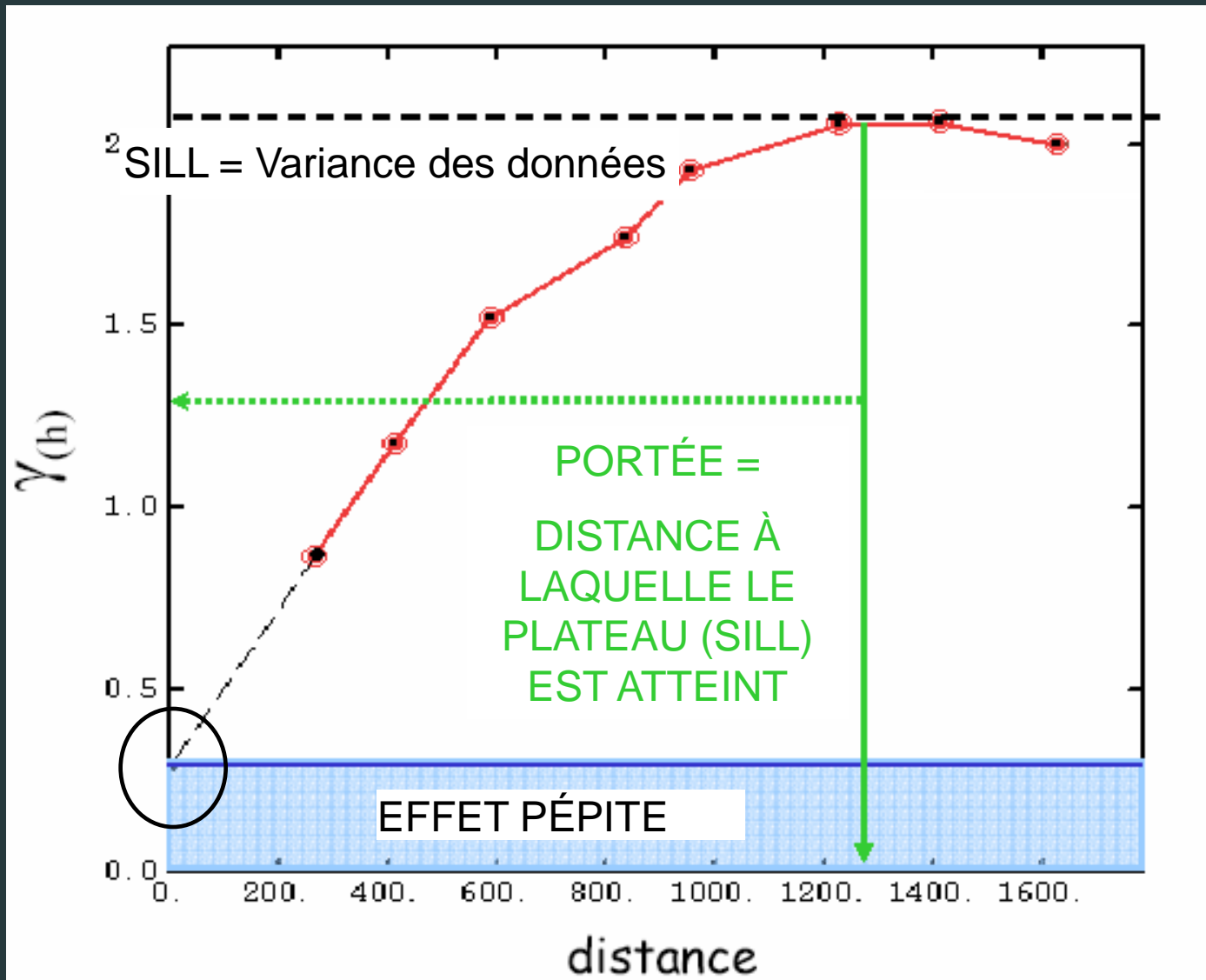


Donnée dites
« corrélées spatialement »

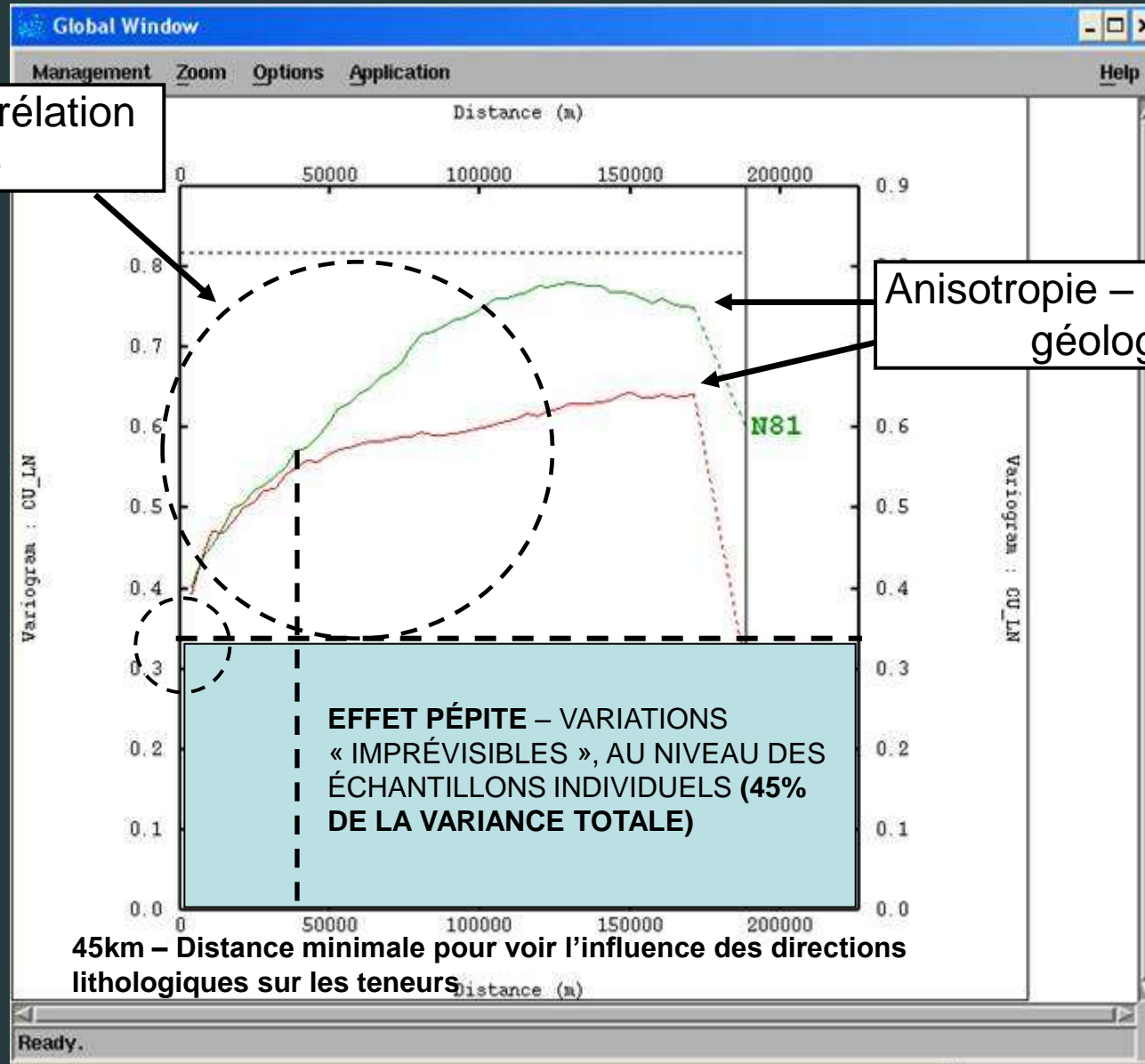


Donnée
« non-corrélées spatialement »
(effet pépite pur)

Méthodes géostatistiques : variogramme expérimental



Méthodes géostatistiques : variogramme expérimental pour Cu levé 1997520



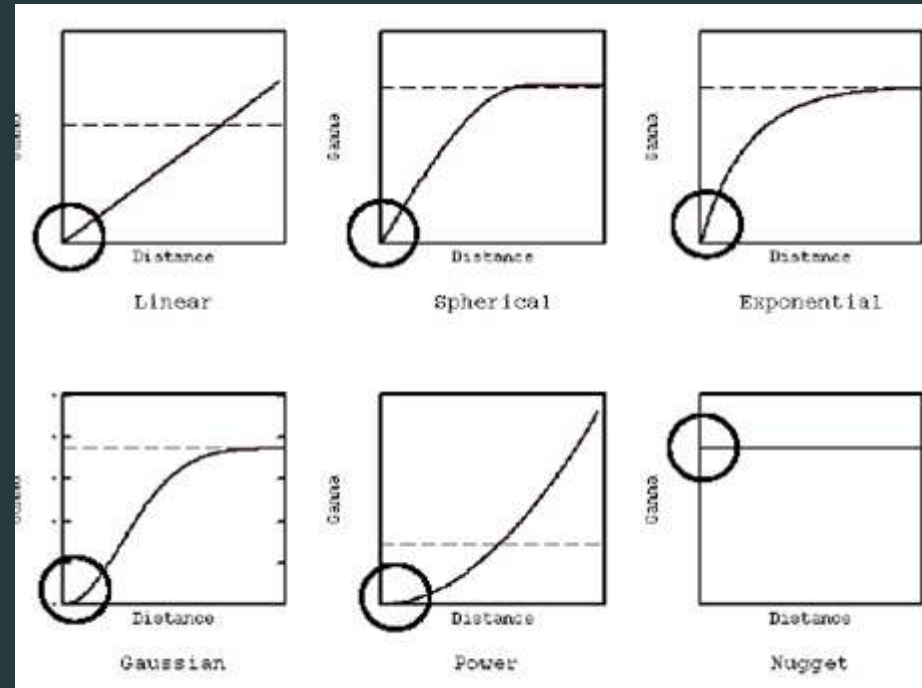
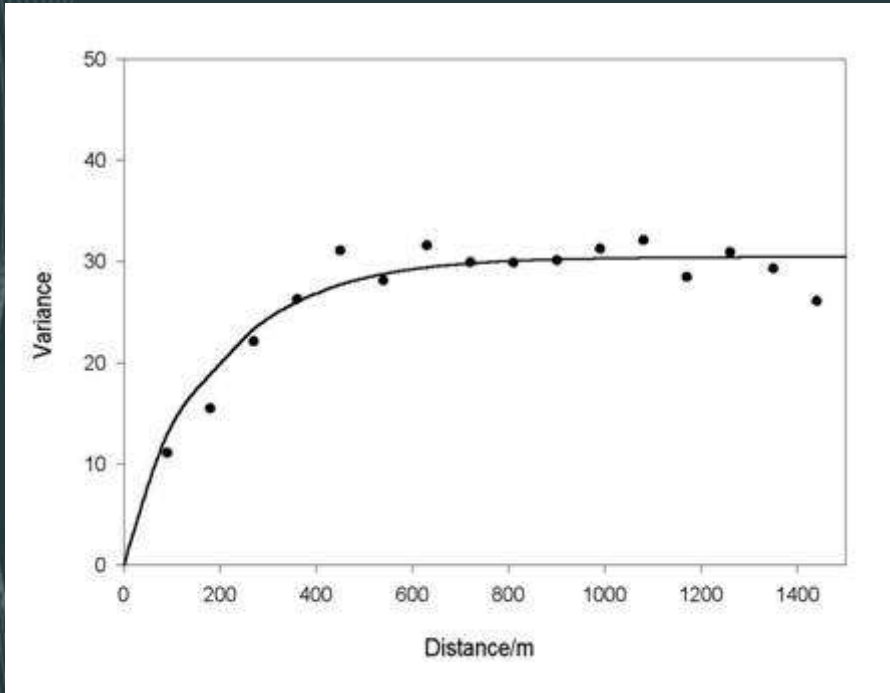
Importante corrélation spatiale

Anisotropie – Effet de la géologie

EFFET PÉPITE – VARIATIONS « IMPRÉVISIBLES », AU NIVEAU DES ÉCHANTILLONS INDIVIDUELS (45% DE LA VARIANCE TOTALE)

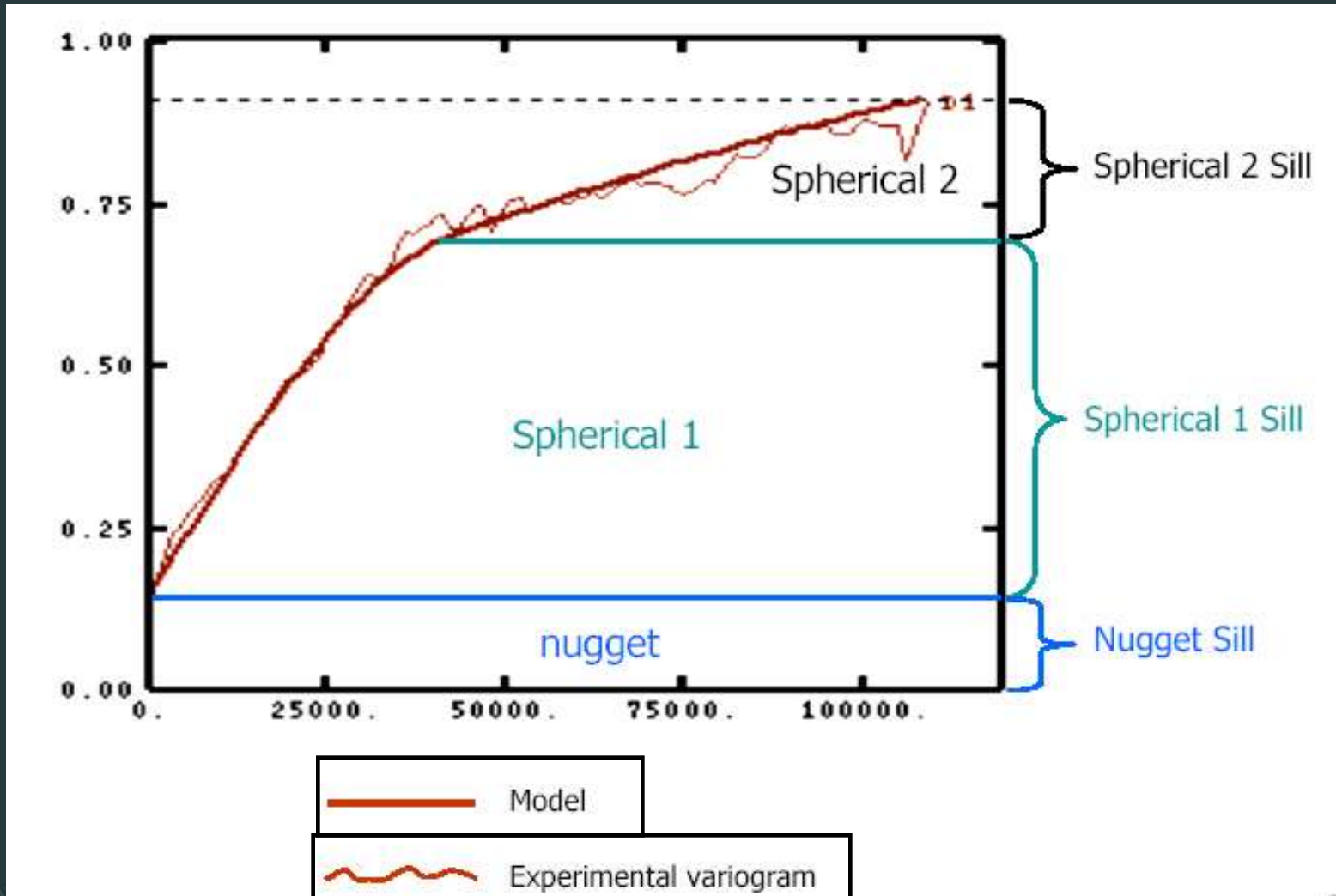
45km – Distance minimale pour voir l'influence des directions lithologiques sur les teneurs

Méthodes géostatistiques : variogrammes théoriques



Trouver quel modèle théorique (courbe) correspond le mieux avec le variogramme expérimental (points)

Variogrammes imbriqués



Variogrammes imbriqués : Superposition trois variogrammes

Variogrammes: applications

- Permet de connaître la taille des phénomènes dans l'espace.
- Permet de connaître l'importance de l'effet pépité → variations locales au niveau des échantillons individuels
- Peut s'appliquer aux facteurs de l'analyse factorielle pour les caractériser dans l'espace
- Certaines méthodes de délimitation d'anomalies en sont dérivées

Géochimie des sédiments de lacs en exploration

1. Méthodes statistiques et géostatistiques d'étude des données de géochimie de l'environnement secondaire
2. **Géochimie des sédiments de lacs en bref**
3. Uniformisation des données régionales
4. Étude des données de sédiments de lacs du Grand Nord du Québec
5. Méthodes d'identification d'anomalies et concept signal/bruit appliqué a la geochemie

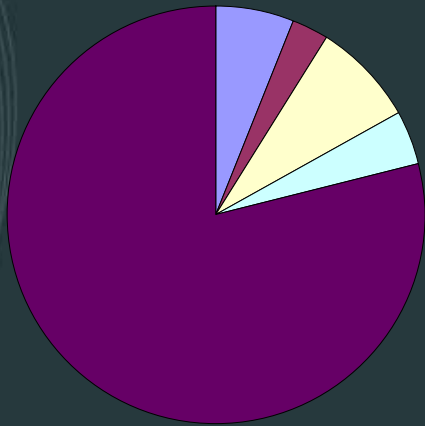
Composition des sédiments de lacs

- Classification selon l'origine du matériel (tiré de Engstrom, 1984)
 - **Allogène** – origine de l'extérieur
 - Minéraux en suspension amenés par drainage
 - Différentes fractions granulométriques :
 - » Sables
 - » Silts
 - » Argiles
 - Débris organiques amenés depuis le bassin de drainage
 - **Endogène** – formé dans la colonne d'eau
 - Activité organique dans le ruisseau ou lac
 - Précipitation chimique à partir de l'eau
 - **Fraction authigène** – interactions eau-sédiment

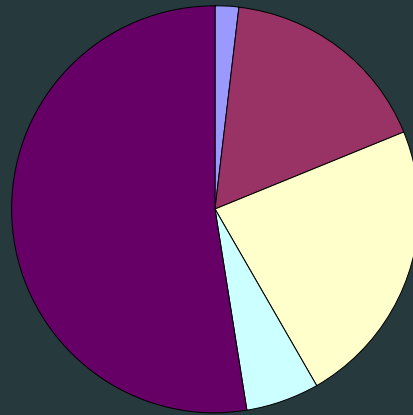
Composition des sédiments de lacs

- De quoi dépendent les proportions de ces fractions? Ex :
 - Granulométrie du sédiment (% de sable vs. silt vs. argile) dépend de :
 - Conditions d'agitation de l'eau
 - Conditions d'érosion et de transport dans le bassin de drainage
 - Types de matériaux dans le bassin de drainage (roche vs. dépôts meubles, etc), **types de roches**, Etc.
 - Sédiments lacs : composition « normale » issue de **l'interaction complexe de plusieurs processus interdépendants**

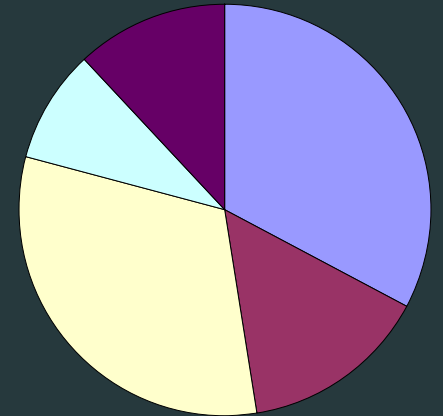
Affinité avec différentes fractions des sédiments



Al



Ni



Cu

Mx primaires



Silicates / résiduel

Oxydes de Fe-Mn cristallins

Matière organique humique

Sulfures/matière organique insoluble

Oxydes de Fe-Mn amorphes

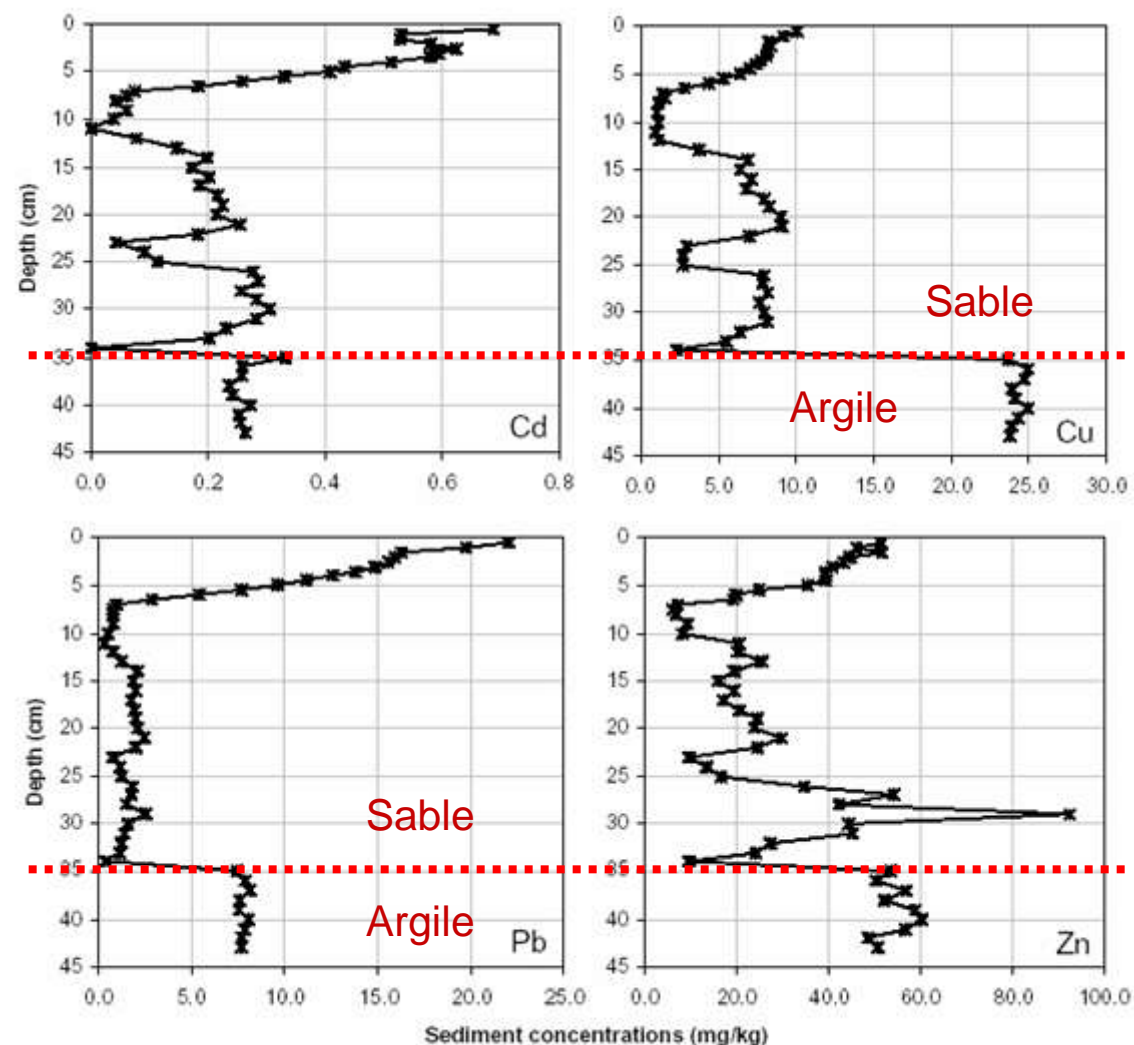
Processus de surface

Pourcentage de quelques éléments se trouvant dans différentes fractions des sédiments du lac Fairy, Ontario

Affinité avec différentes fractions des sédiments (compilation de différentes sources)

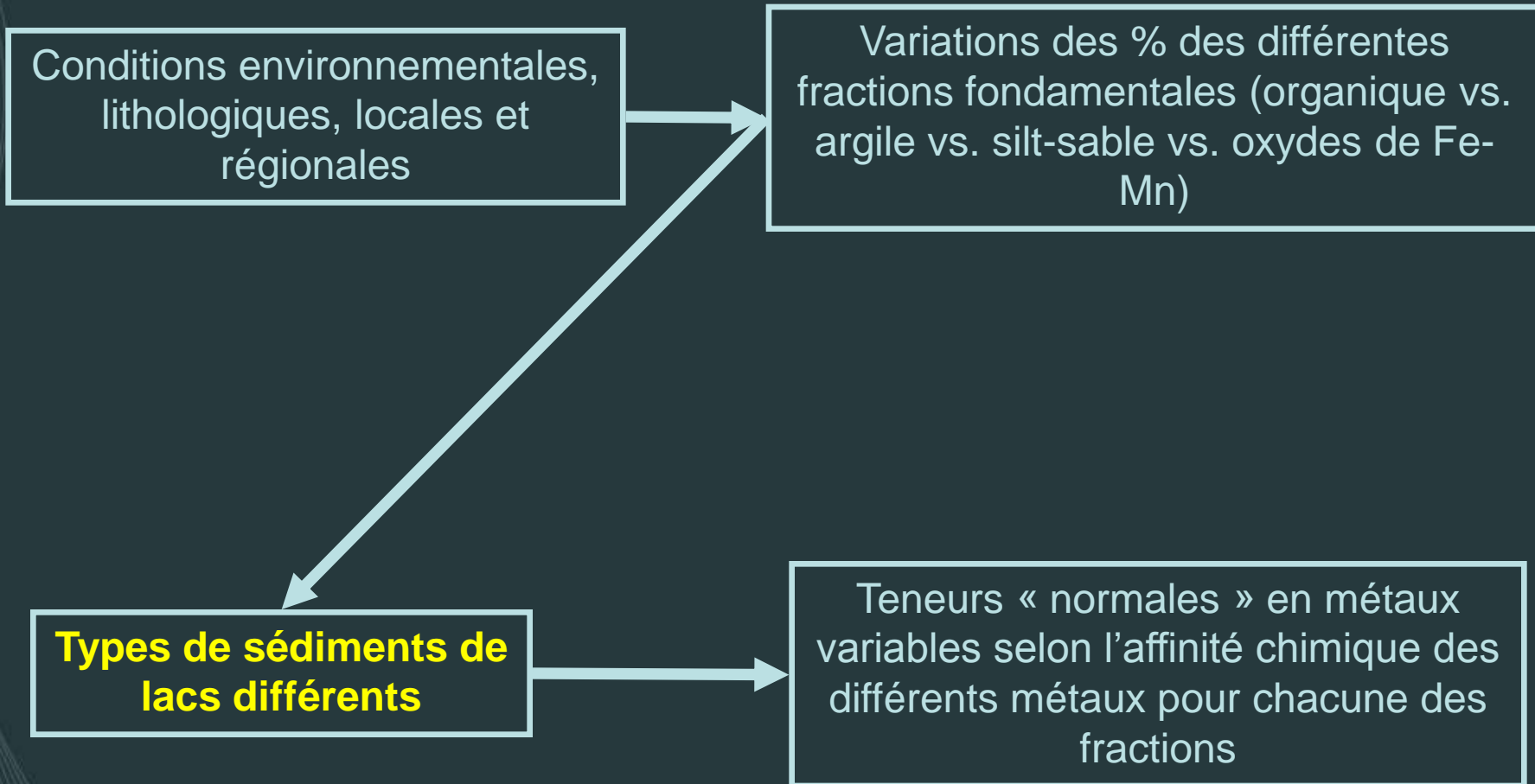
Élément	Affinité avec matière organique	Affinité avec oxydes de Fe-Mn	Présence avec silicates détritiques
K, Mg	--	--	++

Variations des teneurs dues au changement de type de sédiment dans un même lac



Les métaux ont une forte tendance à s'adsorber sur les argiles

Implications des relations teneurs - conditions environnementales



Géochimie des sédiments de lacs en exploration

1. Méthodes statistiques et géostatistiques d'étude des données de géochimie de l'environnement secondaire
2. Géochimie des sédiments de lacs en bref
- 3. Uniformisation des données régionales**
4. Étude des données de sédiments de lacs du Grand Nord du Québec
5. Exemple d'une méthode avancée d'identification des anomalies géochimiques

Levés de sédiments de lacs du Québec

Quelques statistiques...

26 levés

116 854 échantillons

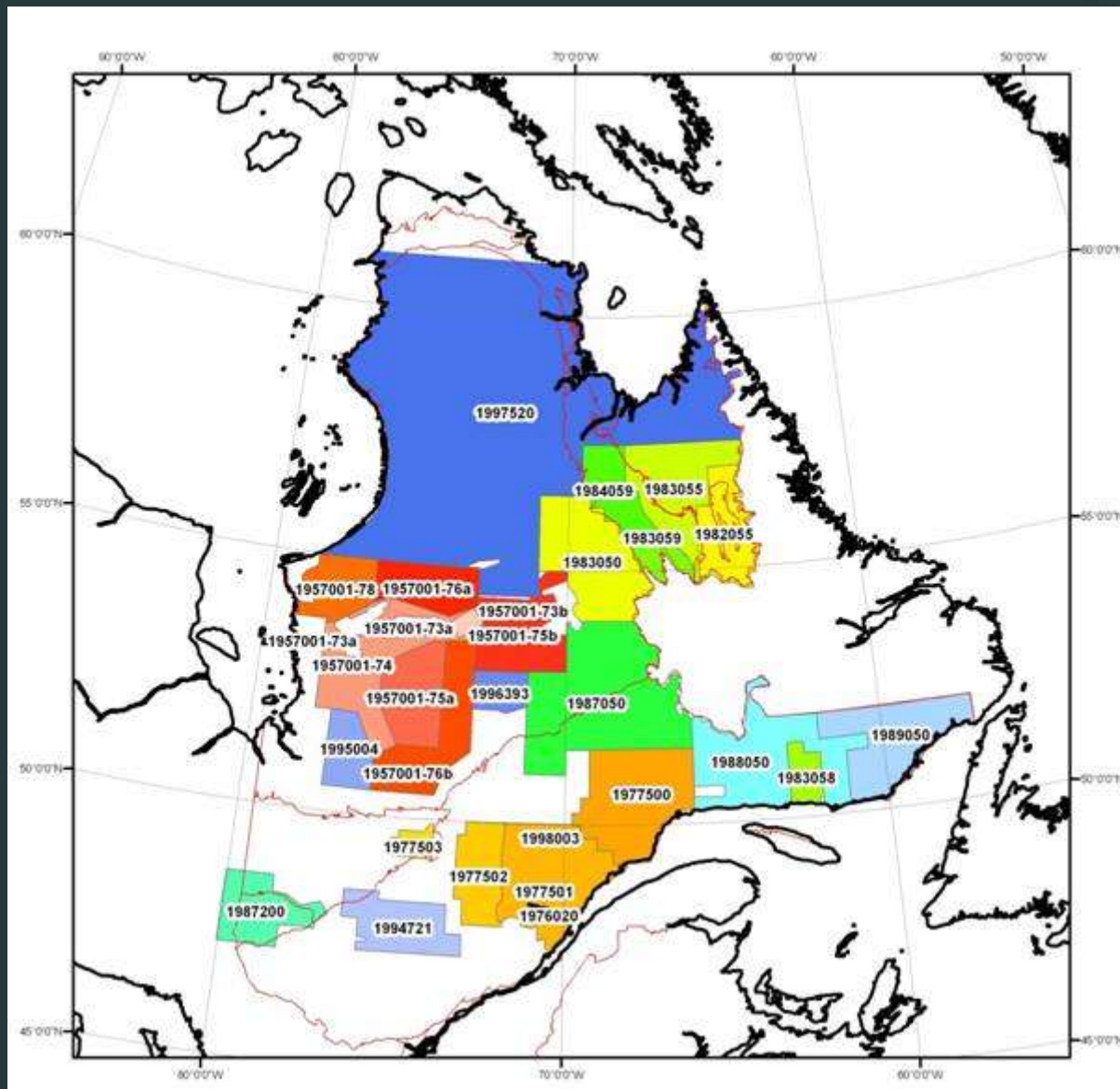
9 éléments analysés dans tous les levés

(Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Mn, Fe, U, Mo)

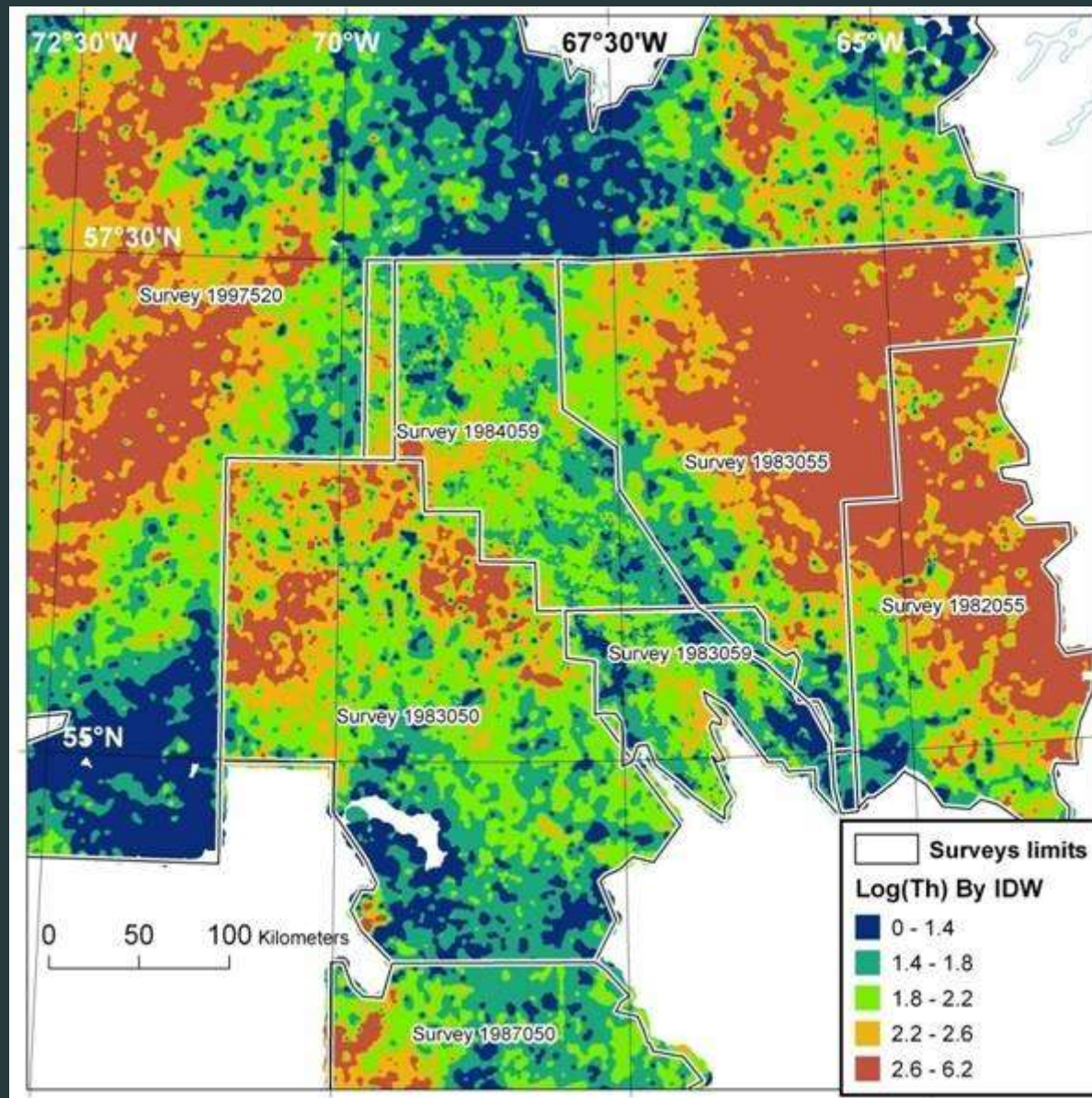
32 éléments analysés dans 16 des 26 levés – RÉANAYSES EN COURS

Levés effectués entre 1973 et 1998

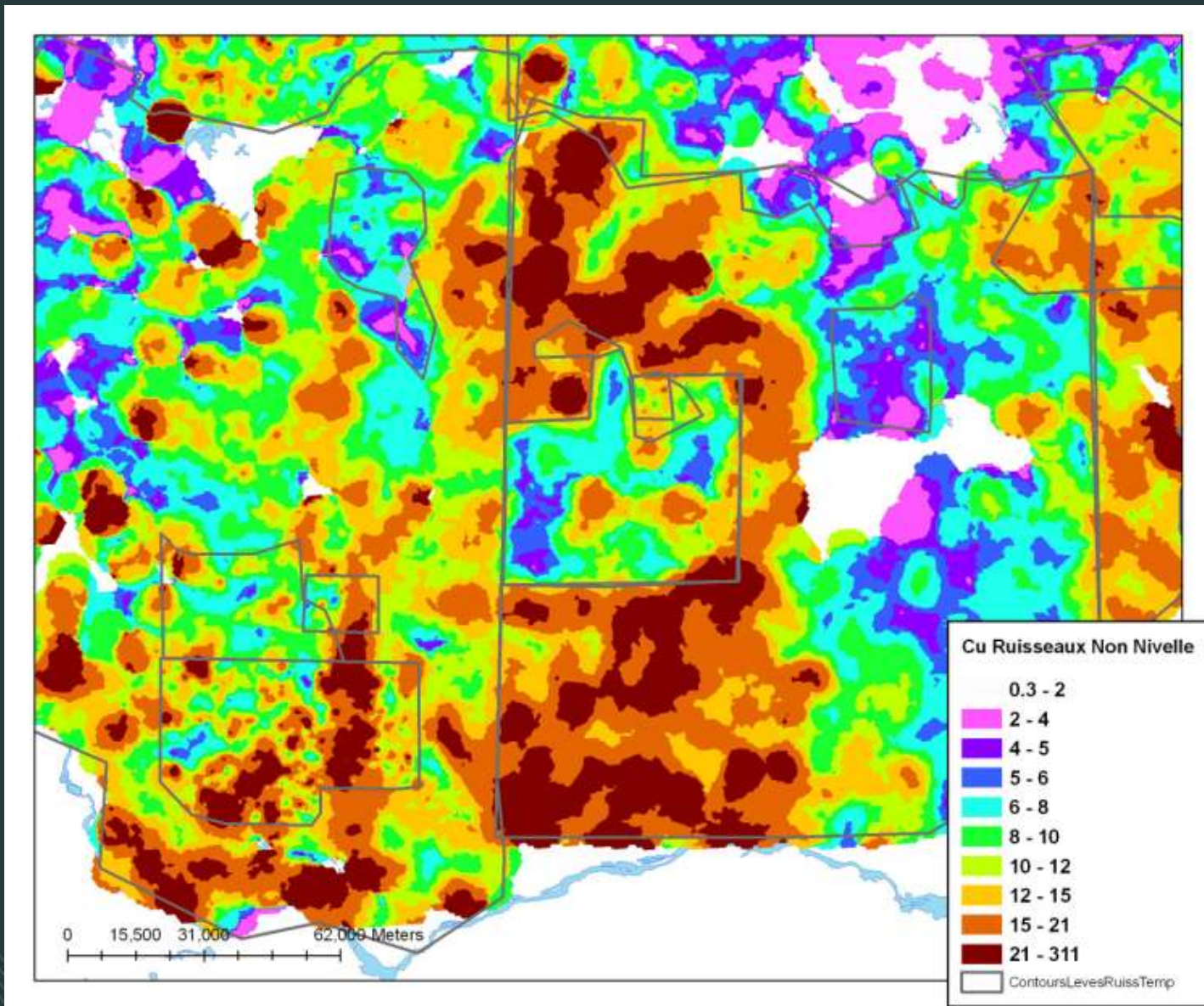
Matériel échantillonné: sédiment des parties centrales, plus profondes des lacs – souvent très organiques



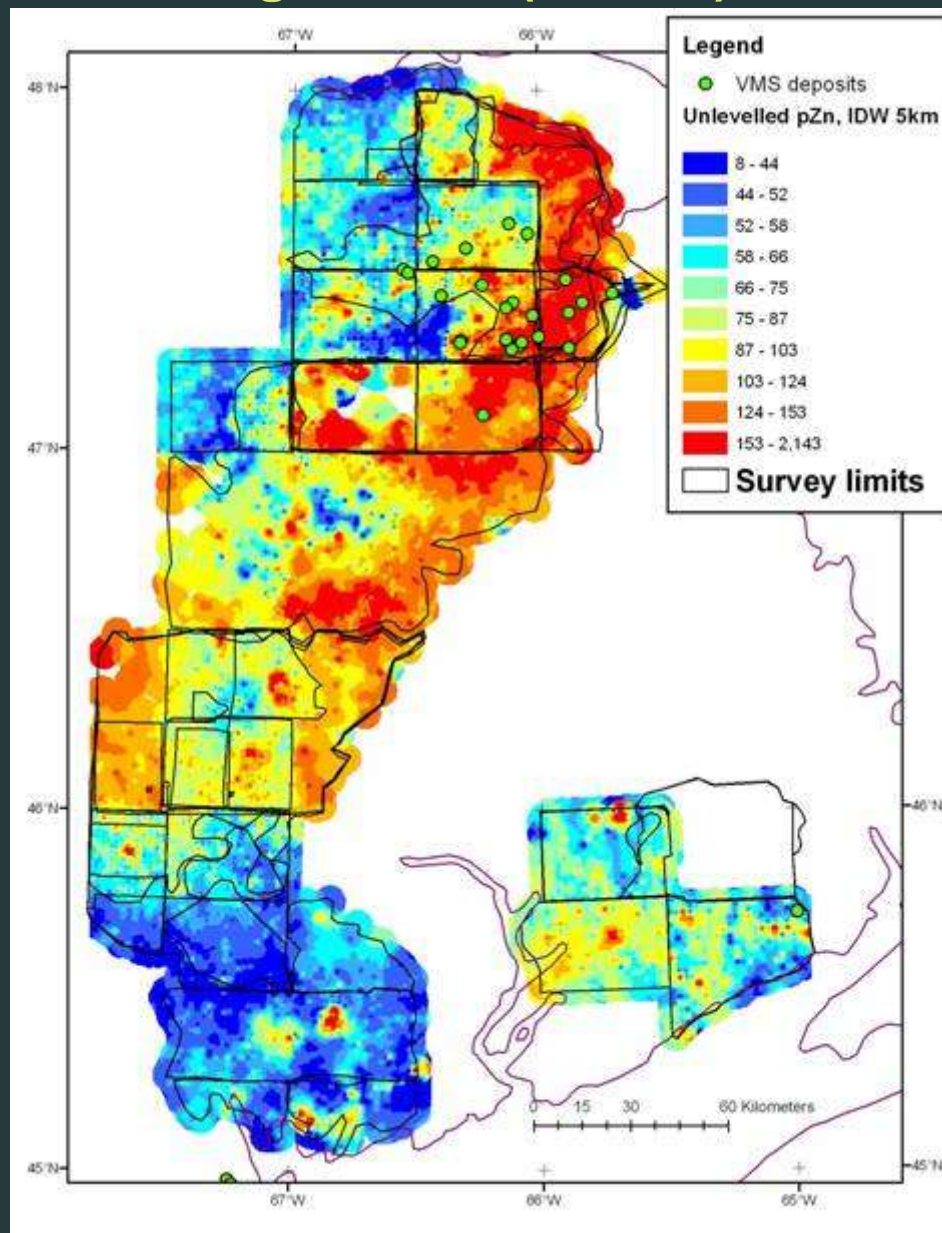
Exemples de problèmes de nivellement: sédiments de lacs



Problèmes de nivellement dans la géochimie de ruisseaux (1)

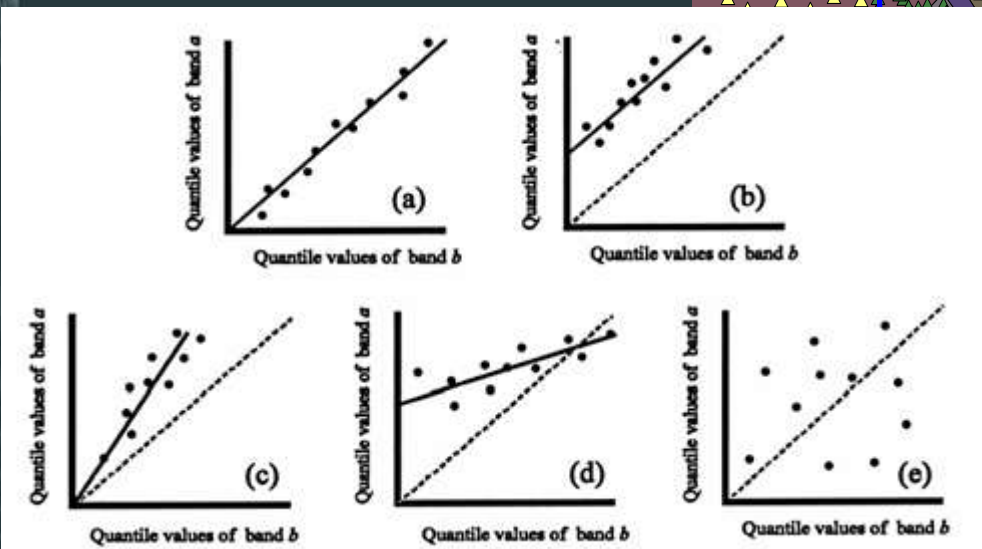
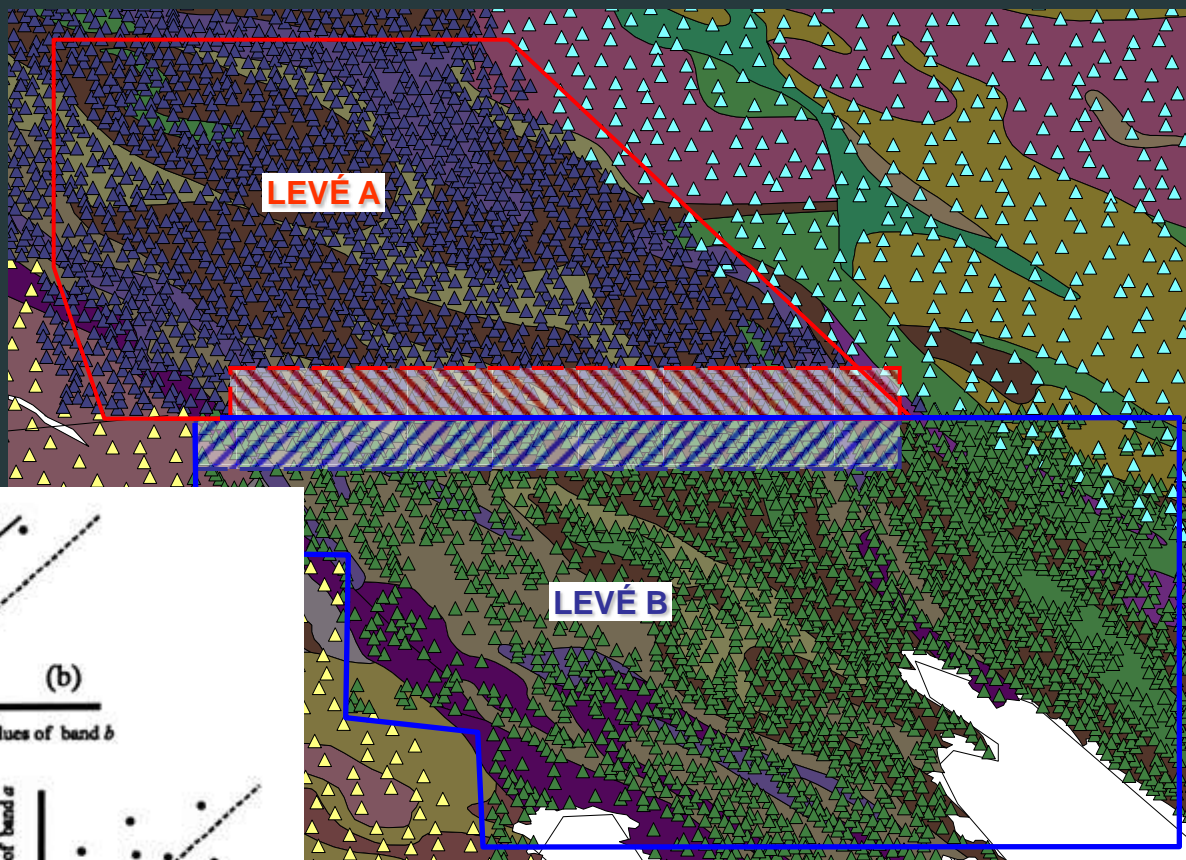


Problèmes de nivellement dans la géochimie des dépôts glaciaires (« tills »)

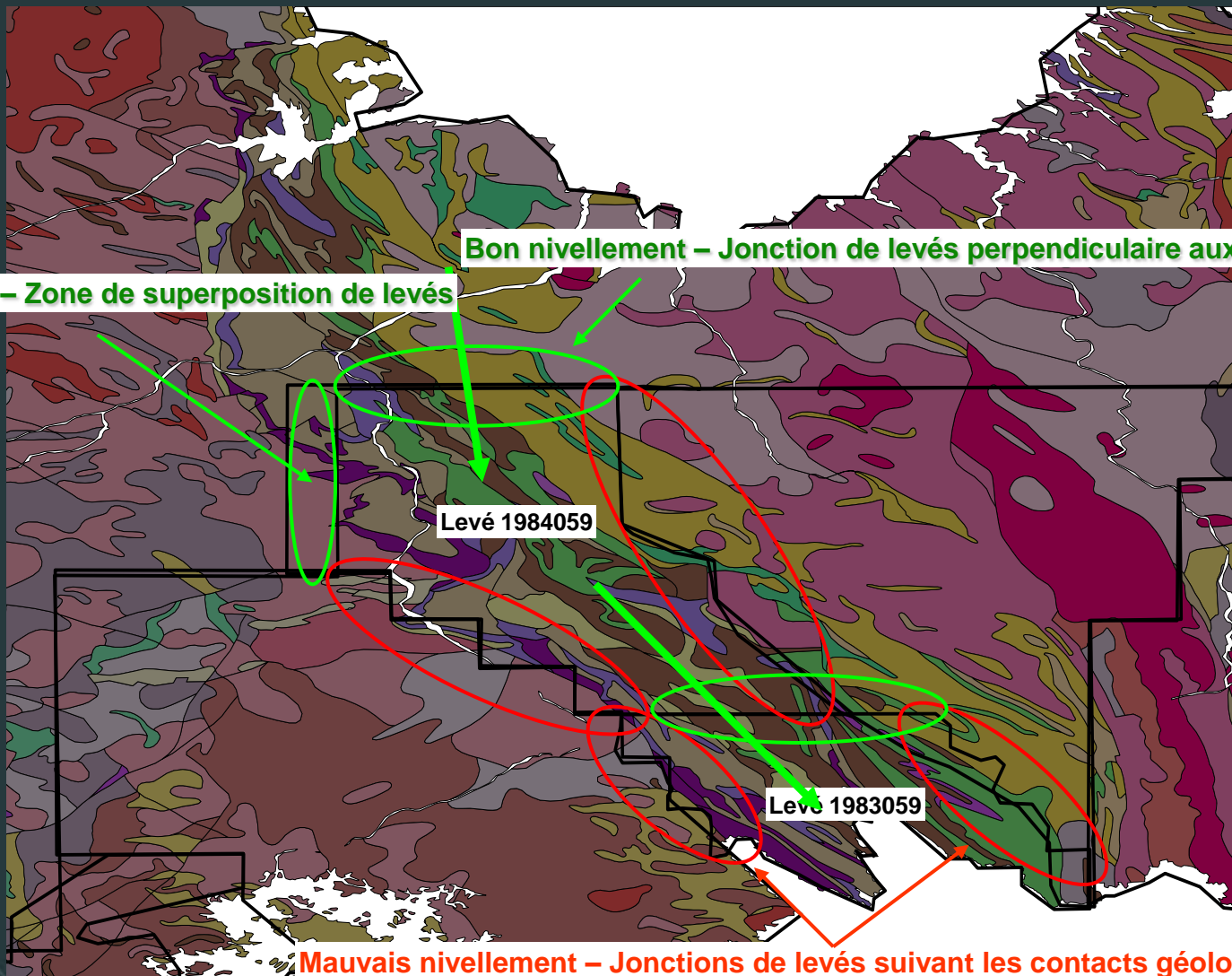


Méthode de nivellement utilisée

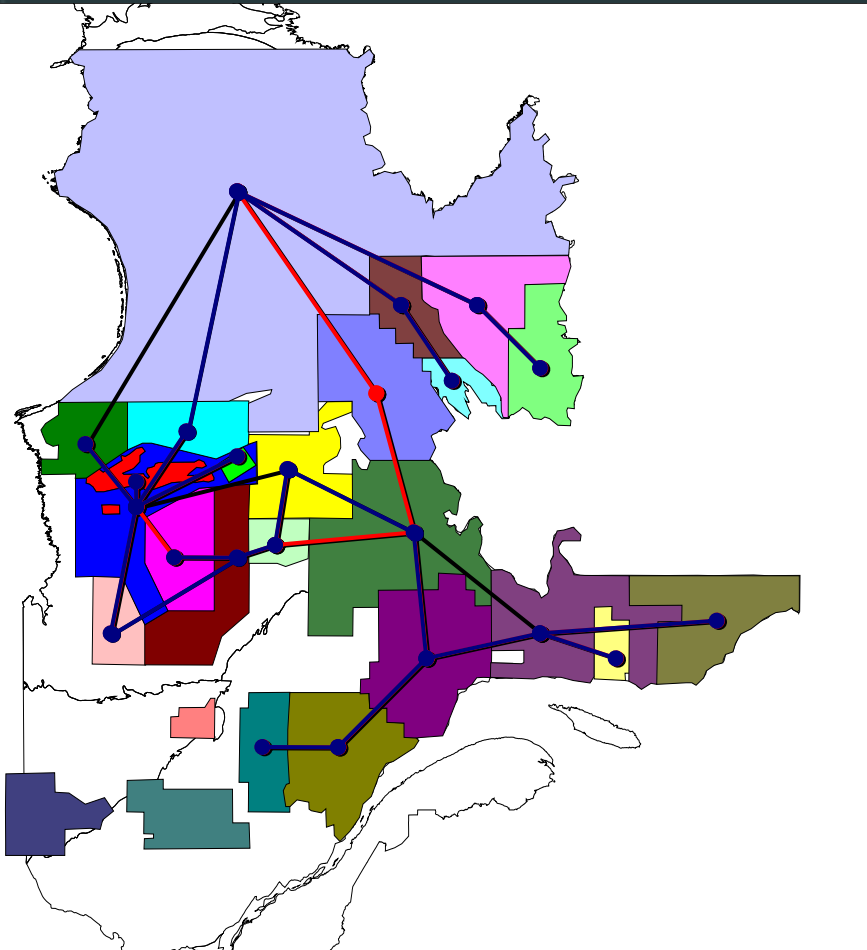
- Idée : évaluer les différences entre deux levés adjacents en comparant les valeurs des échantillons situés près de la limite entre les deux levés (Cameron et Daneshfar ; Journal of Geochemical Exploration 63)



Méthode de nivellement utilisée



Nivellement en cascade



Levés pour lesquels le Zinc a été analysé
(représentation par réseau ou graphe)

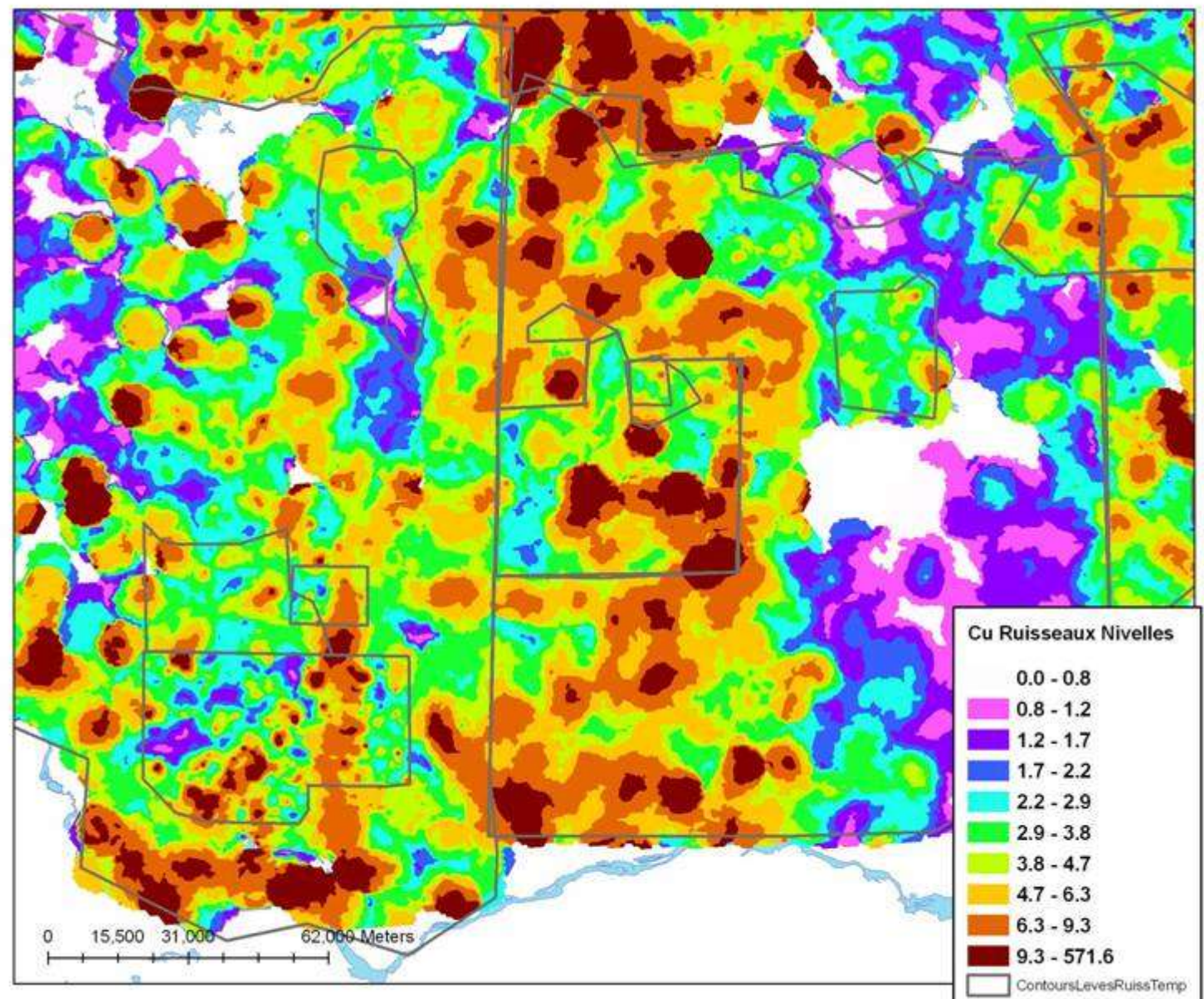
Extension de la méthode de Daneshfar et
Cameron pour de multiples levés adjacents

Nivellement de façon itérative en effectuant
plusieurs cycles de nivellements partiels qui
empruntent des parcours différents à chaque fois

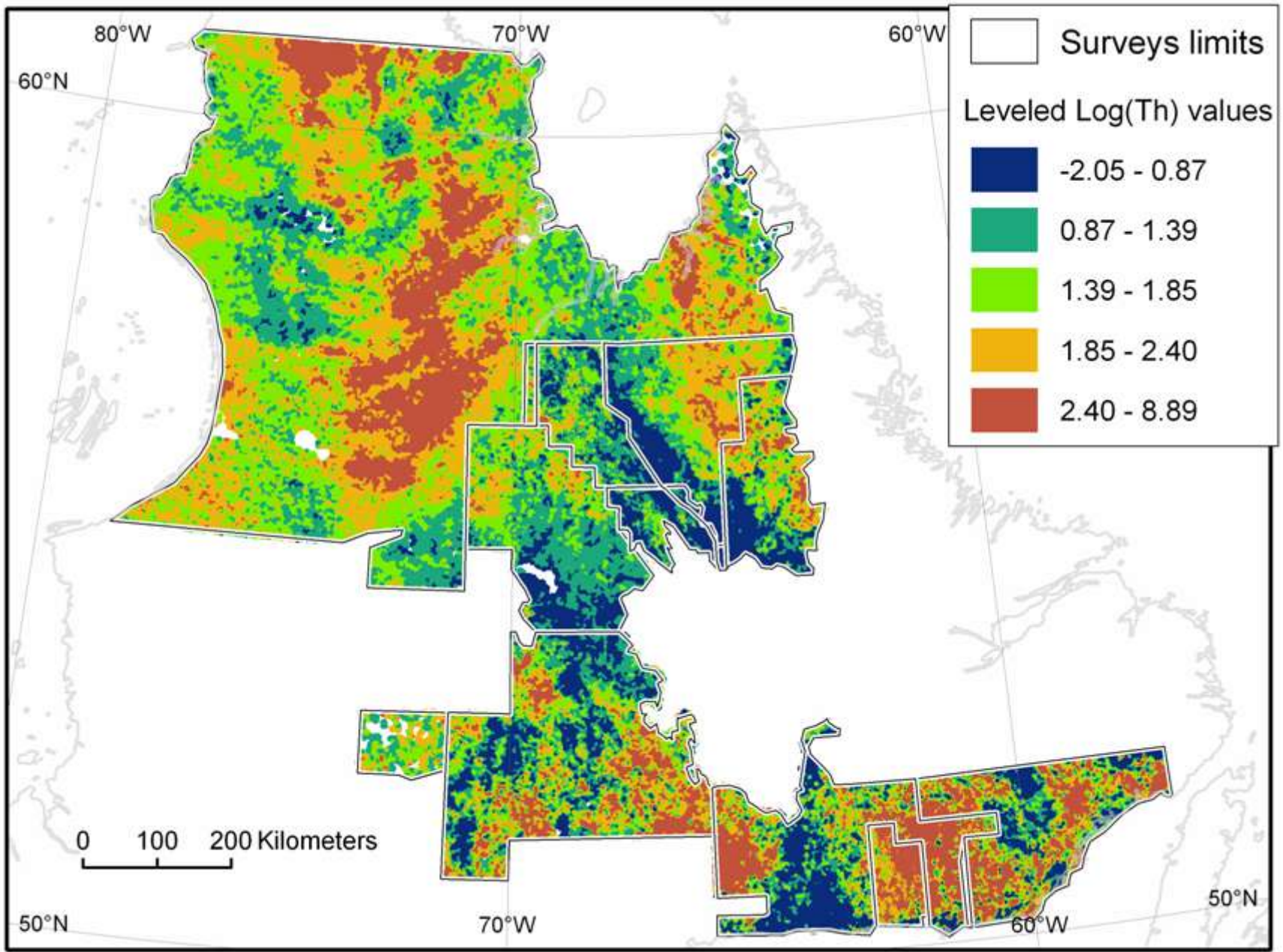
Réalisé grâce à un logiciel de nivellement
automatisé maison développé sur Visual Basic
.NET

GM-

Nivellé (1)



Nivellé (1)



Géochimie des sédiments de lacs en exploration

1. Méthodes statistiques et géostatistiques d'étude des données de géochimie de l'environnement secondaire
2. Géochimie des sédiments de lacs en bref
3. Uniformisation des données régionales
4. Étude des données de sédiments de lacs du Grand Nord du Québec – Signaux géochimiques
5. Exemple d'une méthode avancée d'identification des anomalies géochimiques

Levé du Grand Nord (1997520)

- Données disponibles:
 - 19 éléments de qualité acceptable
 - Perte au feu
 - Profondeur du lac échantillonné
 - Couleur de l'échantillon
 - Lithologie de la carte géologique
 - Surface du lac échantillonnée selon la carte topographique
 - Dépôts de surface

1. « Box-plots » et graphiques X-Y
2. Analyse factorielle
3. Analyse par grappes
4. Variogrammes
5. Conclusions

Relation perte au feu - matière organique

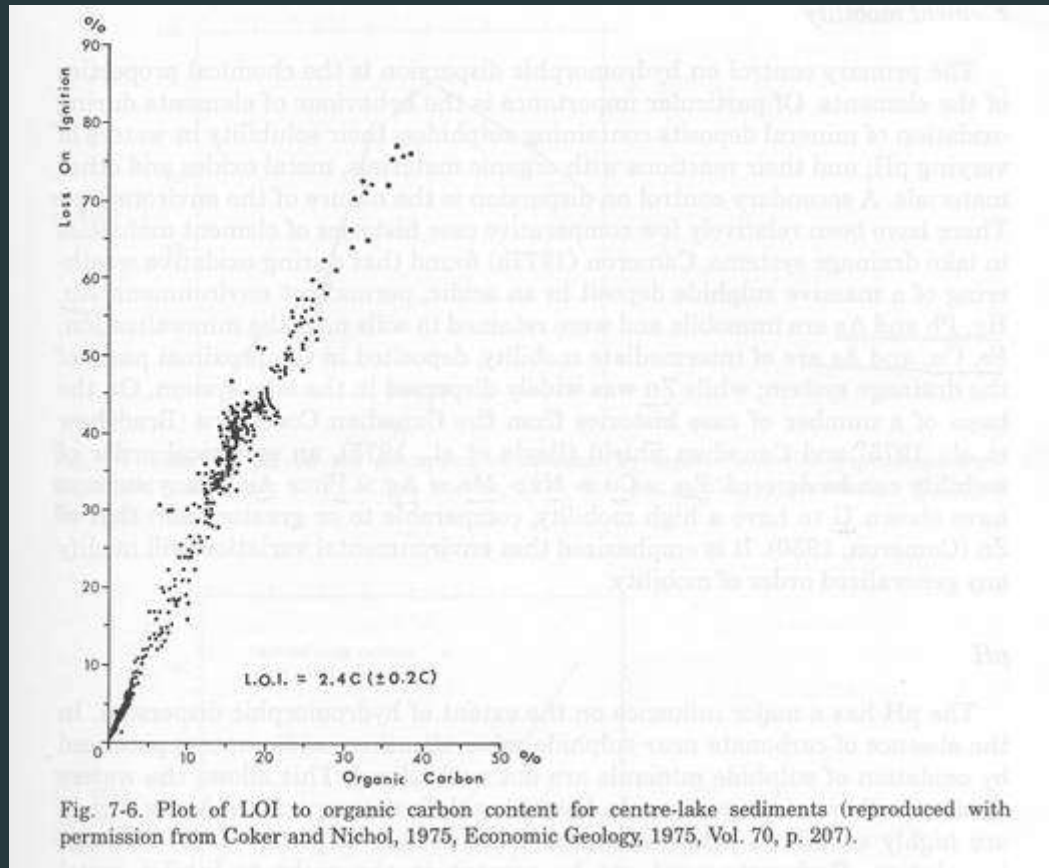


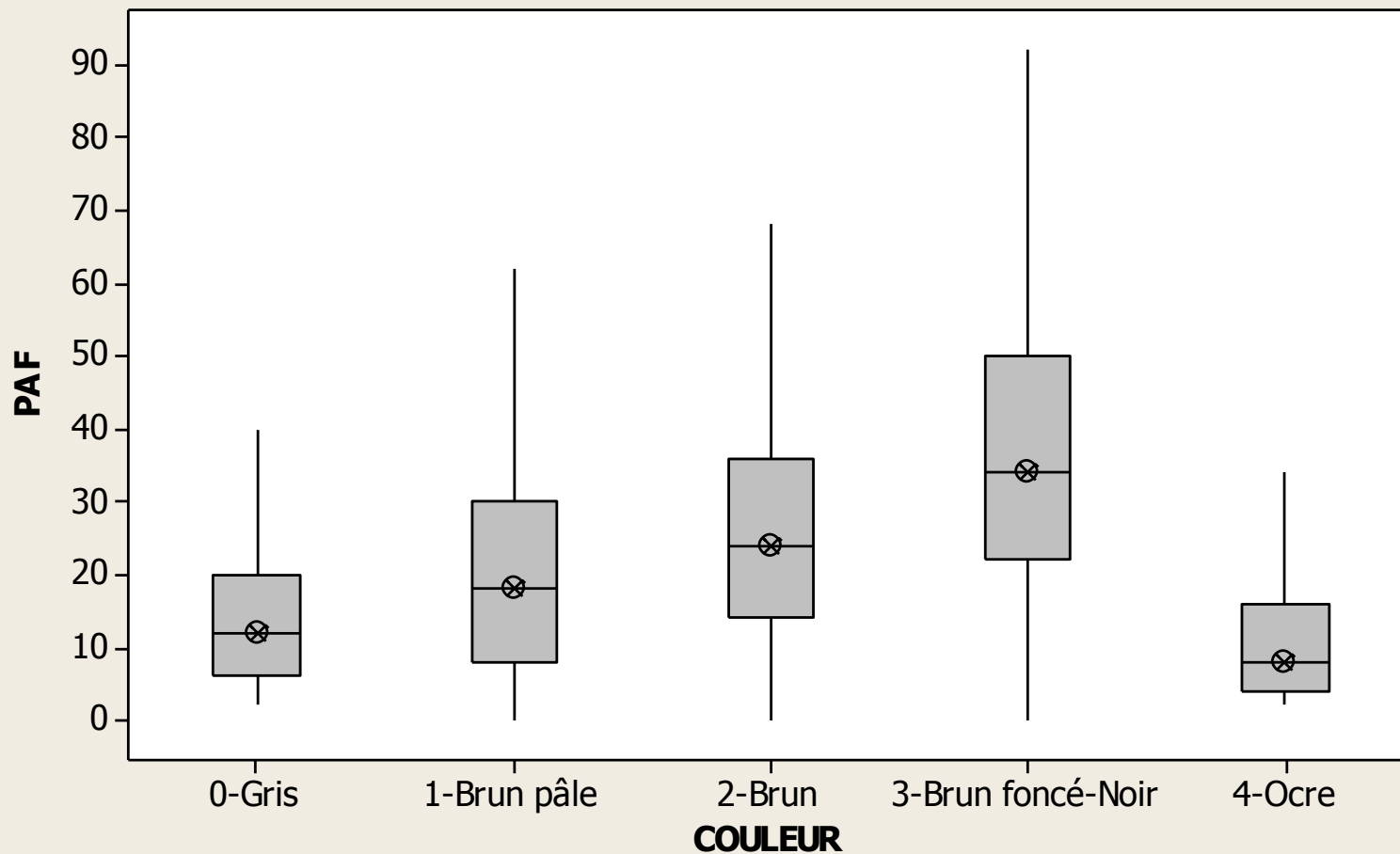
Fig. 7-6. Plot of LOI to organic carbon content for centre-lake sediments (reproduced with permission from Coker and Nichol, 1975, Economic Geology, 1975, Vol. 70, p. 207).

La perte au feu est le % de masse perdu lors la chauffe de l'échantillon à ~1000°C.

La perte au feu est directement fonction du contenu en matière organique dans les sédiments de lacs

Relation entre perte au feu et couleur

Boîte à moustaches de PAF



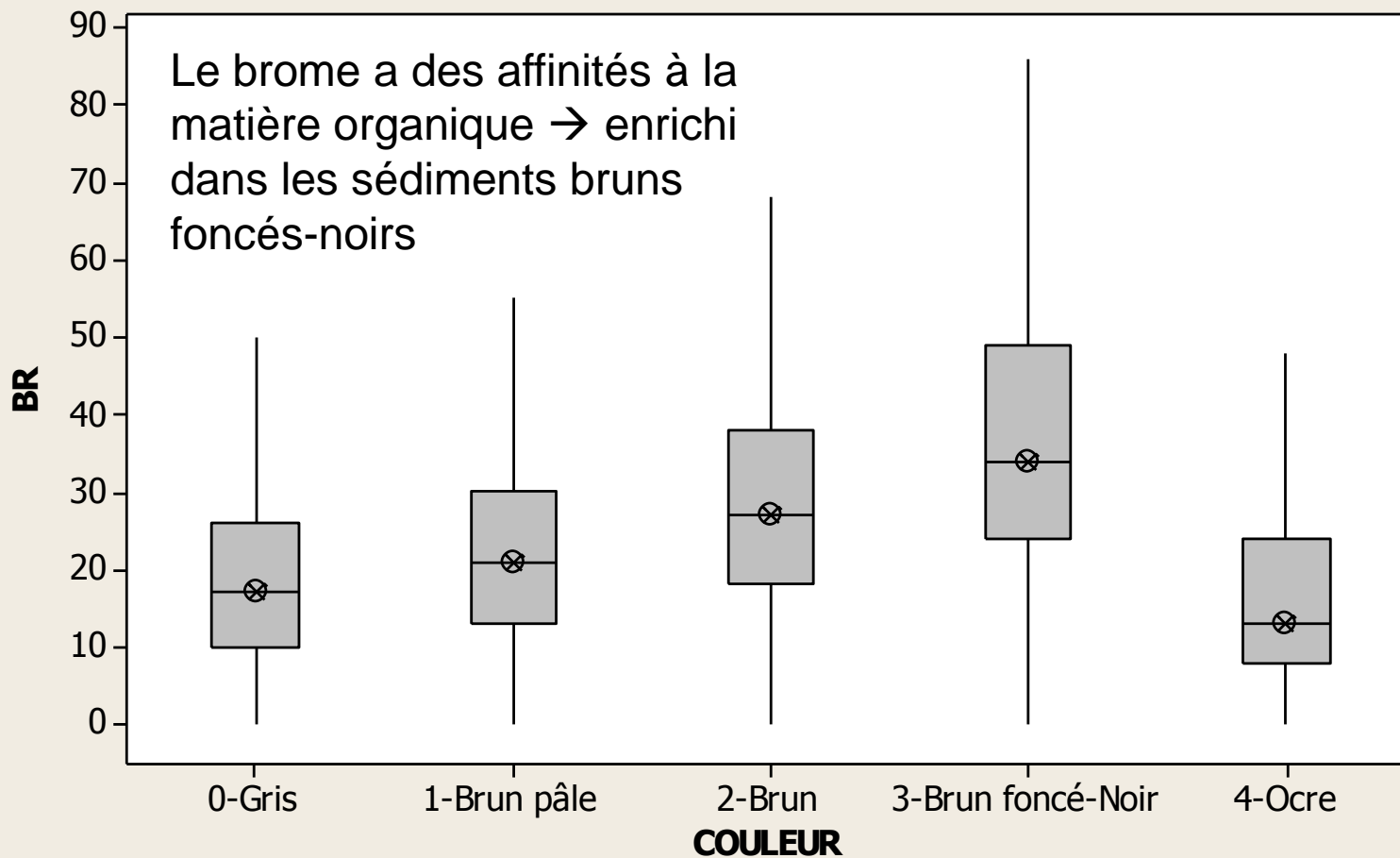
Inorganique



Organique

Couleurs des échantillons et teneurs et métaux

Boîte à moustaches de BR



Inorganique

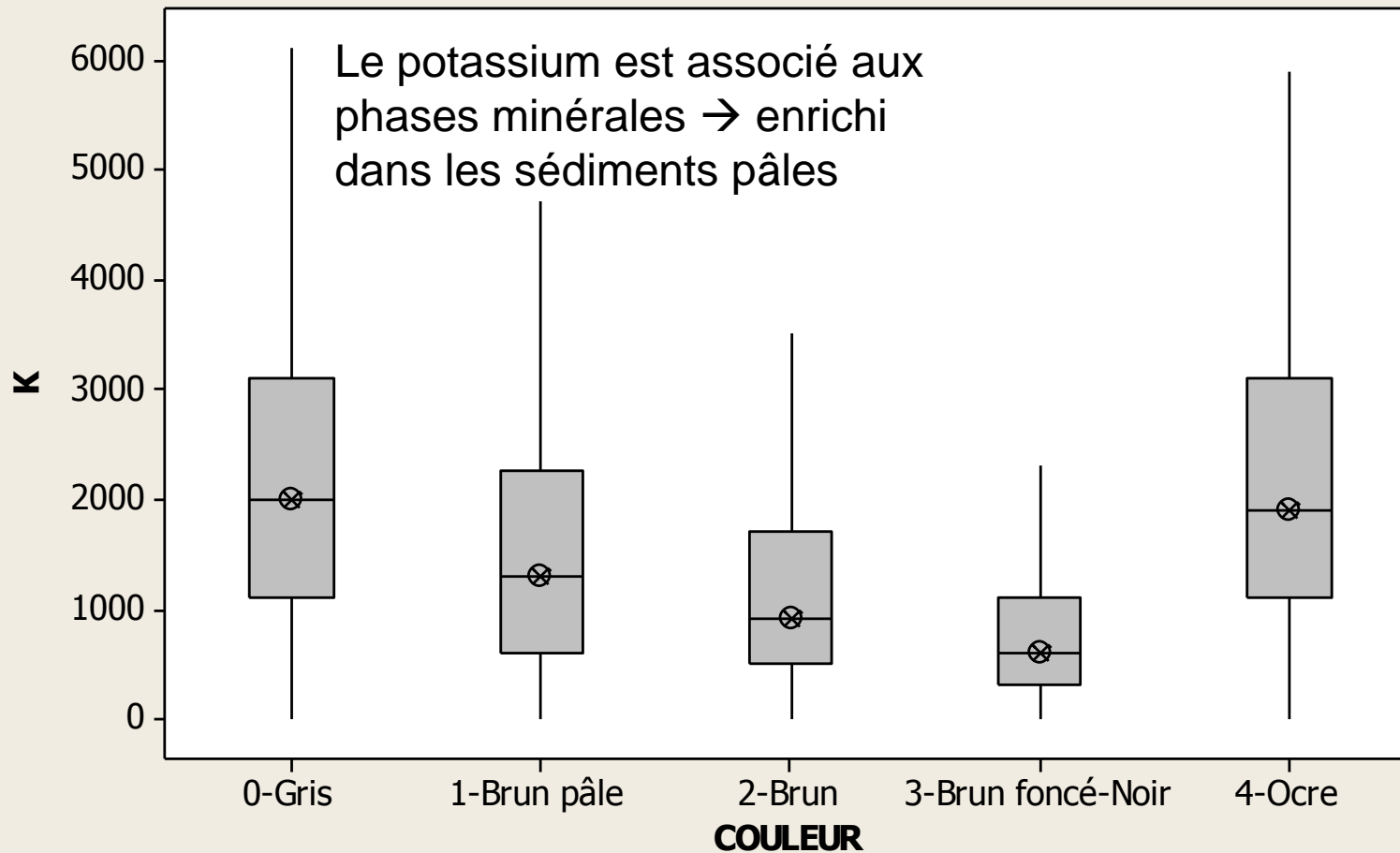


Organique

Oxydes
de Fer

Couleurs des échantillons et teneurs et métaux

Boîte à moustaches de K



Inorganique

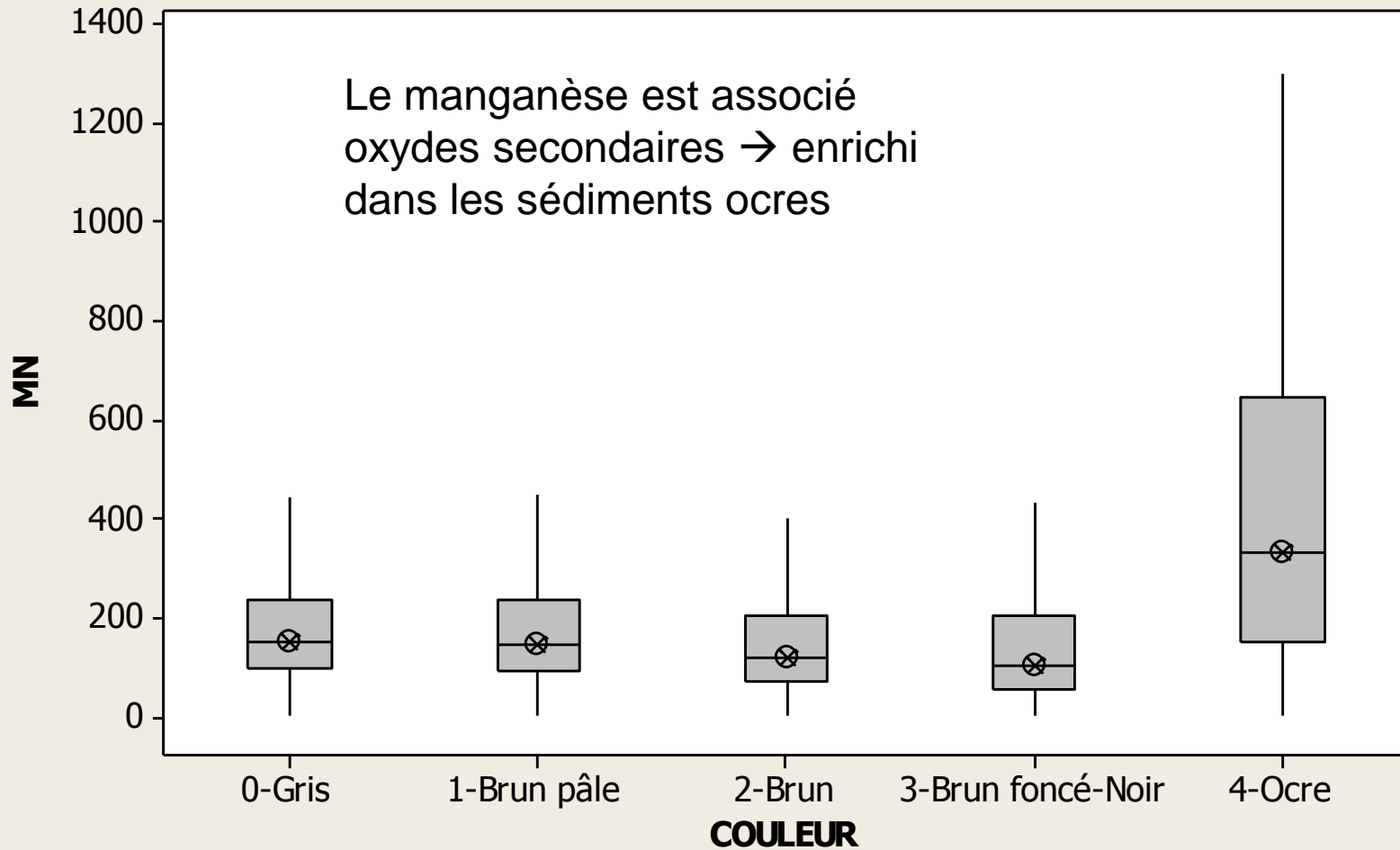


Organique

Oxydes
de Fer

Couleurs des échantillons et teneurs et métaux

Boîte à moustaches de MN



Inorganique



Organique

Oxydes
de Fer

Couleur des sédiments vs. teneurs en métaux

Minéral

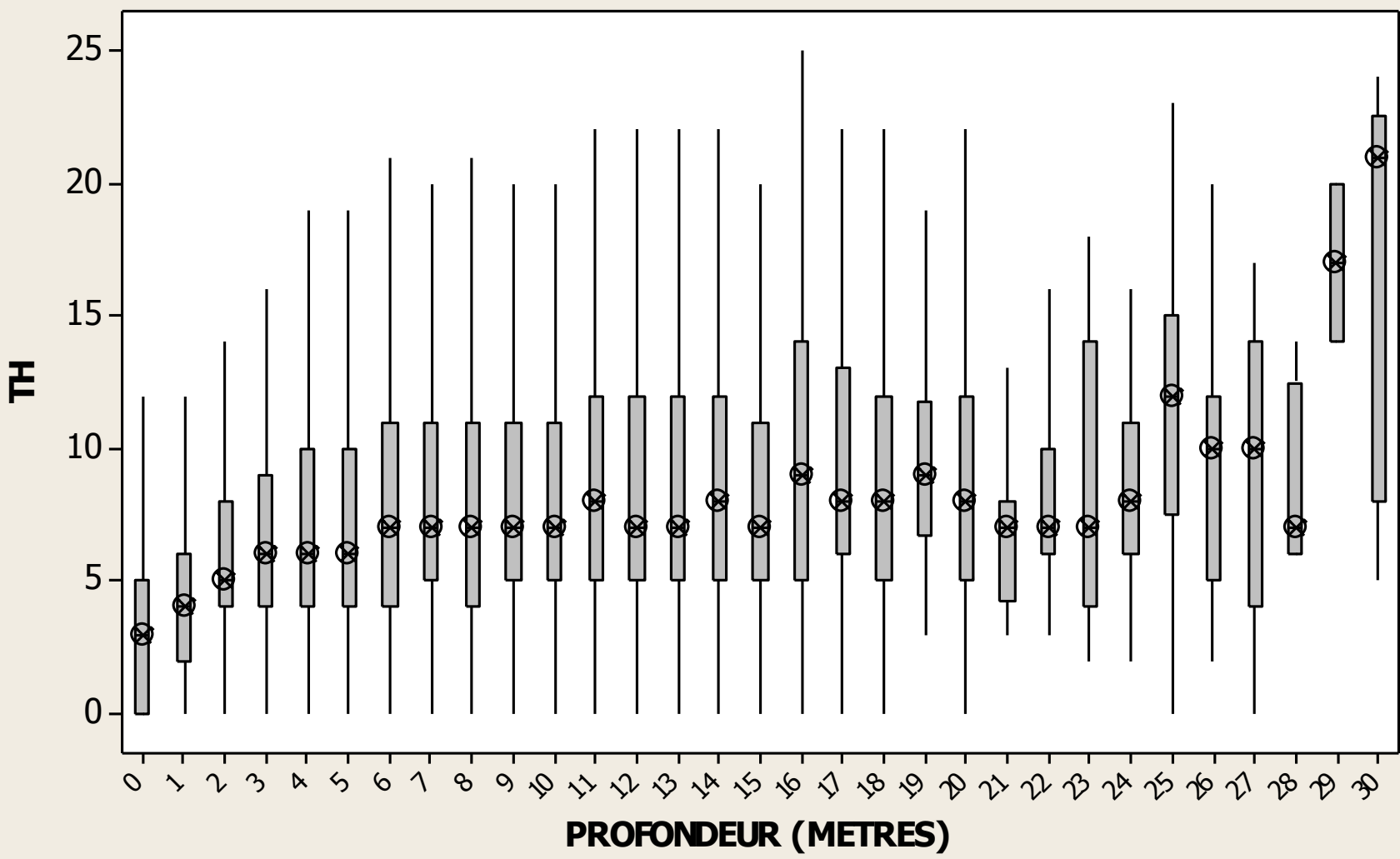
Couleur	Très enrichis	Enrichis	Appauvris	Très appauvris
Gris	K, Mg, Ba, Ti, Ni	Cr, Cu, Zn, Th, Mn, Al	Sr	Ca, PAF
Brun pâle			PAF	
Brun		PAF		
Brun foncé	PAF, Br, As	Fe	Al, Ba, Th, Cu, Cr	K, Mg, Ti, Ni
Ocre	Fe, Mn, Al, Co, P	Zn, Cu, Ti, K	Sr	PAF, Ca



Organique

Profondeur du lac et teneurs et métaux

Boîte à moustaches de TH

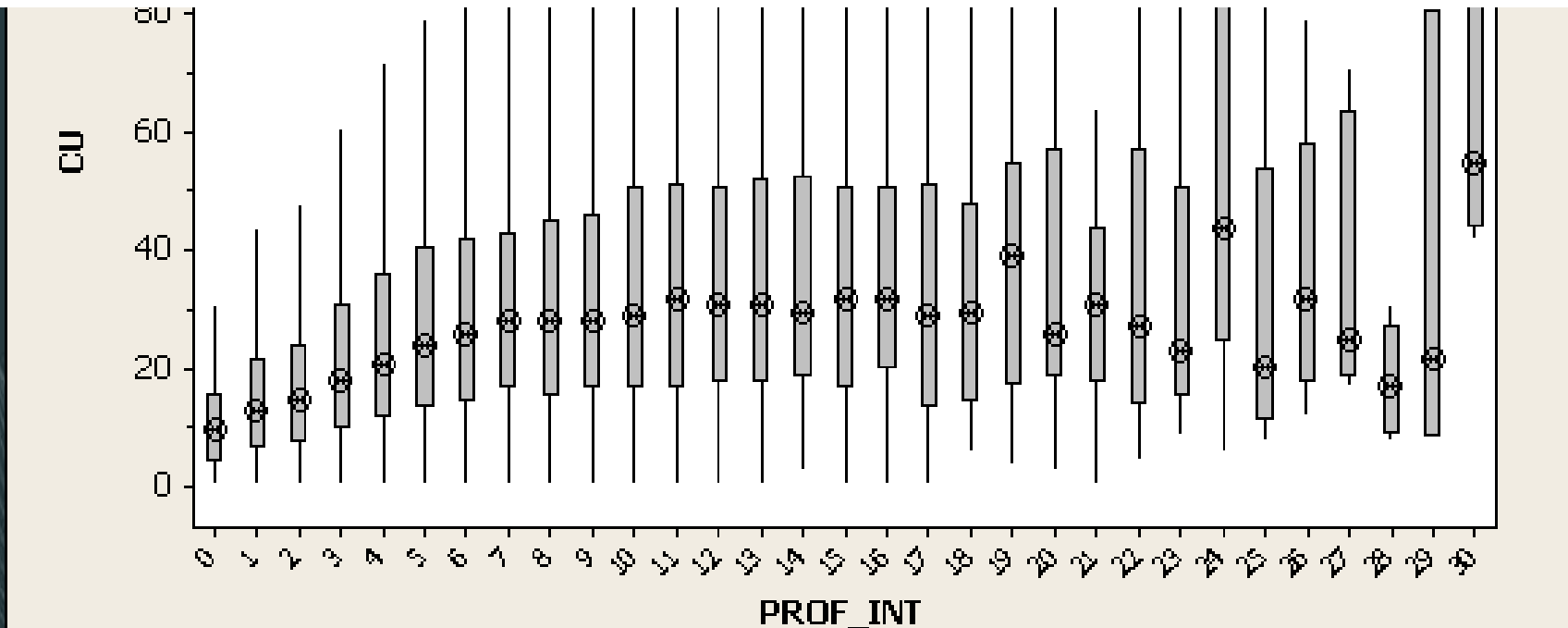


Profondeur du lac et teneurs et métaux

Teneur dans la plupart des éléments plus élevées dans les lacs plus profonds!!!!
Relation non-linéaire.. Augmente généralement de 0 à 6 m, stable ensuite

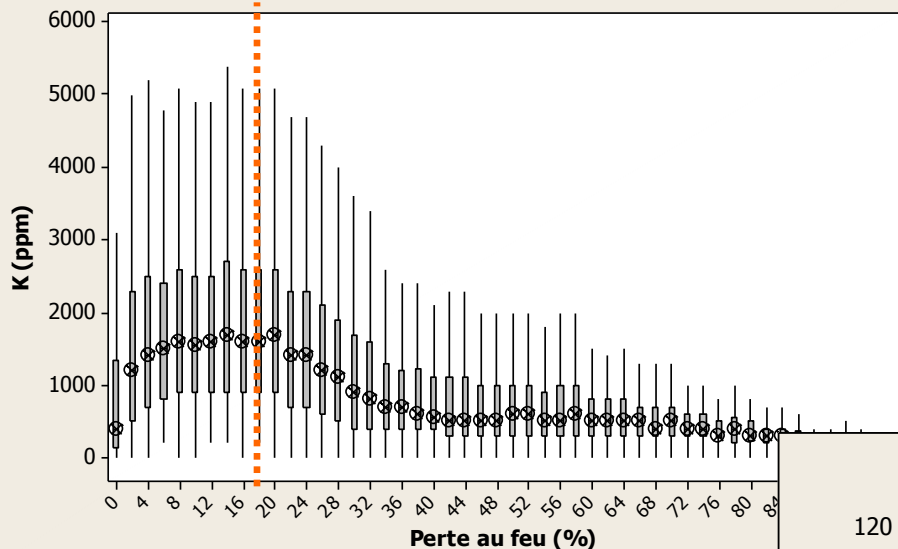
Hypothèse: les sédiments des lacs + profonds sont plus fins... contiennent plus d'argiles ou d'oxydes amorphes (l'eau du fond est plus calme car moins affectée par les vagues causées par le vent). Les argiles ou oxydes amorphes adsorbent les éléments chimiques en solution et les fixent dans le sédiment

C'est probablement un effet de granulométrie-minéralogie du sédiment

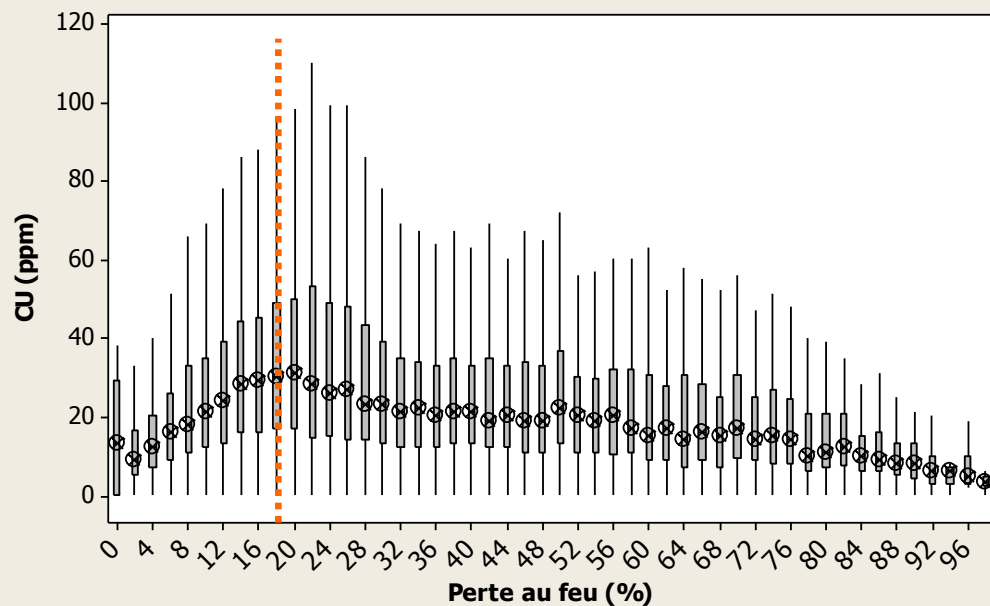


Perte au feu et teneurs en métaux

Boîte à moustaches de K

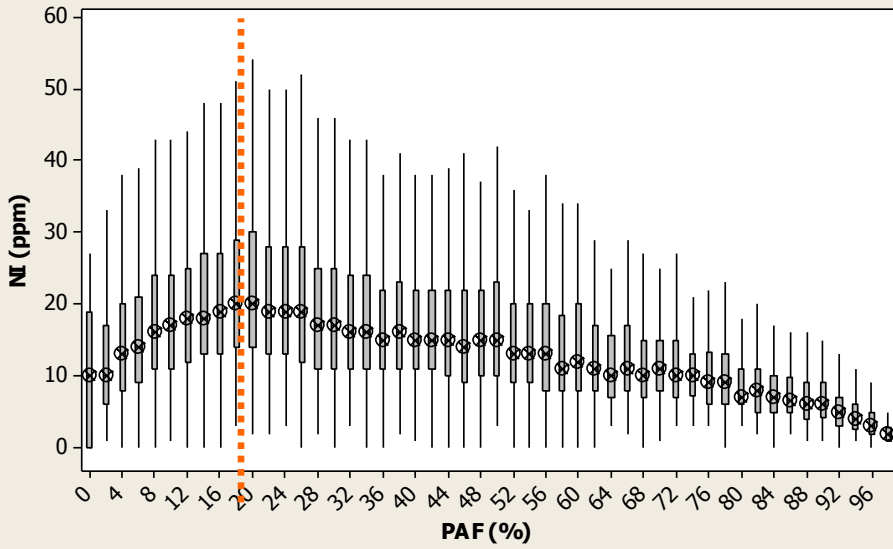


Boîte à moustaches de CU



Perte au feu et teneurs en métaux

Boîte à moustaches de NI



La valeur de 18-20% PAF est critique; relation positive entre beaucoup d'éléments vs PAF de 0-18%. Relation négative par la suite. Même observation par Makinen et Pajunen (2005) en Finlande (9% C) et Garrett et Hornbrook (1976)

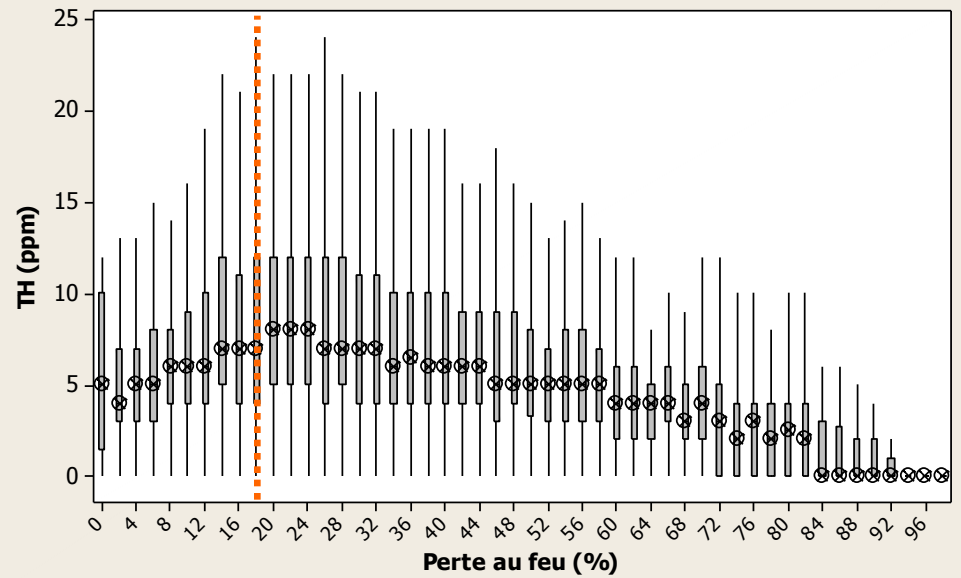
Hypothèse de Makinen et Pajunen (2005): une valeur de 9% C (20% PAF) marque la transition entre un environnement oxydé et réduit.

<20% PAF: oxydé, permet la précipitation d'oxydes de Fe-Mn

>20%: réduit, les inhibe.

Mais n'explique pas l'augmentation des teneurs entre 0 et 20% PAF

Boîte à moustaches de TH



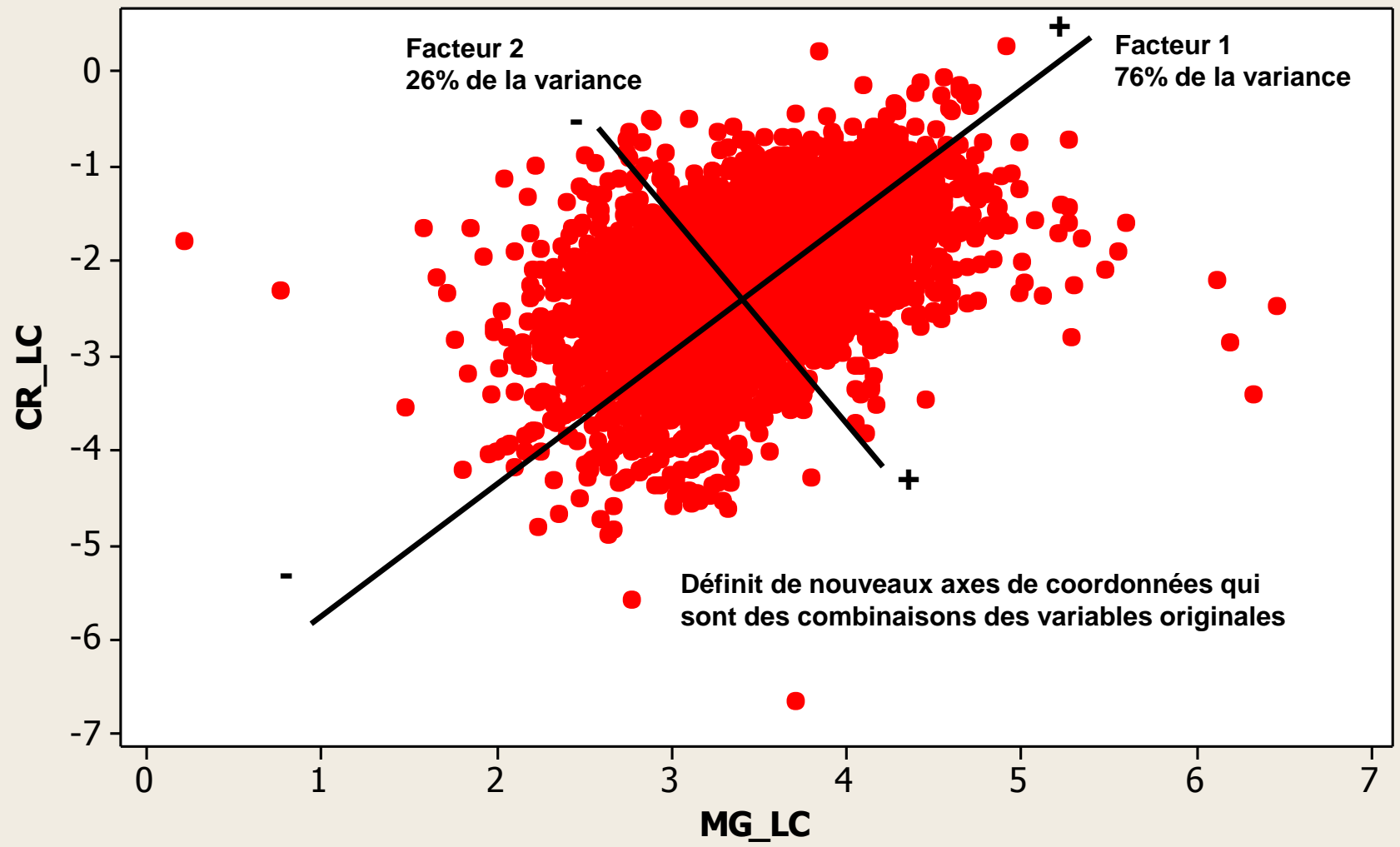
1. « Box-plots » et graphiques X-Y
2. Analyse factorielle
3. Analyse par grappes
4. Variogrammes
5. Conclusions

Analyse factorielle

- Les facteurs de l'analyse factorielle peuvent être interprétés comme des processus géologiques changeant la composition des sédiments
- Cette interprétation se base sur:
 - L'examen des éléments corrélés positivement vs ceux corrélés négativement,
 - les autres variables (géologie, lithologie, couleur)
 - la mise en carte des facteurs

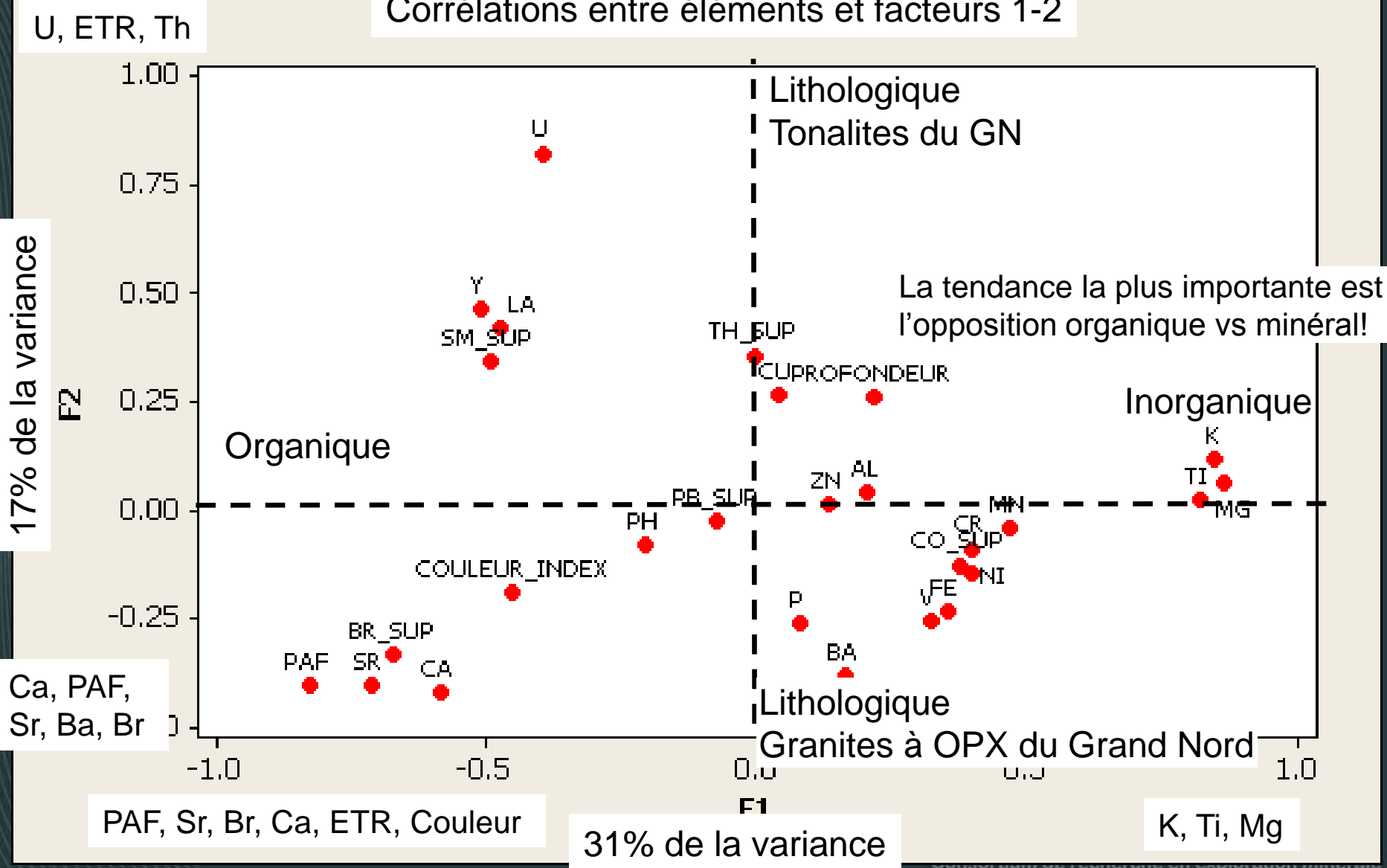
Analyse factorielle

Nuage de points de CR_LC et MG_LC

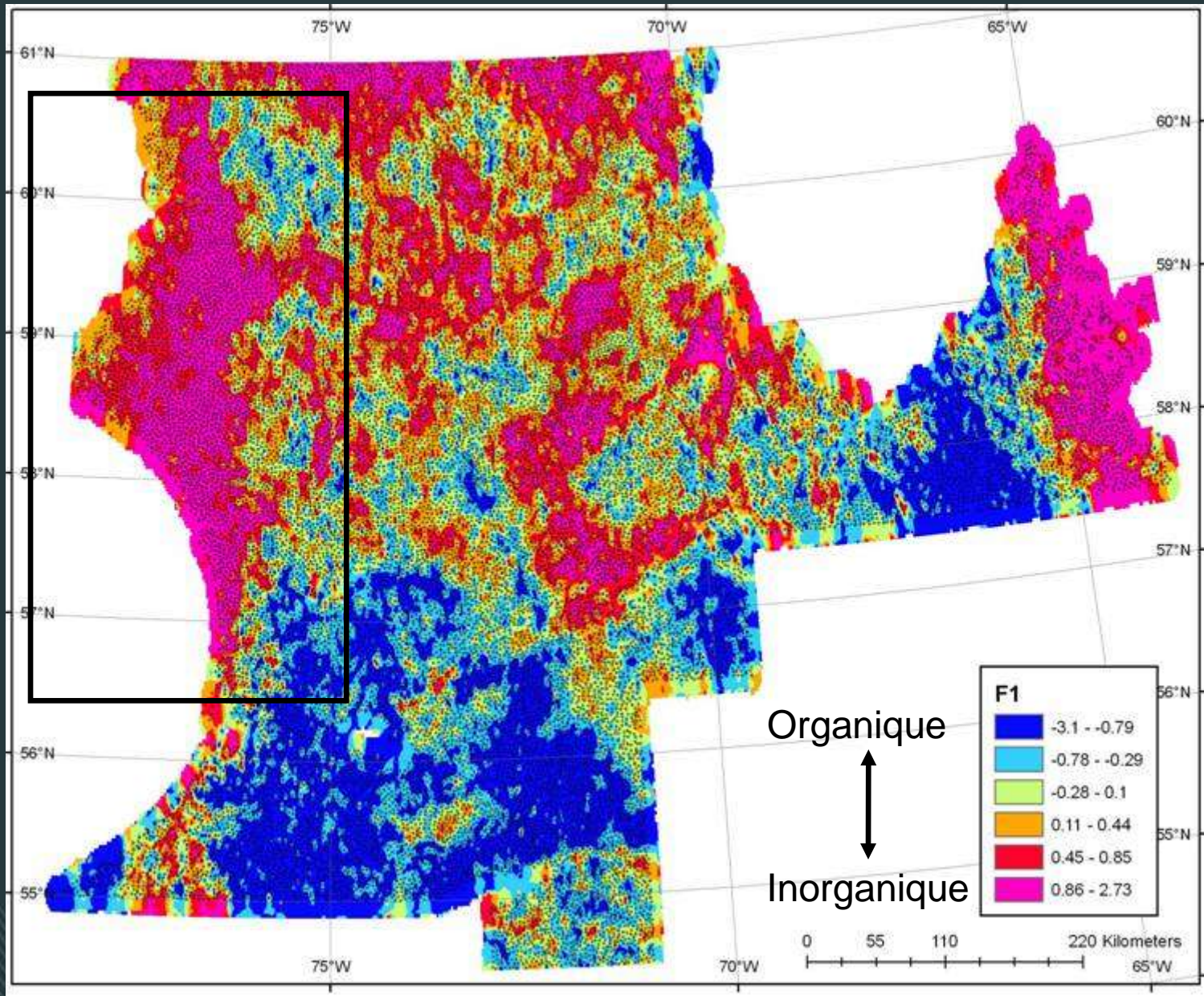


Analyse factorielle

Corrélations entre éléments et facteurs 1-2

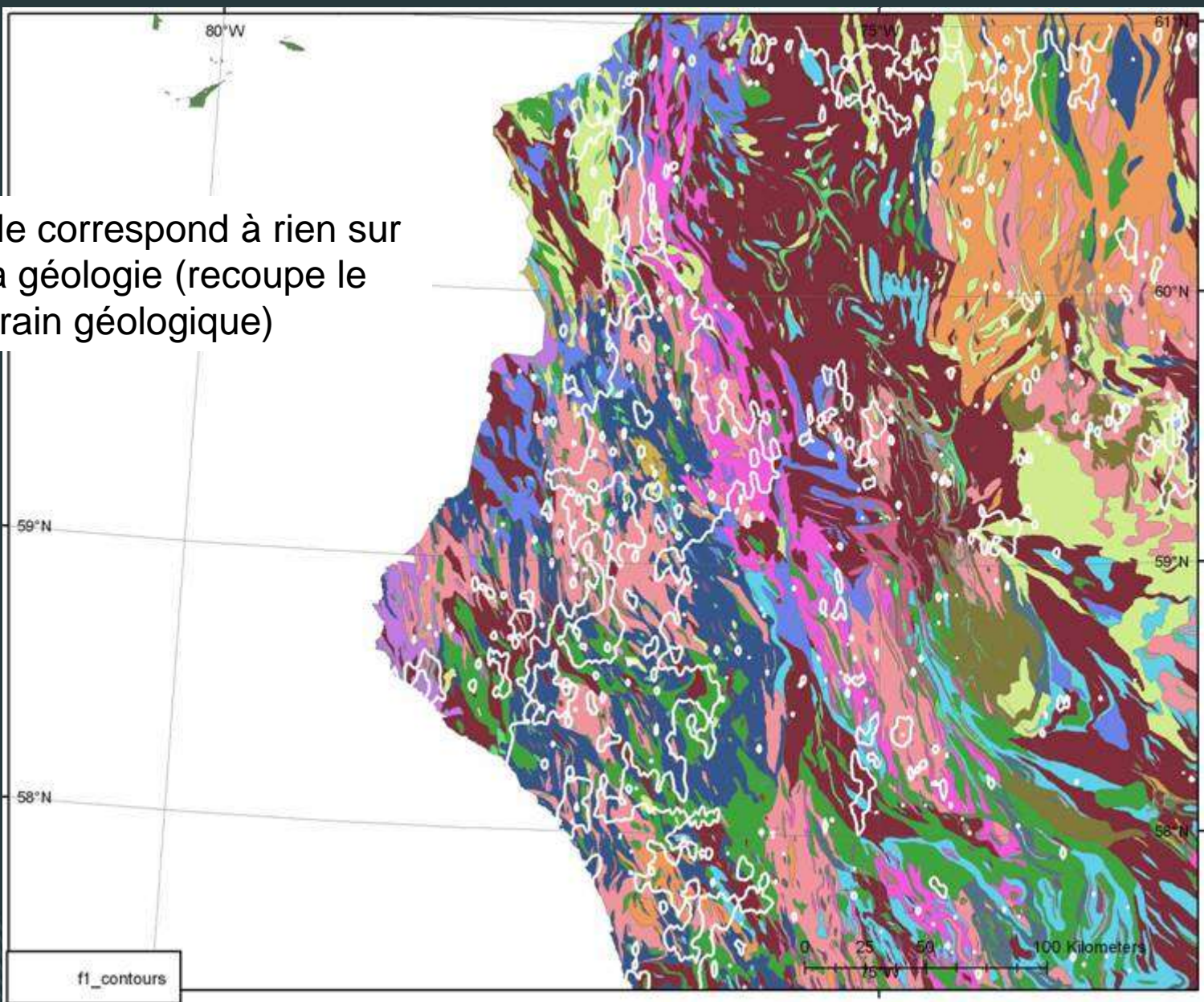


F1

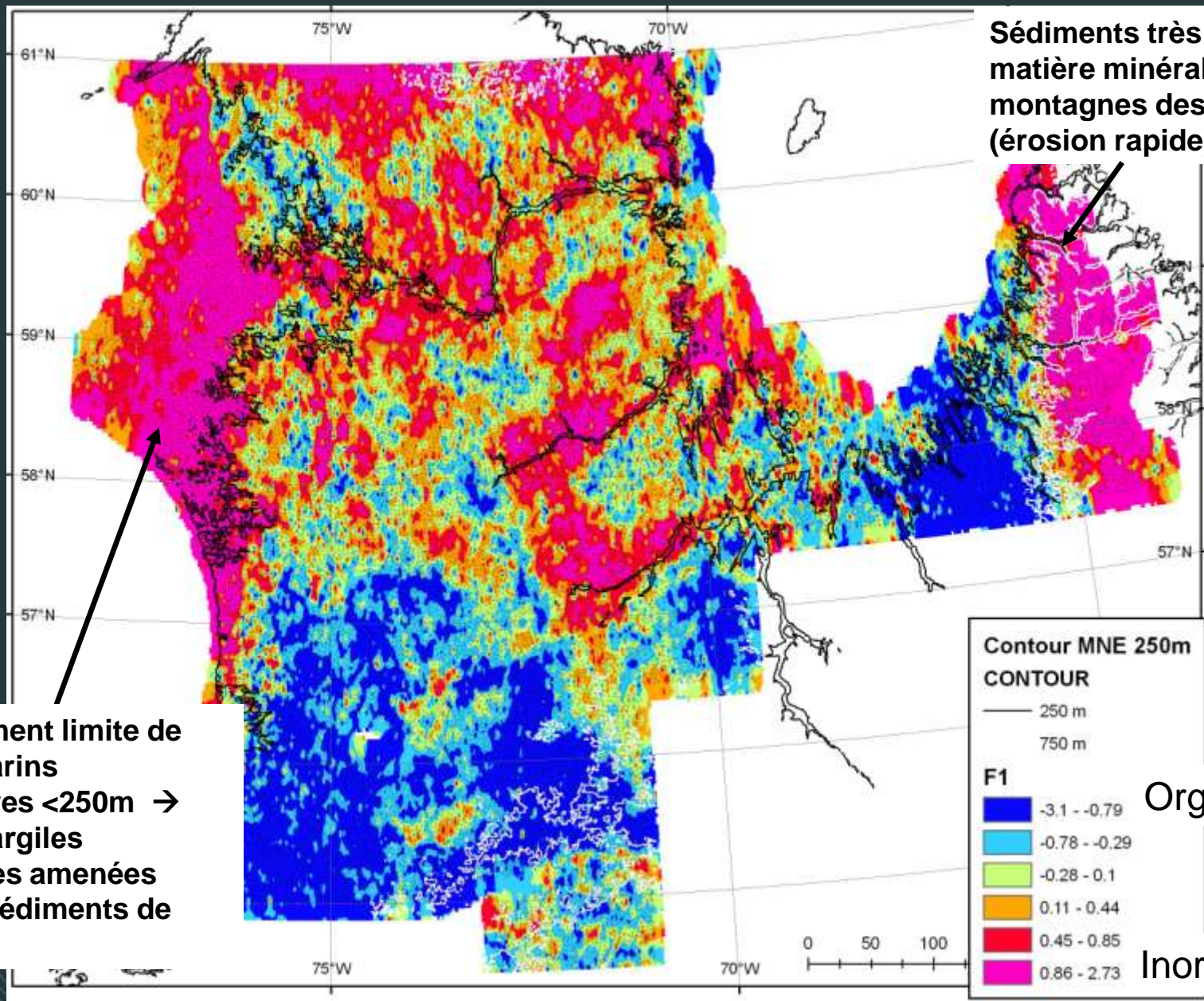


F1

Ne correspond à rien sur la géologie (recoupe le grain géologique)



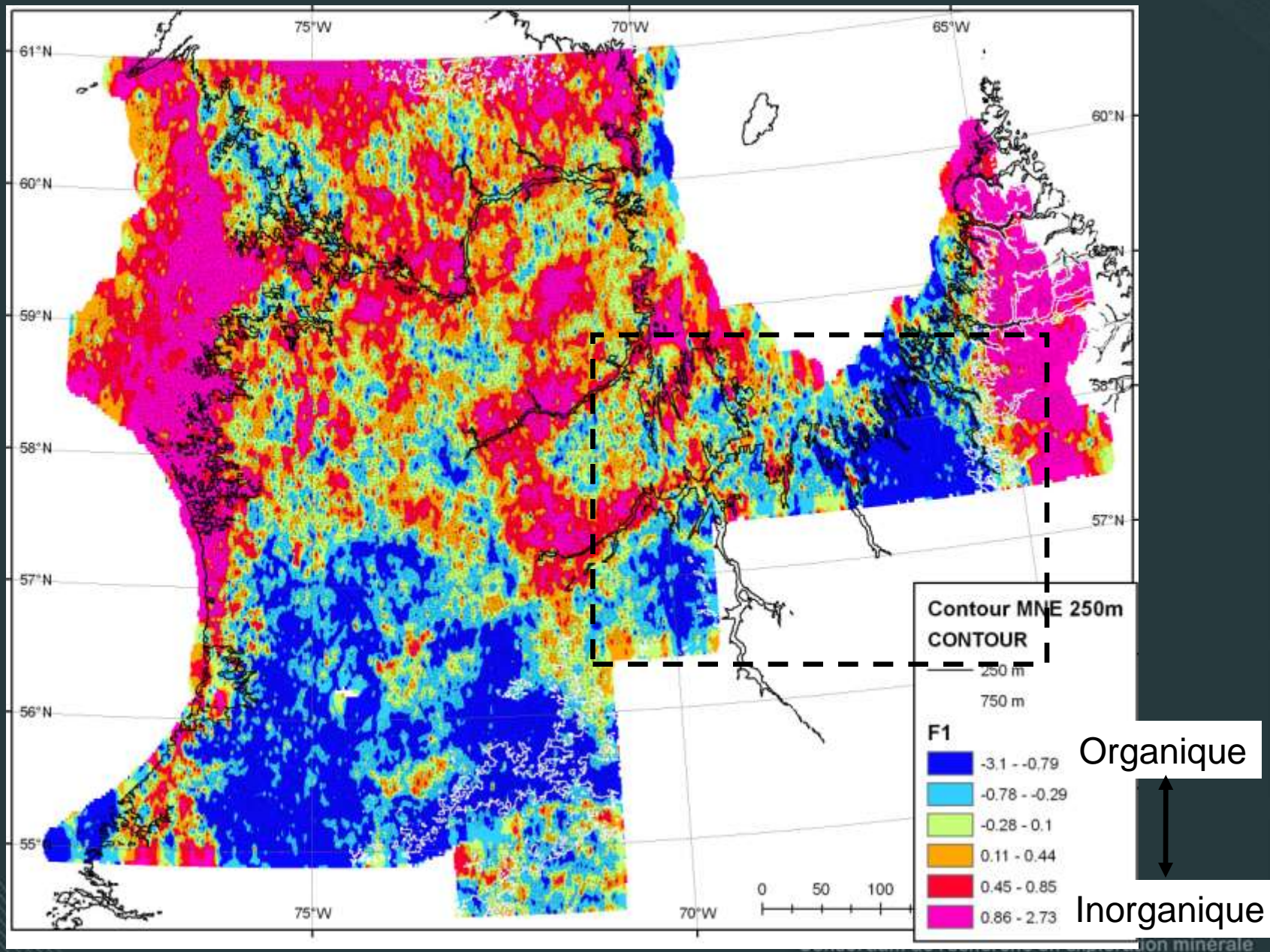
F1 et contours 250m et 750m altitude



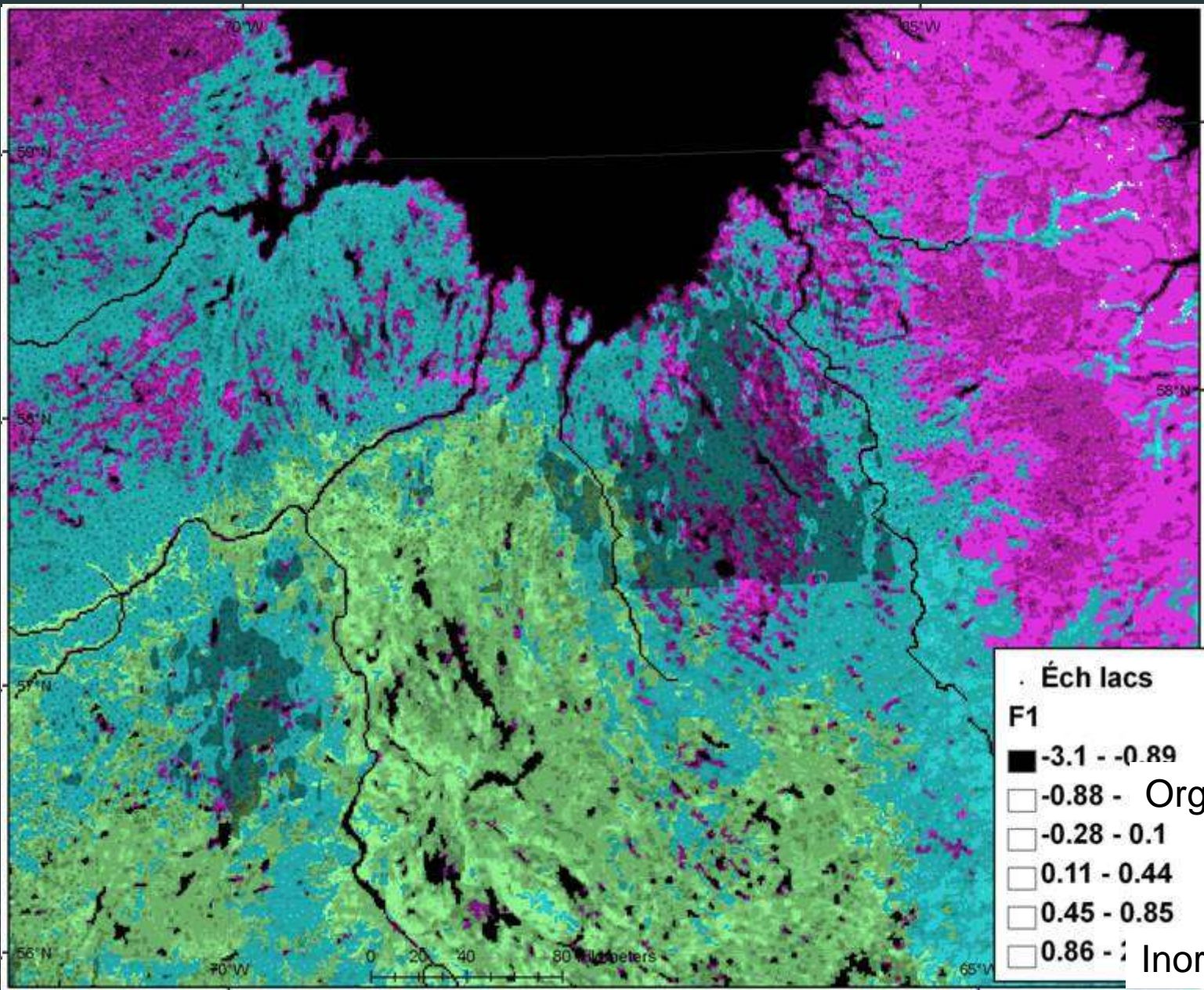
Probablement limite de dépôts marins quaternaires <250m → source d'argiles abondantes amenées dans les sédiments de lacs

Organique
↕
Inorganique

F1 et contours 250m et 750m altitude



F1 et végétation



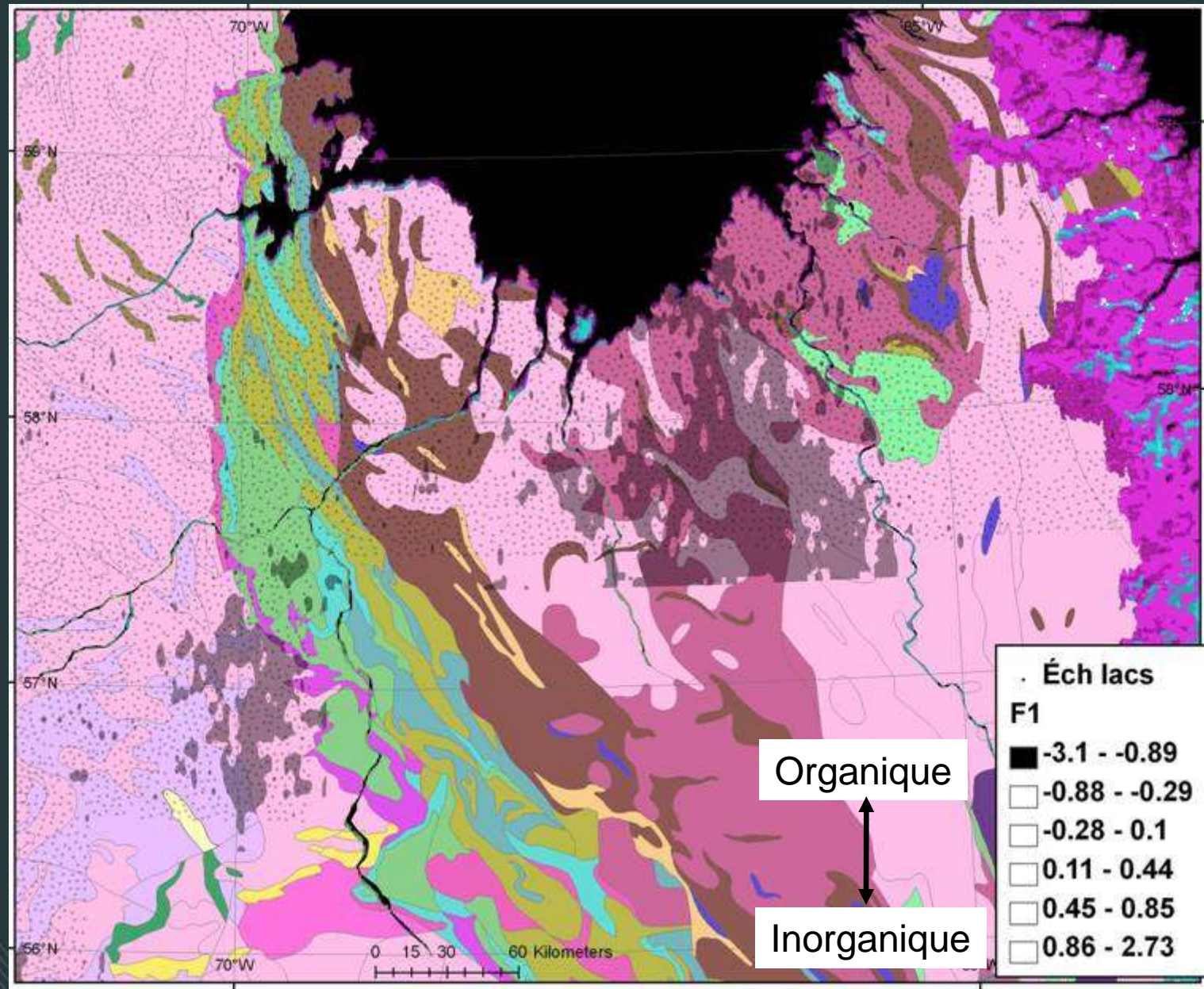
· Éch lacs
 F1

■	-3.1 - -0.89
□	-0.88 - 0.11
□	0.11 - 0.44
□	0.45 - 0.85
□	0.86 - 1.00

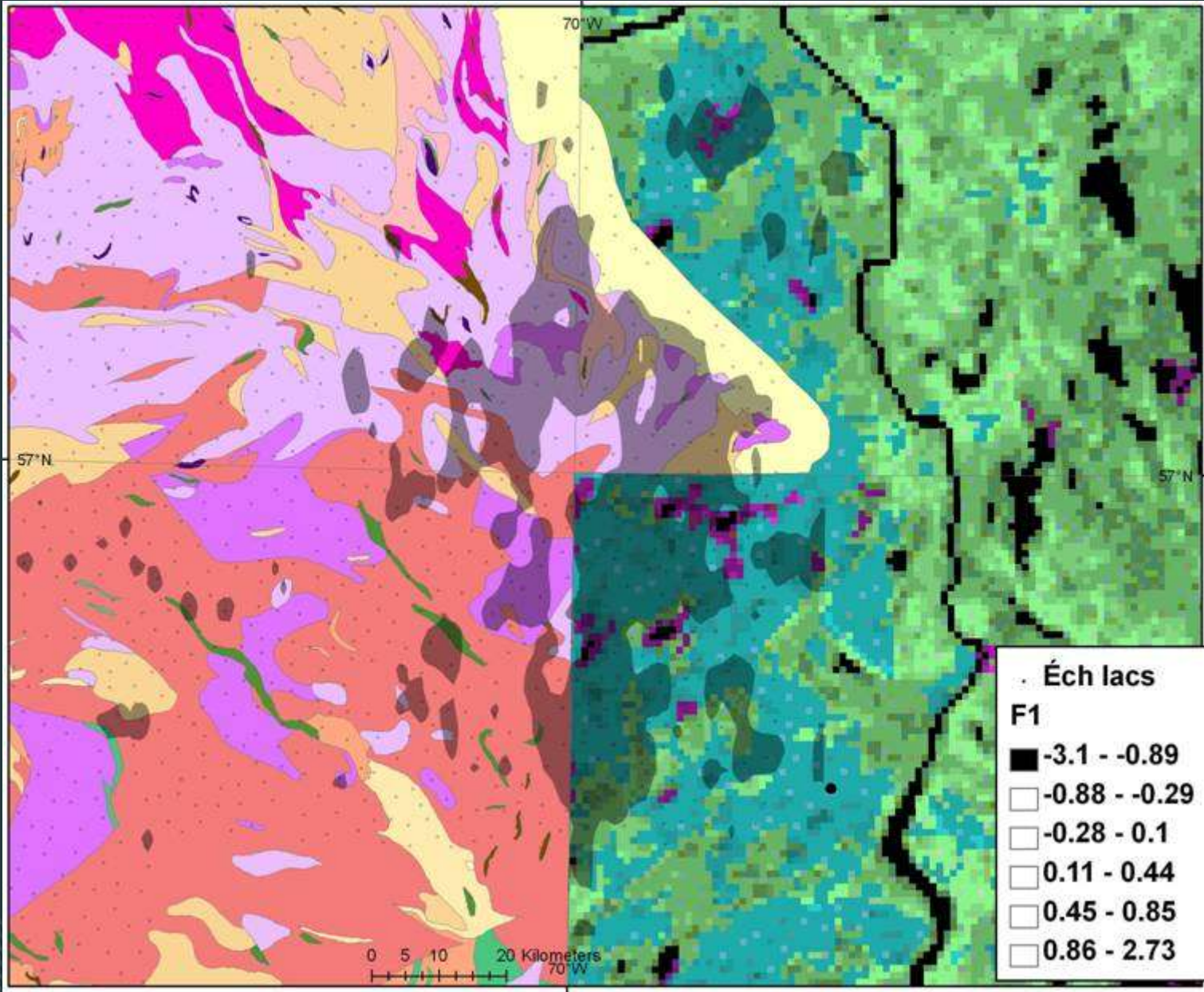
Organique
 ↑↓
 Inorganique

ion minérale

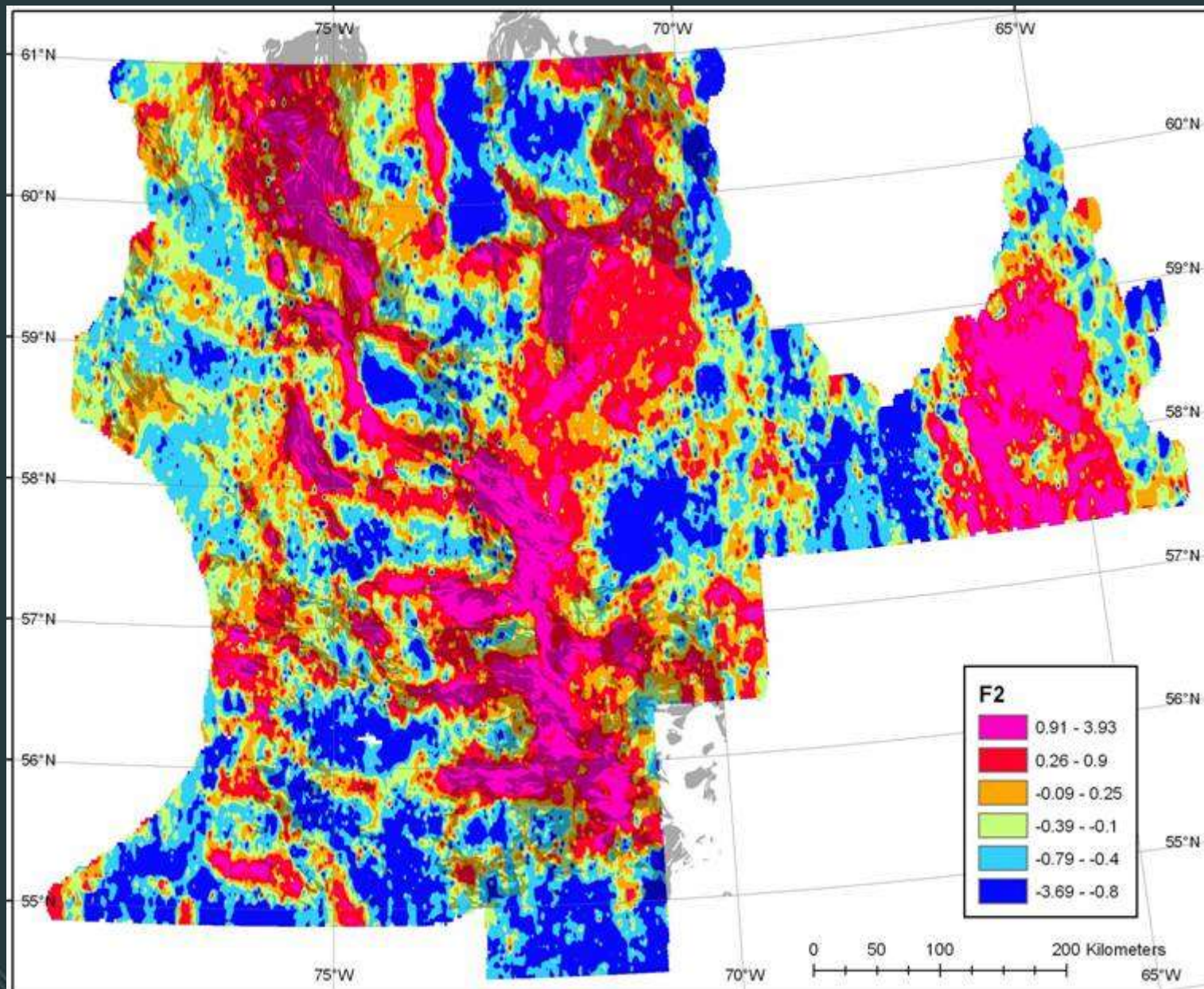
F1 et géologie



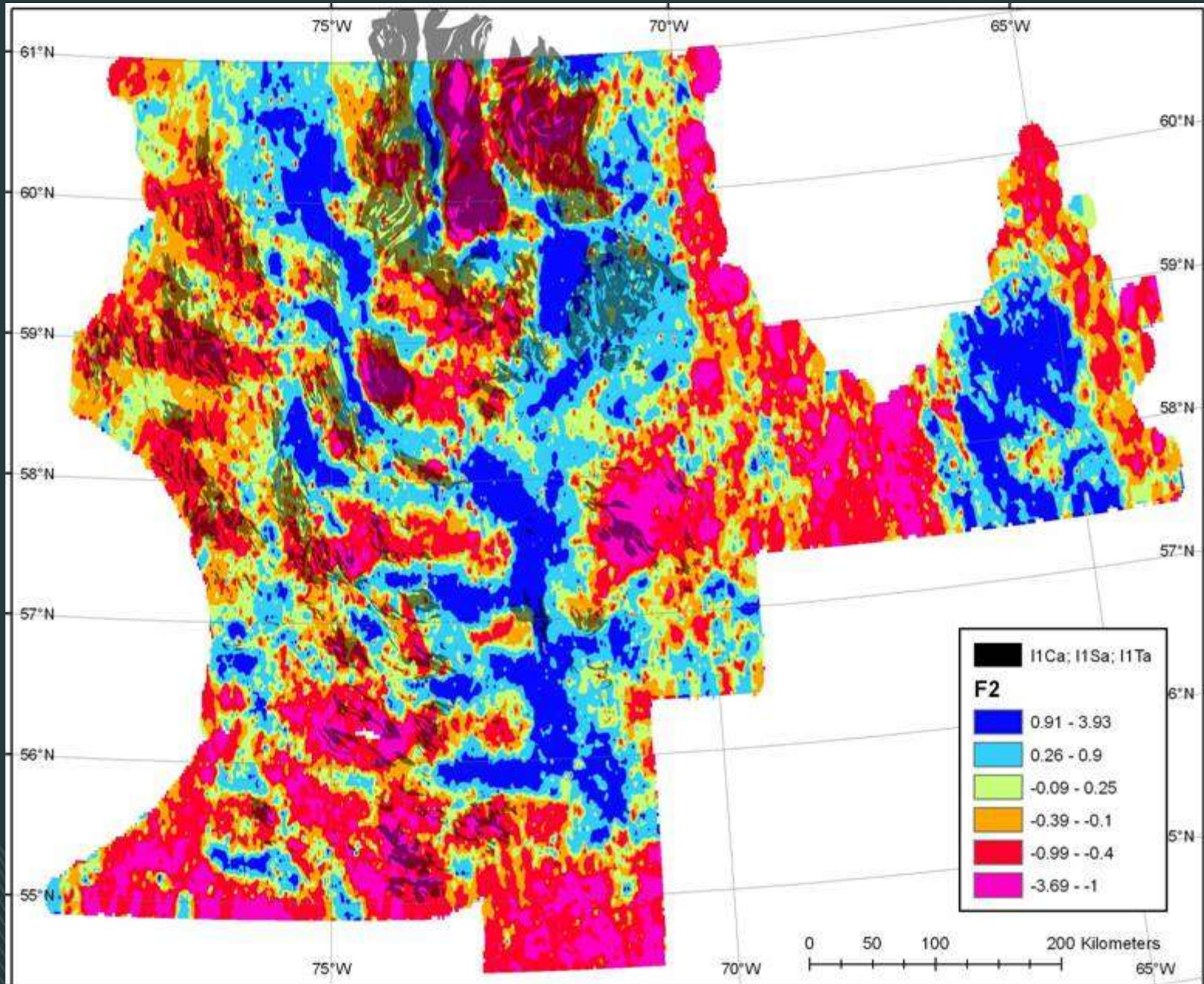
F1 et carte géologique



F2 et tonalites-trondhjemites Archéen Supérieur

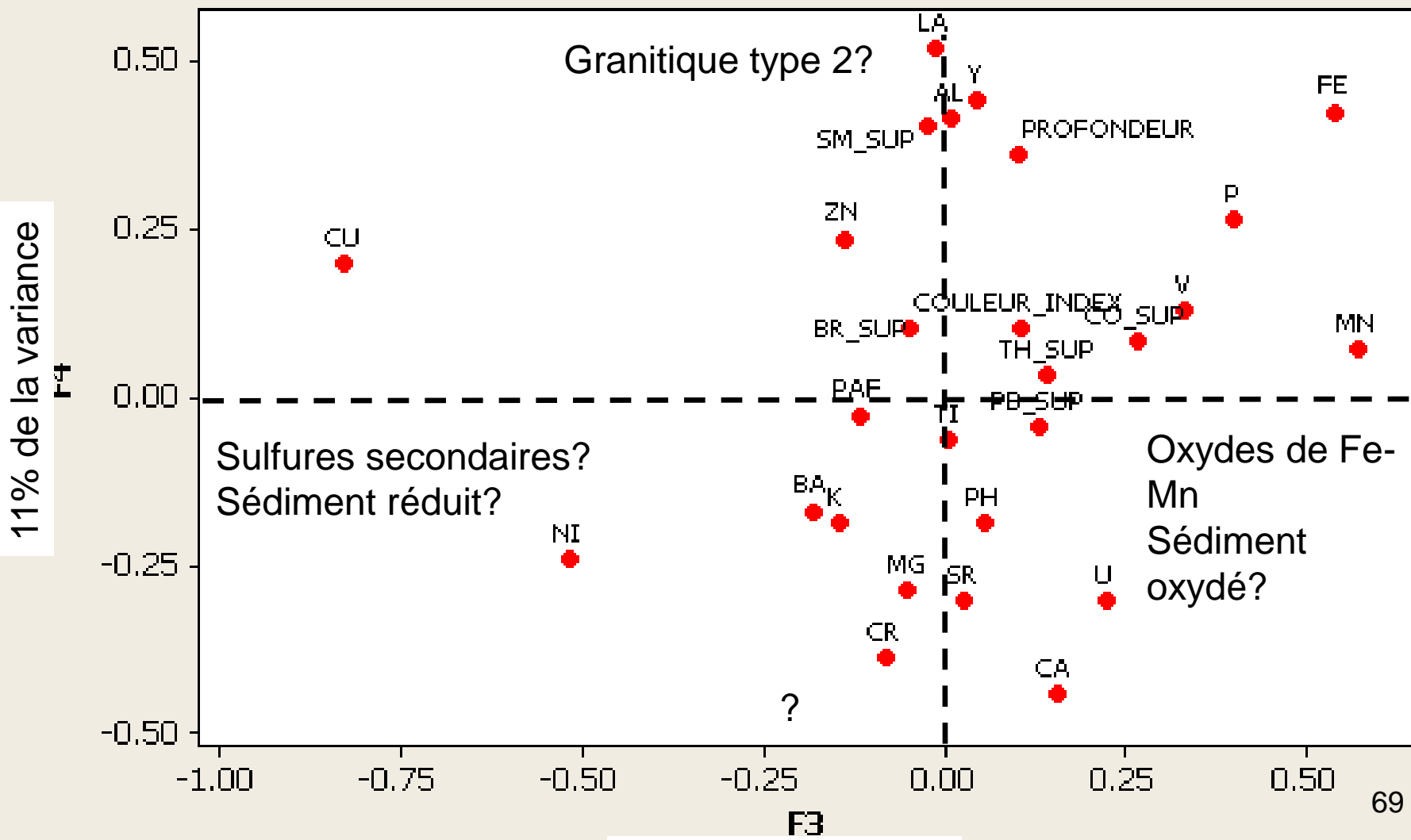


F2 et granitoides à opx Archéen Supérieur



Analyse factorielle

Corrélations entre éléments et facteurs 3-4



Analyse factorielle

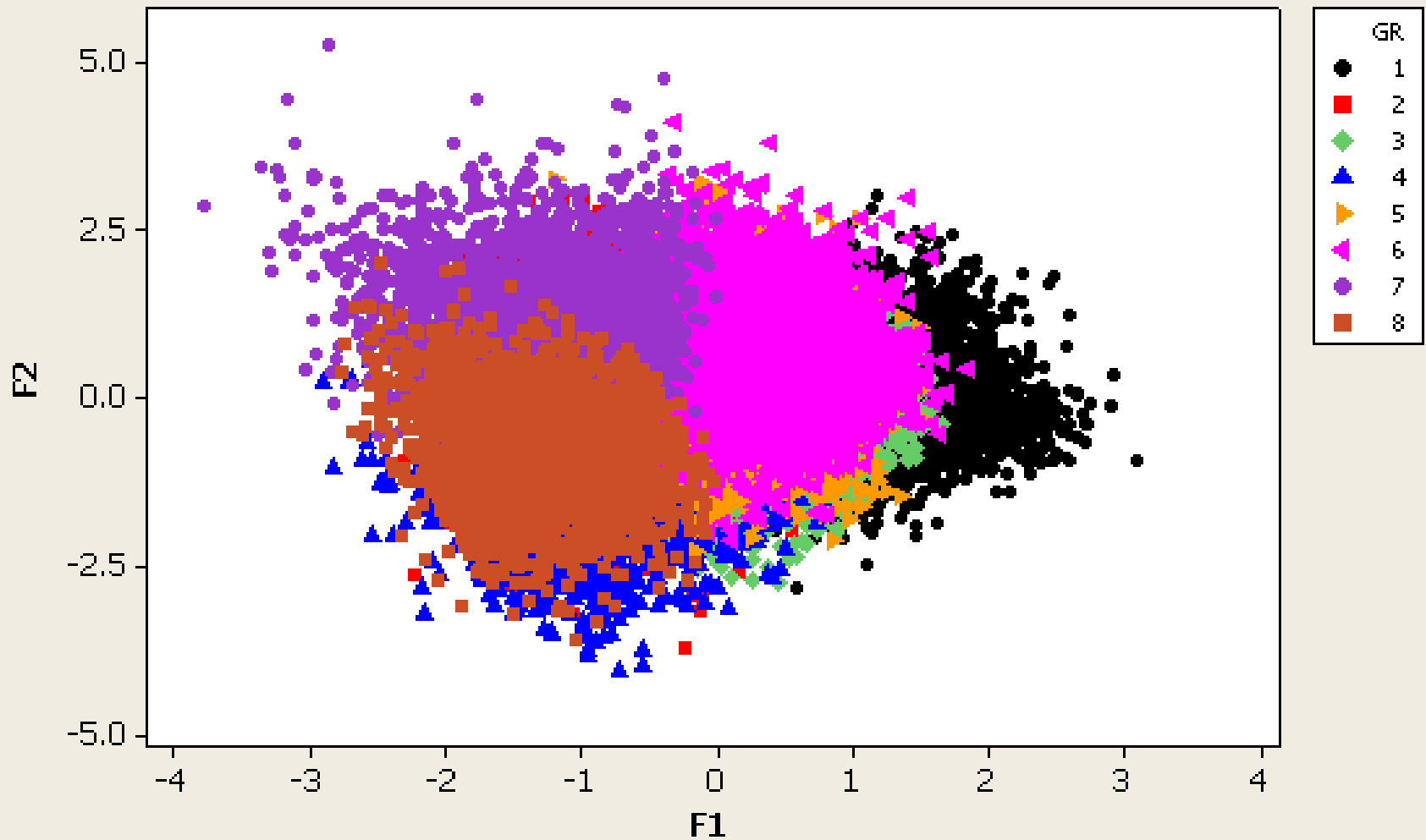
- Certains facteurs sont reliés aux lithologies, d'autres aux conditions ou dépôts de surface
- Dans le Grand Nord, les facteur 1 (organique vs inorganique) et 3 (oxydes de Fe-Mn secondaires) sont reliés à l'environnement secondaire (45% de la variance ensemble)
- Les facteurs 2 et 4 semblent lithologiques (28% de la variance)
- Pour interpréter les grandes tendances géochimiques, il faut utiliser toute l'information disponible et faire preuve d'imagination.

Étude des données de lacs du Grand Nord

1. « Box-plots » et graphiques X-Y
2. Analyse factorielle
3. Analyse par grappes
4. Variogrammes
5. Conclusions

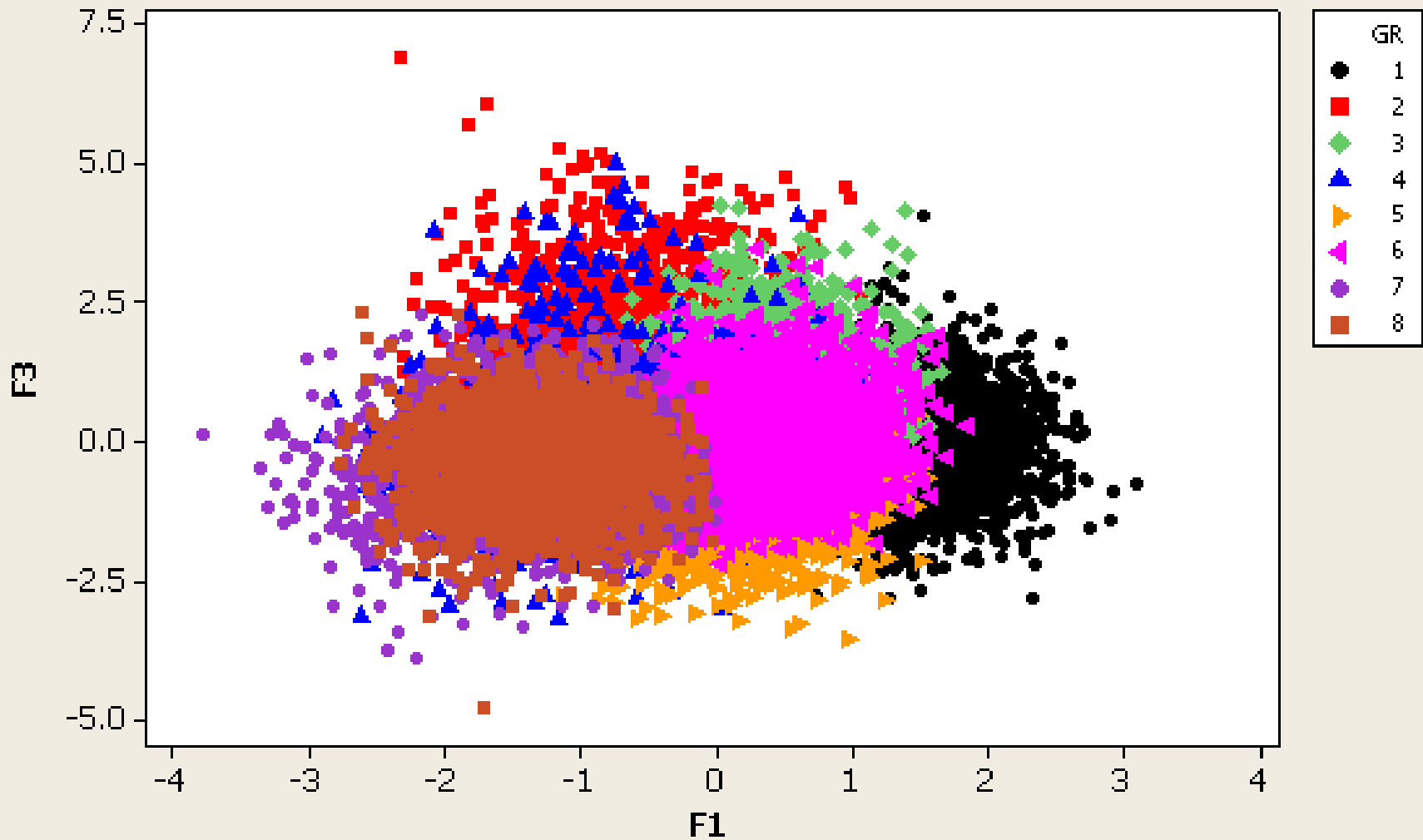
Groupes de l'analyse par grappe vs analyse factorielle

Nuage de points de F2 et F1

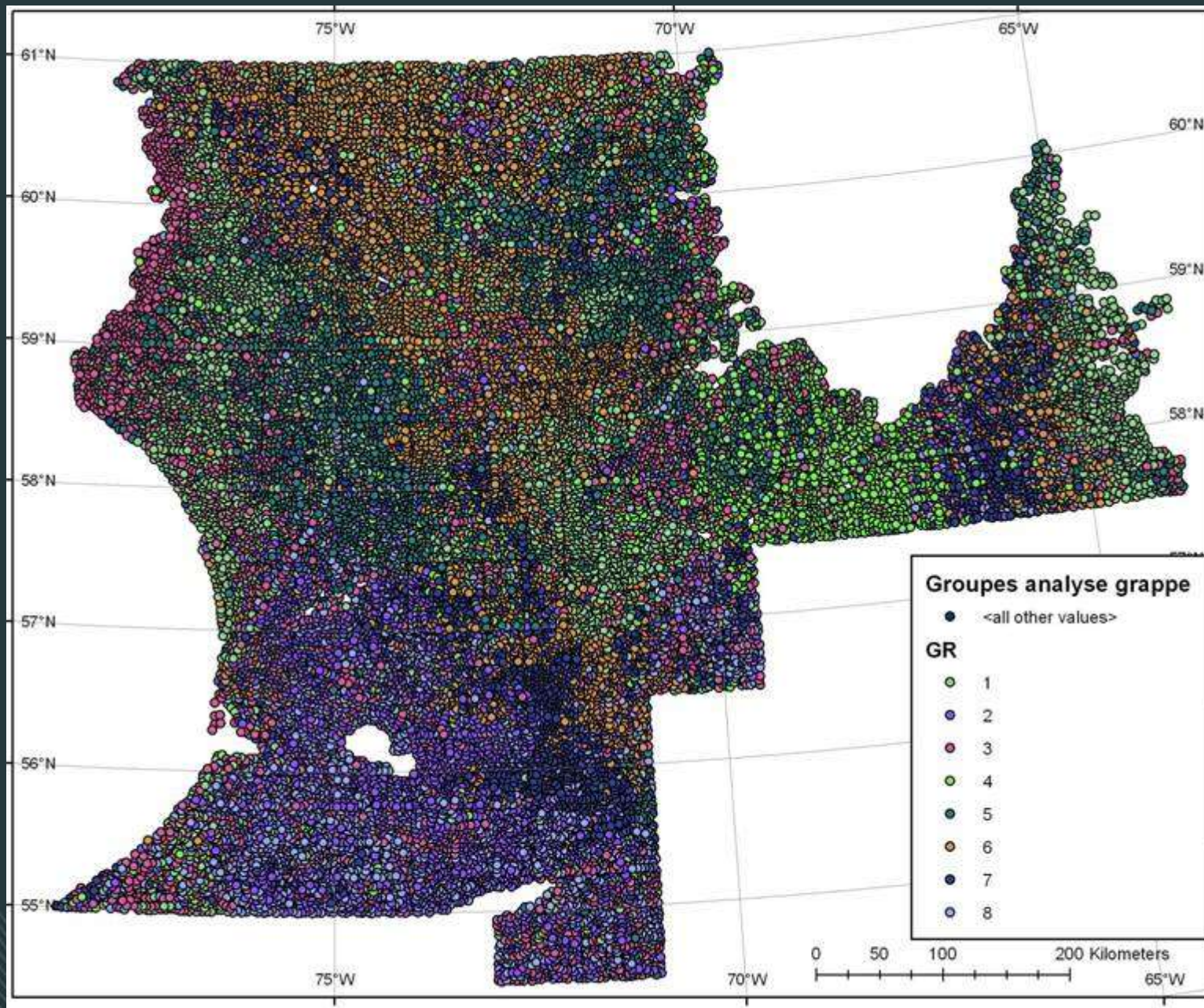


Groupes de l'analyse par grappe vs analyse factorielle

Nuage de points de F3 et F1

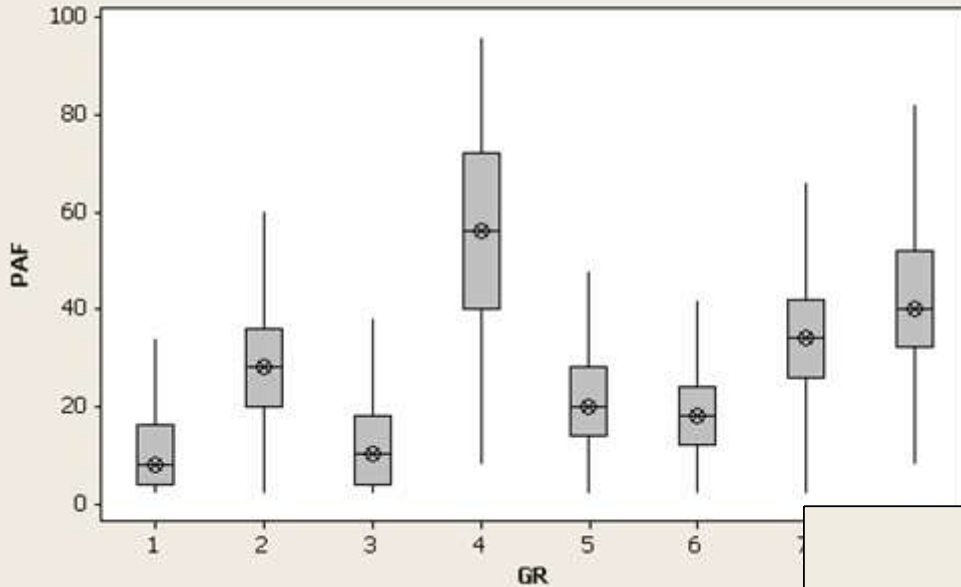


Groupes de l'analyse par grappe



Groupes de l'analyse par grappe

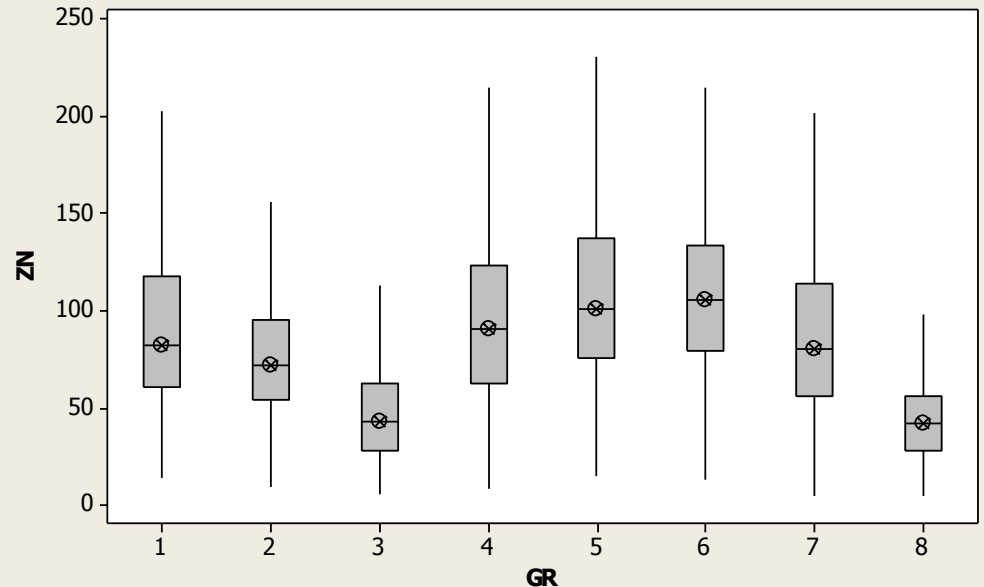
Boîte à moustaches de PAF



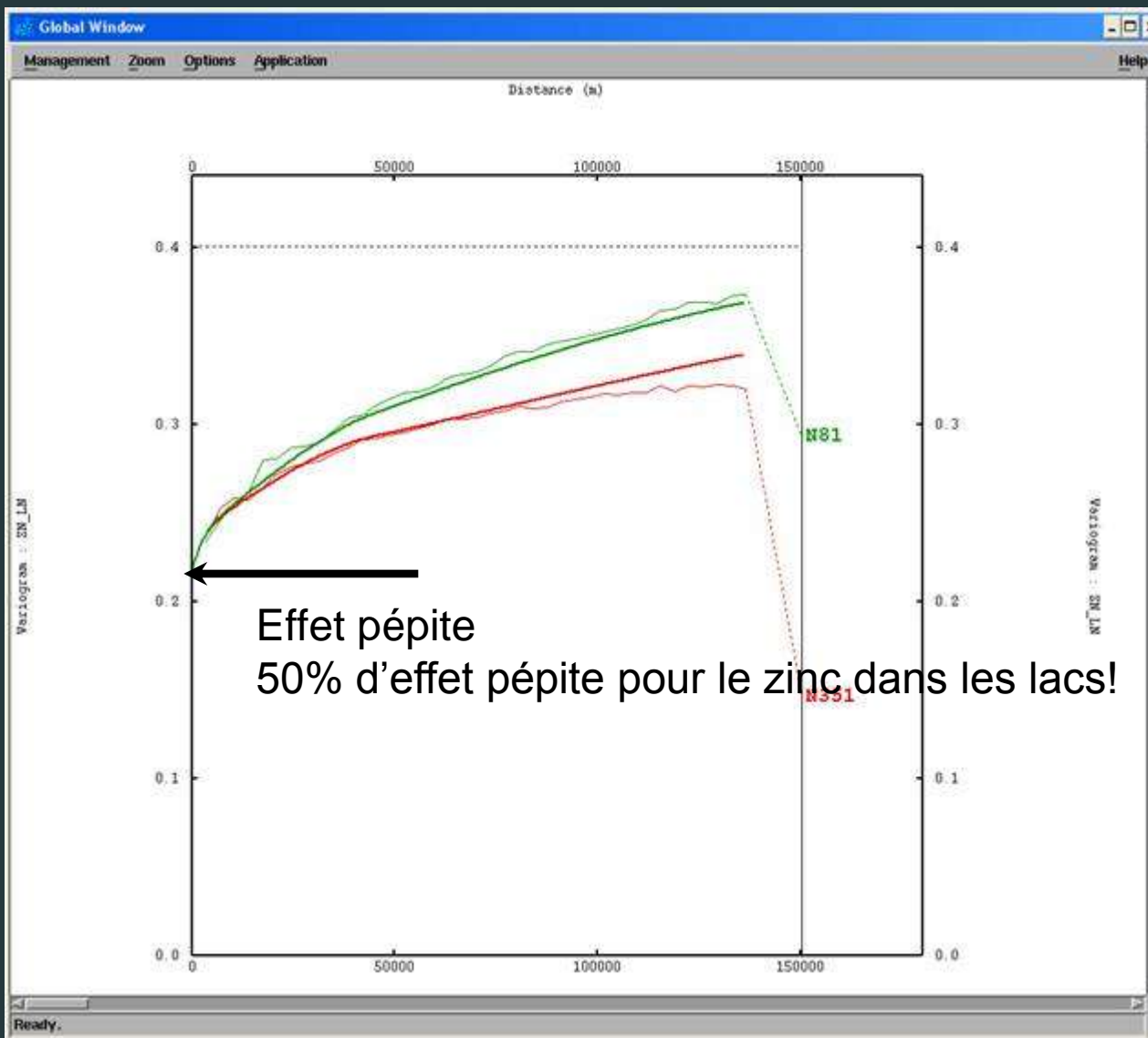
On peut identifier les groupes
Ex: Gr4 : Ultra-organique, etc

**Peut servir à fixer des seuils
spécifiques aux groupes par la
suite par statistiques de base**

Boîte à moustaches de ZN



Variogrammes imbriqués : Zn (levé 1997520)



Conclusions – lacs du Grand Nord

- Les différents aspects de l'étude statistique montrent que les valeurs « normales » en métaux dans les sédiments de lacs varient en fonction de
 - % de mat organique dans les sédiments (ex: relations PAF vs métaux, couleur vs. métaux) ou d'oxydes de fer-manganèse
 - Types de dépôts de surface (ex: argiles marines ou roc)
 - Lithologie du socle
 - Etc
- Plusieurs de ces facteurs (ex: % organique, % argiles) peuvent varier d'un lac adjacent à l'autre, même dans un même lac, même au même site! (ex de la variation du % d'argiles et de Cu dans une carotte de sédiment)
- Les compositions des sédiments de lacs et donc les teneurs en métaux sont donc le résultat de l'interaction de plusieurs facteurs géologiques et environnementaux

Géochimie des sédiments de lacs en exploration

1. Méthodes statistiques et géostatistiques d'étude des données de géochimie de l'environnement secondaire
2. Uniformisation des données régionales
3. Géochimie des sédiments de lacs en bref
4. Étude des données de sédiments de lacs du Grand Nord du Québec
5. Exemple d'une méthode avancée d'identification des anomalies géochimiques

Méthodes de délimitation d'anomalies géochimiques

- De nombreuses méthodes de délimitation d'anomalies géochimiques existent
 - Seuil unique déterminé par la valeur d'un certain centile (ex: 99e) sur les valeurs brutes
 - Seuil unique déterminé par la brisure dans une distribution normale
 - Etc.
- Certaines méthodes développées récemment sont de plus en plus raffinées
 - Approche multifractale (ex: Panahi et Cheng, 2004)
 - Contre-validation géostatistique et krigeage factoriel (ex: Jimenez-Espinosa et Chica-Olmo, 1999)
 - Filtrage du bruit de fond par analyse en composantes principales (Bellehumeur et Jébrak, 1993)
 - Etc.

Un peu de philosophie....

- Mais pourquoi toutes ces méthodes de traitement?
- Sont-elles vraiment nécessaires? Et ne pourrait-on pas choisir la « meilleure » et laisser tomber les autres????
- Ces différentes méthodes utilisent des aspects spatiaux ou statistiques différents des données
- La meilleure méthode à utiliser **dépendra de ce que l'on cherche et de son contexte**
- Principe de la boîte à outils → une boîte à outils contient plusieurs outils, et chacun a son utilité selon ce qu'on veut faire. Un marteau de qualité même exceptionnelle ne peut remplacer une scie!!!

Méthodes de délimitation d'anomalies géochimiques

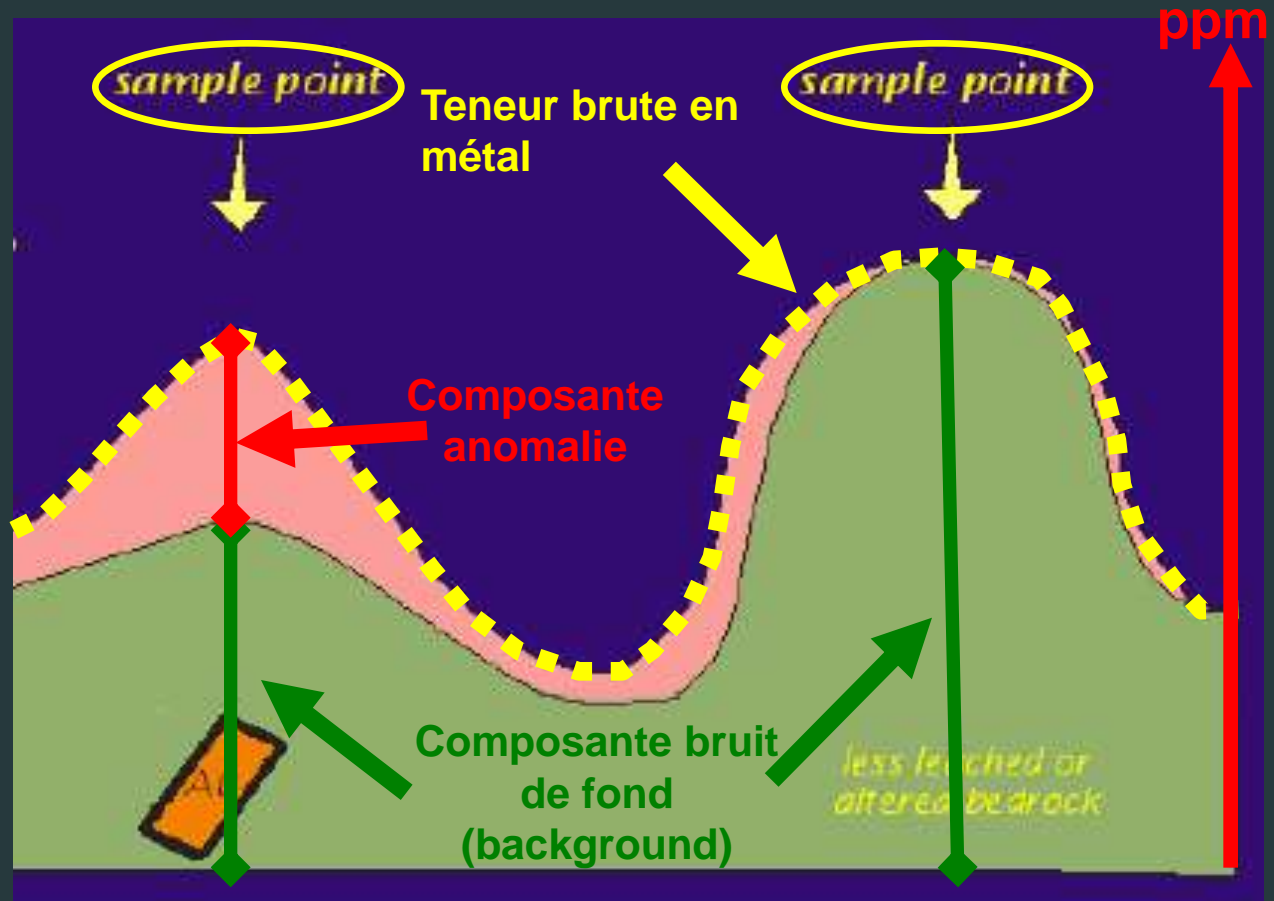
- Comment choisir une méthode? Aller vers
 - Une méthode simple (statistique et/ou monovariante) ?
 - Ou complexe (spatiale et/ou multivariante)?
- Réponse par l'utilisation du concept de ratio Signal des anomalies / Bruit de fond géochimique

Anomalies et bruit de fond géochimique

Chaque valeur brute de chaque échantillon est la somme de deux composantes variables:

Comment séparer les deux, i.e. rehausser le signal des anomalies? Nécessaire?

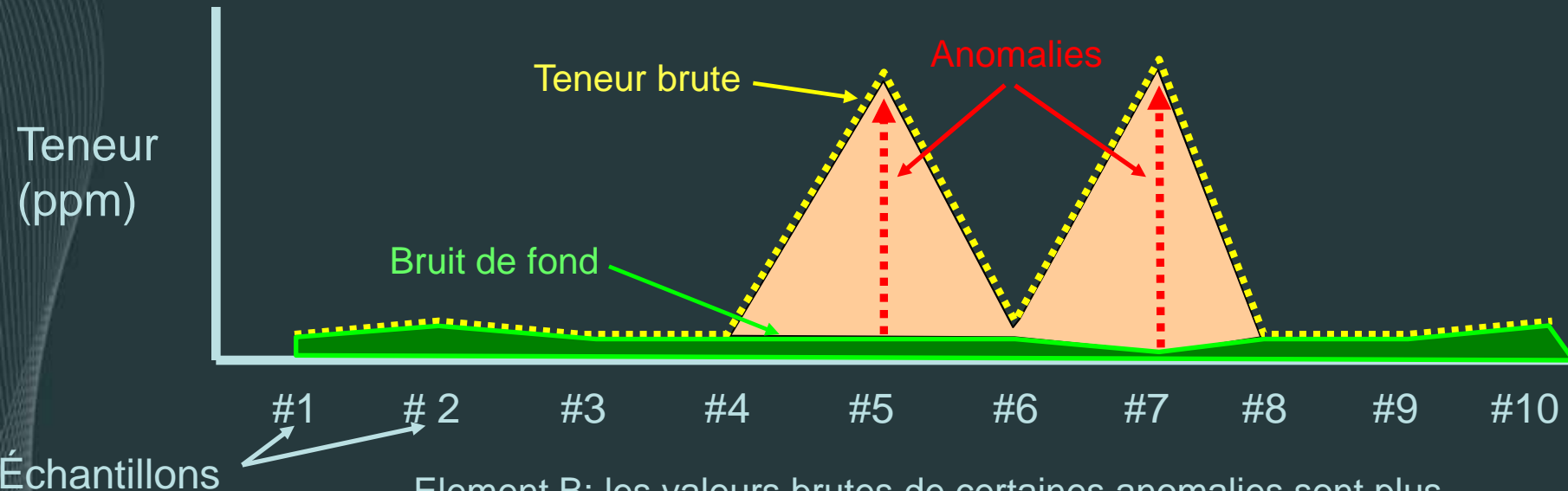
Ampleur de variation du bruit de fond vs. anomalies?
Rapport Signal / Bruit (télécomms)



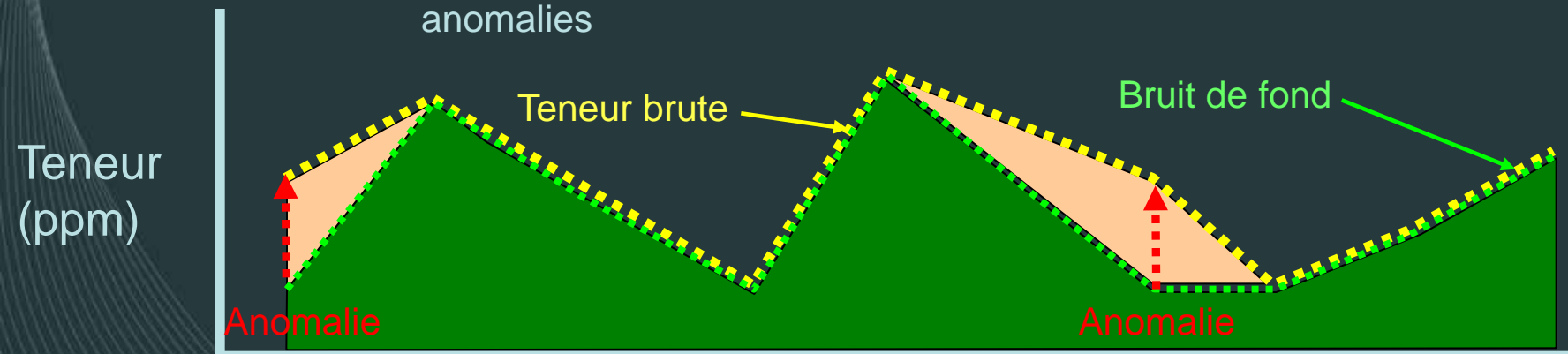
Ici, variations du bruit de fond peuvent masquer les anomalies

Ratio Signal sur Bruit – Exemple théorique pour deux éléments

Element A: les anomalies se démarquent clairement du bruit de fond. Pas de rehaussement de signal à faire



Element B: les valeurs brutes de certaines anomalies sont plus faibles que les variations du bruit de fond. Rehausser le signal des anomalies



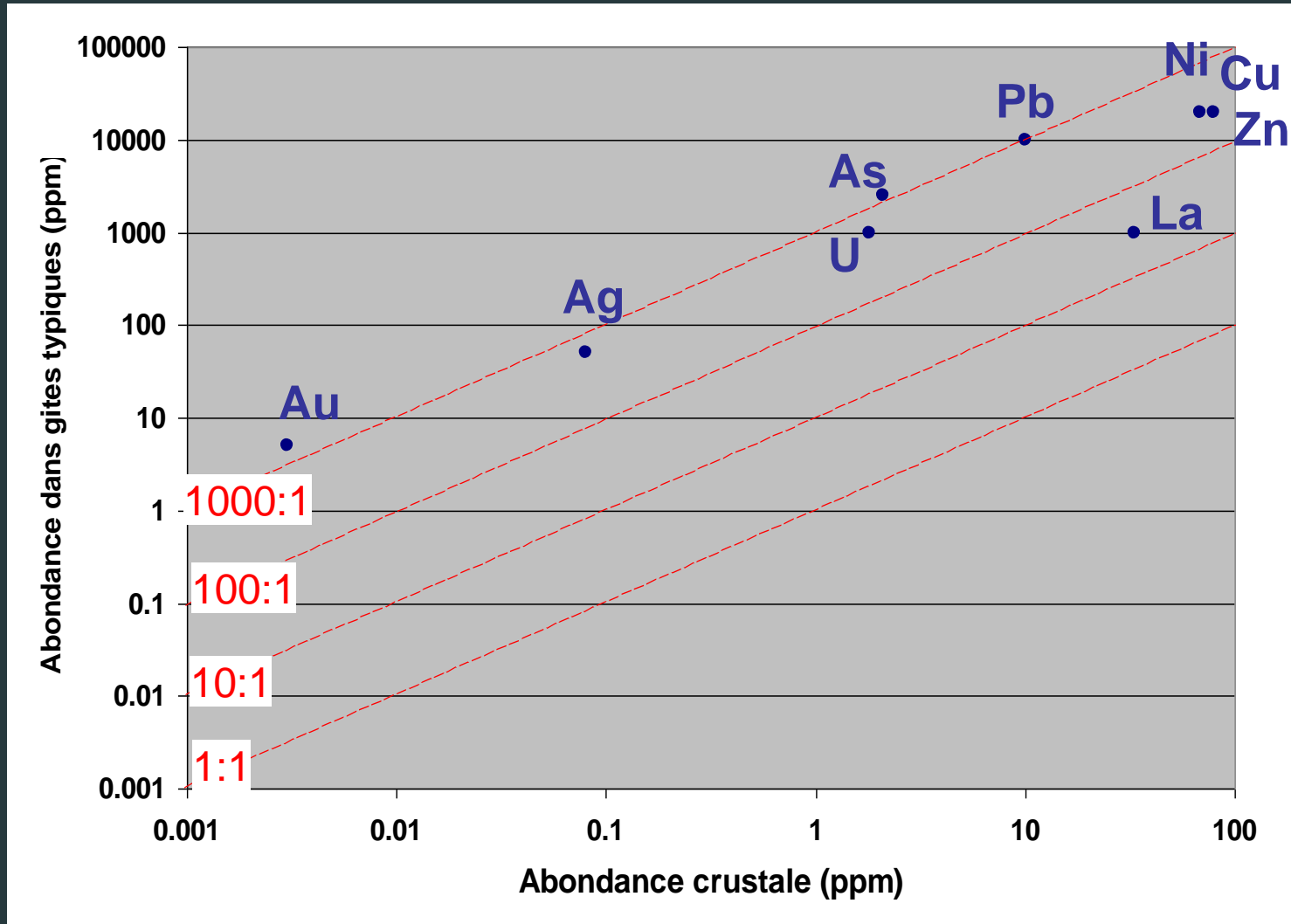
Évaluation du ratio Signal / Bruit

- Pour évaluer le ratio Signal / Bruit moyen pour différents éléments dans les sédiments de lacs
 - Approche Théorique - Qualitative
 - Approche Quantitative

Évaluation du ratio Signal des anomalies / Bruit de fond Approche Théorique - Qualitative

- **Abondance des métaux dans la minéralisation recherchée vs. abondance crustale**
- **Mobilité dans l'environnement secondaire (lacustre) à partir d'une minéralisation**
- **Extraction par les méthodes analytiques**

Abondance crustale des éléments vs. abondance dans des minéralisations



Abondance crustale des éléments vs. abondance dans des minéralisations

Substance avec minéral typique d'un gîte	Facteur de concentration ds gîte vs croûte
Au	1667
As (arsenopyrite)	1190
Pb (galène)	1000
Ag	625
U (uraninite)	556
Ni (pentlandite)	294
Cu (Chalcopyrite)	294
Zn (Sphalerite)	253
Ti (Ilmenite)	50
La (monazite)	30
Fe (Magnétite)	8
Mg (Chlorite)	3
K (Sericite)	3

Évaluation du ratio Signal / Bruit – Approche théorique

- Abondance des métaux dans la minéralisation recherchée vs. abondance crustale
- **Mobilité dans l'environnement secondaire à partir d'une minéralisation**
- Extraction par les méthodes analytiques

Mobilité chimique de certains éléments dans l'environnement secondaire

Substance avec minéral typique d'un gîte	Mobilité chimique relative des mx vers l'environnement lacustre
As (arsenopyrite)	Élevée
U (uraninite)	Élevée
Fe (Pyrite ou magnétite)	Élevée
Zn (Sphalerite)	Élevée
Cu (Chalcopyrite)	Moyenne-élevée
Ni (pentlandite)	Moyenne-élevée
La (monazite)	Faible-moyenne?
Ti (Ilmenite)	Faible
Pb (galène)	Faible
Ag	Faible
Au	Faible

Évaluation du ratio Signal / Bruit de fond Approche Théorique - Qualitative

- Abondance des métaux dans la minéralisation recherchée vs. abondance crustale
- Mobilité dans l'environnement secondaire
- **Extraction par les méthodes analytiques**

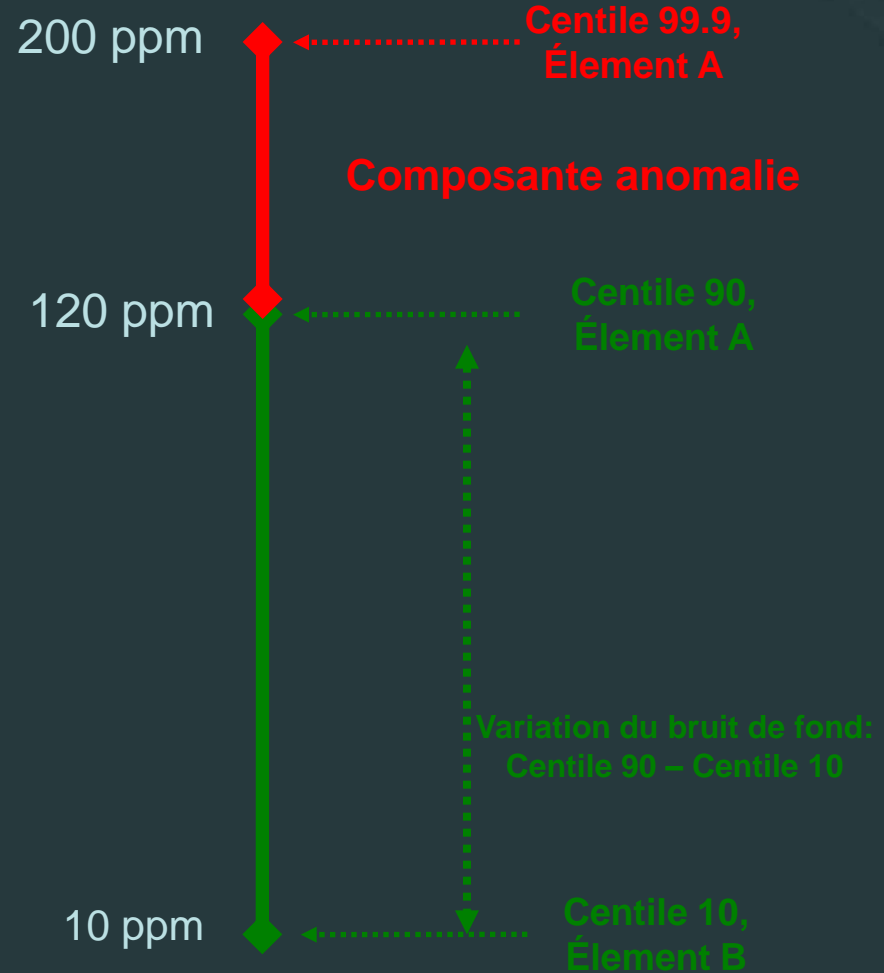
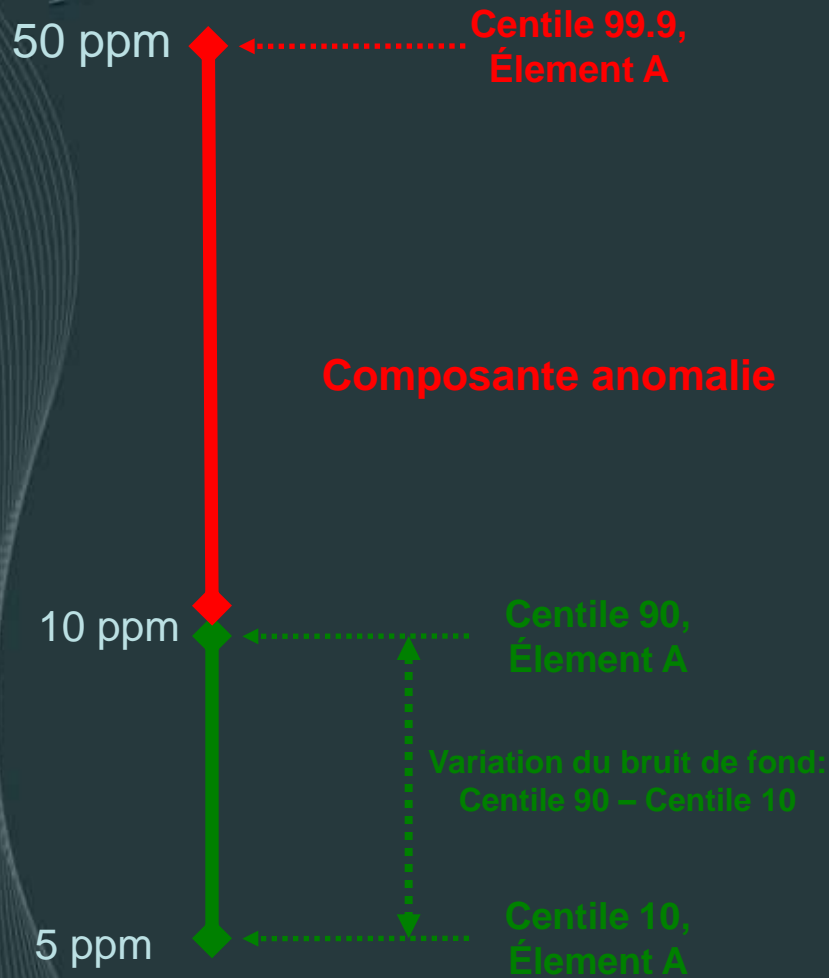
Variations du ratio Signal / Bruit moyen dans les sédiments de lacs: Approche théorique

Substance avec minéral typique d'un gîte	Facteur de concentration ds gîte vs croûte	Mobilité chimique relative des mx vers l'environnement lacustre	Extraction par aqua-regia	Ratio Signal / Bruit théorique
As (arsenopyrite)	1190	Élevée	Complète	ÉLEVÉ
U (uraninite)	556	Élevée	Complète	ÉLEVÉ
Au	1667	Faible	N/A	MOYEN-ÉLEVÉ
Ni (pentlandite)	294	Moyenne-élevée	Complète	MOYEN
Cu (Chalcopyrite)	294	Moyenne-élevée	Complète	MOYEN
Zn (Sphalerite)	253	Élevée	Complète	MOYEN
Pb (galène)	1000	Faible	Complète	MOYEN
Ti (Ilmenite)	50	Faible	Partielle	FAIBLE
La (monazite)	30	Faible-moyenne?	Partielle	FAIBLE
Fe (Magnétite)	8	Élevée	Complète	FAIBLE
Mg (Chlorite)	3	Faible	Complète	FAIBLE
K (Sericite)	3	Faible	Partielle	FAIBLE

Évaluer l'ampleur de variation du bruit de fond en considérant les anomalies constantes

- Calculer à l'aide de levés existants le rapport entre le signal des anomalies et l'amplitude du bruit de fond
- Méthode:
 - Calculer l'écart entre le 10e et le 90e centiles pour différents éléments
 - Prendre les 99.9 centiles (anomalie extrême) et diviser par les résultats précédents

Anomalies et bruit de fond géochimique



Le Ratio Centile 99.9 / (Centile 90 – Centile 10) pour élément A est supérieur au même ratio pour l'élément B

$$A: 50 / (10 - 5) = 10$$

$$B: 200 / (120 - 10) = 1.81$$

Amplitude de variation du ratio Signal / Bruit – Grand Nord – levés de lacs 1997520

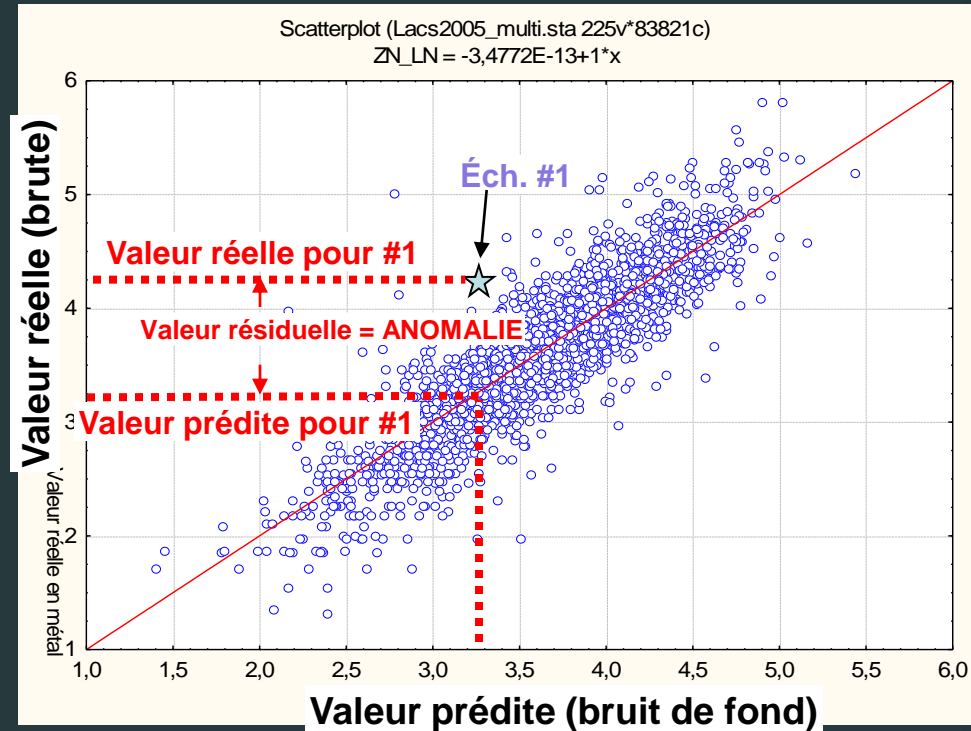
Substance	Centile 90 – Centile 10 (ppm)	Centile 99.9 (ppm)	Centile 99.5 / (Centile 90 – Centile 10)
Au (ppb)	< 0.5	16	>32
As	2 - 3	43	14 – 21
U	16.9	315	19
Ni	27	161	6.0
Cu	54	268	5.0
Pb	7 - 9	38	4 – 5.5
La	111	488	4.4
Zn	115	472	4.1
K	2900	10055	3.5
Ti	800	2700	3.3
Mg	4900	15200	3.1
Fe	34000	96577	2.8

Conclusions – Ratio Signal sur Bruit pour différents éléments

- Les approches théoriques et quantitatives convergent vers les mêmes conclusions
- As, U, Au: signal des anomalies semble très clair. Peu / pas besoin de rehausser le signal des anomalies
 - Utilisation de méthodes statistiques monovariées simples est probablement suffisante pour la délimitation d'anomalies
- Zn, Cu, Ni, Pb, Ti: signal des anomalies plus subtil. Besoin de rehausser le signal des anomalies vs. le bruit de fond.
 - Utilisation de méthodes plus avancées pour la délimitation des anomalies est nécessaire – Statistiques multivariées et spatiales

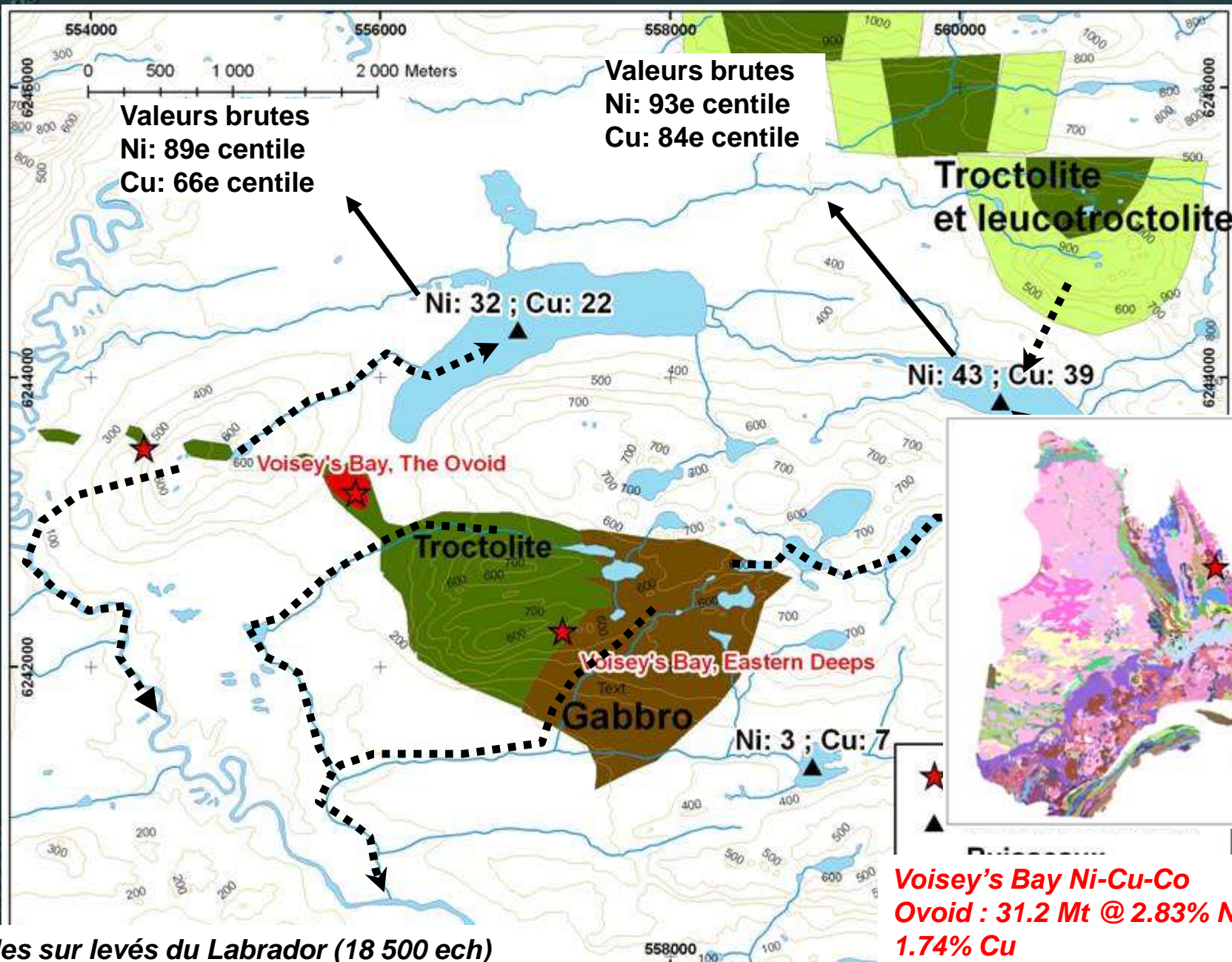
Prédiction du bruit de fond : approche statistique

- Valeur « normale » pour un échantillon donné dans un métal donné (son « bruit de fond »)? « Prédiction »
- Calculer ensuite « l'excès » de métal dans l'échantillon → valeur résiduelle = valeur réelle (brute) – prédite (« valeur normale »)
- Évaluation spécifique à chaque échantillon → varie d'un échantillon à l'autre
- **Seuil** → spécifique à chaque échantillon sa valeur prédite en métal



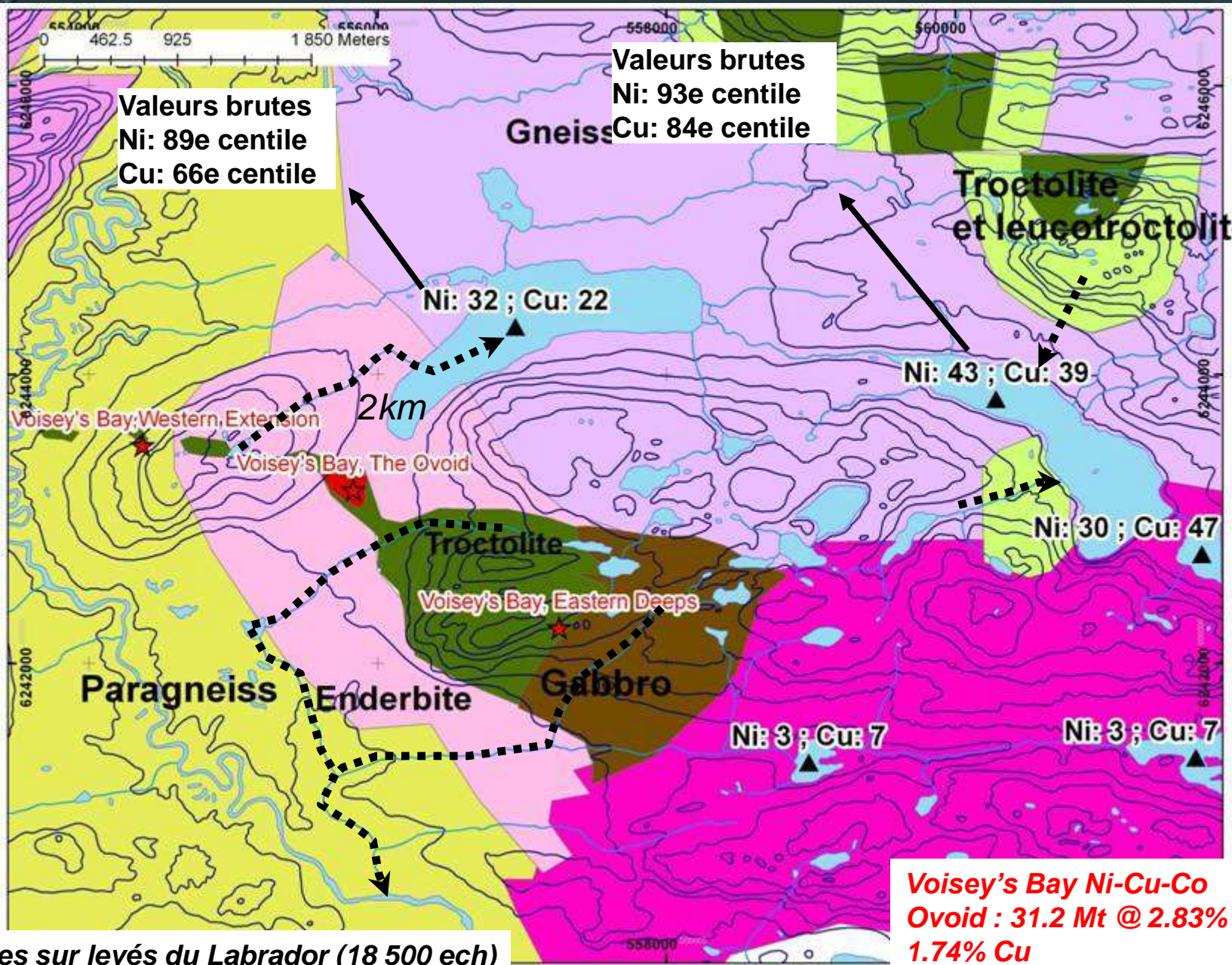
Représentation statistique de la séparation bruit de fond vs. anomalies

Voisey's Bay



Centiles sur levés du Labrador (18 500 ech)

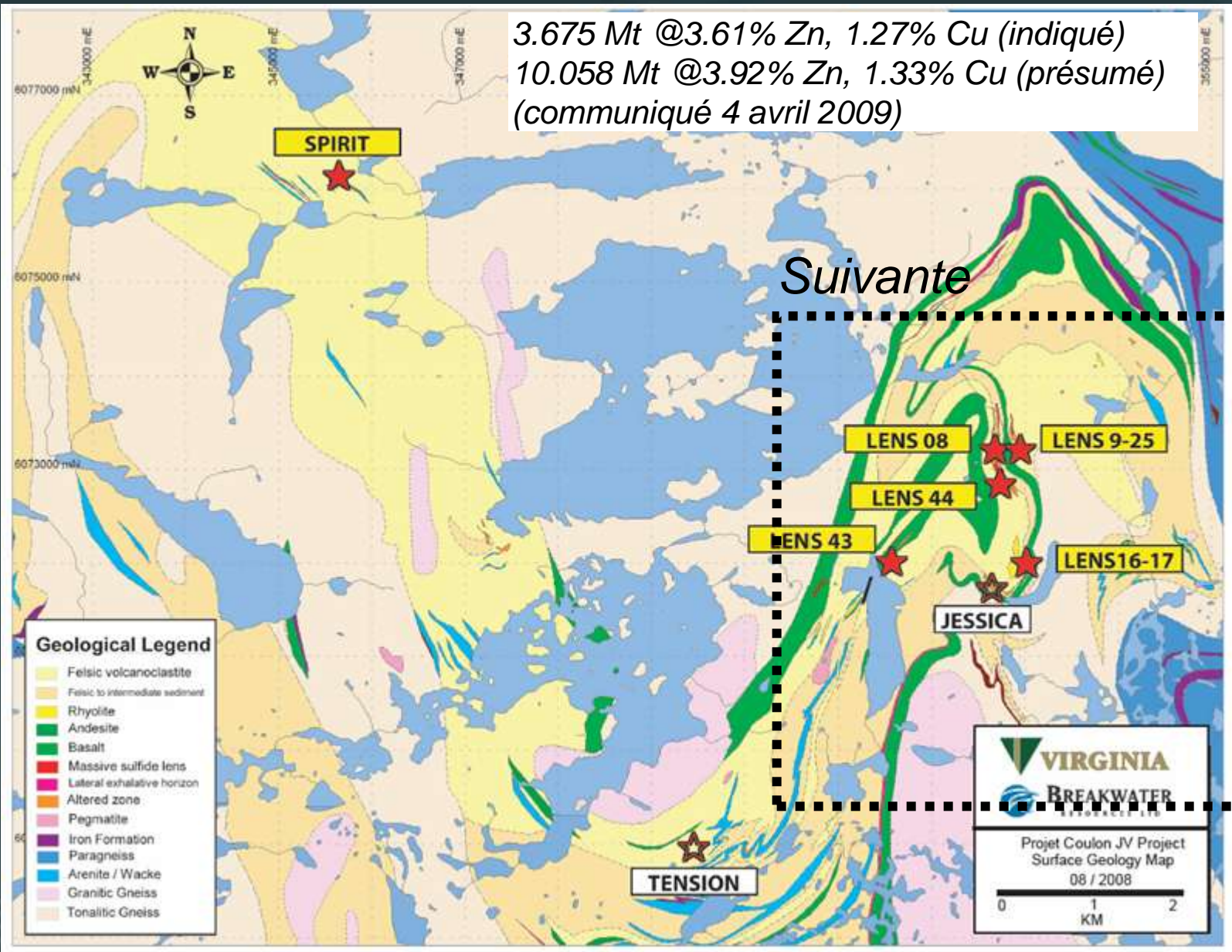
Voisey's Bay



Centiles sur levés du Labrador (18 500 ech)

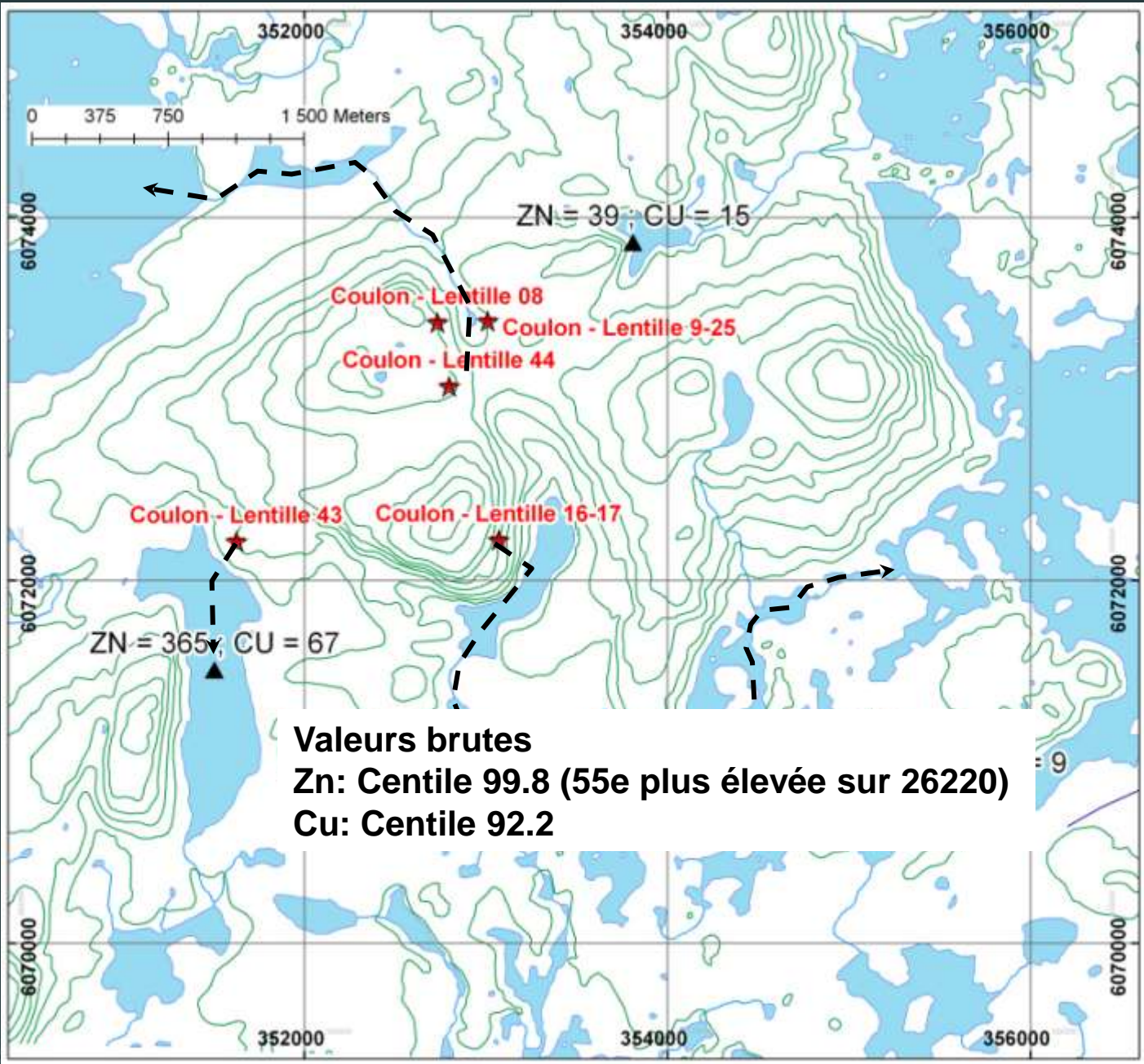
Coulon

3.675 Mt @3.61% Zn, 1.27% Cu (indiqué)
 10.058 Mt @3.92% Zn, 1.33% Cu (préssumé)
 (communiqué 4 avril 2009)



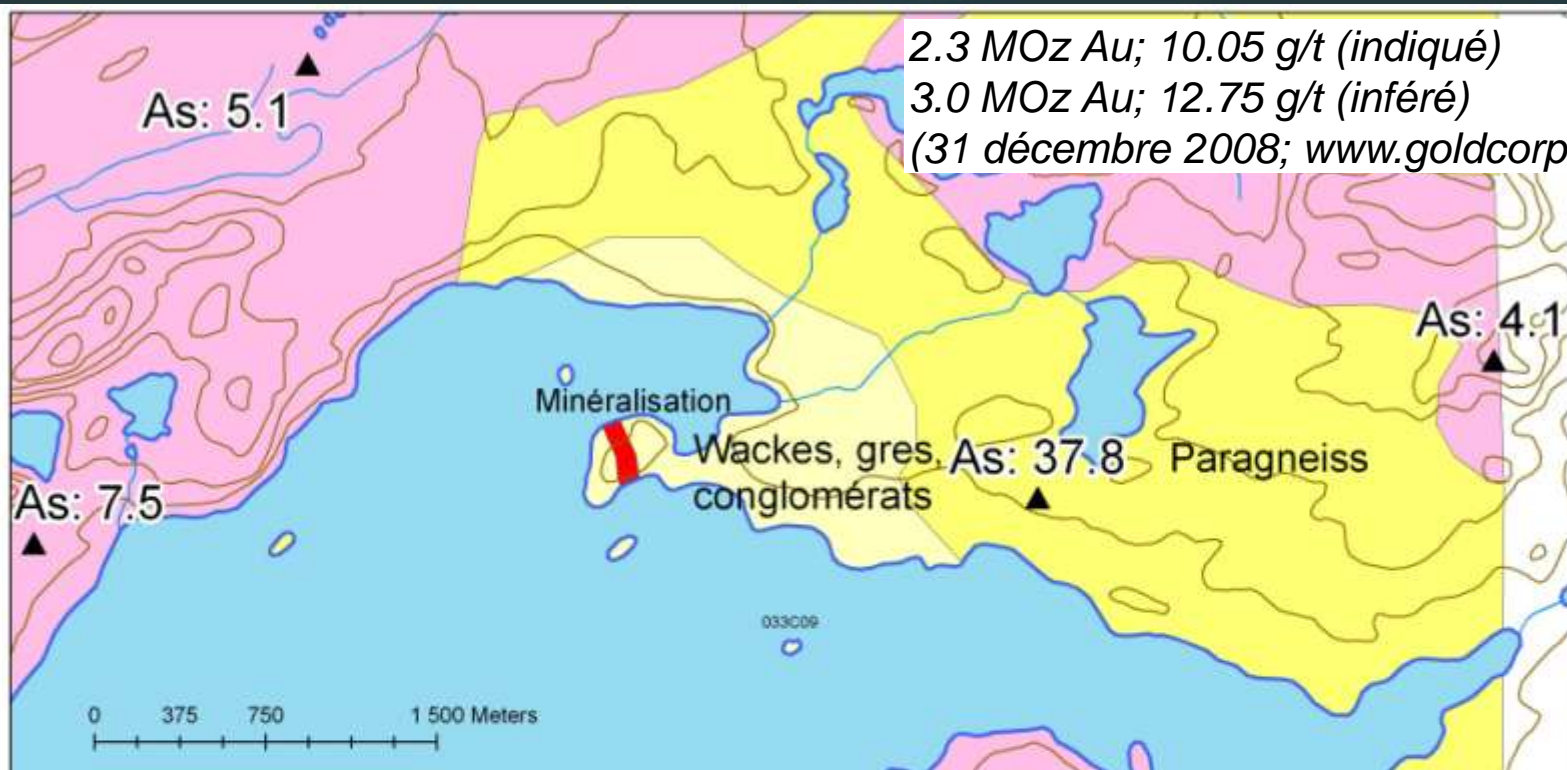
Suivante

Coulon



Valeurs brutes
Zn: Centile 99.8 (55e plus élevée sur 26220)
Cu: Centile 92.2

Éléonore



Valeurs brutes

As: Centile 99.65 (27e plus élevée sur 7541 – SDBJ-AA réanalysées ICP)



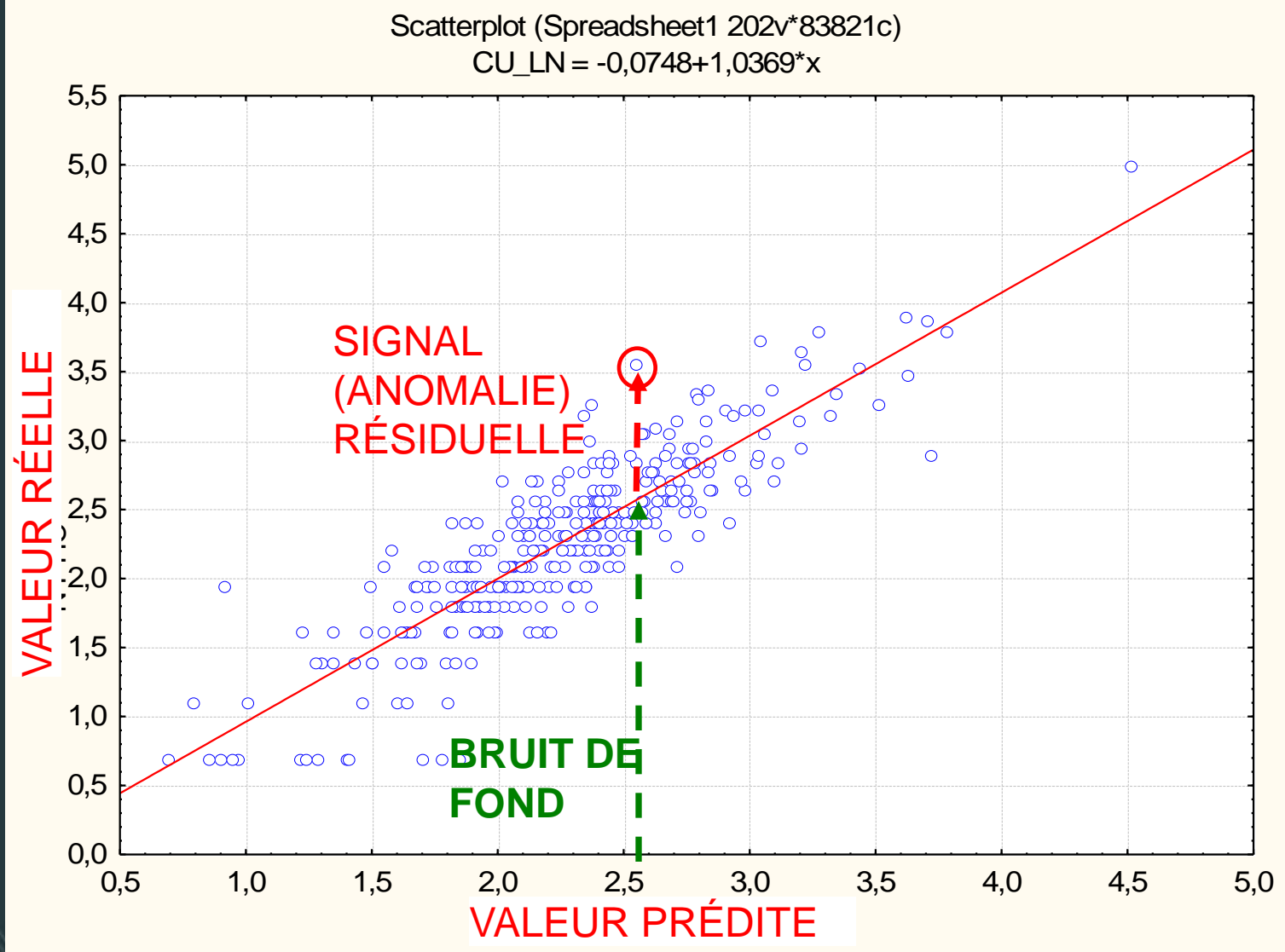
Paramètres de la prédiction

- Comment évaluer la teneur géochimique attendue de chaque échantillon (i.e son bruit de fond) pour un métal donné?
 - **Par une prédiction (régression) utilisant d'autres éléments de l'analyse** (éléments non-associés au type de minéralisation recherchée)
 - Bruit de fond géochimique → implique tous les éléments et à l'échelle régionale
 - Anomalies dues aux minéralisations → influence un plus petit nombre d'éléments et à l'échelle locale
- Approche statistique multivariable – le bruit de fond a des caractéristiques statistiques multivariées différentes des anomalies

Ex: A quelle valeur en Zn devrait-on s'attendre pour un échantillon donné si on regarde les autres éléments de son analyse? – évaluation statistique du bruit de fond

$$\text{Ex : Zn_Predit} = 0.1 * \text{Al} + 0.3 * \text{Ba} - 0.6 * \text{Ca} \dots + 2.2$$

Régression et résiduelle

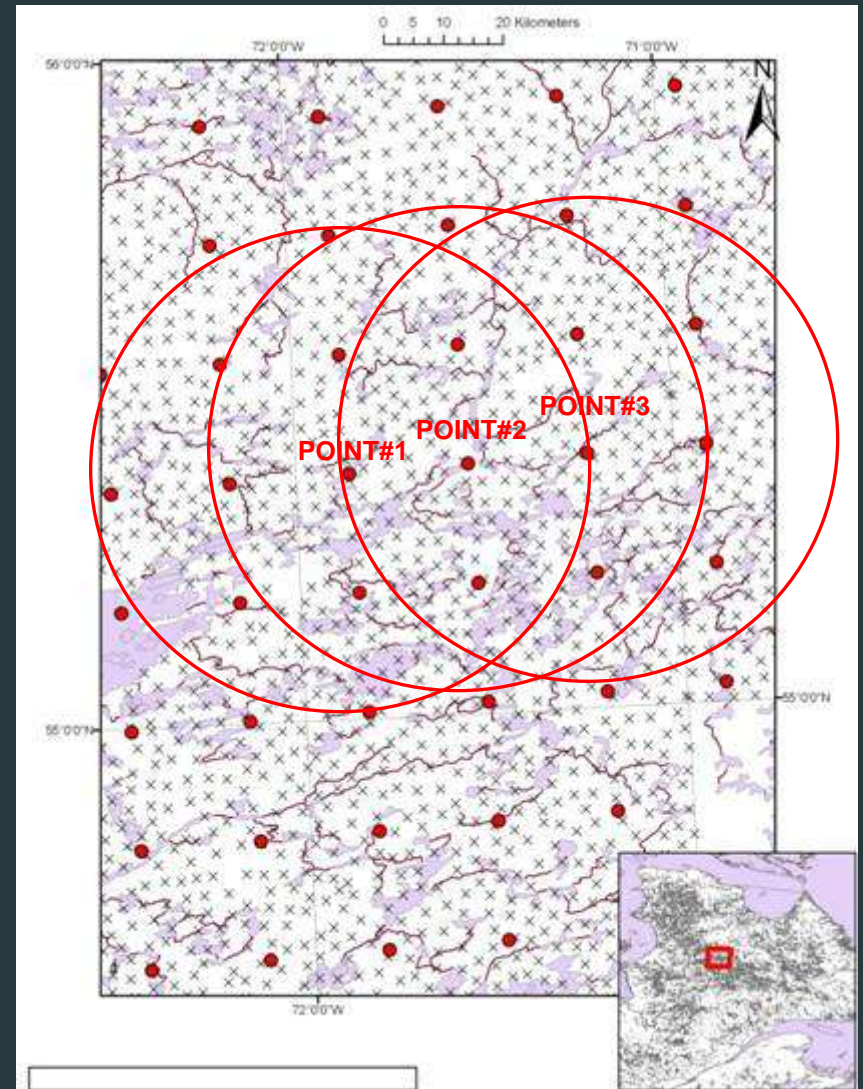


Méthode de la régression spatiale

Point 1 : $Zn_Predit = 0.1 * Al + 0.3 * Ca - 0.6 * Cr... + 2.2$

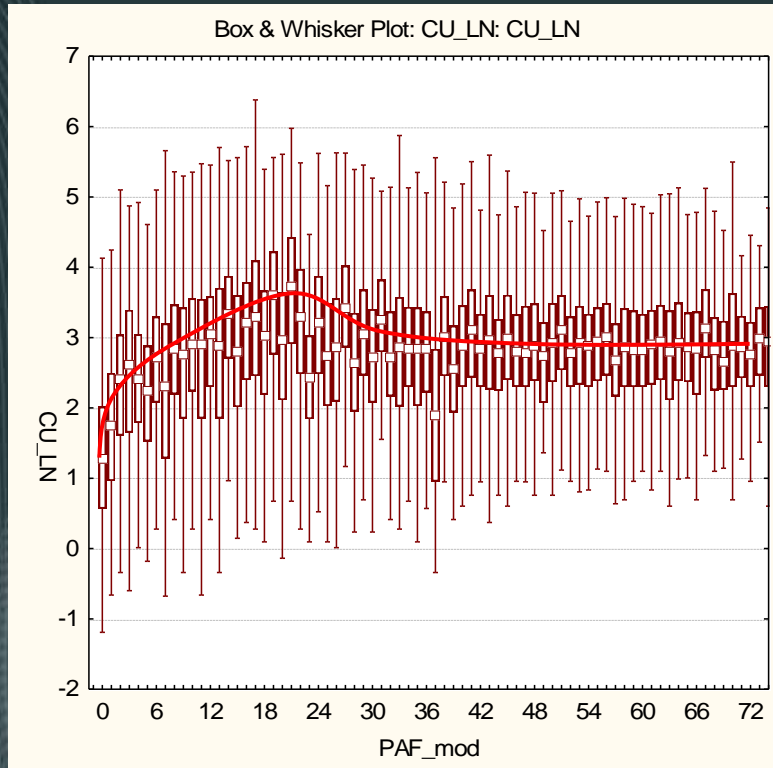
Point 2 : $Zn_Predit = 0.3 * Al + 0.4 * Ca + 1.7 * Cr... + 1$

Point 3 : etc



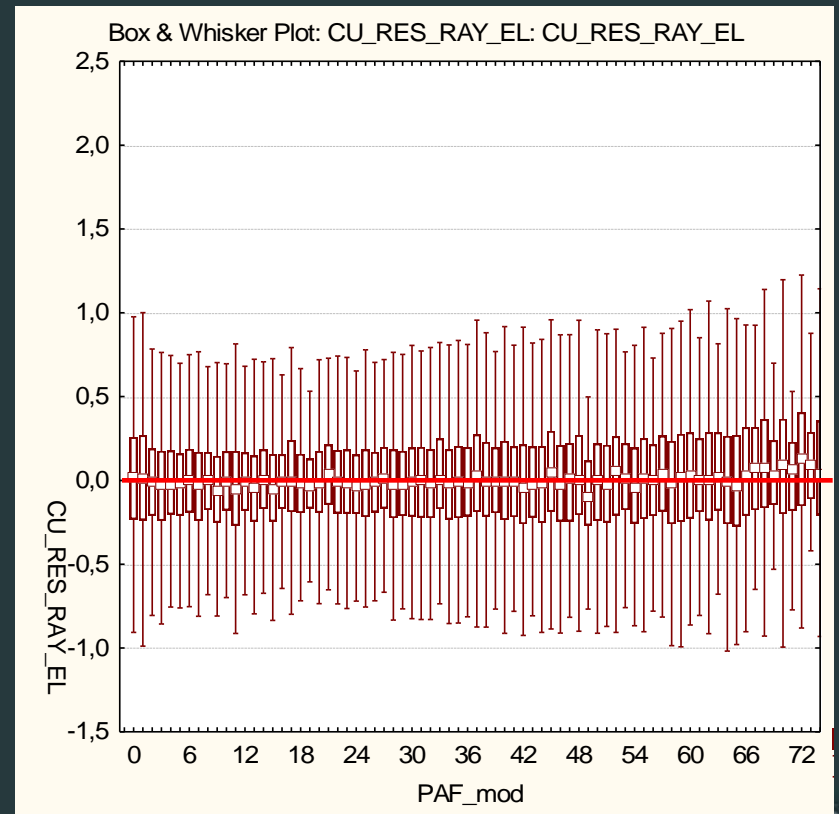
Régression multiple spatiale (« Geographically weighted regression »)

Relation résiduelle vs. PAF

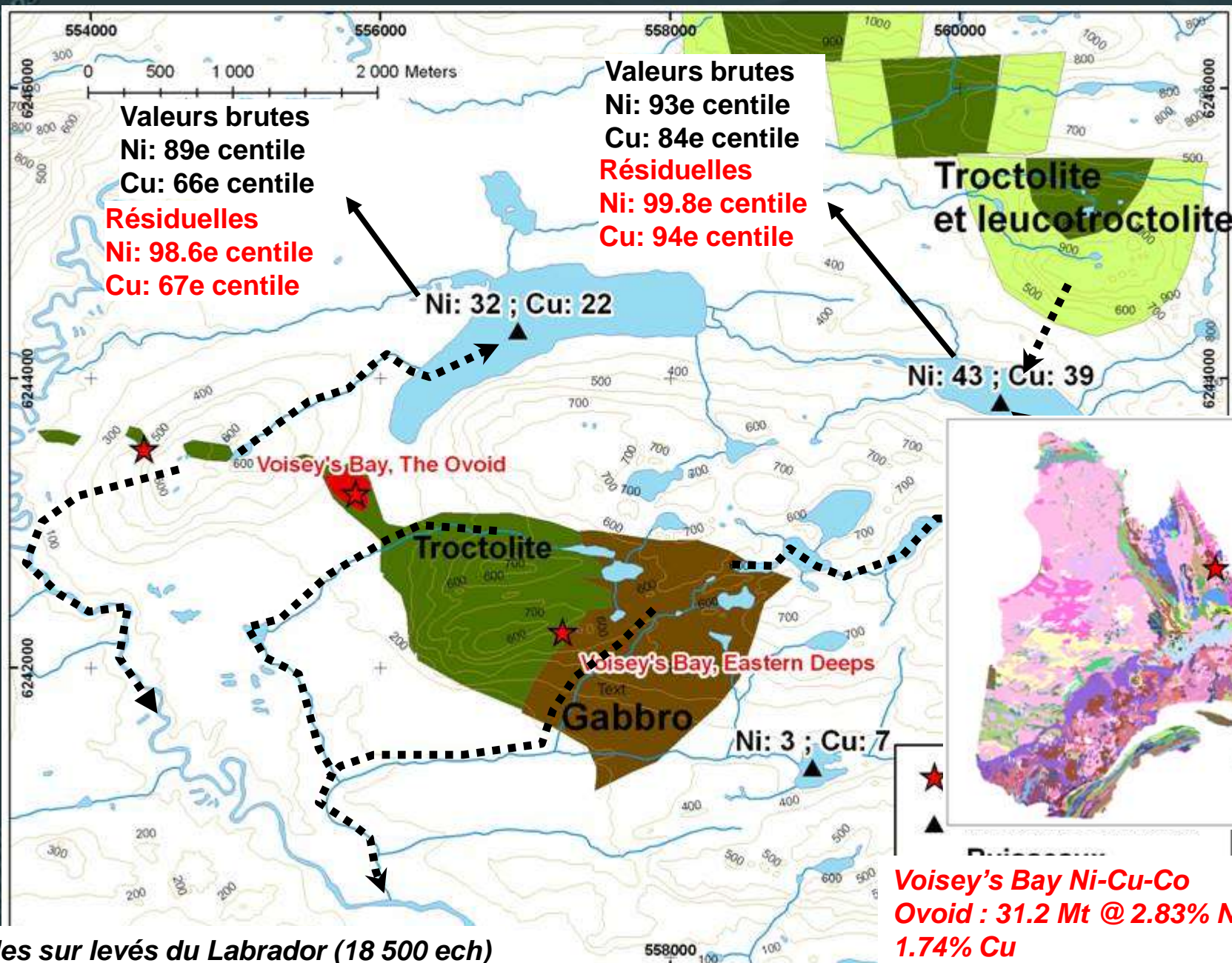


Valeurs brutes en Cu vs. Perte au Feu

Anomalies en Cu de la Régression multiple spatiale vs. Perte au Feu

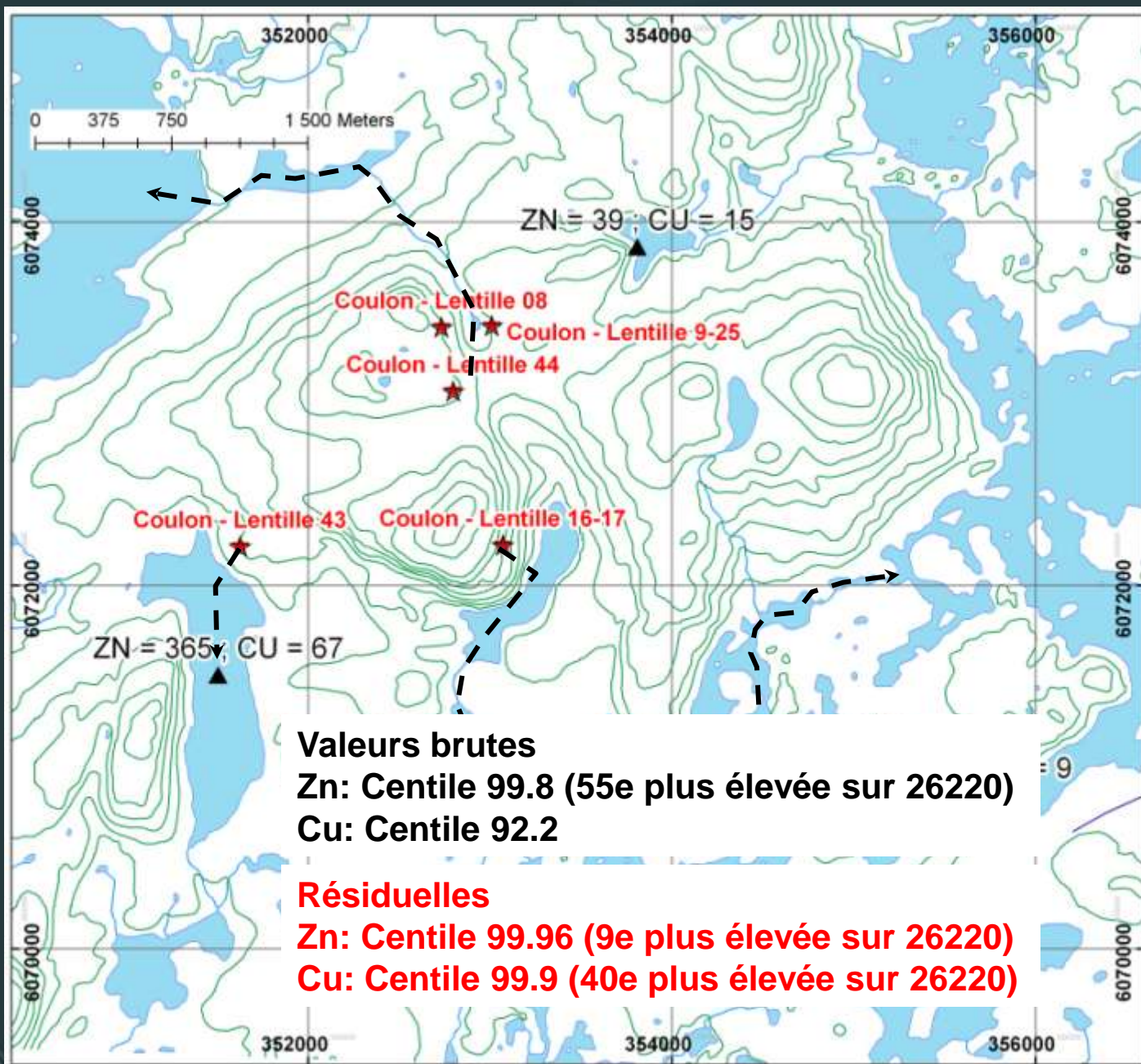


Voisey's Bay



Centiles sur levés du Labrador (18 500 ech)

Coulon



Valeurs brutes

Zn: Centile 99.8 (55e plus élevée sur 26220)

Cu: Centile 92.2

Résiduelles

Zn: Centile 99.96 (9e plus élevée sur 26220)

Cu: Centile 99.9 (40e plus élevée sur 26220)

Éléonore



Valeurs brutes

As: Centile 99.65 (27e plus élevée sur 7541 – SDBJ-AA réanalysées ICP)

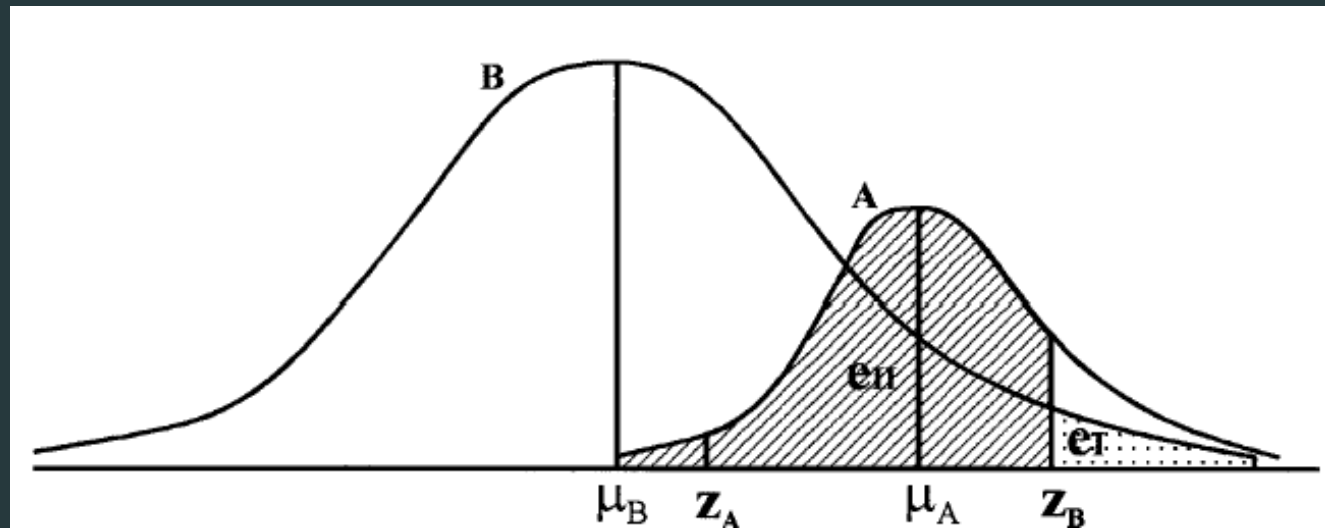
Résiduelles

As: Centile 99.61 (29e plus élevée sur 7541)



Statistique spatiale U (Cheng, 1999)

- Supposons 2 populations : bruit de fond (B) et anomalie (A). On suppose que les valeurs des deux populations se superposent.
- En prenant deux écart-types comme seuil d'appartenance à B, on a une superposition importante avec A. Comment les séparer?
- Idée : si on considère que les échantillons anormaux seront groupés dans l'espace (**i.e. anomalies à plusieurs échantillons**) on peut améliorer la classification en considérant le groupement des valeurs



Statistique spatiale U (Cheng, 1999)

Calculer la moyenne des valeurs du voisinage (m) de la teneur (t) autour de l'échantillon

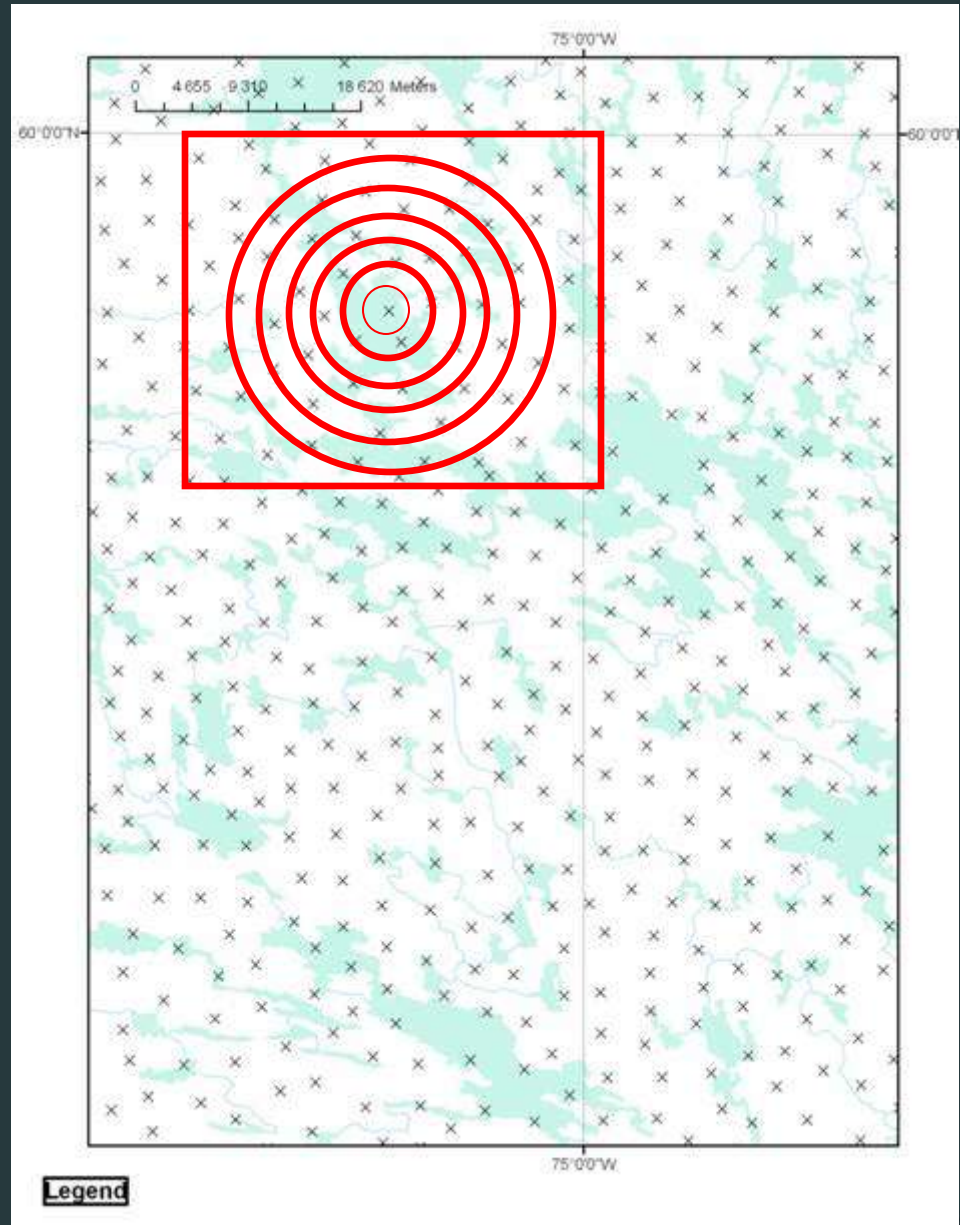
Considérer des cercles de taille croissante centrés sur l'échantillon

A chaque cercle, calculer la statistique U suivante :

$$U = n^{1/2} (1/n \sum_{i=1}^n (t_i - m))$$

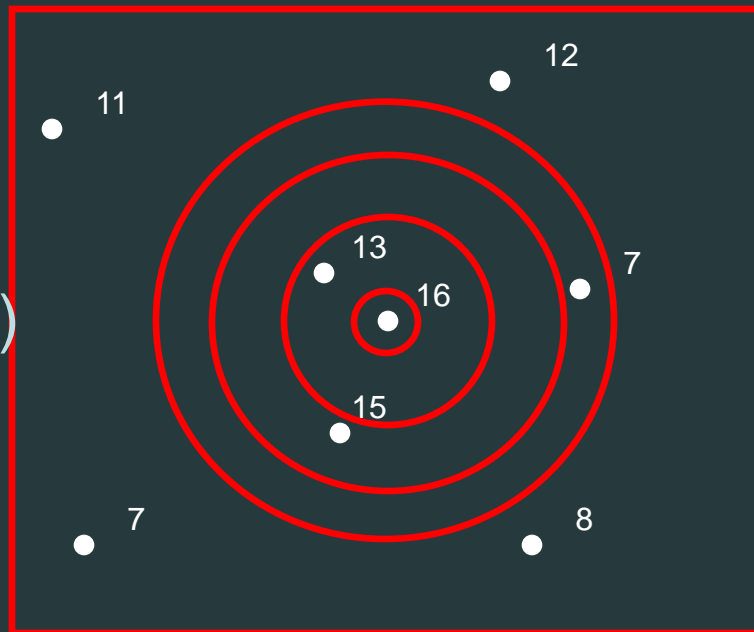
(somme de la différence entre chaque valeur t incluse dans le cercle et la moyenne m)

Trouver la taille du cercle tel que U est maximal et enregistrer U pour l'échantillon



Statistique spatiale U (Cheng, 1999)

$$U = n^{1/2} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - m) \right)$$



Moyenne = 10 ppm

Rayon : 1 km $U = \sqrt{1} * (1/1) * (16 - 10) = 6$

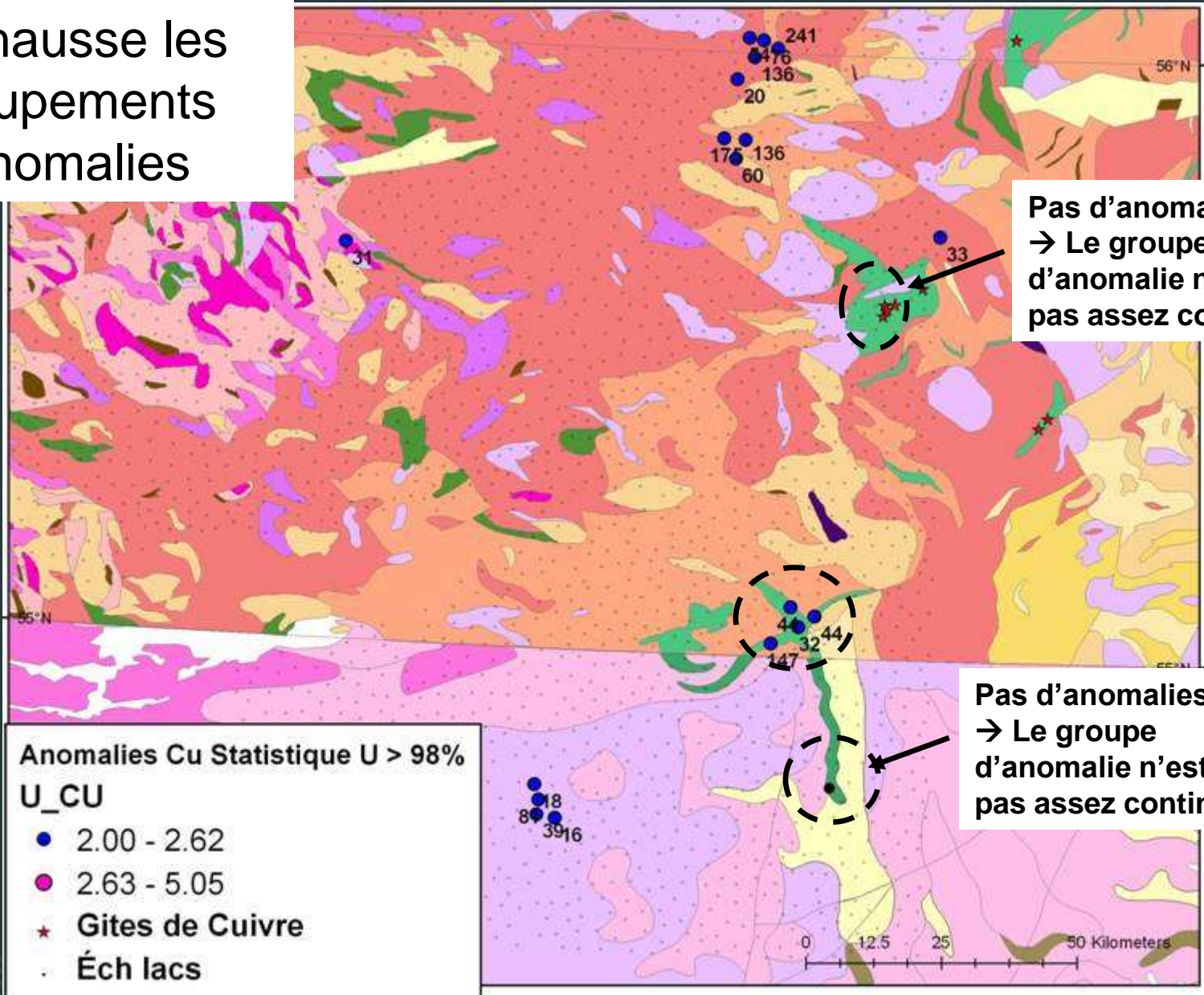
Rayon : 3 km $U = \sqrt{2} * (1/2) * (16 - 10 + 13 - 10) = 6,36$

Rayon : 5 km $U = \sqrt{3} * (1/3) * (16 - 10 + 13 - 10 + 15 - 10) = 8$

Rayon : 7 km $U = \sqrt{4} * (1/4) * (16 - 10 + 13 - 10 + 15 - 10 + 7 - 10) = 8,5$

Anomalies en Cu par statistique U (zone exemple)

Rehausse les groupements d'anomalies



Anomalies Cu Statistique U > 98%
U_CU

- 2.00 - 2.62
- 2.63 - 5.05
- ★ Gites de Cuivre
- Éch lacs

Pas d'anomalies ici
→ Le groupe d'anomalie n'est pas assez continu

Pas d'anomalies ici
→ Le groupe d'anomalie n'est pas assez continu

Conclusions

- Dans le cadre de la géochimie des sédiments de lacs:
- Il est préférable d'utiliser des méthodes avancées de traitement d'anomalies géochimiques pour les éléments ayant un rapport signal / bruit faible → Ex: métaux de base
- Les bonnes vieilles méthodes simples peuvent être suffisantes pour les éléments ayant un rapport signal / bruit élevé → Ex: As, U, Au. Ex: Éléonore
- Les exemples de Voisey's Bay, Coulon illustrent bien l'utilité de méthodes plus avancées avec les métaux de base dans un cas où les méthodes simples performant moins bien.

Conclusions générales

- Les teneurs en métaux dans les sédiments de lacs varient selon les conditions de l'environnement de surface (matière organique, argiles) et les lithologies environnantes
 - On a plusieurs « types » de sédiments de lacs ayant des teneurs en métaux « normales » qui varient considérablement
- Pour certains éléments/contextes, ces variations sont mineures par rapport aux anomalies causées par les minéralisations
 - Des méthodes statistiques simples pour cibler les anomalies sont alors suffisantes
- Pour d'autres éléments/contextes, ces variations cachent les anomalies géochimiques causées par les minéralisations
 - Dans ces cas, les anomalies doivent être rehaussées par des techniques statistiques spatiales ou statistiques multivariées.
 - La méthode de rehaussement à utiliser dépend du contexte: taille de la minéralisation cible, densité des levés, mobilité chimique des éléments considérés, etc.

Pour plus de détails..

- Document GM-62922 (Consorem)
 - Rapport sur les signaux géochimiques dans les sédiments de lacs
 - Inclue base de données nivelées (2005) pour tous les levés du Québec – technique existante perfectionnée au Consorem
- Site web du Consorem (www.consorem.ca) et CD
 - Rapports 2004-09 et 2005-03 – Détails sur la technique de régression spatiale et d'autres techniques de rehaussement d'anomalies
 - Présentations publiques
- Données pour tout le Québec traitées par la technique de régression spatiale **seront publiées au PDAC 2010** – EP-2010-01 – réalisé par Daniel Lamothe (MRNF)
 - Utilise logiciel de régression spatiale développé au Consorem
 - Inclura données nivelées à jour par la méthode développée au Consorem