



Vers une vision systémique de la géochimie de l'exploration: Les leçons de la caractérisation environnementale dans le cas du dépôt de graphite-sulfures du lac Knife.

Réjean GIRARD, Géo..

**24eme Forum Technologique du
Consorem– Mercredi 13 mai 2026**



IOS Géosciences
De l'innovation émerge la richesse

Le projet minier!



Et son flux d'information



**Et pendant
l'exploitation!**



*Et si on était curieux
et osait défaire les
silos?*



Caractérisation environnementale selon le géologue!

AVANTAGES

- Tous les médiums sont ciblés
 - Roches (métaux, PAG, Lixiviats)
 - Sols (A,B,C)
 - Eaux (Surface, souterraines)
 - Sédiments (Fond de lacs, etc)
- Grande rigueur d'échantillonnage
 - Très Normé
- Laboratoires certifiés
- Éventail d'analytes
 - Cations, anions, organiques, paramètres, ~~grenouilles~~
- Source connue
- Colonne stratigraphique complète
 - Variations verticales
- Plusieurs cycles
 - Variations temporelles

INCONVÉNIENTS

- Complexe à interpréter
 - Interprétation environnementale très simple
- Contracteurs travaillent en silos!
- Grille d'échantillonnage peu étendue
- Petite population
- Méthode analytique différentes
 - Aqua Forte et non Aqua Regia
- Laboratoires moins connus
- QAQC analytique déficient
- Source déjà connue!
- → Études de cas
- **Hard cash!**



iStock.com

De l'innovation émerge la richesse

Caractérisation environnementale selon le géologue!

AVANTAGES

- Tous les médiums sont ciblés
 - Roches (métaux, PAG, Lixiviats)
 - Sols (A,B,C)
 - Eaux (Surface, souterraines)
 - Sédiments (Fond de lacs, etc)
- Grande rigueur d'échantillonnage
 - Normé
- Laboratoires certifiés
- Éventail d'analytes
 - Cations, anions, organiques, paramètres, ~~grenouilles~~
- Source connue
- Colonne stratigraphique complète
 - Variations verticales
- Plusieurs cycles
 - Variations temporelles

INCONVÉNIENTS

- Complexe à interpréter
 - Interprétation environnementale très simple
- Contracteurs travaillent en silos
- Grille d'échantillonnage peu étendue
- Petite population
- Méthode analytique différentes
 - Aqua Forte et non Aqua Regia
- Laboratoires moins connus
- QAQC analytique déficient
- Source déjà connue
- → Études de cas
- ~~Hard cash!~~ **Accréditif**

Il y a-t-il un Sedex qui se cache quelque part?



iStock.com

De l'innovation émerge la richesse

Caractérisation environnementale selon le géologue!

AVANTAGES

- Tous les médiums sont ciblés
 - Roches (métaux, PAG, Lixiviats)
 - Sols (A,B,C)
 - Eaux (Surface, souterraines)
 - Sédiments (Fond de lacs, etc)
- Grande rigueur d'échantillonnage
 - Normé
- Laboratoires certifiés
- Éventail d'analytes
 - Cations, anions, organiques
 - ~~grenouilles~~
- Source connue
- Colonne stratigraphique
 - Variations verticales
- Plusieurs cycles
 - Variations temporelles

INCONVÉNIENTS

- Difficile à interpréter
- Méthodologie environnementale très simple
- Travaillent en silos
- Échantillonnage peu étendue

différentes

la Regia

US

Y a-t-il un Sedex
qui se cache
quelque part?

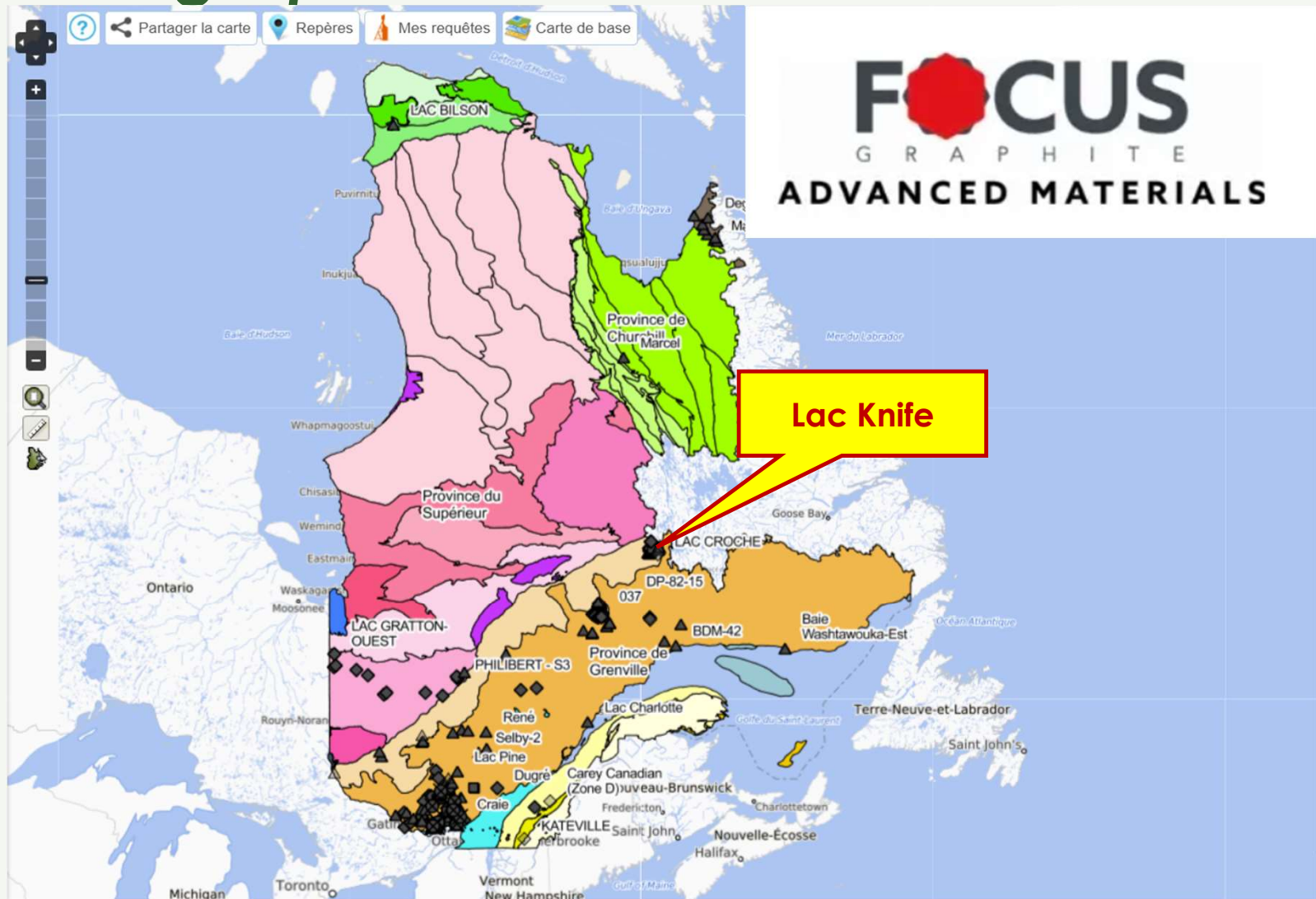


iStock.com

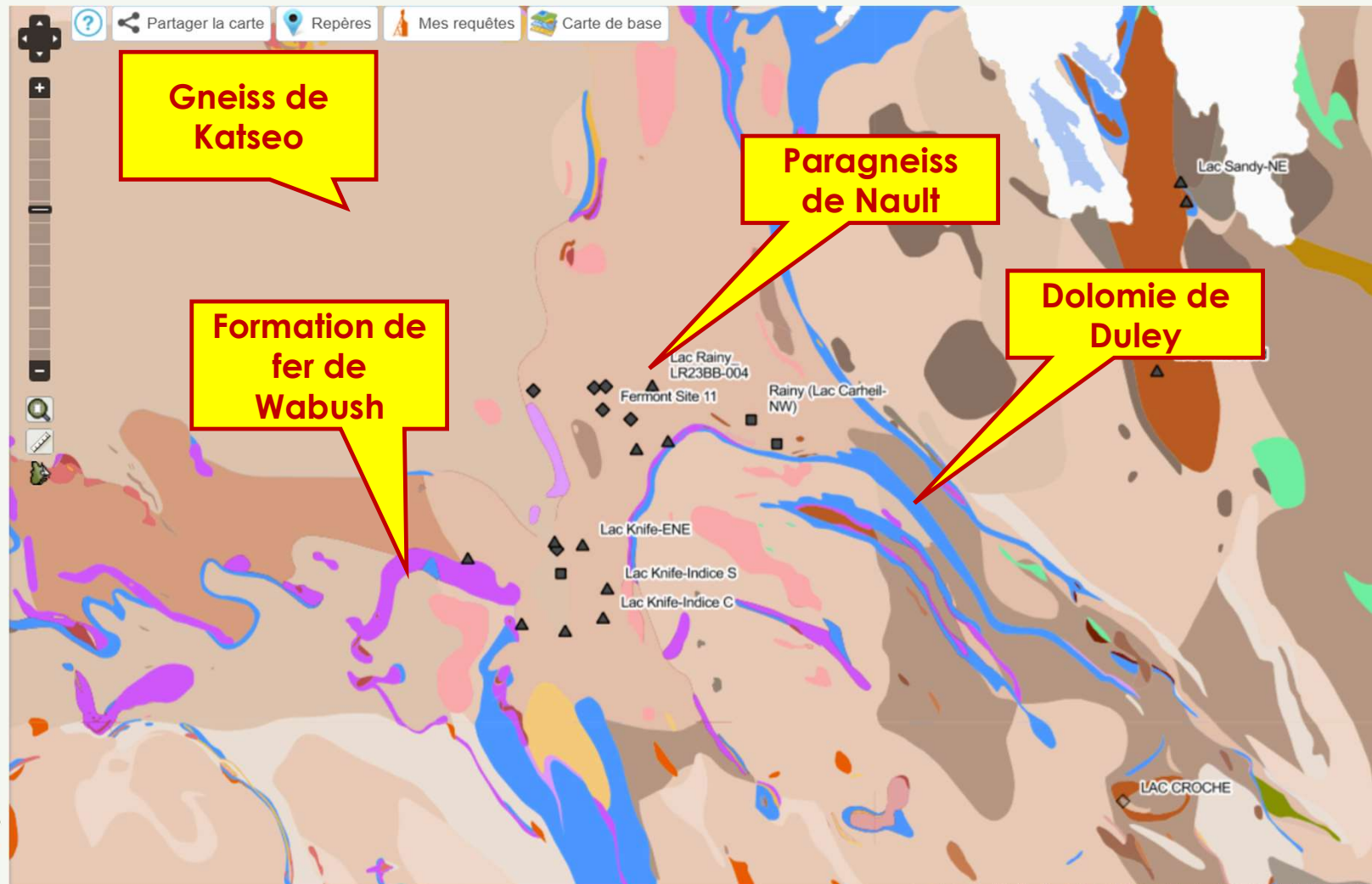


la richesse

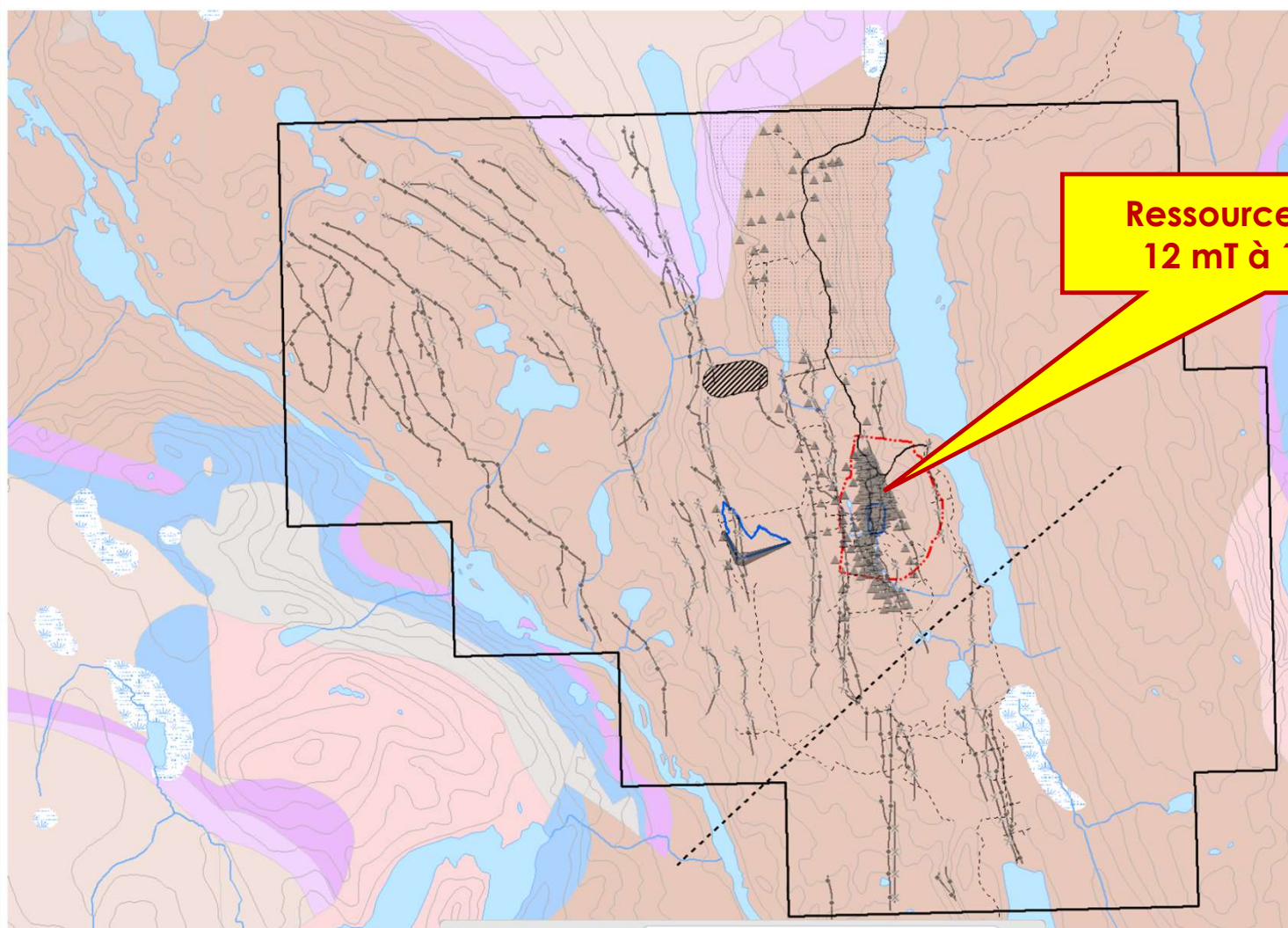
Projet de graphite du lac Knife



Géologie Régionale



Géologie locale

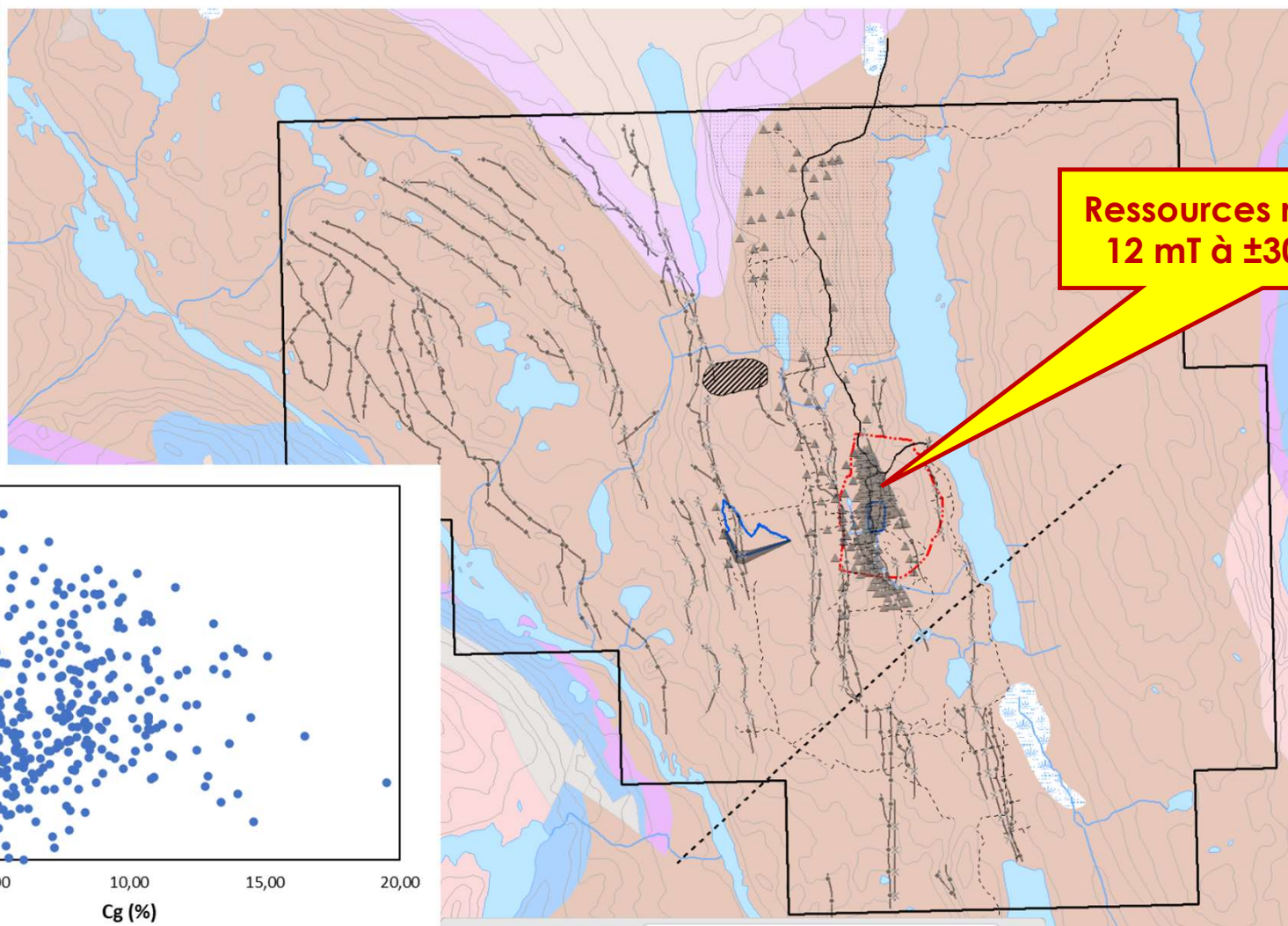


**Ressources Indiquées
12 mT à 15.34% Cgr**

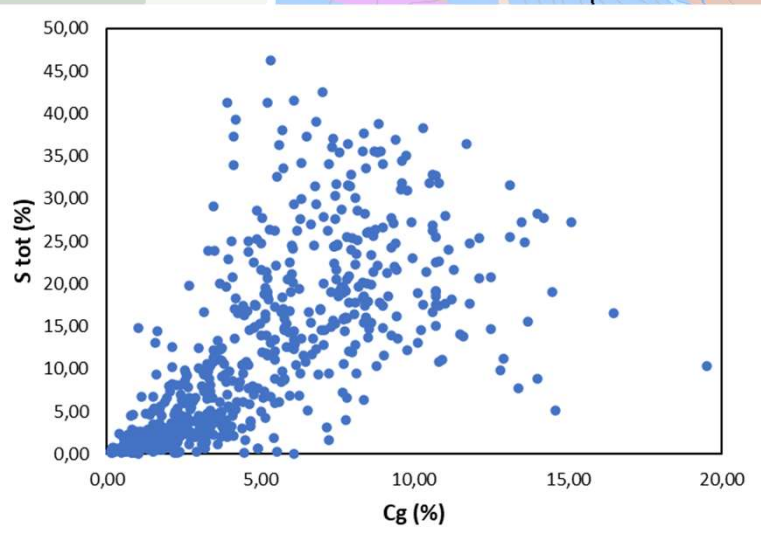
DRA 2022



Géologie locale



**Ressources non-indiquées
12 mT à $\pm 30\%$ pyrrhotite**



Génération d'acide

- La pyrrhotite s'oxyde spontanément



- Oxydation jusqu'à plus de 30 mètres
- Entraîne la lixiviation des métaux
- Environ 30% du soufre est lessivé des roches de surface!

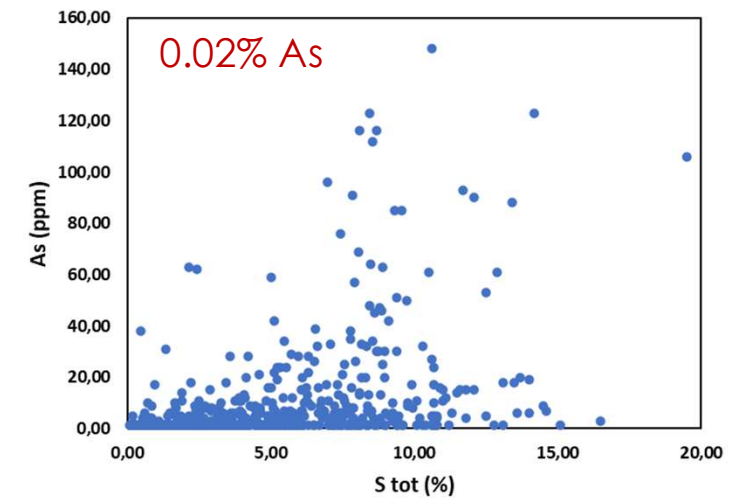
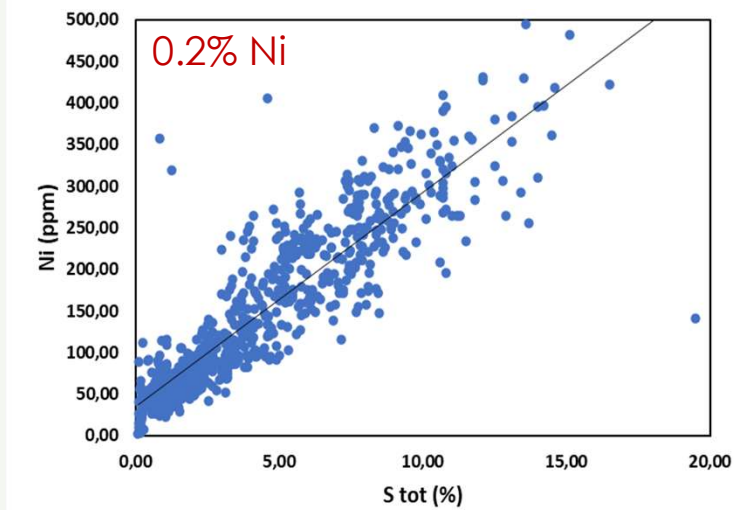
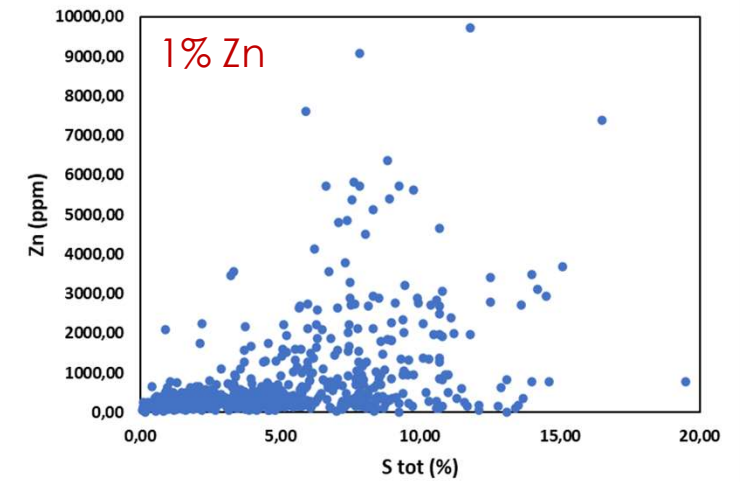
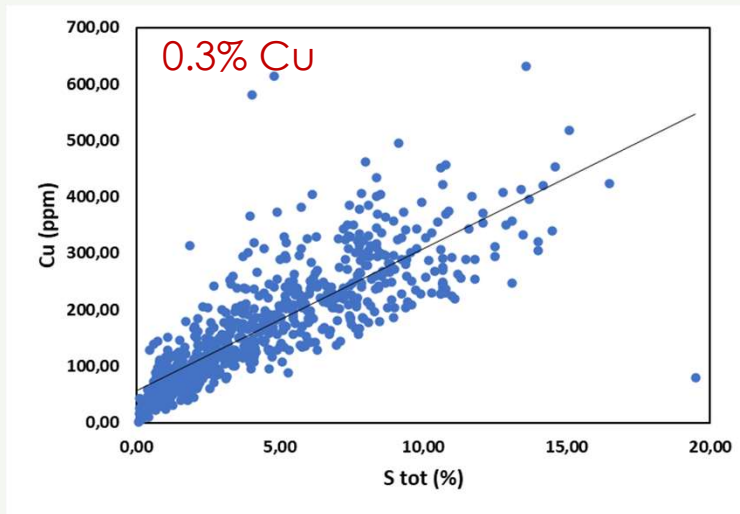


iStock.com

De l'innovation émerge la richesse

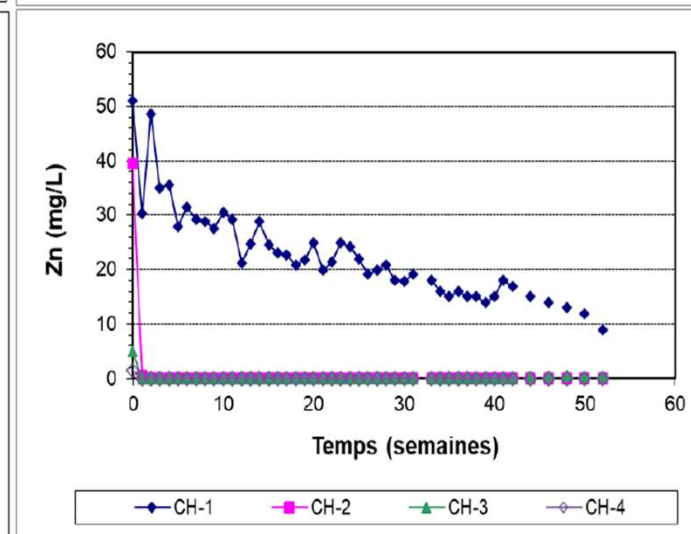
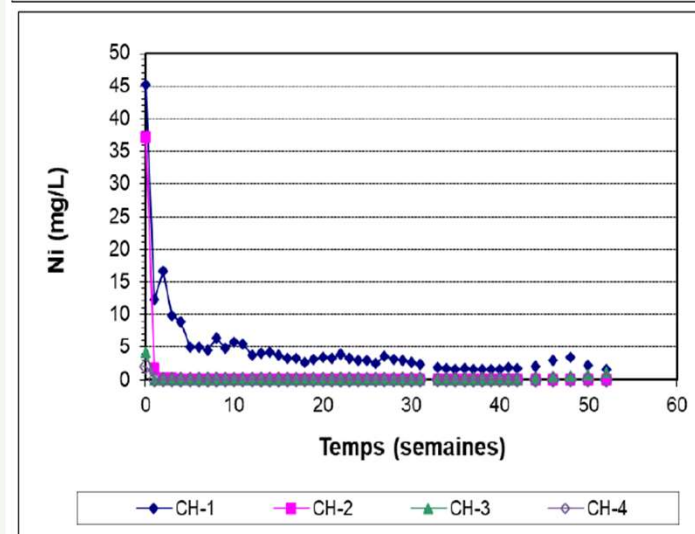
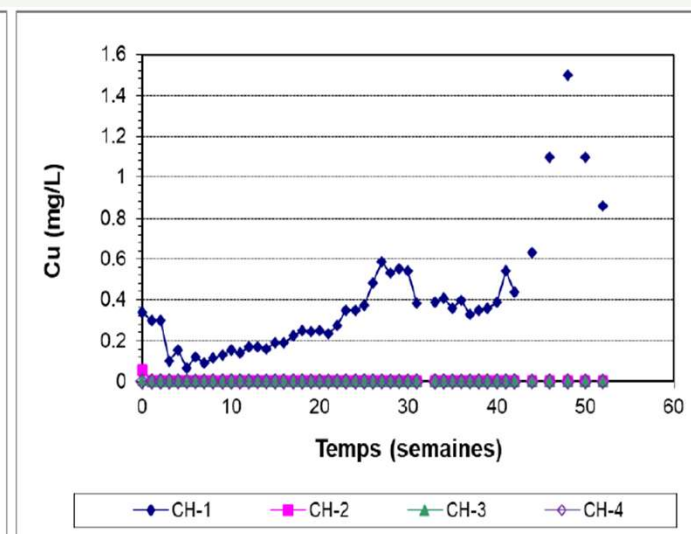
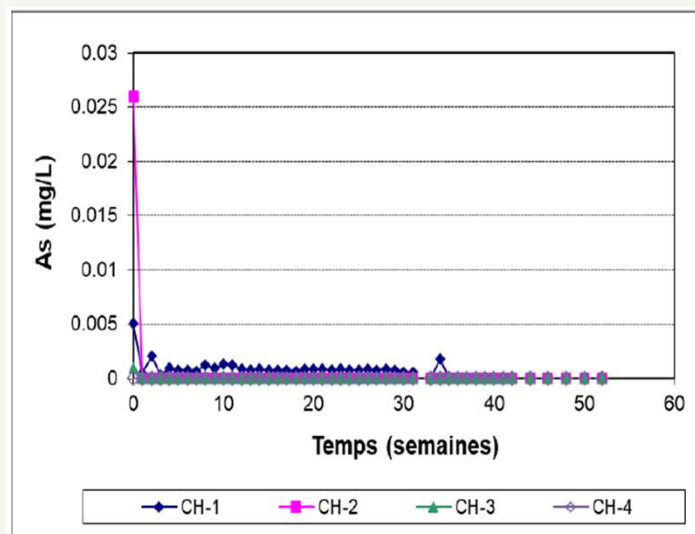


Les métaux sont contenus dans les sulfures

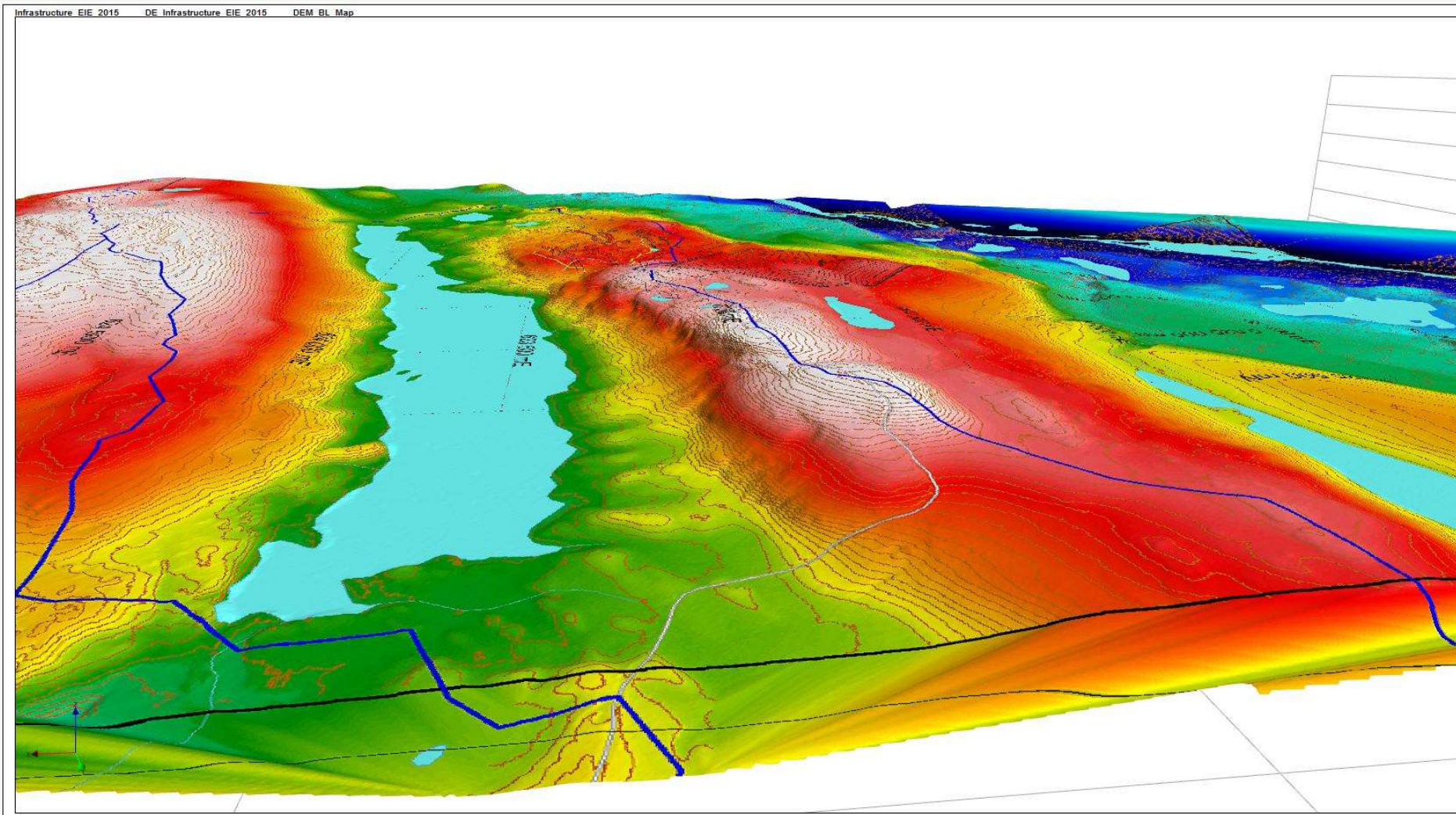


Les lixiviats (eaux d'exhaures)

- Les essais en cellules humides sur les résidus ont fourni une composition anticipée des eaux d'exhaures.
- Il peut être assumé que la composition des lixiviats en laboratoire représente approximativement celle des lixiviats naturels provenant de l'oxydation du gisement en surface.

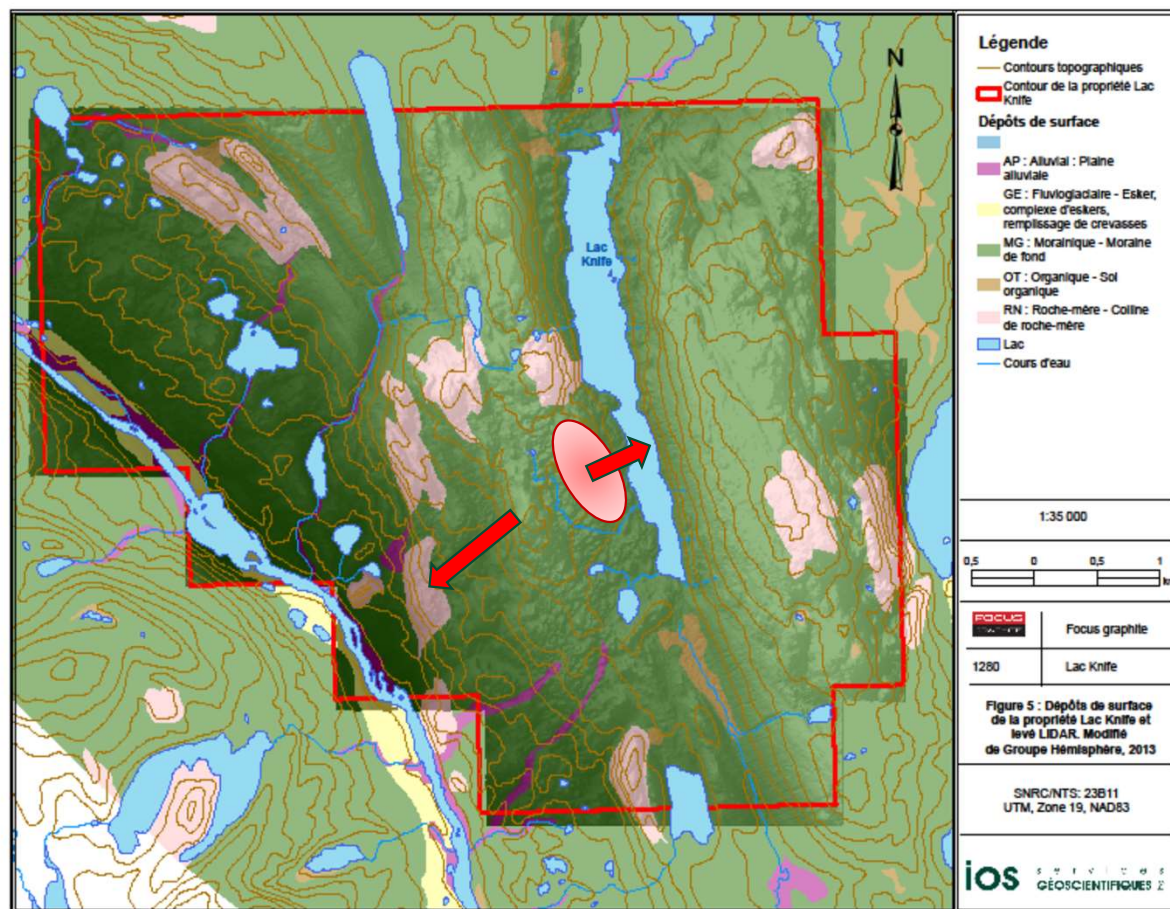


Topographie *Dépôt près de la crête...*



Ruissellement de surface

- Le dépôt est situé près de la crête et de la ligne de partage des bassins versants.
- **Le ruissellement de surface s'écoule vers le lac Knife (est)**
- L'écoulement souterrain via la fracturation du massif rocheux s'écoule vers la rivière au Pékans (ouest).
- La dispersion glaciaire était vers le sud-sud-est
- La dispersion éolienne est vers le nord-est



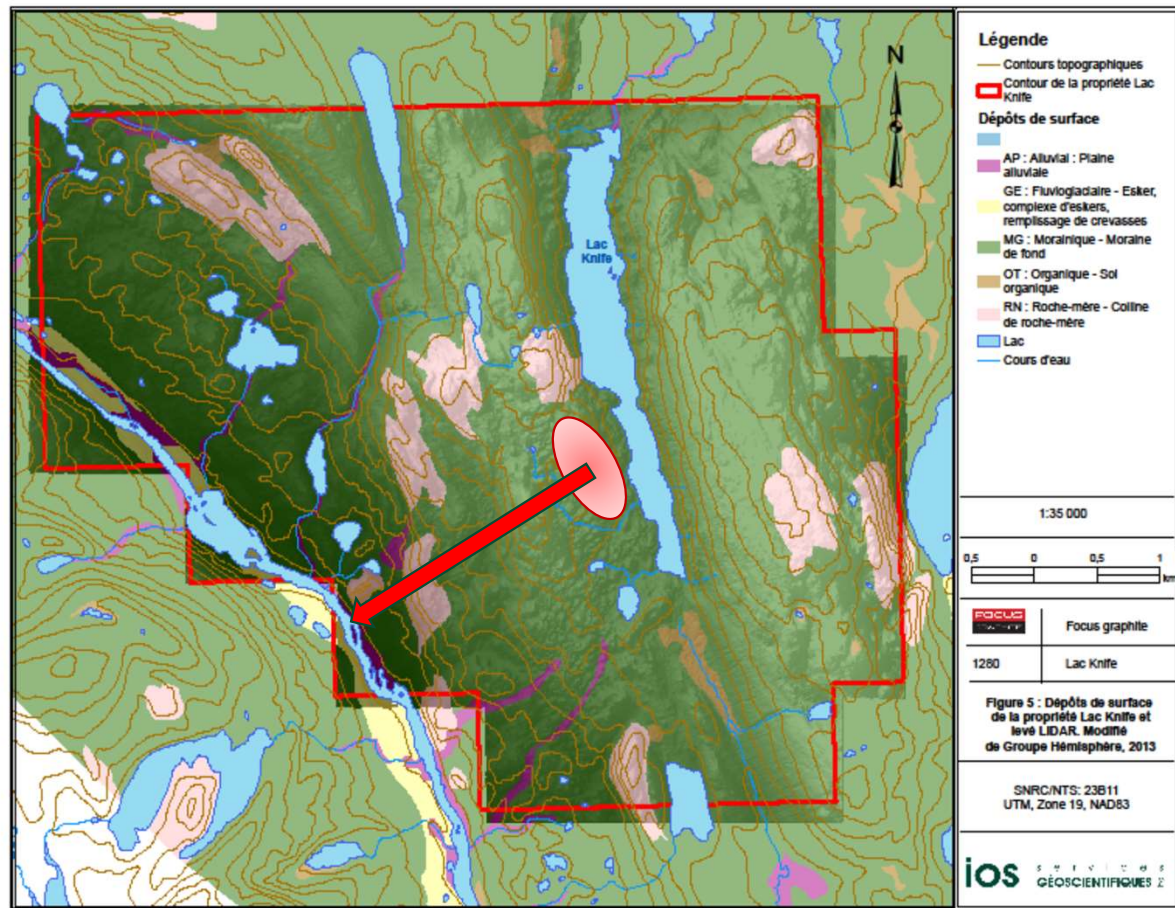
iStock.com

De l'innovation émerge la richesse



Écoulement hydrique souterrain

- Le dépôt est situé près de la crête et de la ligne de partage des bassins versants.
- Le ruissellement de surface s'écoule vers le lac Knife (est)
- **L'écoulement souterrain via la fracturation du massif rocheux s'écoule vers la rivière au Pékans (ouest).**
- La dispersion glaciaire était vers le sud-sud-est
- La dispersion éolienne est vers le nord-est



iStock.com

De l'innovation émerge la richesse

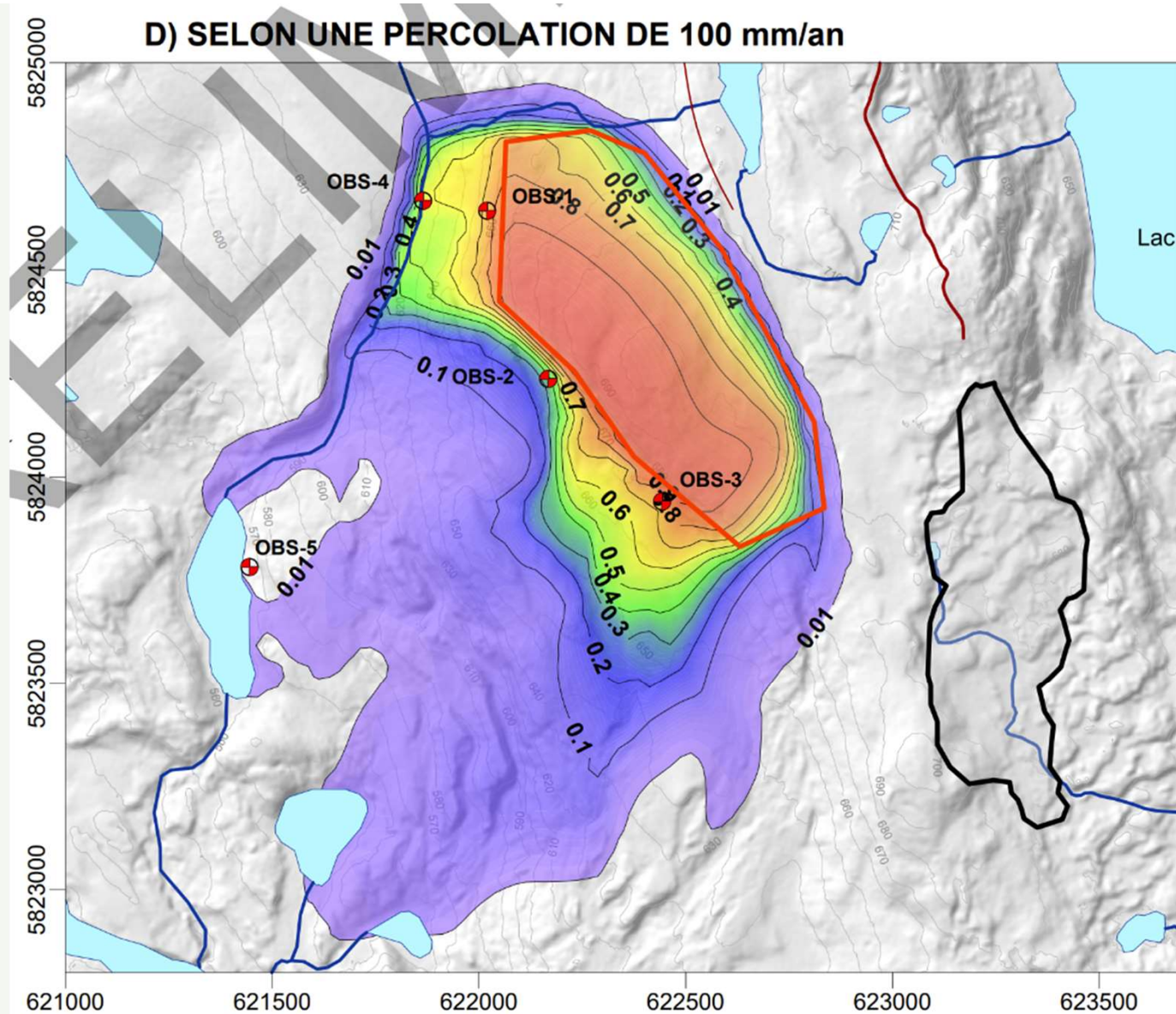


Écoulement hydrique sou-terrain

- Vertical dans le mort-terrain
- Tangentiel dans le massif rocheux
- Vers la rivière au Pékan (point le plus bas)
- Résurgences à flanc de colline

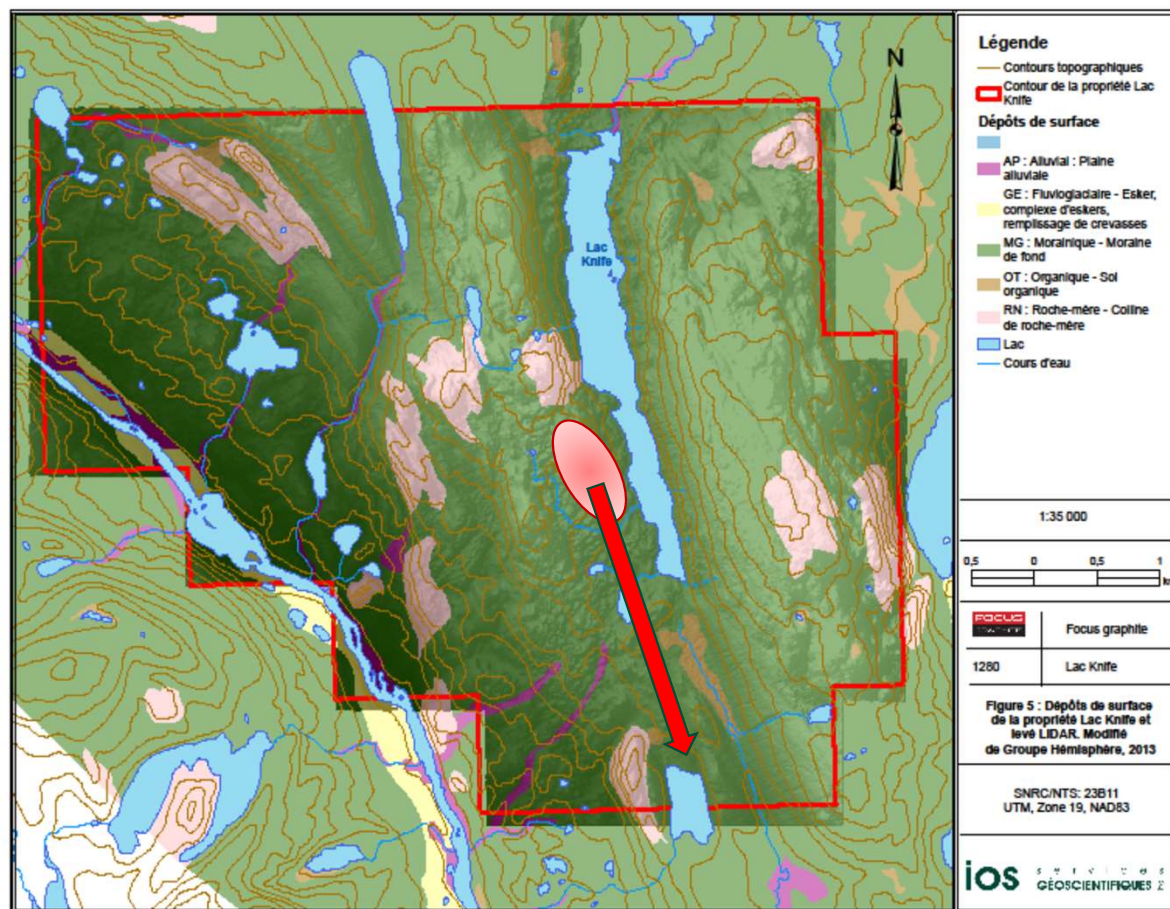


iStock.com



Dispersion glaciaire

- Le dépôt est situé près de la crête et de la ligne de partage des bassins versants.
- Le ruissellement de surface s'écoule vers le lac Knife (est)
- L'écoulement souterrain via la fracturation du massif rocheux s'écoule vers la rivière au Pékans (ouest).
- **La dispersion glaciaire était vers le sud-sud-est**
- La dispersion éolienne est vers le nord-est



iStock.com

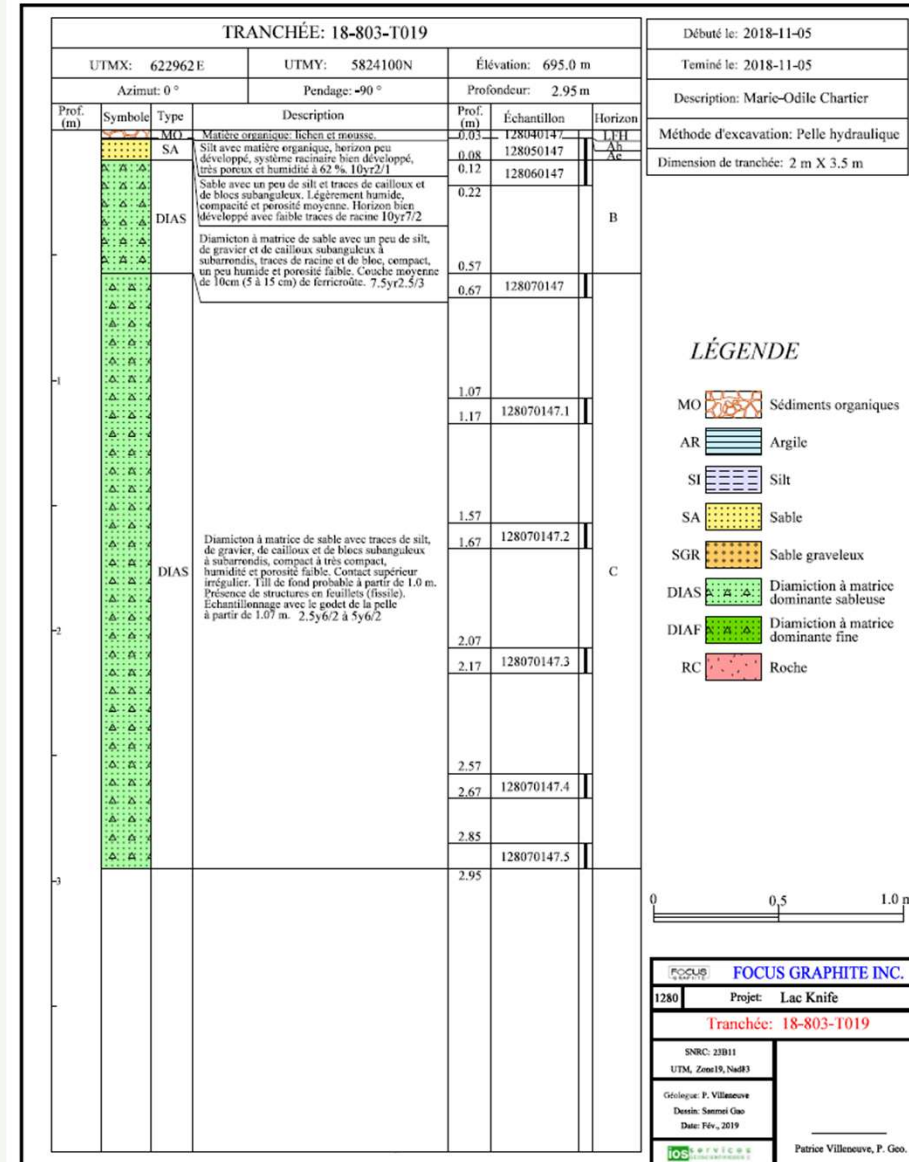
De l'innovation émerge la richesse



Géochimie des sols

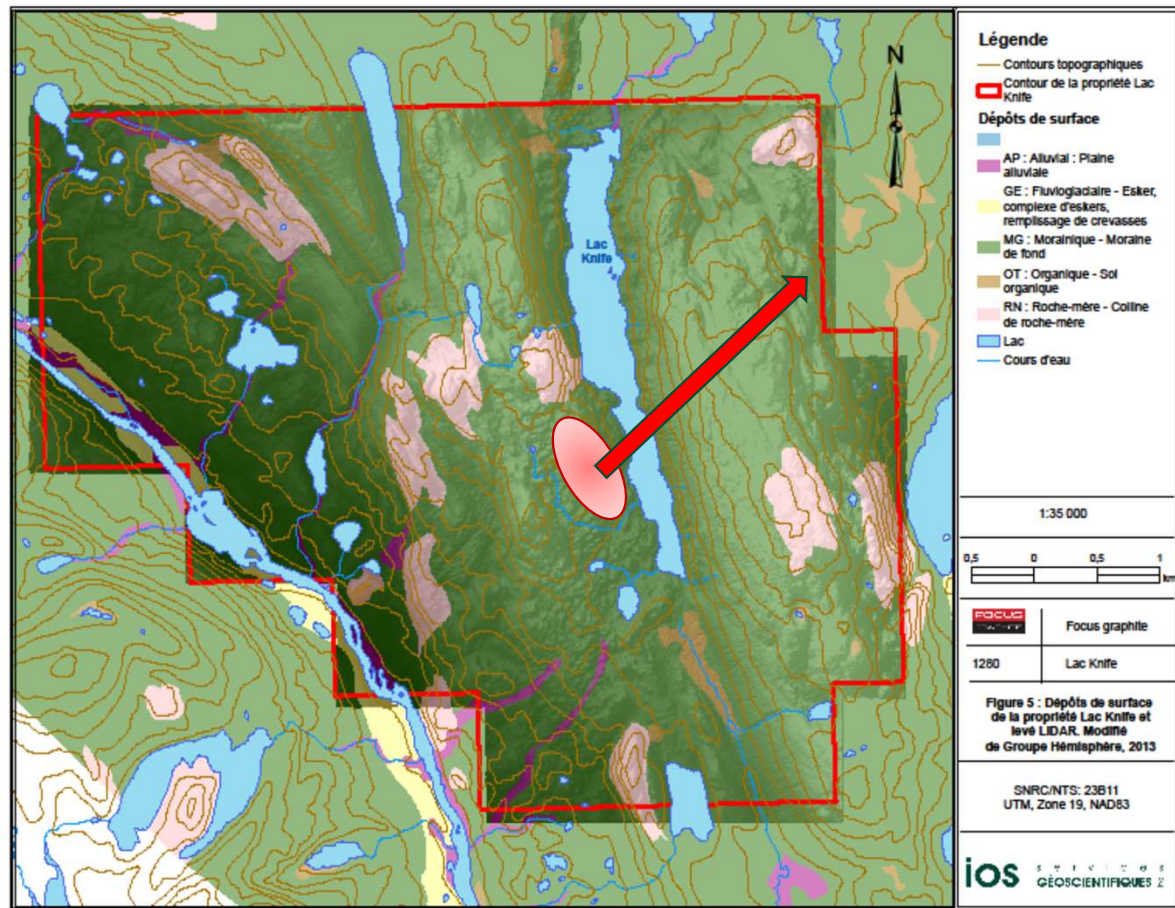
- 106 sites
 - Surfaces
 - Tranchées
 - Forages géotechniques
- 722 échantillons
- Profils
 - Horizon A_h (135 échantillons)
 - Horizon A_e (132 échantillons)
 - Horizon B (142 échantillons)
 - Horizon C (till) (313 échantillons)
- Digestion à l'Aqua Forte

iStock.com



Déflation éolienne post-glaciaire

- Le dépôt est situé près de la crête et de la ligne de partage des bassins versants.
- Le ruissellement de surface s'écoule vers le lac Knife (est)
- L'écoulement souterrain via la fracturation du massif rocheux s'écoule vers la rivière au Pékans (ouest).
- La dispersion glaciaire était vers le sud-sud-est
- **La dispersion éolienne est vers le nord-est**

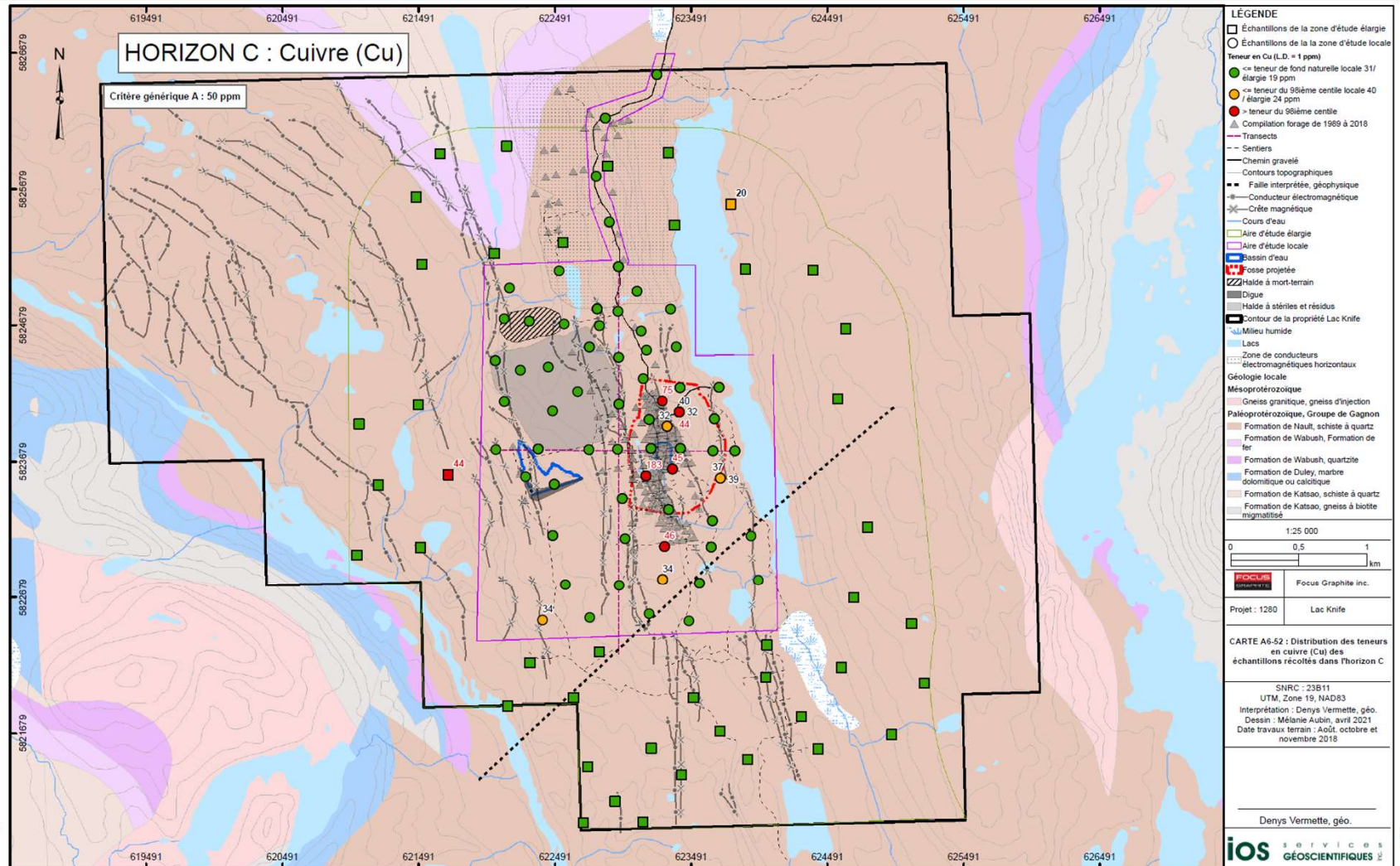


iStock.com

De l'innovation émerge la richesse

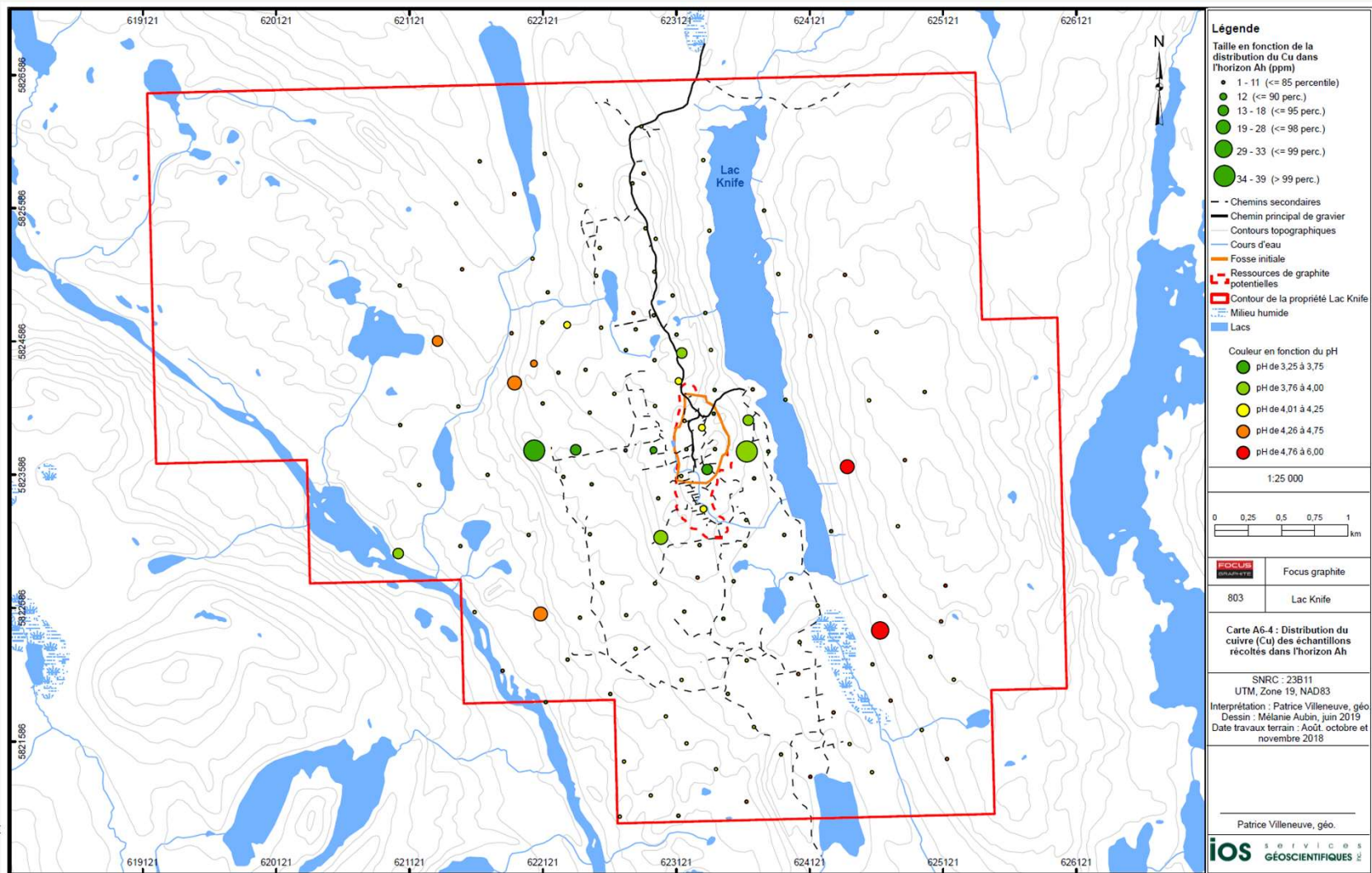


Cuivre dans l'horizon C (carte environnementale)



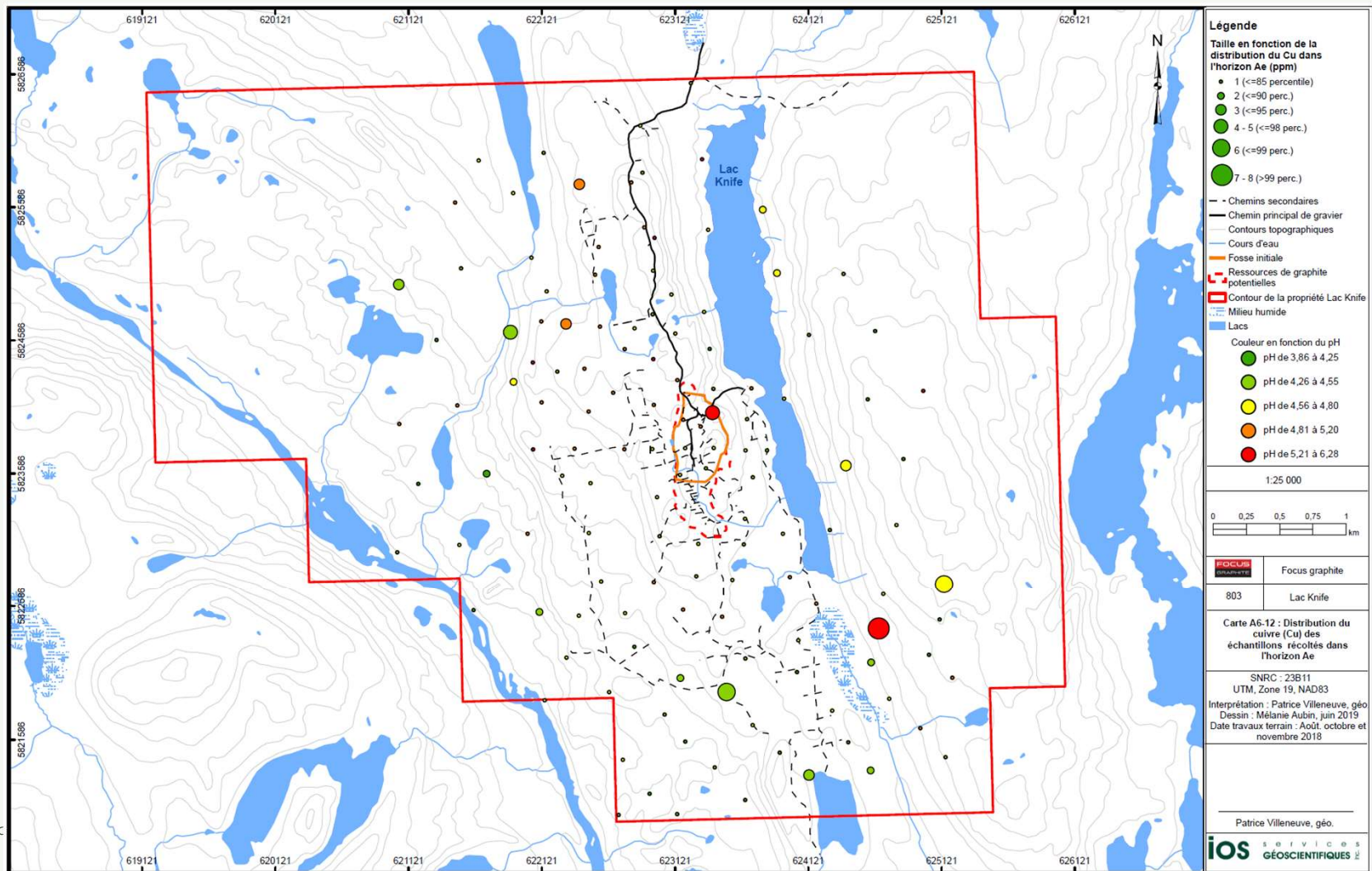
iStock.com

Cuivre dans l'horizon A₀ (humus)



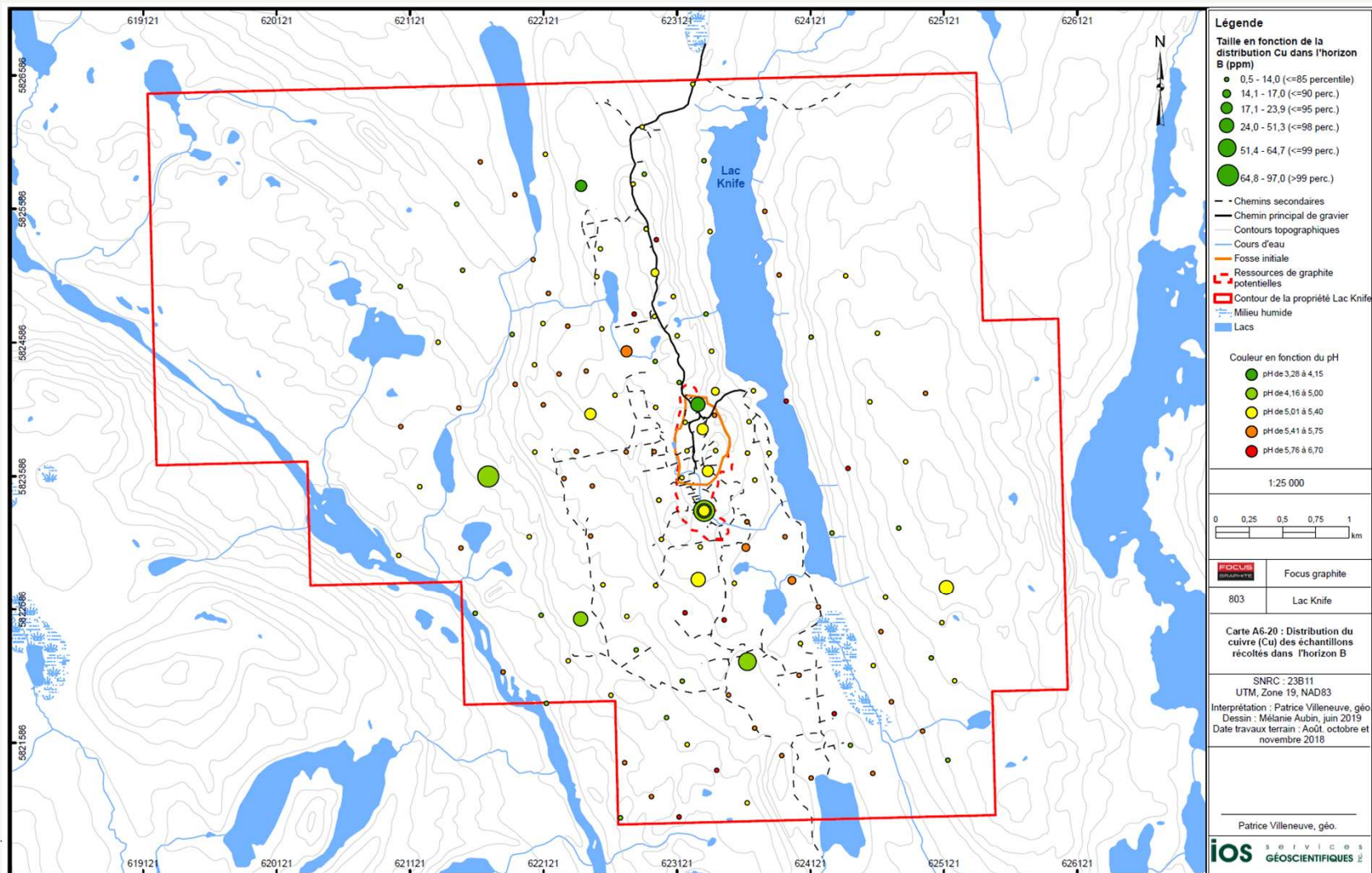
iStock.c

Cuivre dans l'horizon A_e (horizon lixivié)



iStock.c

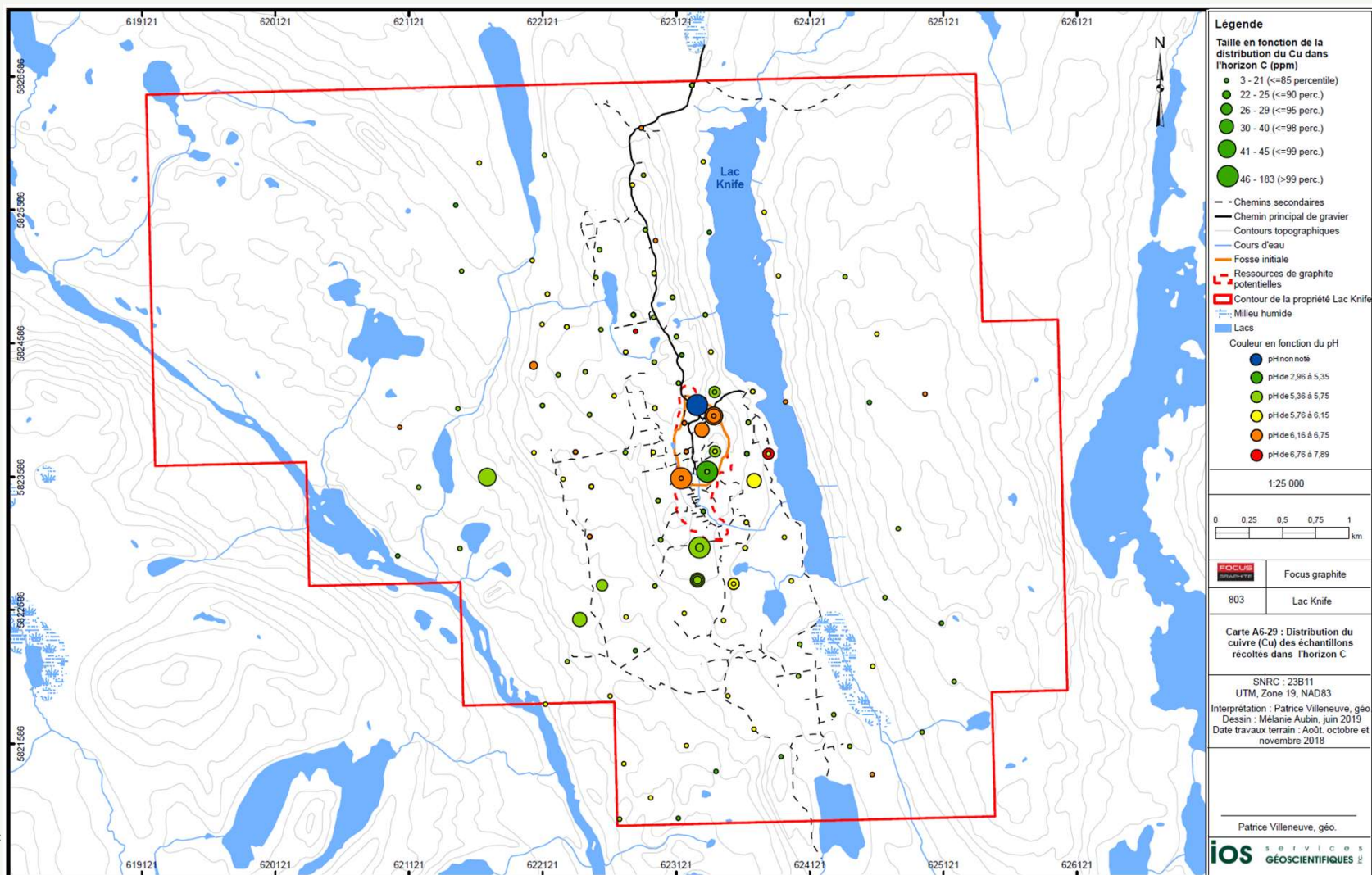
Cuivre dans l'horizon B (zone oxydée)



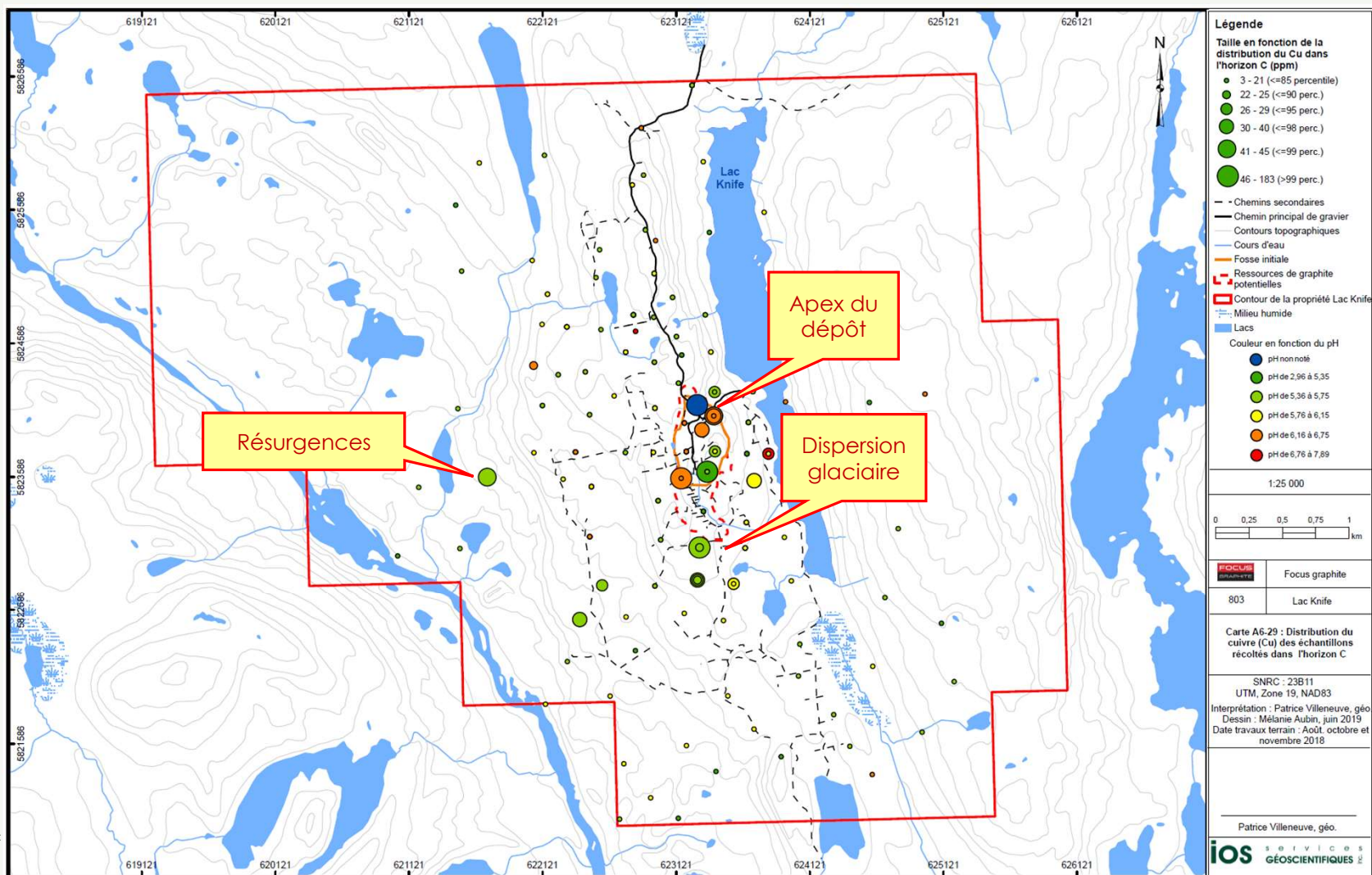
iStock.



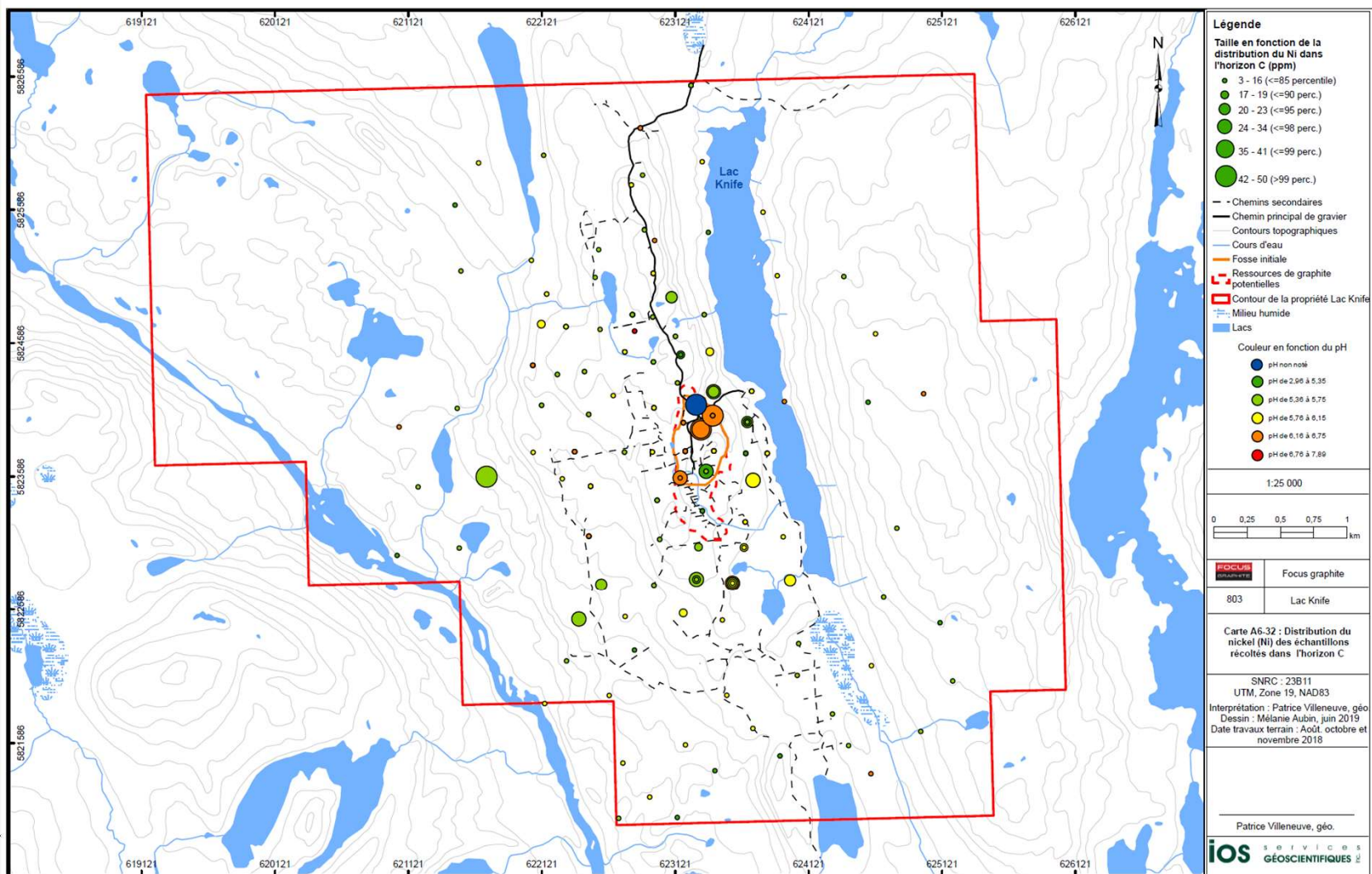
Cuivre dans l'horizon C (till)



Cuivre dans l'horizon C (till)

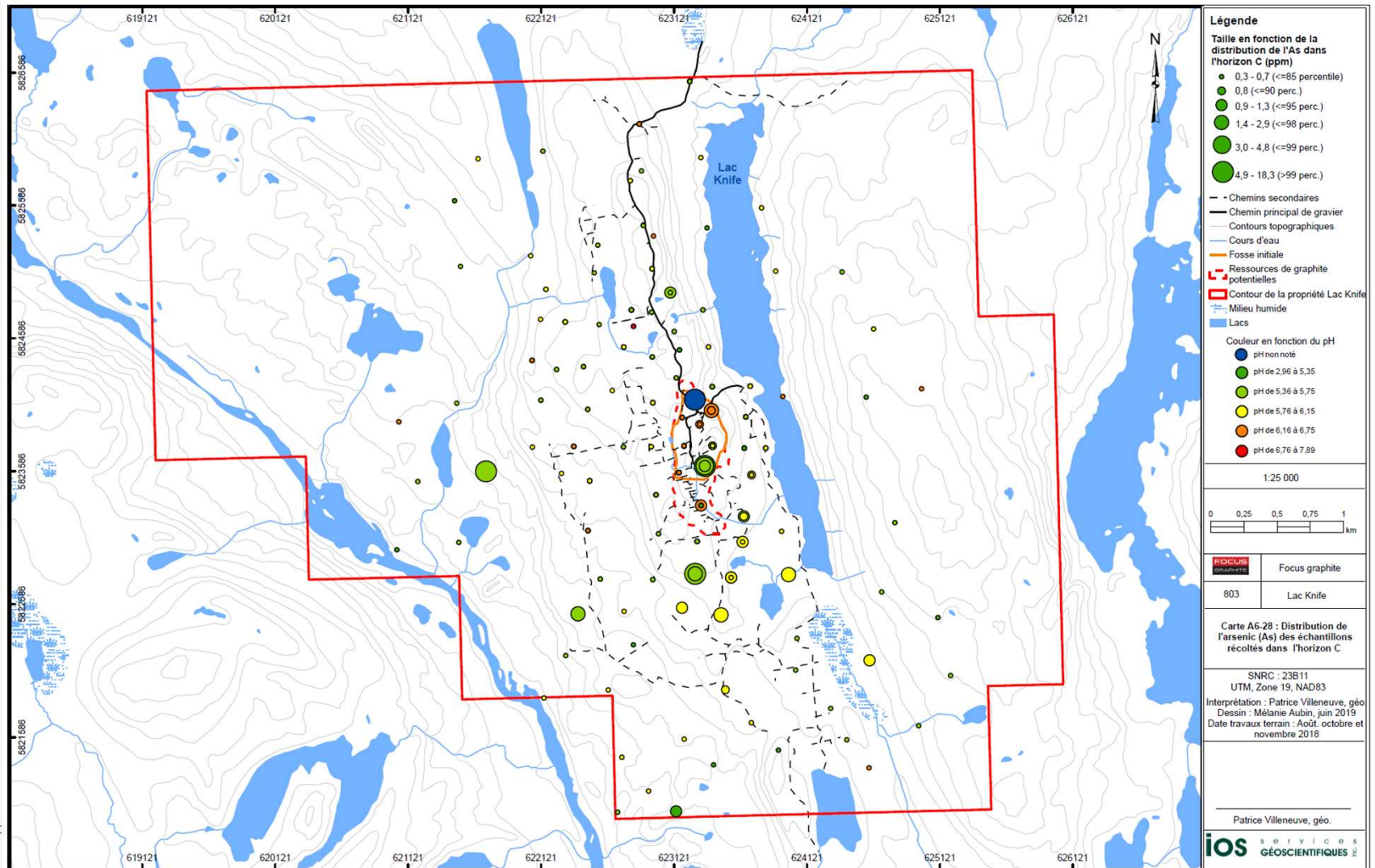


Nickel dans l'horizon C



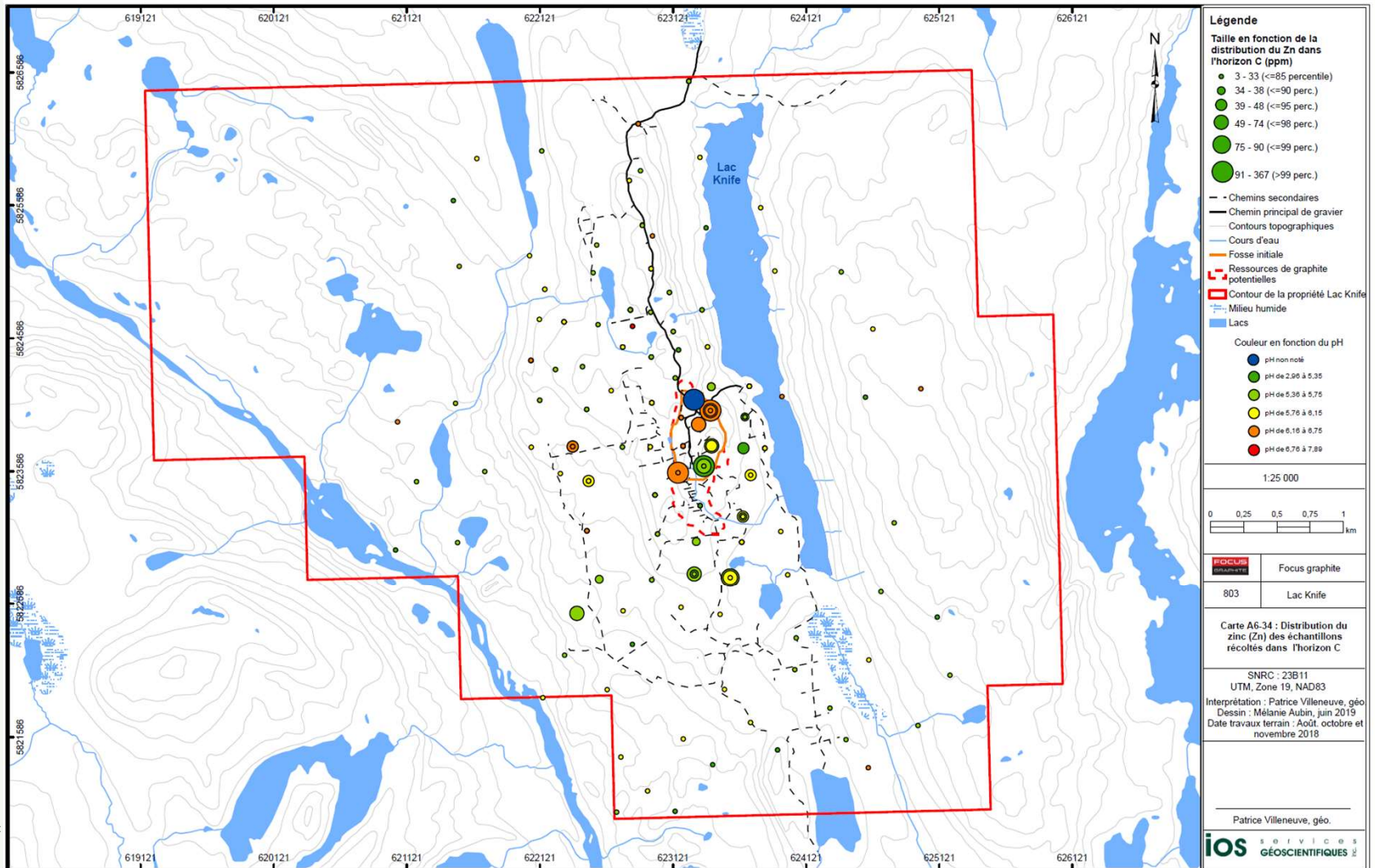
iStock

Arsenic dans l'horizon C



iStc

Zinc dans l'horizon C

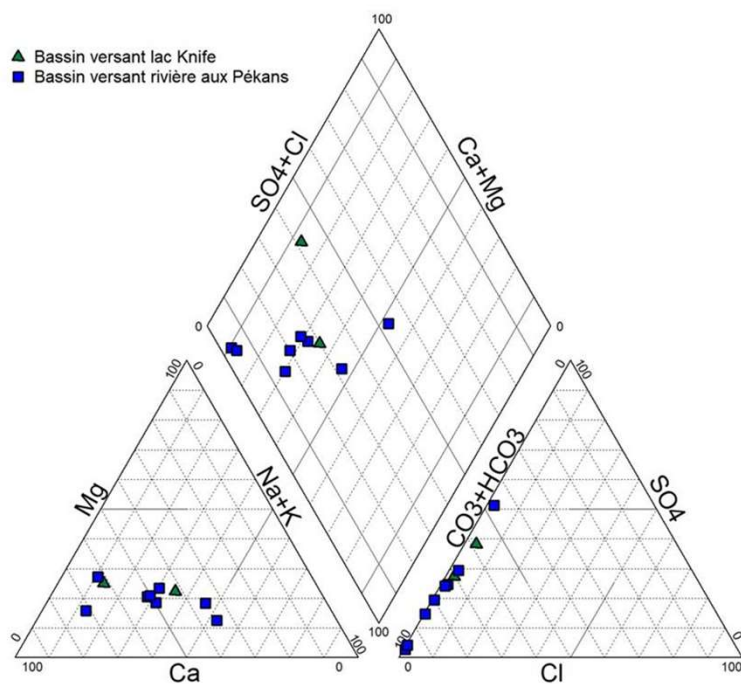


iStoc

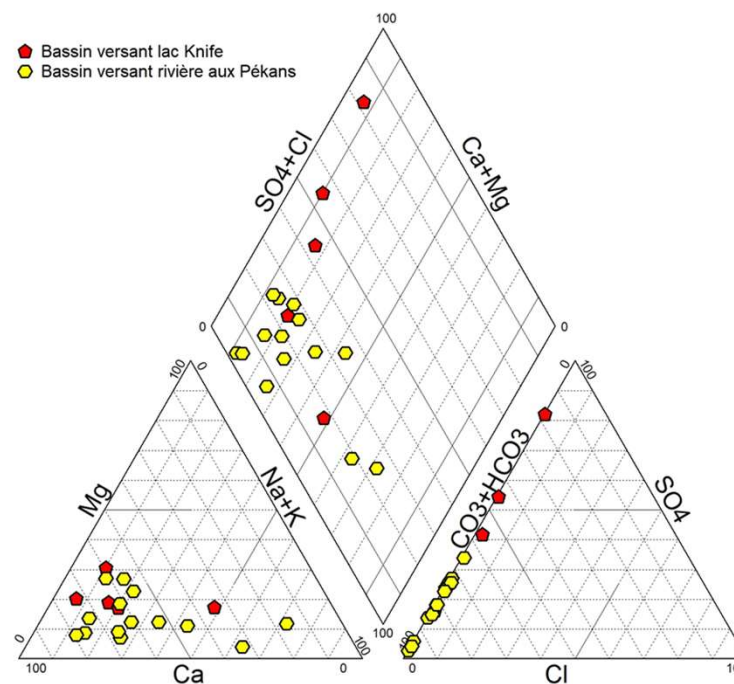
Eaux souterraines

- ±30 Puits d'échantillonnage / Piézomètres
- Profils sur les forages

Piper dépôts meubles par bassin versant 2018



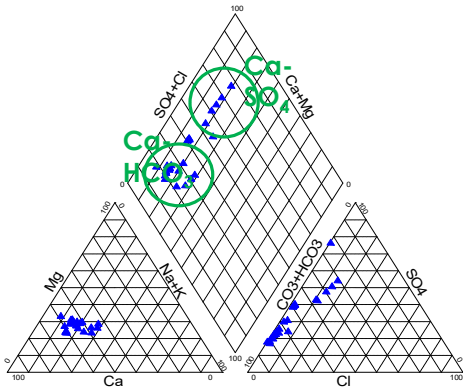
Piper Roc par bassin versant 2018



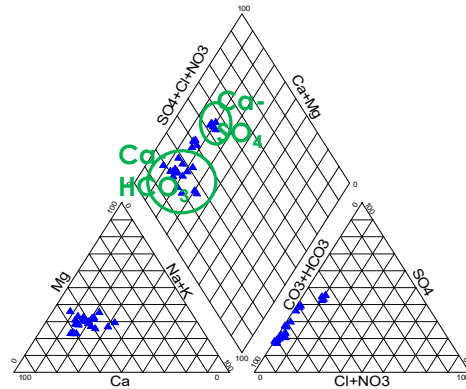
Variations temporelles

- Fluctuations induites par l'apport de sulfates!

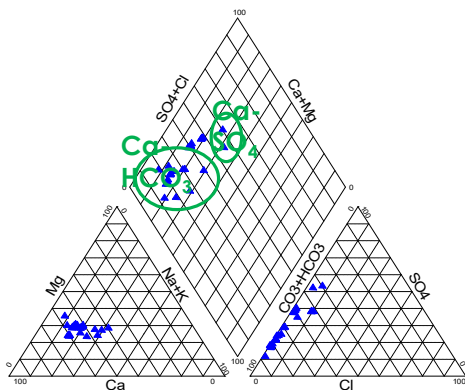
Piper eau de surface juillet 2020



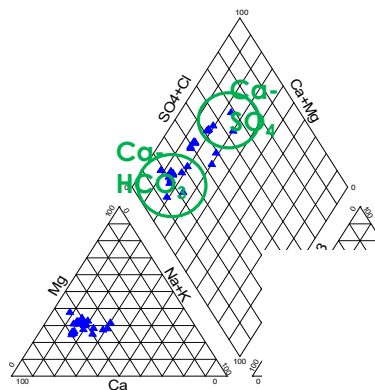
Piper eau de surface août 2020



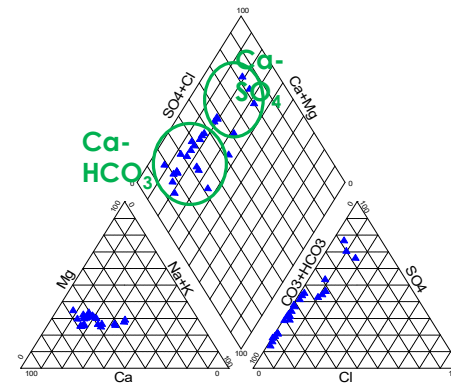
Piper eau de surface septembre 2020



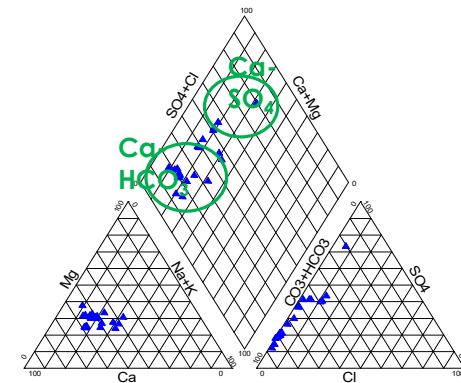
Piper eau de surface octobre 2020



Piper eau de surface juillet 2021

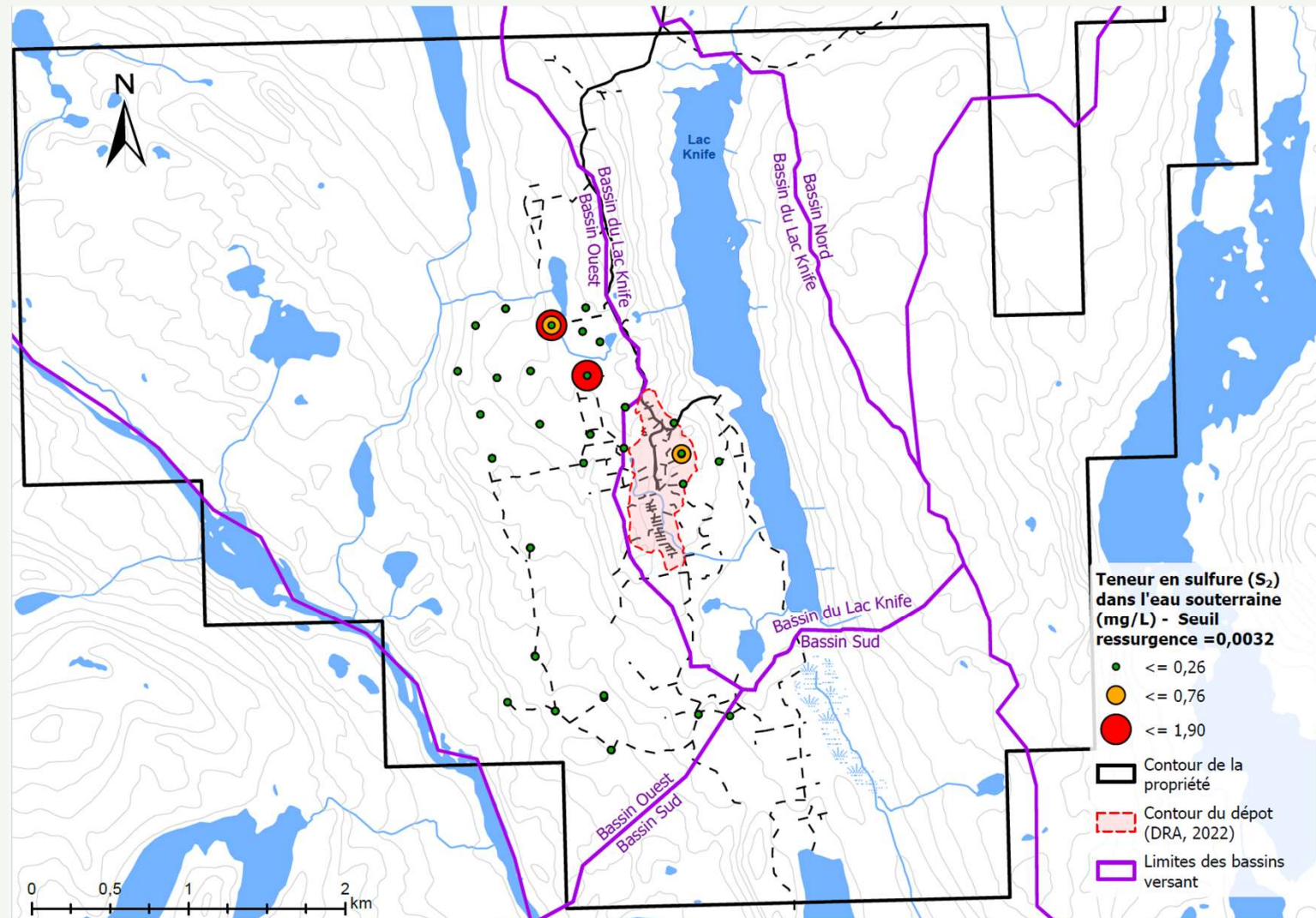


Piper eau de surface août 2021



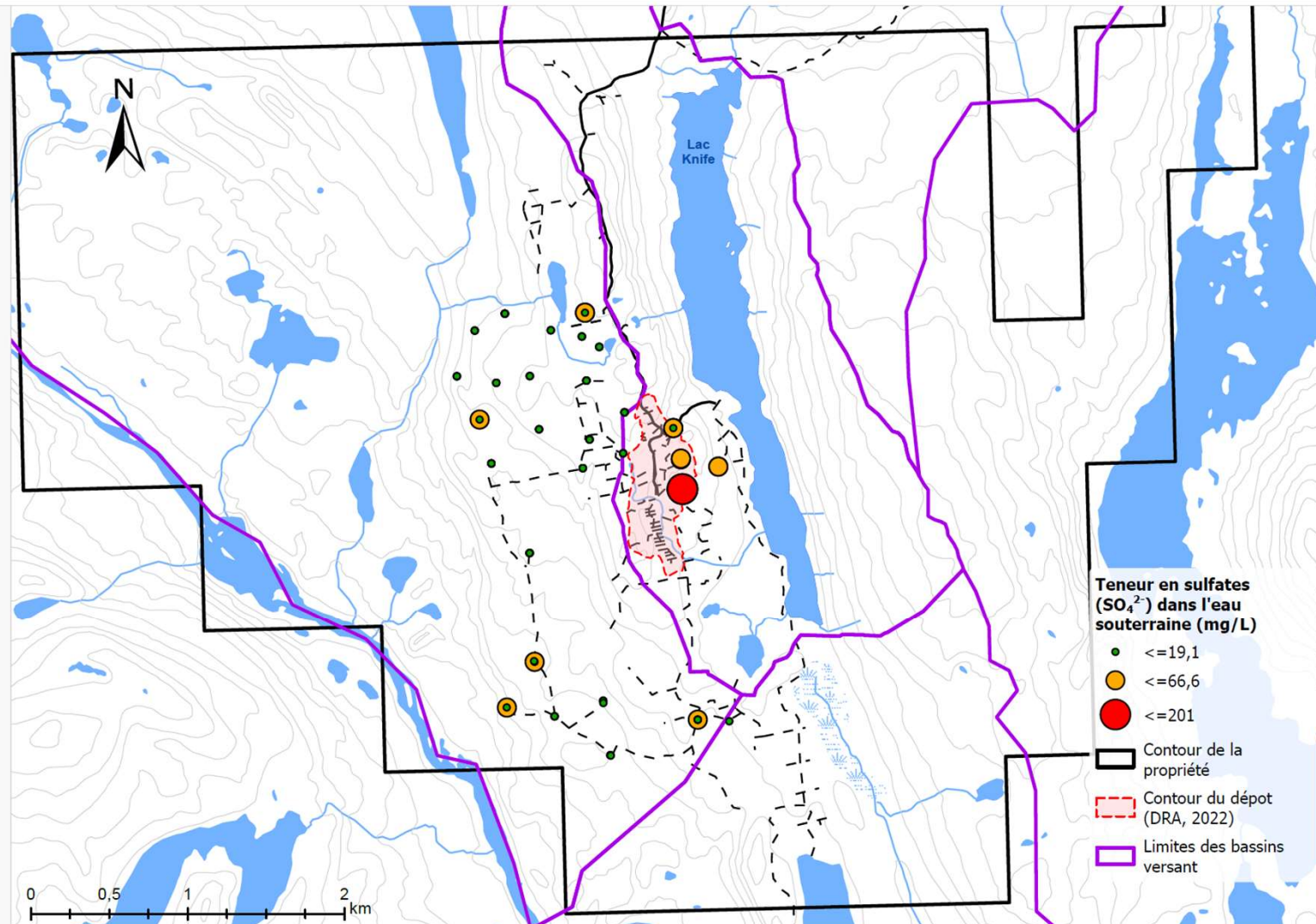
Sulfure (S^{-2}) dans les eaux souterraines

Dispersion vers
le nord-ouest
?!?



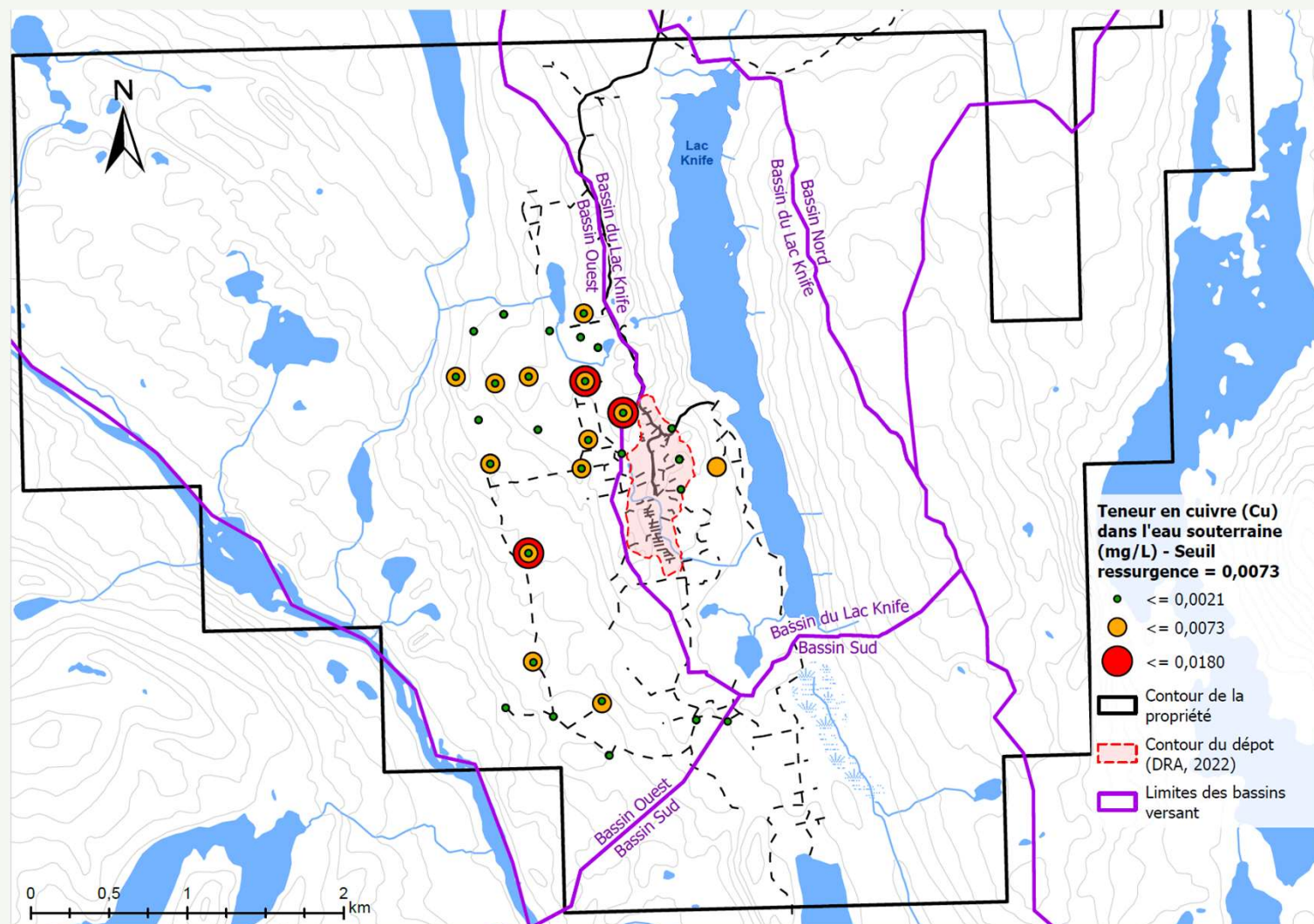
Sulphates (SO_4^{-2}) dans les eaux souterraines

Dispersion vers
Le lac Knife,
mais
rapidement
atténué



Cuivre dans les eaux souterraines

Dispersion vers
la rivière aux
Pékans



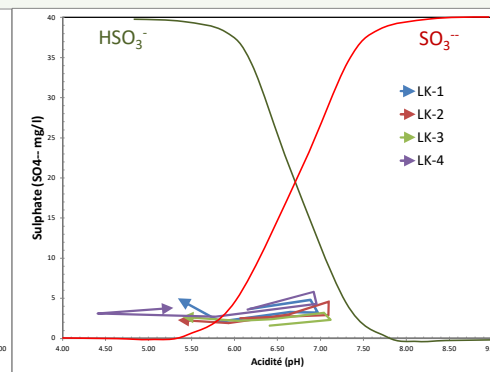
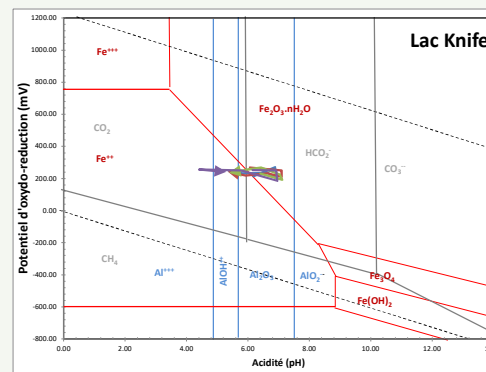
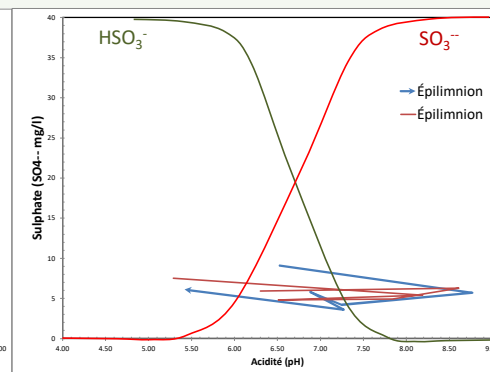
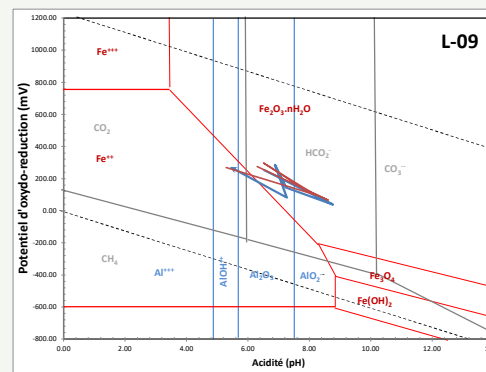
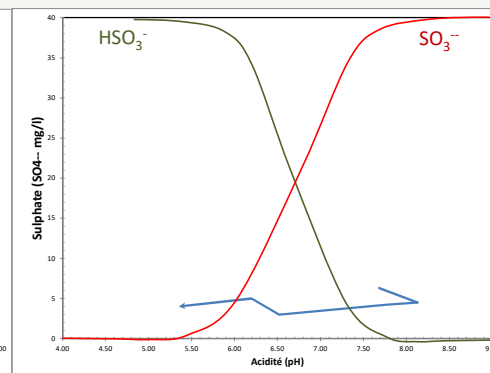
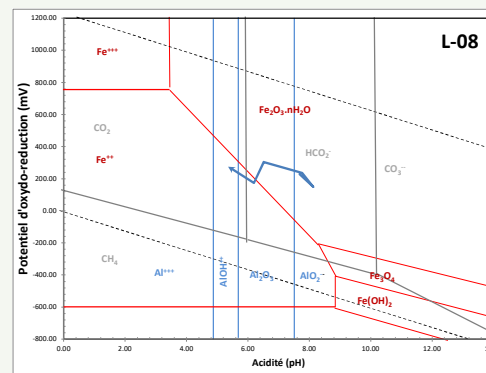
iStock.com



Chimie des eaux de surface

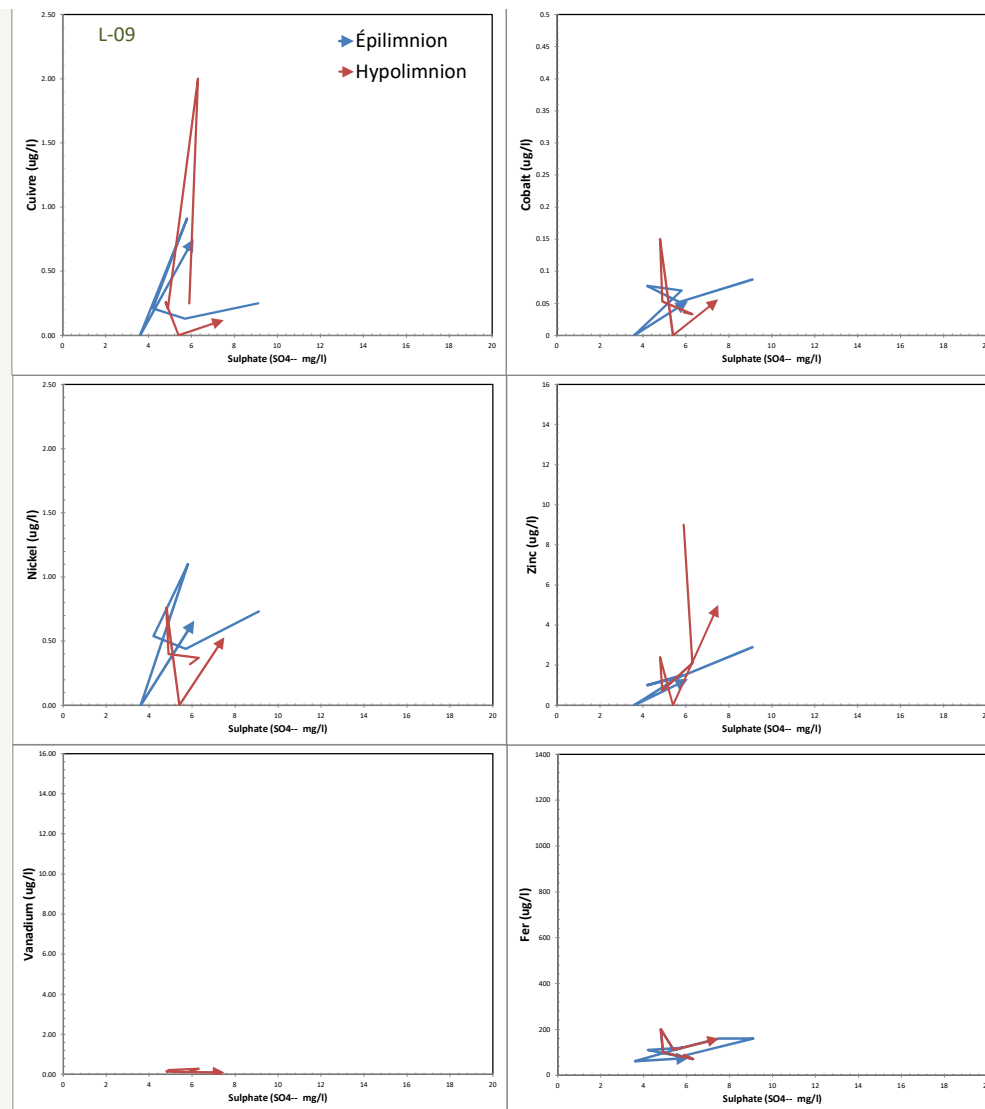
- 13 Lacs ou rivières
- 18 Sites échantillonnés
- Profils dans les lacs profonds
- 6 cycles d'échantillonnage sur 2 ans
- 172 analyses
- Acidité limitée par le champ de stabilité des bicarbonates et la précipitation d' Al_2O_3 : Quasi neutre!
- Fluctuations de l'acidité liées à l'abondance des sulfates

Oxydo-réduction contrôlée par le fer



Chimie des eaux de surfaces

- Fluctuations temporelles erratiques
- Teneur en métaux découplée de l'abondance des sulfates
- Pas de différences significatives entre l'épilimnion et l'hypolimnion



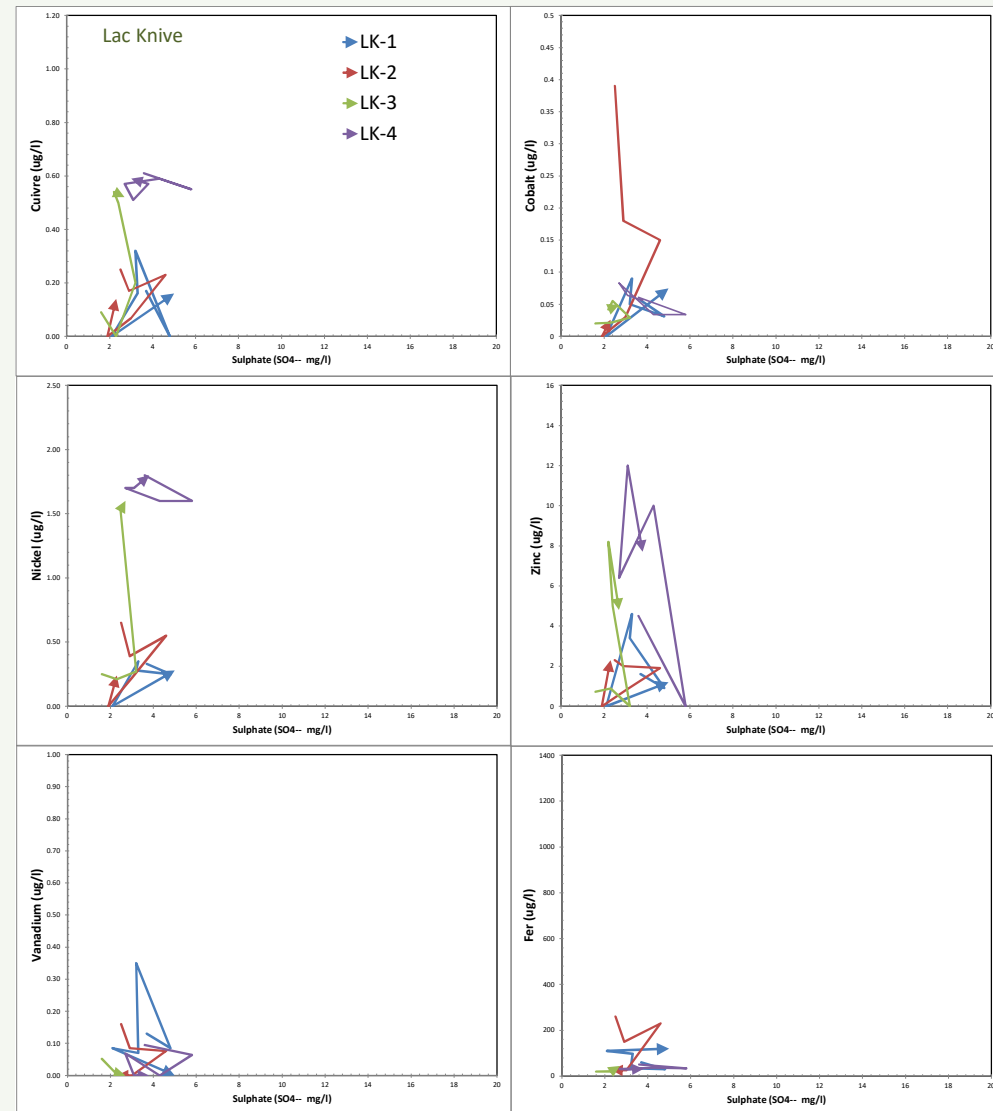
iStock.com

De l'innovation émerge la richesse



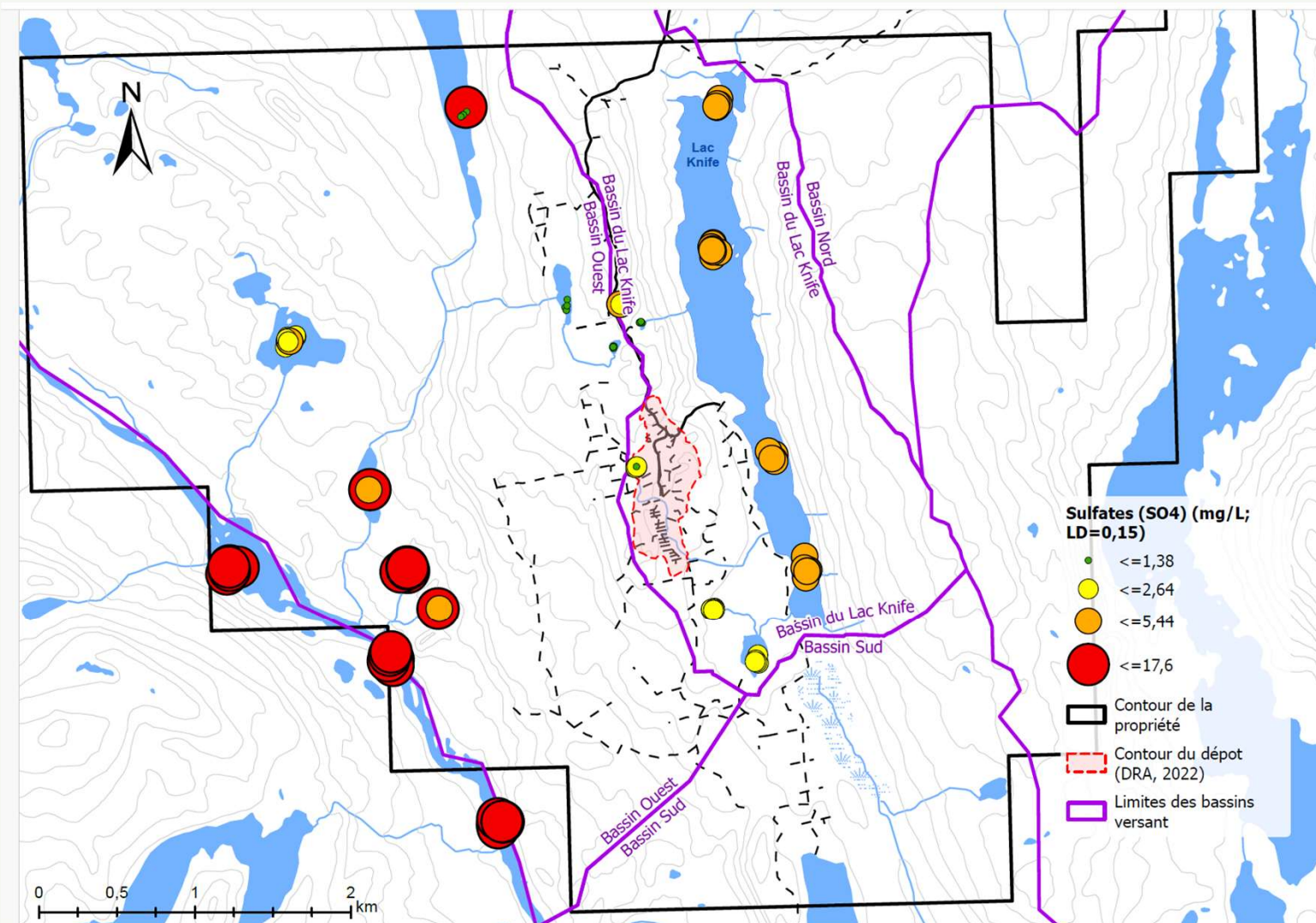
Chimie des eaux de surfaces

- Généralement pas de différence entre les différents sites d'échantillonnage dans un même lac
- Fluctuations temporelles erratique → Bruit!



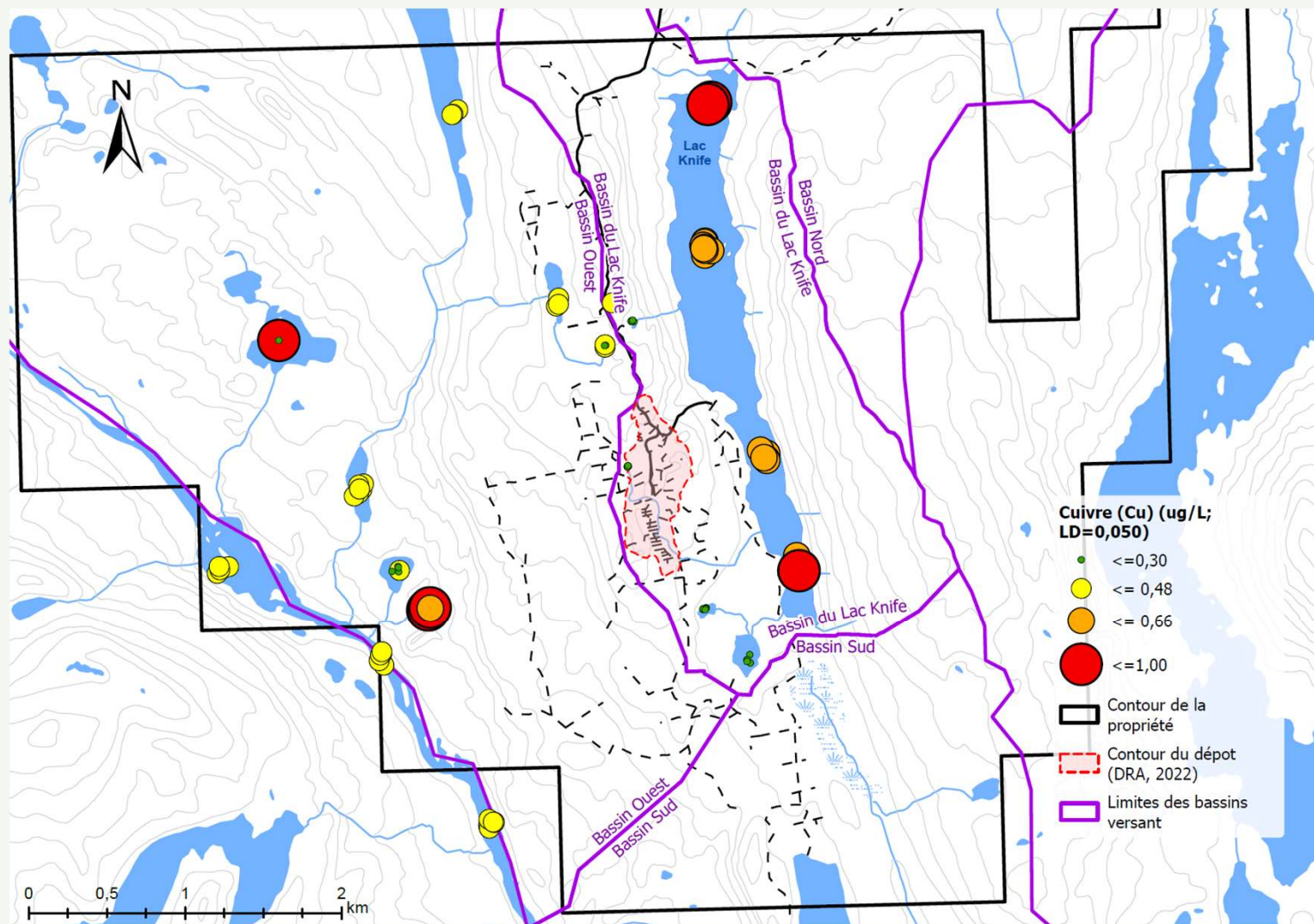
Sulfates dans les eaux de surface

- Reflète l'écoulement des eaux souterraines (résurgences)
- Peu de contamination par ruissellement



Cuivre dans les eaux de surface

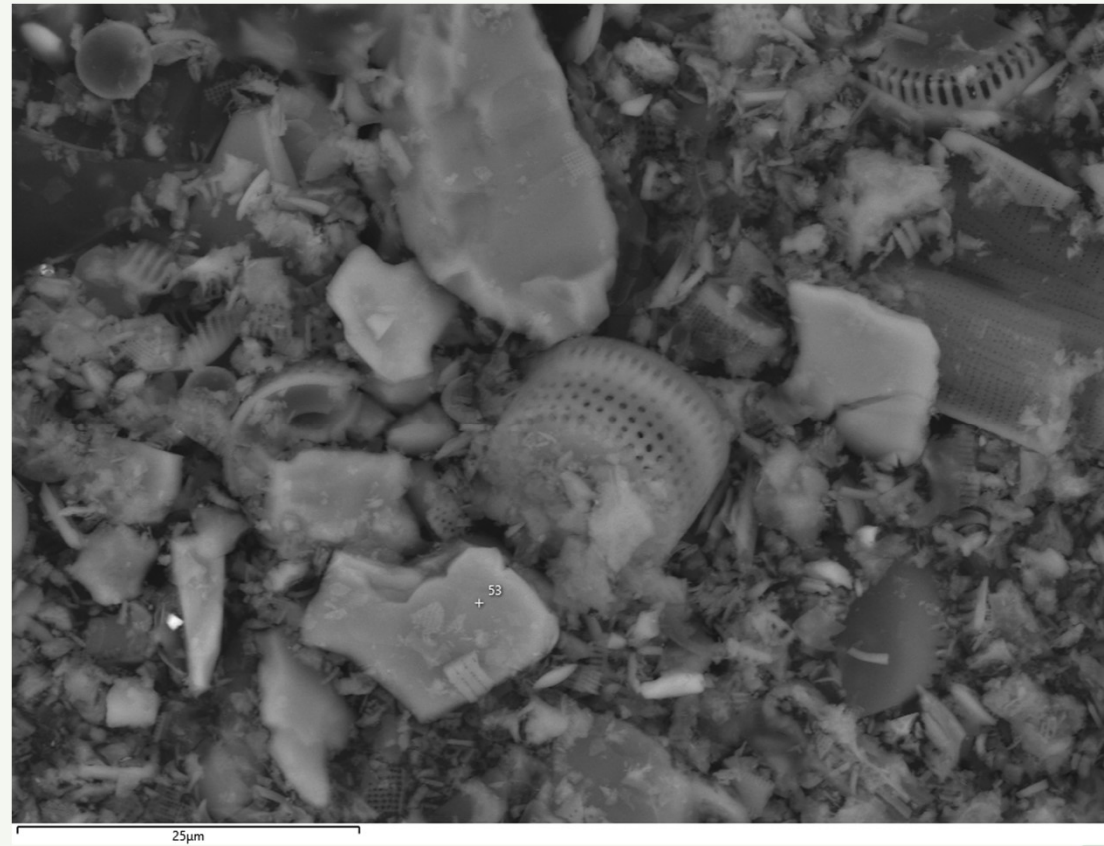
- Reflète l'écoulement des eaux souterraines (résurgences)... et du ruissellement
- Partiellement découplé de la dispersion des sulfates
- Pas de contamination apicale



iStock.com

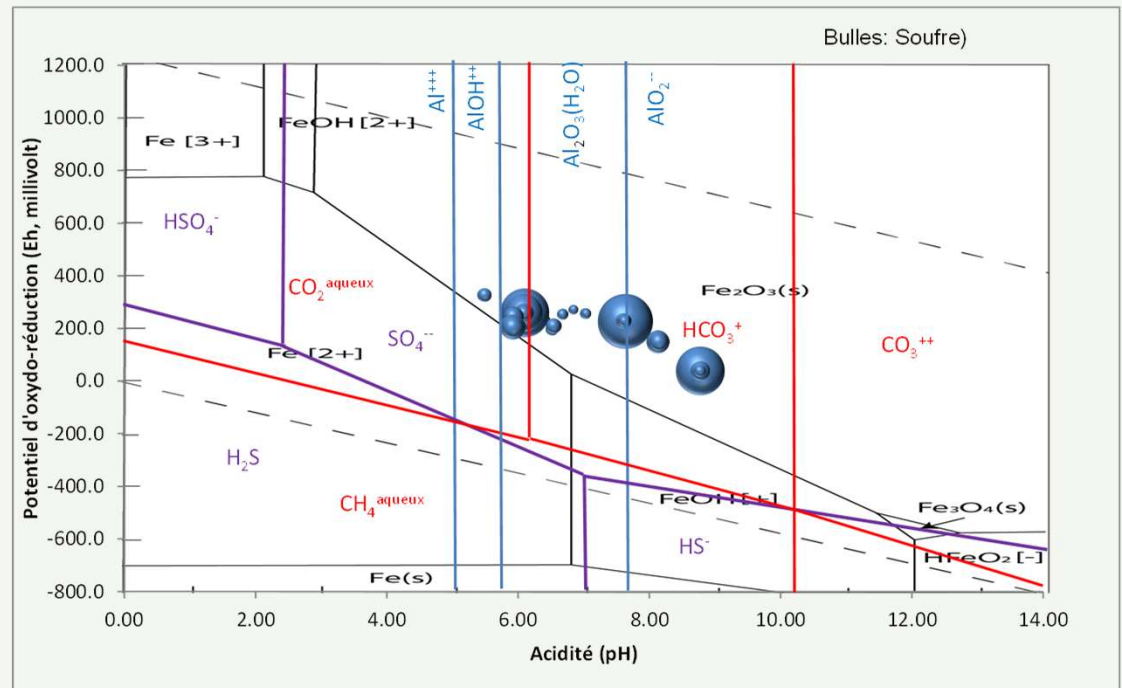
Chimie des sédiments de fonds de lacs

- 14 Lacs ou étangs
- 28 Sites échantillonnés
- 5 échantillons par sites
- 172 analyses
- Effectué à la mi-Août 2020



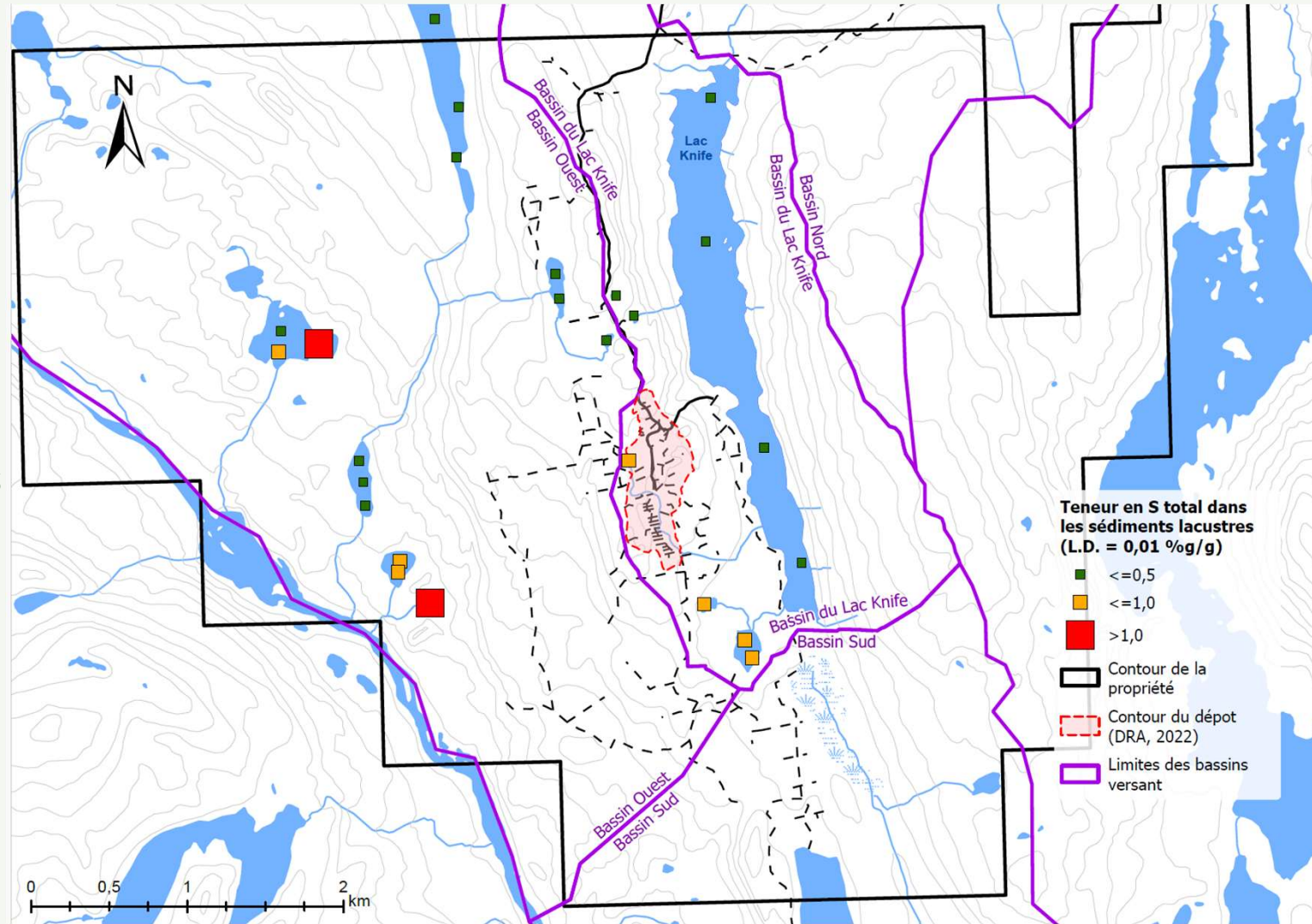
Chimie des sédiments de fonds de lacs

- Acidité limitée dans le champ de stabilité des bicarbonates et la précipitation d' Al_2O_3
- Champs de stabilité des sulfates
 - *Sulfures authigènes non-expliqués*
- Oxydo-réduction contrôlée par l'équilibre fer ferreux-ferrique



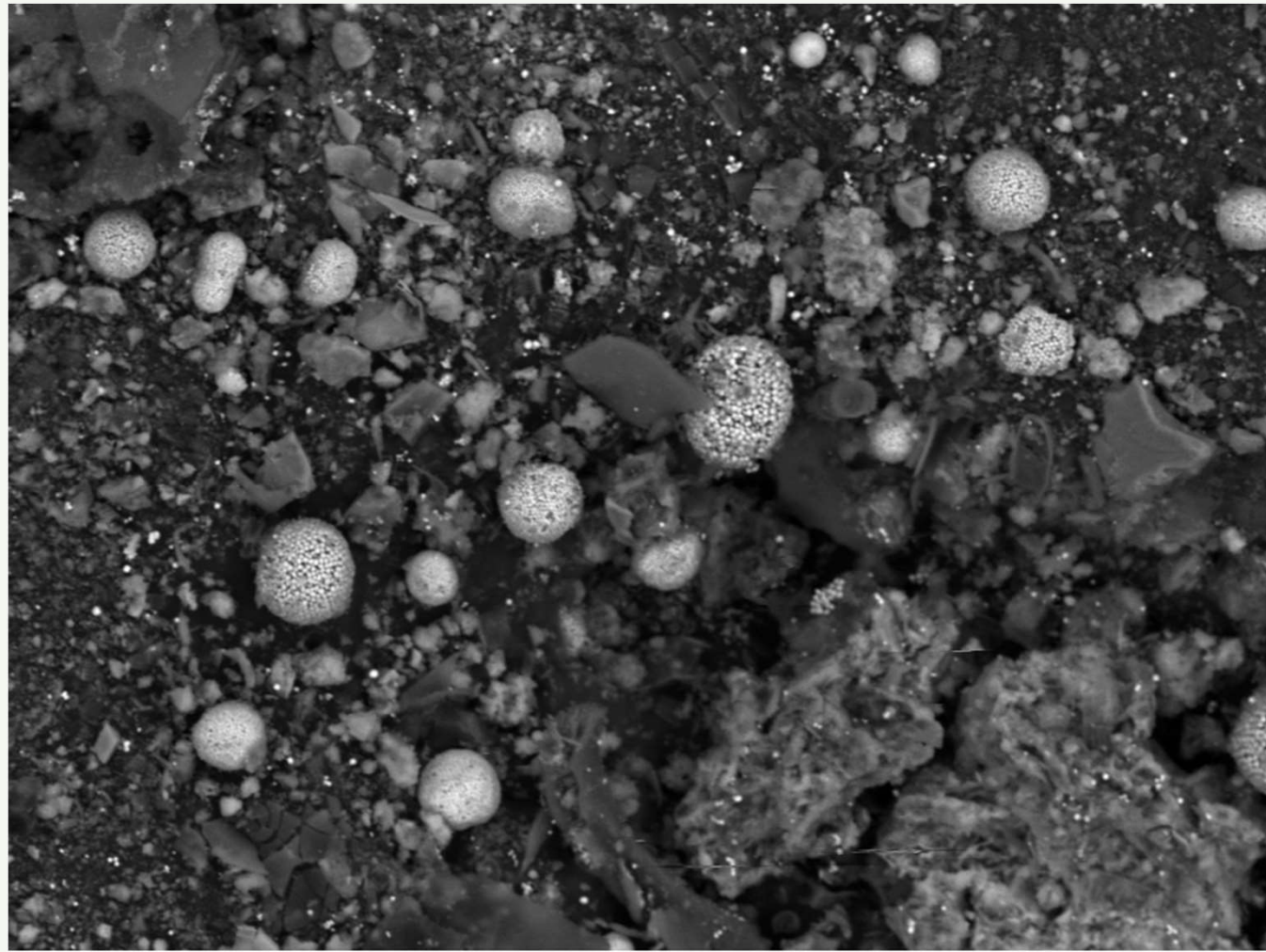
Soufre dans les sédiments lacustres

- Mimique la distribution des sulfates dans les eaux de surfaces
- Jusqu'à **6.7% S**
- Correspond aux résurgences des eaux souterraines.



Pyrite authigène dans les sédiments lacustres

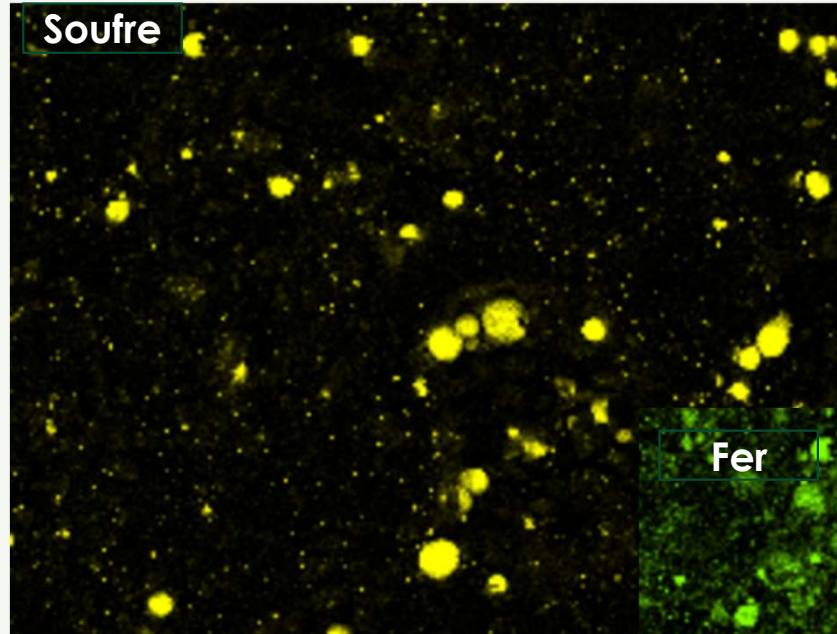
- Précipitation de pyrite framboïdale.
- Activité bactérienne, non à l'équilibre avec l'Eh-pH
- Reflète un milieu anoxique.
- Processus accumulatif
- Puit de métaux



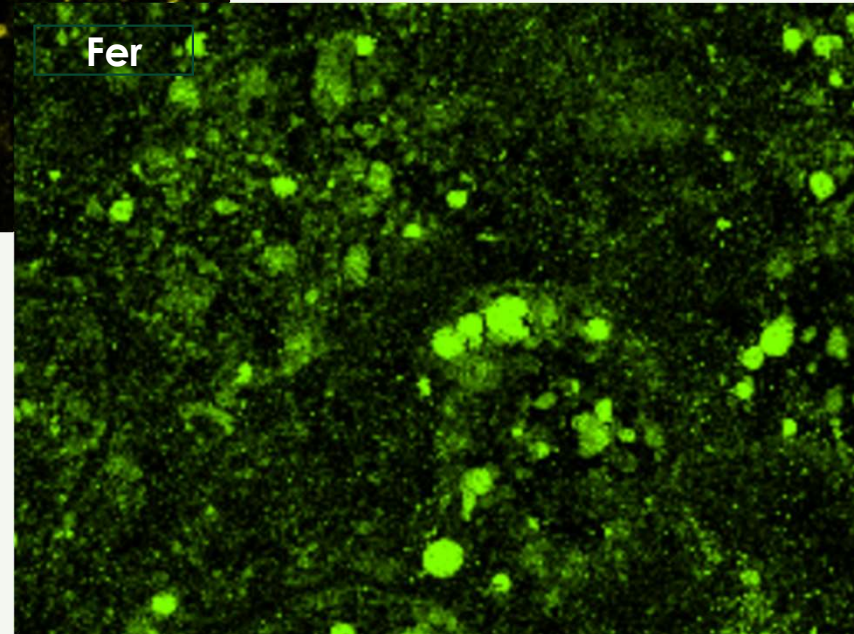
Pyrite authigène dans les sédiments lacustres

- Précipitation de pyrite framboïdale.
- Activité bactérienne, non à l'équilibre avec l'Eh-pH
- Reflète un milieu anoxique.
- Processus accumulatif
- Puit de métaux

Soufre

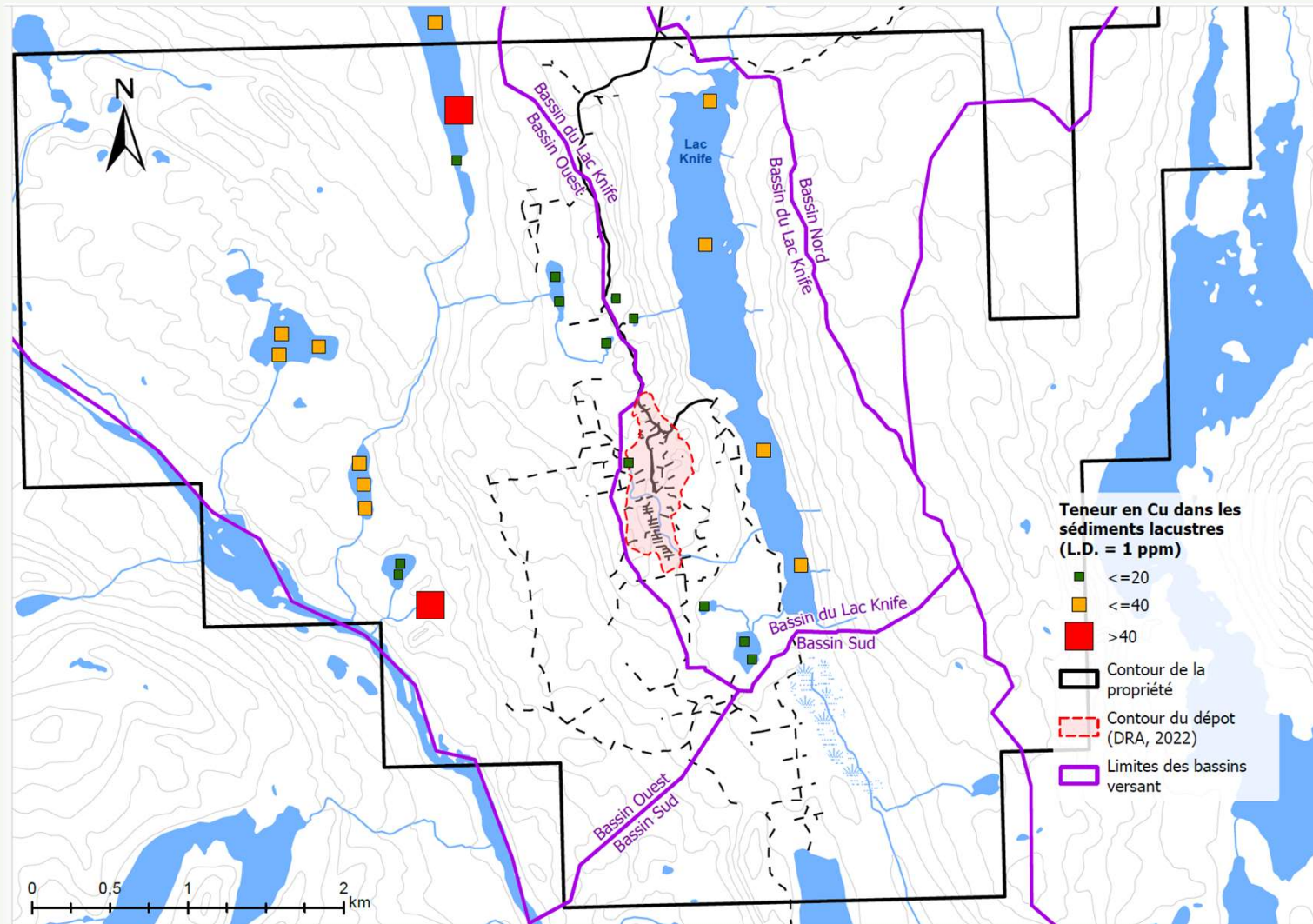


Fer



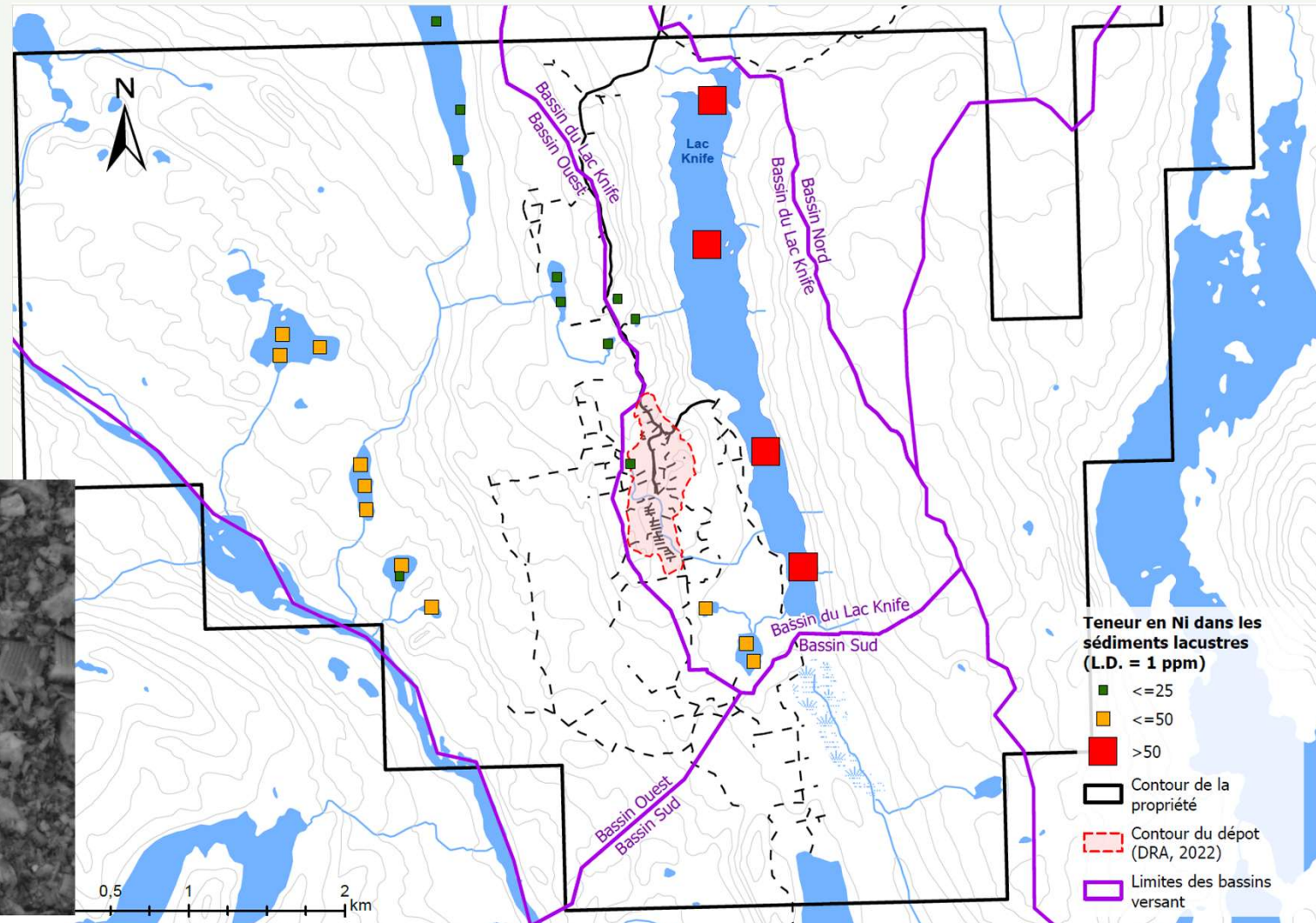
Cuivre dans les sédiments lacustres

- Distribution erratique
- Ne respecte pas les bassins versants!
- Pas d'enrichissement extrême
- Habituellement adsorbé sur la matière organique



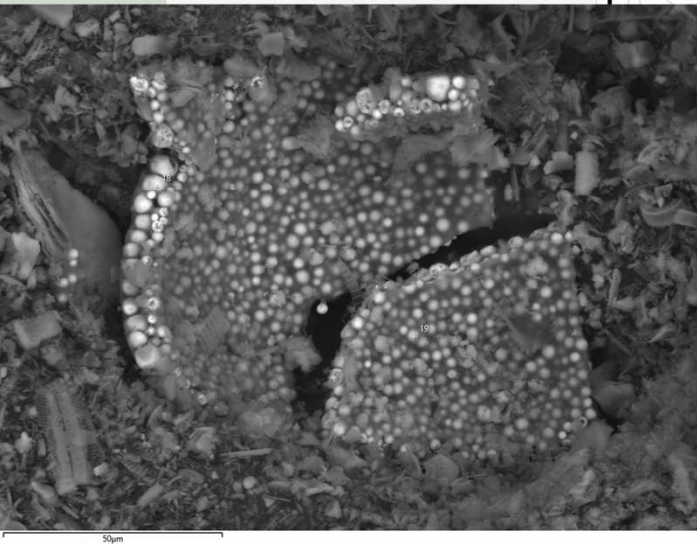
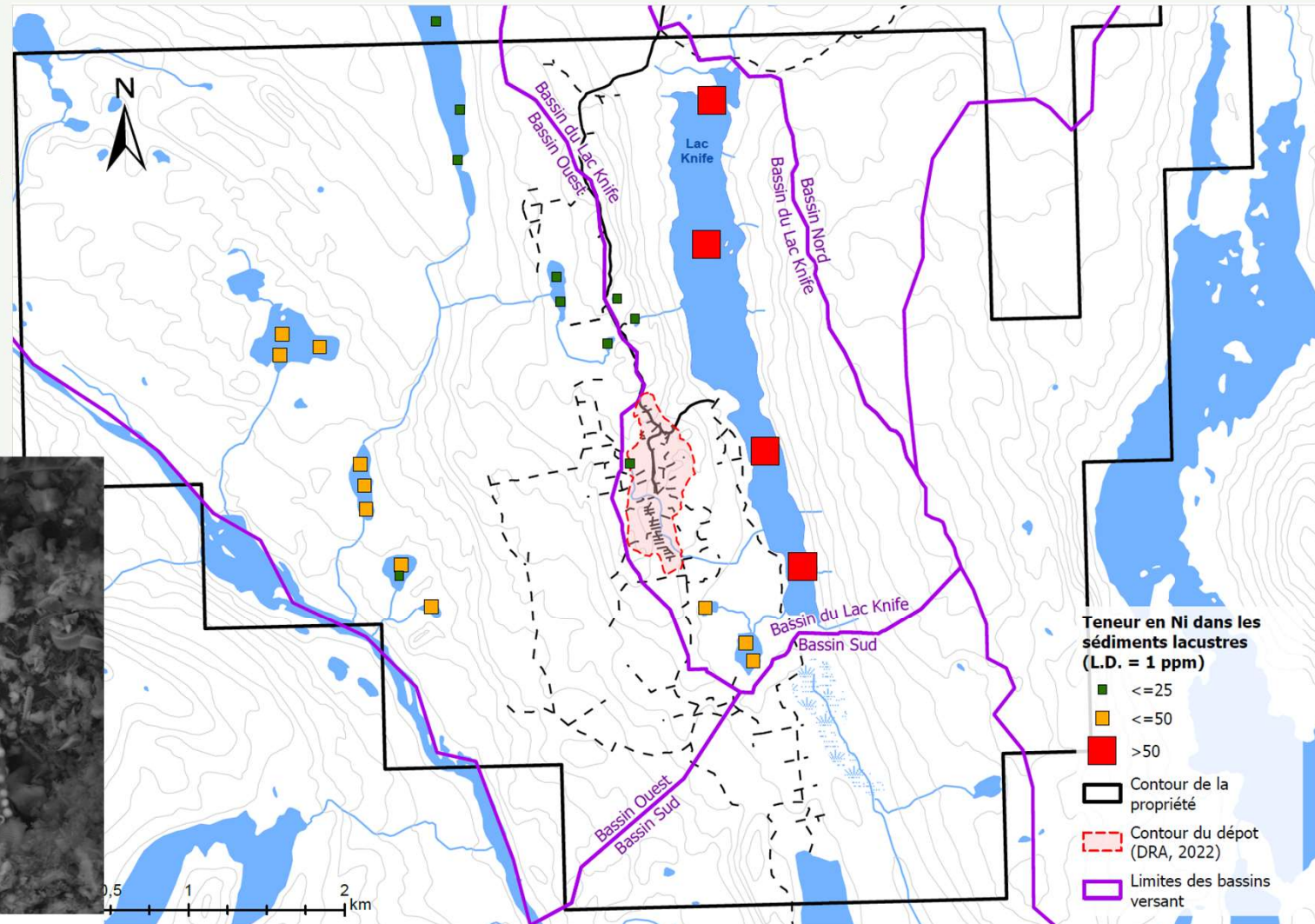
Nickel dans les sédiments lacustres

- Léger enrichissement dans le lac Knife
- Présent dans les argiles et les phyllosilicates
- → Détritique
- Ne provient pas du dépôt de graphite!



Nickel dans les sédiments lacustres

- Propagation cationique à l'ouest du dépôt
- Gersdorfite et cobaltite **authigène!**

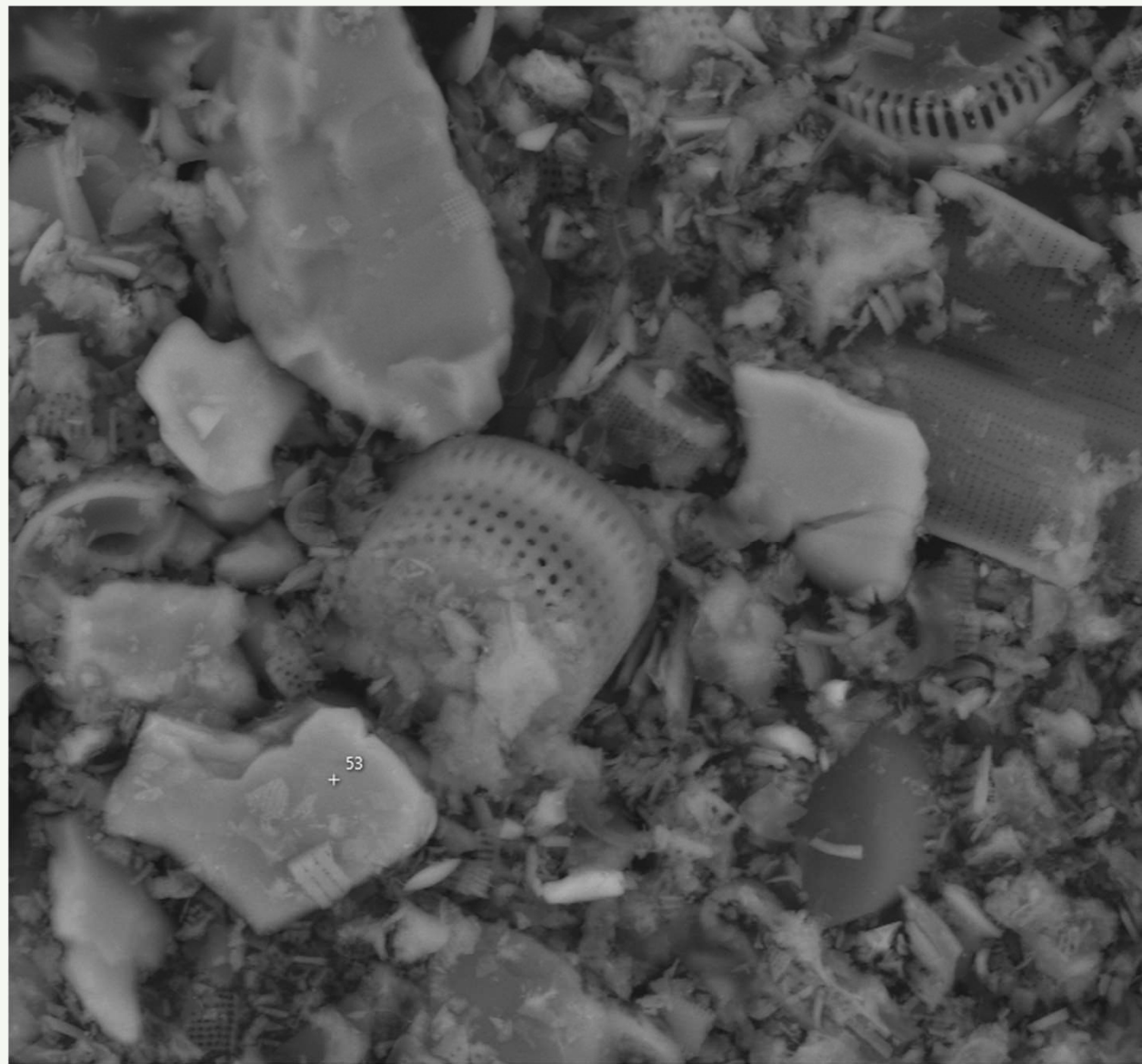


Conclusions

La géochimie de l'environnement secondaire n'est pas simple...

Et il y a beaucoup de mythe à défaire:

- L'analyse de l'horizon B n'est pas optimale!
- La dispersion dans les sédiments de lac ne respecte pas les bassins versants
- Attention à la spéciation des métaux, plusieurs sources peuvent co-exister
- Lors de leur dispersion, les métaux et les anions réagissent avec l'environnement, change celui-ci, ce qui perturbe leur dispersion.





Remerciements

- Denys Vermette (*présentement Norda-Stelo*)
- Mélanie Aubin (Biologiste, SIG)
- Jonathan Tremblay (Opérateur MEB)
- Véronique Bouchard (Chimiste)
- Nathalie Rey (*présentement Orezone Gold*)
- Yves Leblanc (Richelieu Hydrogéologie)
- Louis Bernier (Labtem)
- Etc, etc, etc

www.iosgeo.com

De l'innovation émerge la richesse