Natural Resources Canada | Ressources naturelles Canada

Un siècle d’activité en Abitibi: évolution spatio-temporelle des émissions atmosphériques de métaux dans l’environnement

2025

Canada

Membres du Projet

P.L.: N. Benoit[1], J. Jautzy[1], J. Marion[1]

Coll.: J. Ahad[1], K. Aweke Arega[1,8], E. Berryman[2], O. Caron[3], V. Cloutier[5], A. Crémazie[4], F. Gennaretti[5], M. Gigoux[6], G. Grosbois[5], J. Laganière[7], D. Lauzon[8], T. Lolli[1,4], C.Meyer-Jacob[5], D. Petts[1], R. Quijada-Campos[1,3], M. Rosabal[3], S. Tirdad[1]

[1] *Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada (NRCan)*
[2] *CanMet Mines, Natural Resources Canada*
[3] *UQAM*
[4] *INRS-ETE*
[5] *UQAT*
[6] *Consorem & UQAM*
[7] *Centre de foresterie des Laurentides, Natural Resources Canada*
[8] *École polytechnique de Montréal*

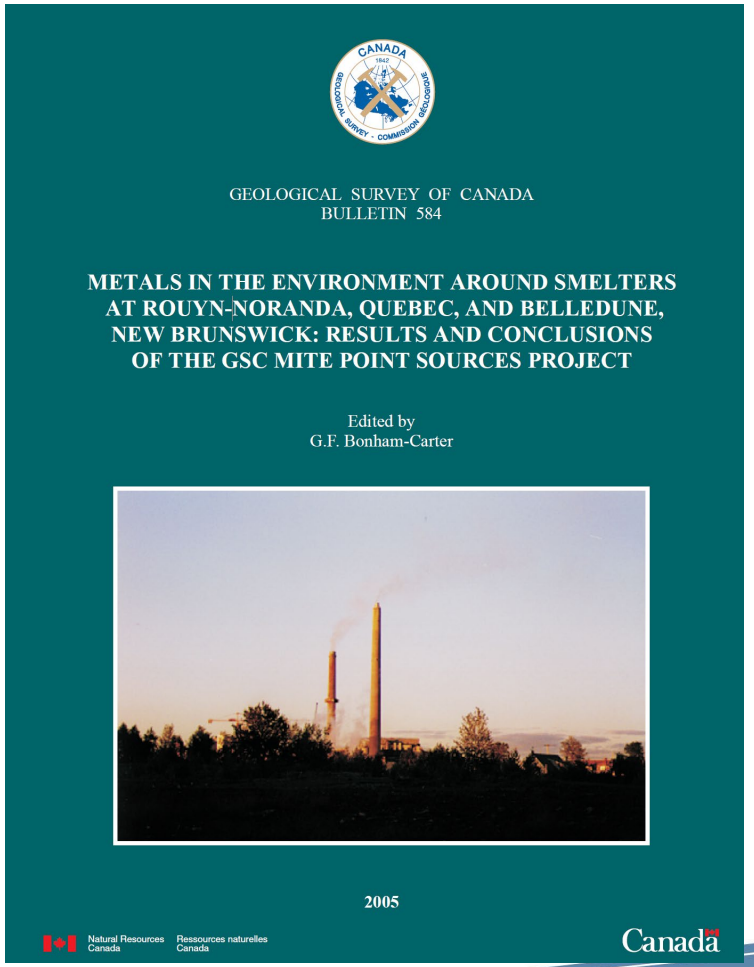
Projet MITE (Métaux Dans l'Environnement)

Projet lancé en 1997 par la CGC (durée 5 ans).

But:

1) Distinguer les sources de métaux dans l'environnement autour des fonderies
2) Identifier la distance de transport des métaux depuis une fonderie

Focus: environnements autour des fonderies Flin Flon (MB), Rouyn-Noranda (QC), Trail (C-B) et Belledune (NB).



Il y a 25 ans: le projet MITE

- Matrices étudiées (nb de site):

sol (106),

neige (139),

tourbe (37),

sédiments et eau de lacs (99),

arbres (5).

- Jusqu'à 250km avec une densité d'échantillonnage plus importante autour de la fonderie.
- Principaux métaux étudiés: As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn.

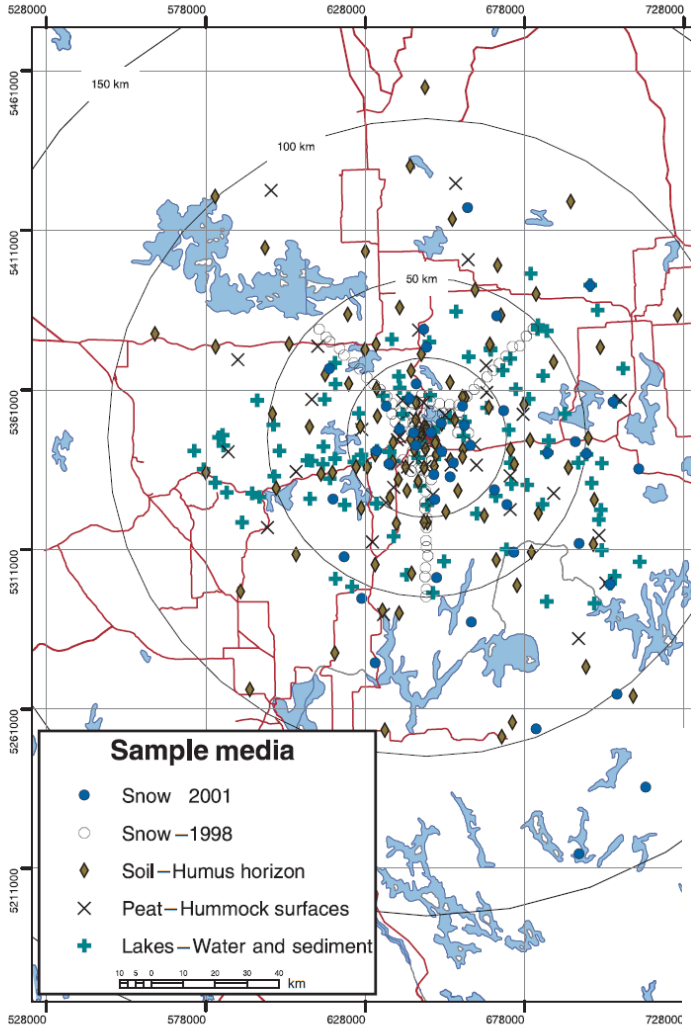
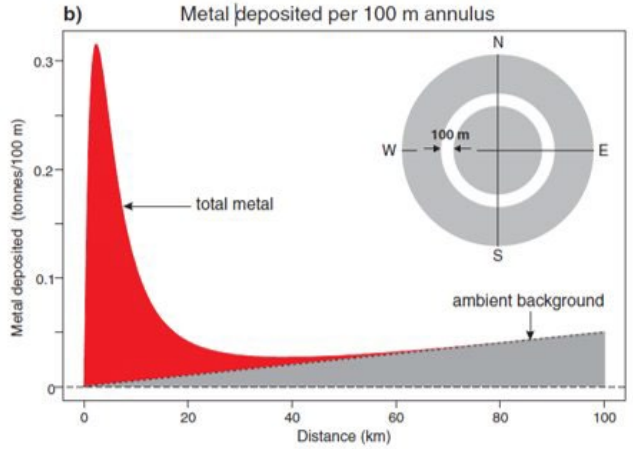


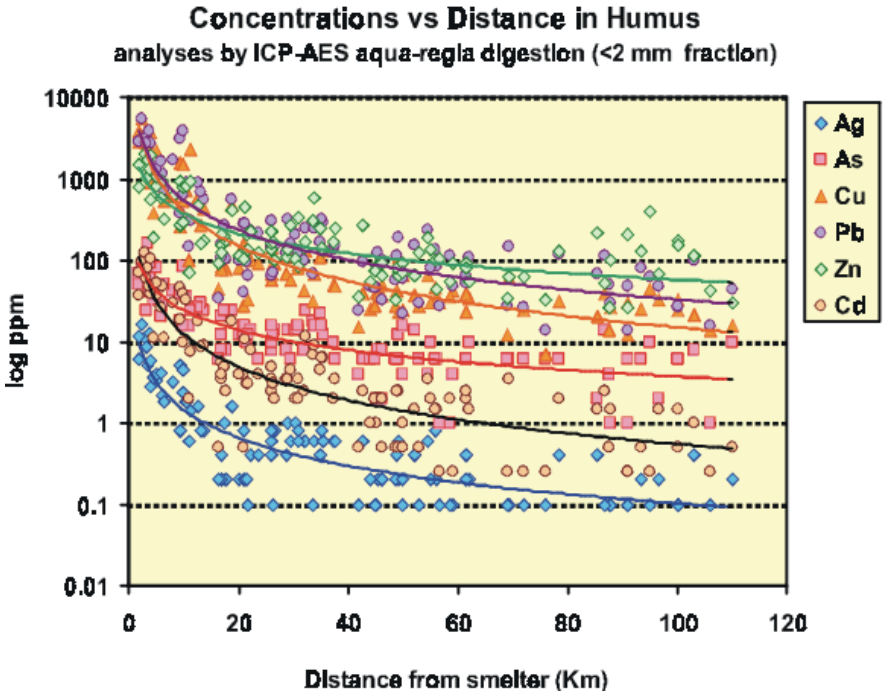
Figure 1. Map showing the study region around Rouyn-Noranda 2001), peat hummocks, humus horizon in soil, and lakes (surface Horne smelter is in the town of Rouyn-Noranda at the centre of

Bonham-Carter *et al.* (2005)



MITE conclusion – sols

- [métaux] diminuent de manière exponentielle en fonction de la distance par rapport à la fonderie.
- Anisotropie de l'empreinte jusqu'à 5 km plus loin vers l'est 5 km en direction opposée.
- Accumulation principalement dans l'humus.
- À quelques km de la fonderie un lessivage vers les horizons pédologiques B et C.
- Au-delà de 150 km, les [métaux] sont près des valeurs naturelles ou des limites de détection.



Henderson *et al.* (2002)

MITE conclusion – neige

- [métaux] diminuent de manière exponentielle en fonction de la distance par rapport à la fonderie.
- Calcul de flux de dépôts.
- Au-delà de 50 km, les sources des métaux dans la neige sont difficiles à distinguer (fonderie vs autre).
- La solubilité des métaux dans la neige est variable. Cd soluble à 90%, Pb et As 65 à 75% et Cu de 42 à 70%.
- Cu identifié comme le meilleur traceur de l'impact de la fonderie.

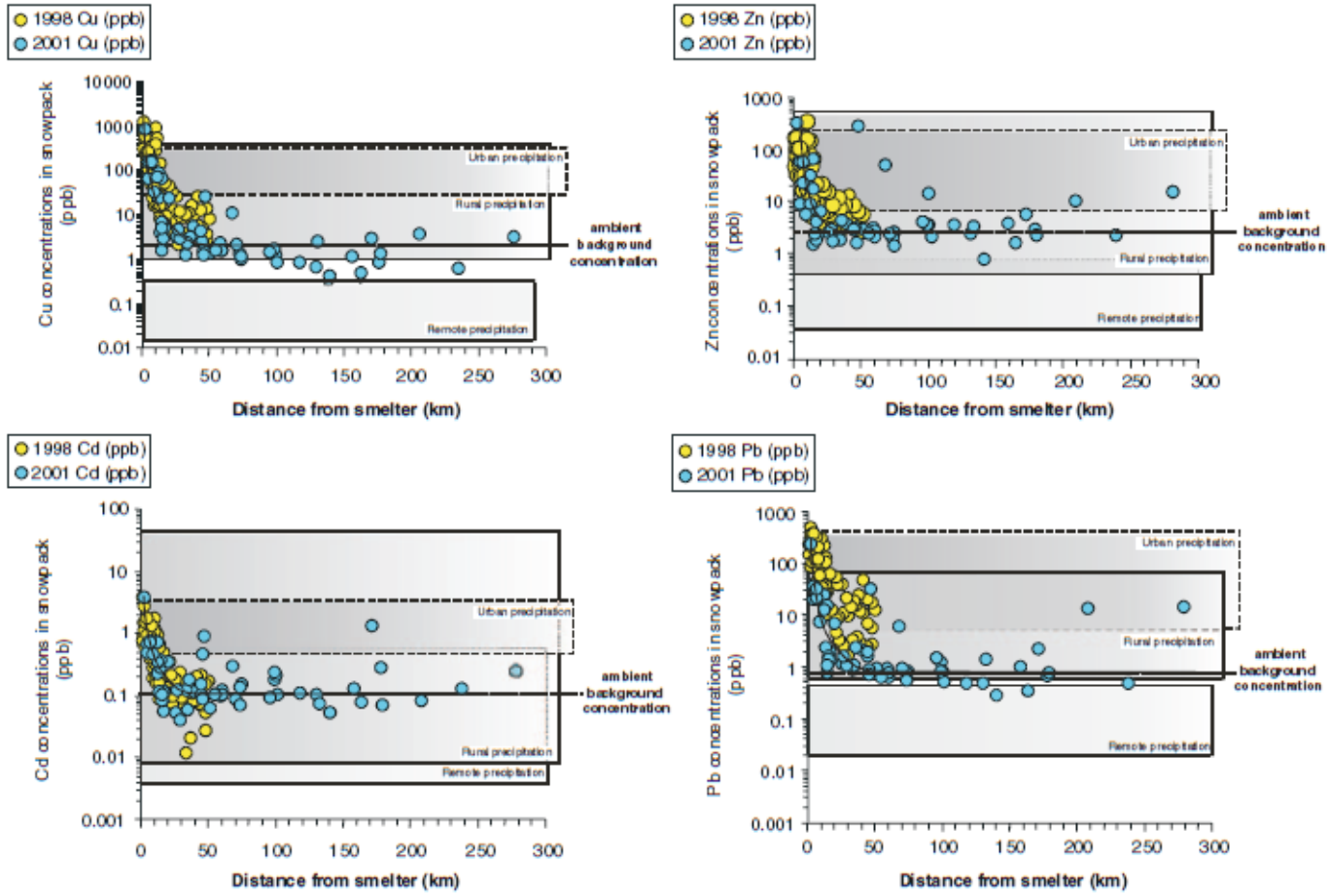


Figure 6. Concentrations (ppb or µg/L) of Cu, Pb, Zn, and Cd plotted against distance from the smelter (km). Ranges of remote, urban, and rural concentrations in wet deposition based on a world-wide survey by Galloway et al. (1982) are superimposed.

Kliza *et al.* (2005); Telmer *et al.* (2005)

MITE conclusion – tourbières

- Empreinte s'étend jusqu'à ~65km de la fonderie.
- Semble enregistrer un historique de déposition. Datation compliquée (mais ^{137}Cs valide).
- Les teneurs en métaux ont augmenté depuis le démarrage des activités de la fonderie.
- Les teneurs en métaux ont diminué vers le dessus des carottes reflétant probablement la baisse des émissions.
- Buttes de tourbières présentent de meilleures profiles.

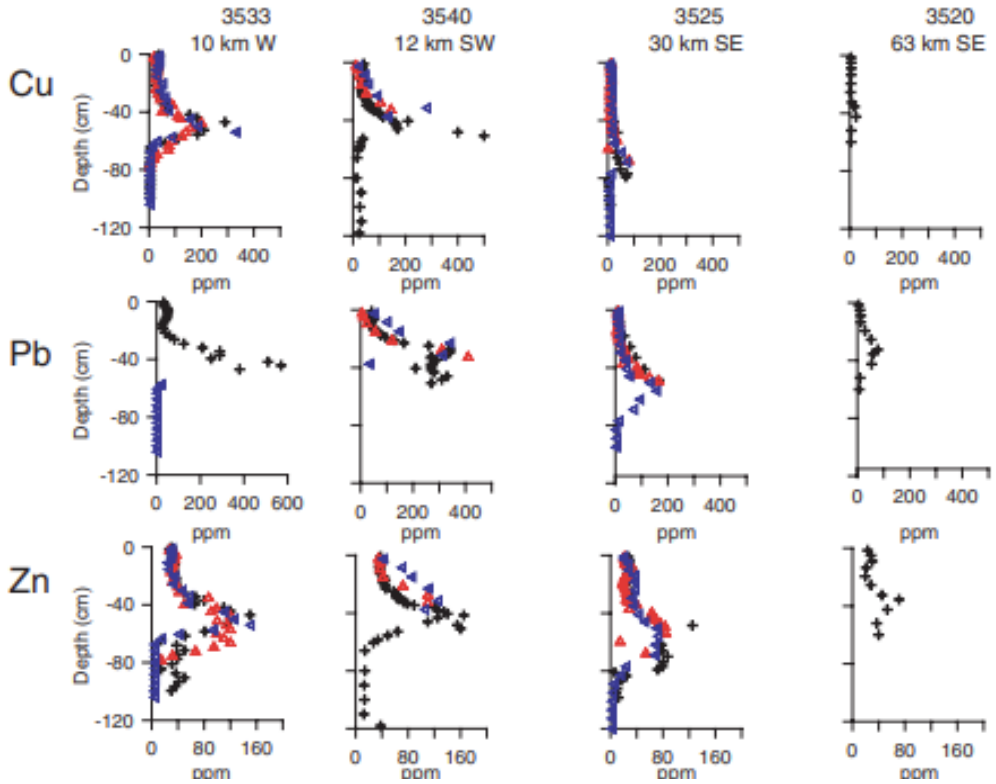


Figure 3. *Distribution of Cu, Pb, Zn, Ca, and Ni in profile samples from tall hummocks at four peatland sites. Samples were analyzed by ICP-AES after HNO_3–$HClO_4$ digestion. At three of the sites, geochemical profiles were generated for two or more separate hummocks, indicated using different symbols. The dashed line on the Ca graphs represents the position of the water table.*

Kettles, (2005); Kettles and Bonham-Carter (2002)

MITE conclusion – sédiments lacustres

- Empreinte s'étend jusqu'à 50km de la fonderie.
- Au-delà de 50 km, les sources des métaux dans les sédiments de lac sont difficiles à distinguer (fonderie vs autre).
- Les teneurs en métaux ont augmenté depuis le démarrage des activités de la fonderie.
- Modèle d'âge incertain – Diagenèse et/ou compaction sédimentaire.
- *NB: Gallon et al. (2006) bon modèle d' âge et impact fonderie jusqu'à 150km (5-35% Pb déposé) – isotopes Pb.*

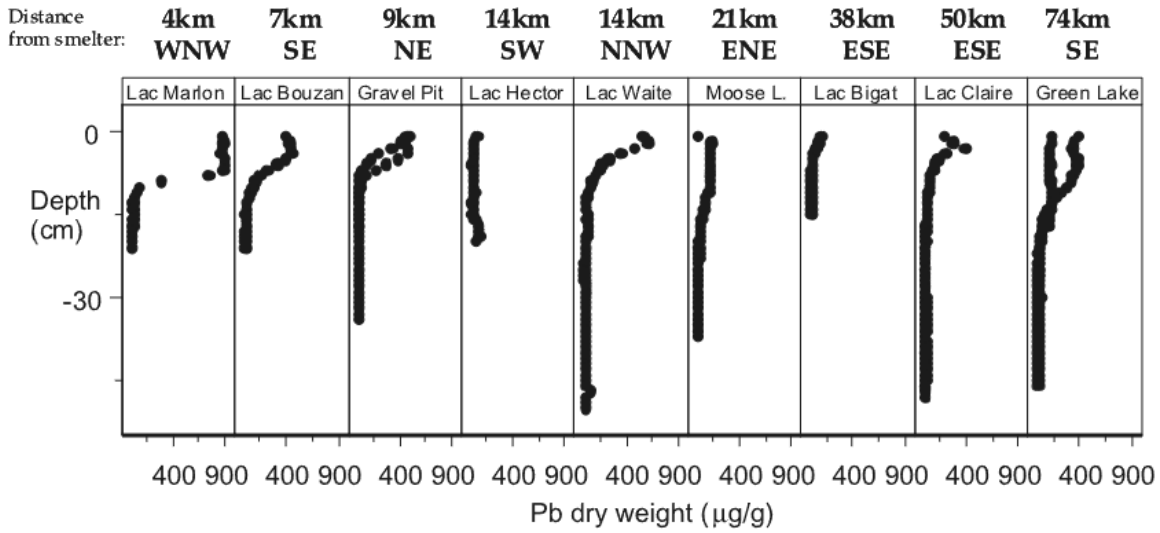


Fig. 3. Depth profiles (in cm) of Pb (in µg/g (ppm)) in nine lakes at various distances and directions from the smelter.

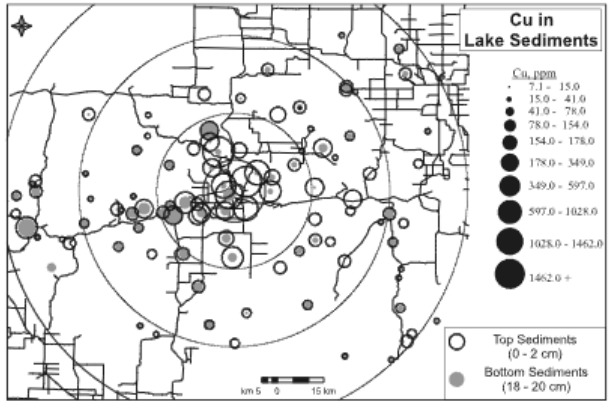


Fig. 4. Copper in surface sediments and pre-industrial sediments for 99 lakes surrounding the Rouyn-Noranda smelter.

Telmer *et al.* (2006)

Post : 0-2cm
Pre :18-20cm

MITE conclusion – Épinettes noires

- Isotopes du plomb identifiés comme bons traceurs des sulfures de l'Abitibi.
- Effet de la fonderie immédiate et observé sur $\delta^{13}C$ et $\delta^{2}H$.
- Métaux enregistrés avec 14-20 ans de délai.
- Au-delà de 150 km, les concentrations de métaux sont près des valeurs naturelles ou des limites de détection.

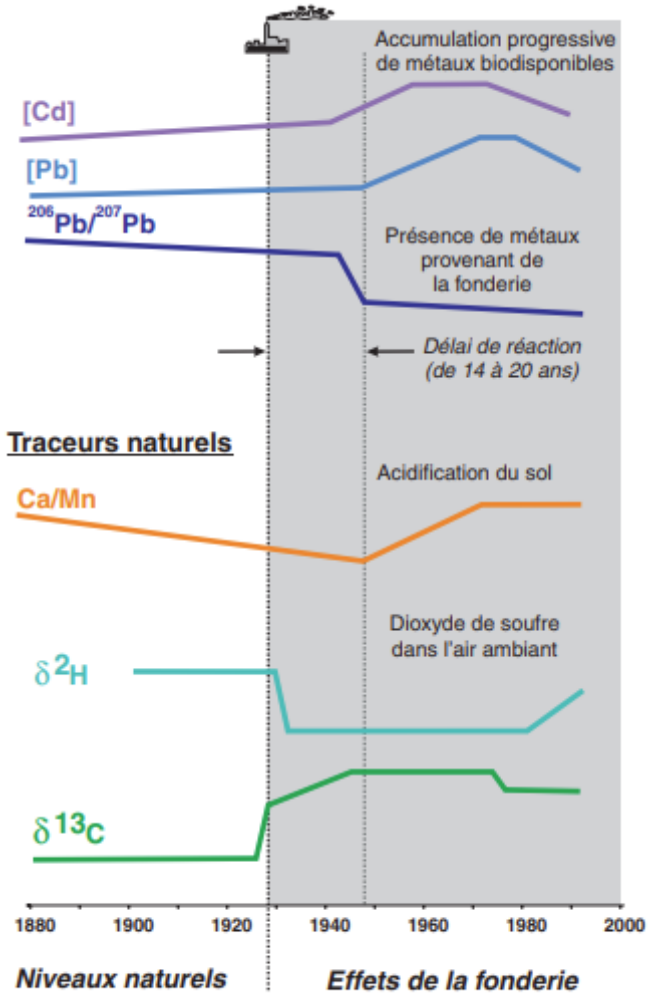


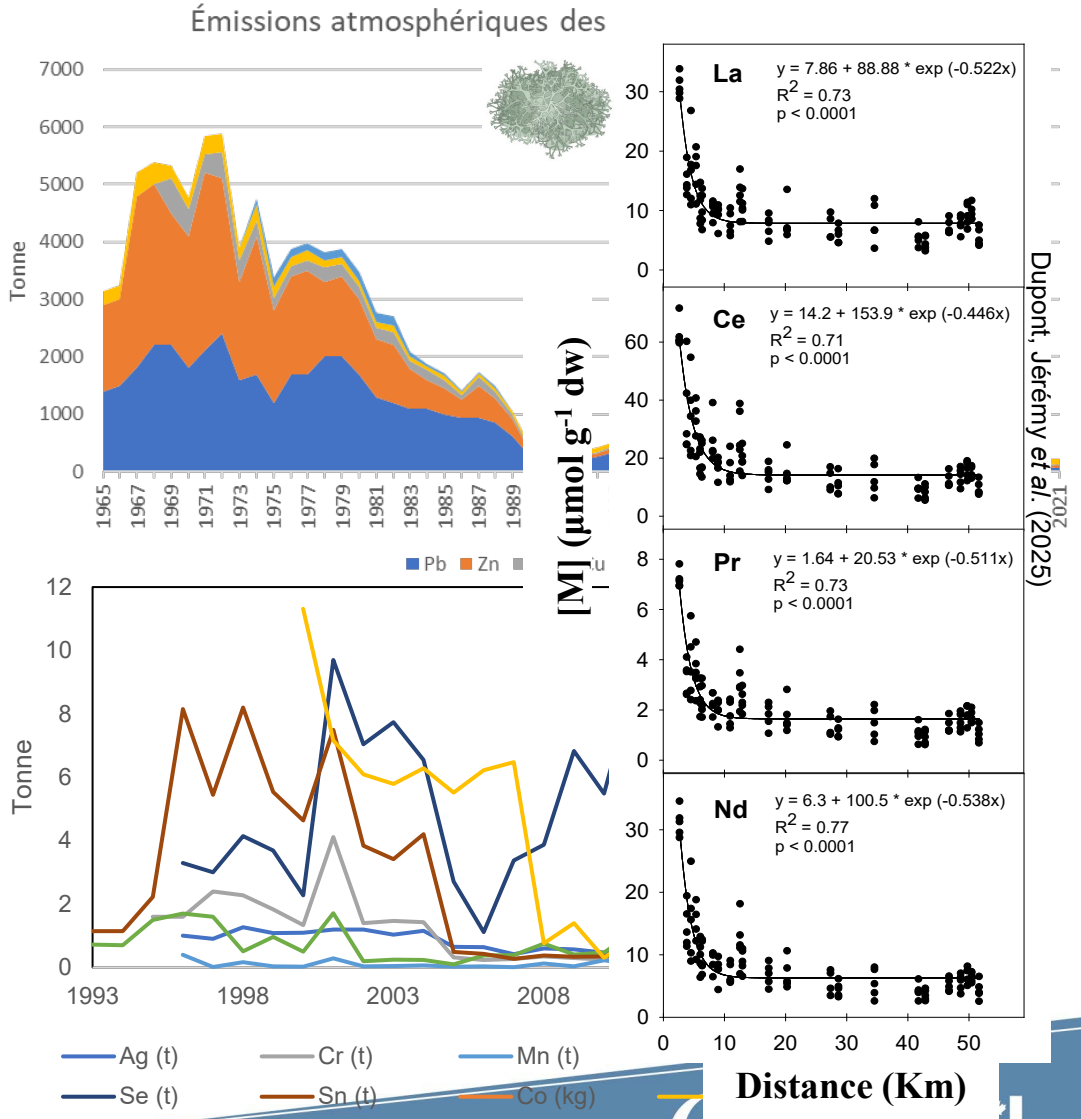
Figure 10. Synthèse des résultats des analyses

Savard *et al.* (2002, 2005)

Aujourd'hui

- Profil d'émissions de la fonderie a changé depuis 1984 avec intrant croissant de recyclage de matériel électronique.
- Métal(loïd)es émergents d'intérêt économique et peu de connaissances quant à leur dispersion dans l'environnement et leur toxicité potentielle.
- Augmentations récentes de certains métal(loïde)s.

Les **métaux émergeants** sont associés à la production et au recyclage d'appareils électroniques au cours des dernières décennies. Ils incluent certains métaux et métalloïdes ainsi que des éléments du groupe des terres rares tels que les éléments suivants : REE, Ag, Cr, Co, Ga, In, Li, Mo, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Te, Tl, V, Zr.



Sources: Noranda & INRP

1) Historique des dépôts de métaux

Sédiments de lacs

- enregistre les dépôts atmosphériques et du bassin versant
- couverture temporelle de quelques siècles
- Datation ^{210}Pb ^{137}Cs

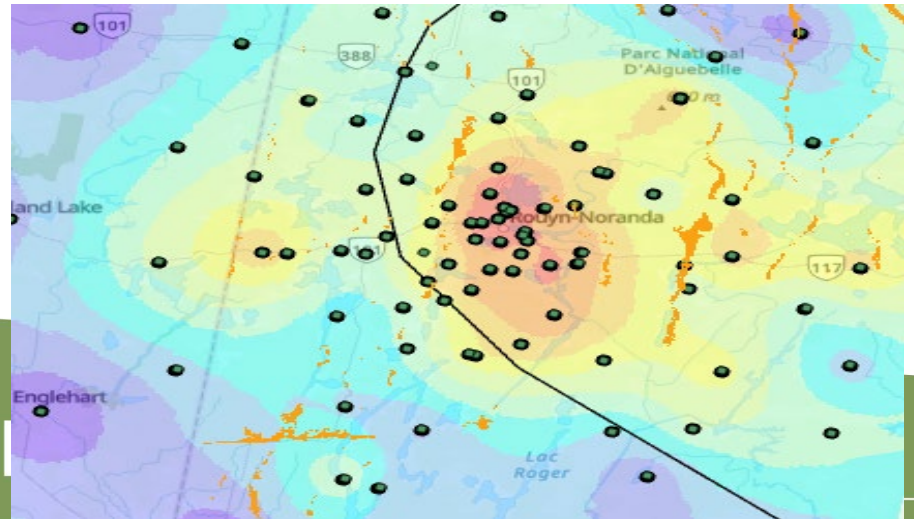
Tourbières

- enregistre les dépôts atmosphériques
- couverture temporelle de quelques siècles
- Datation ^{210}Pb ^{137}Cs

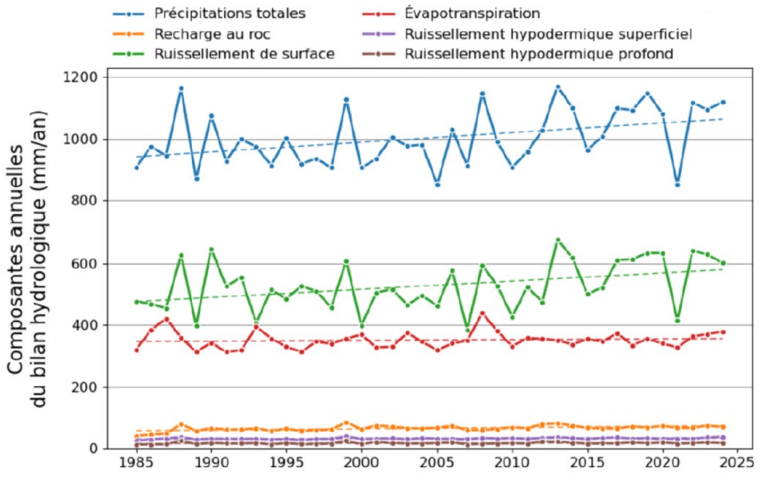
Épinettes noires

- enregistre les dépôts atmosphériques et ce que contient naturellement le sol
- couverture temporelle d'un peu plus d'un siècle (150 ans)
- datation absolue par comptage de cernes

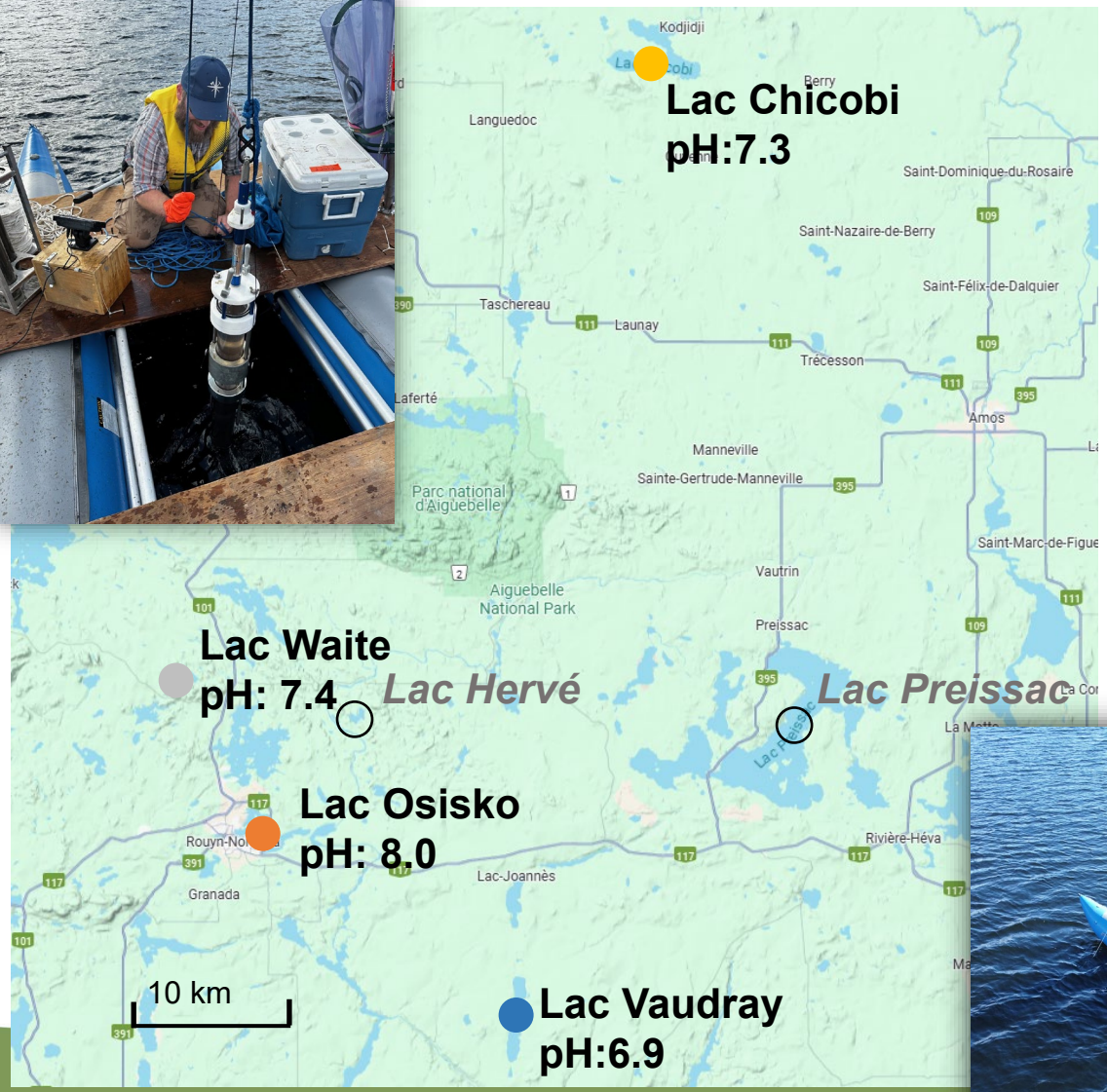
2) Modélisation spatiale des métaux en milieu forestier

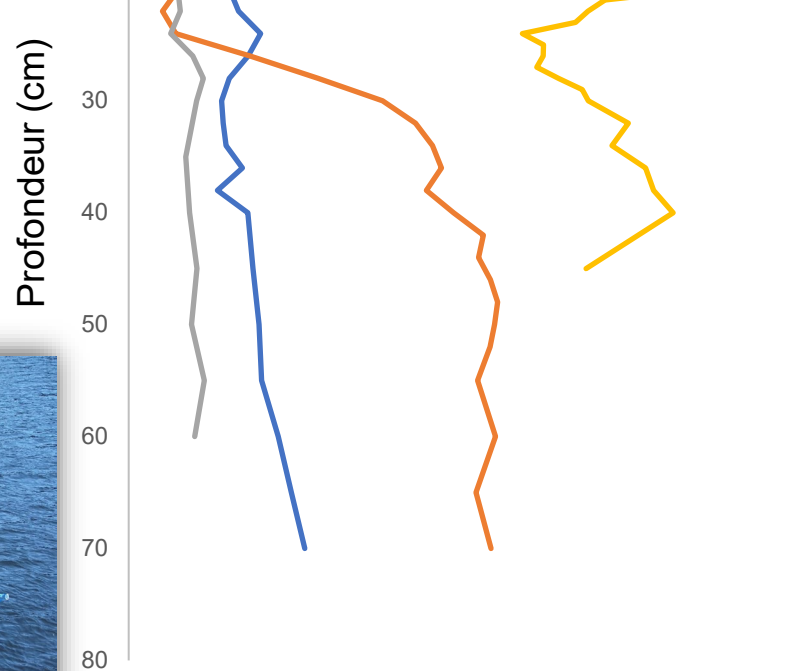


3) Estimation stochastique de la recharge

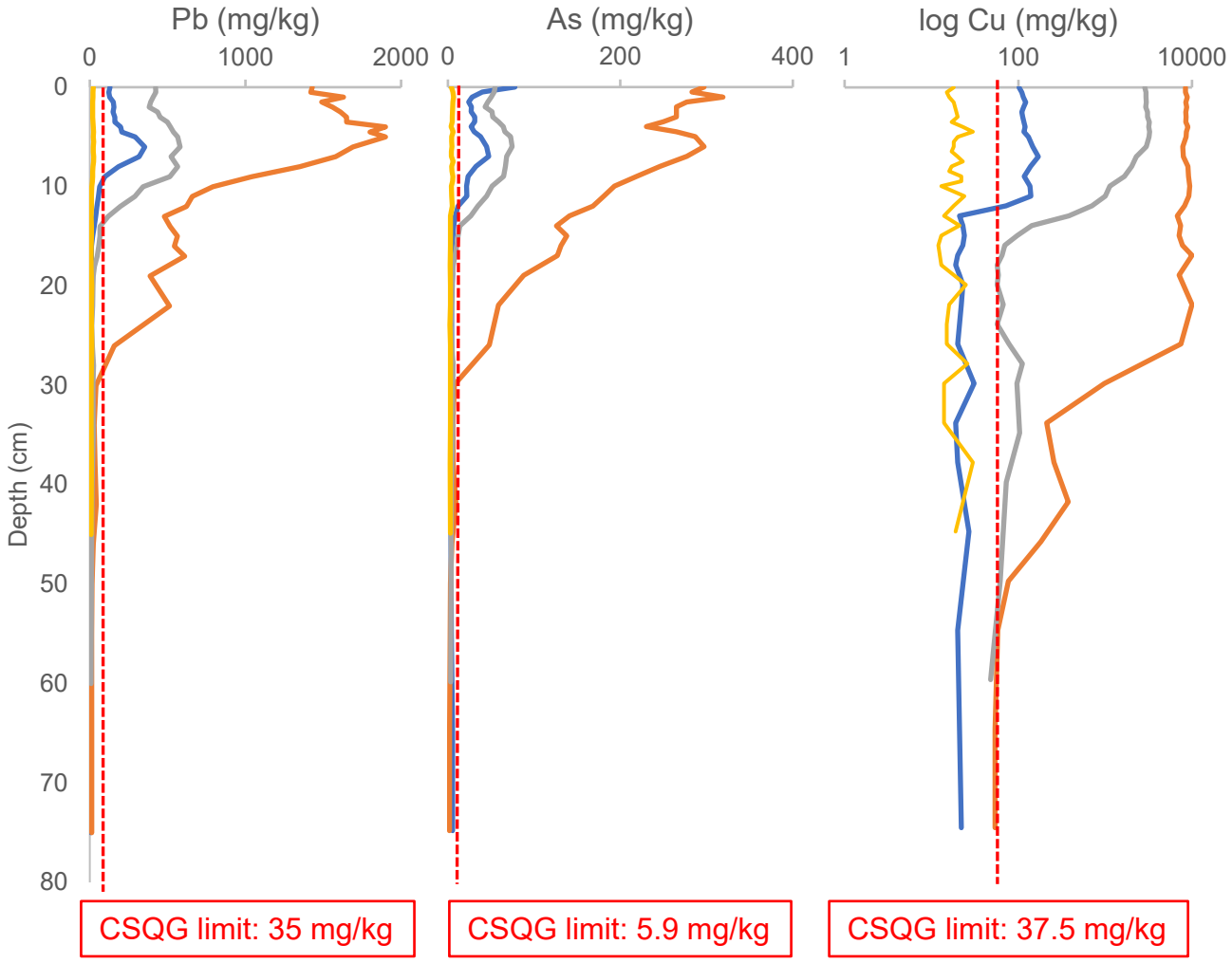


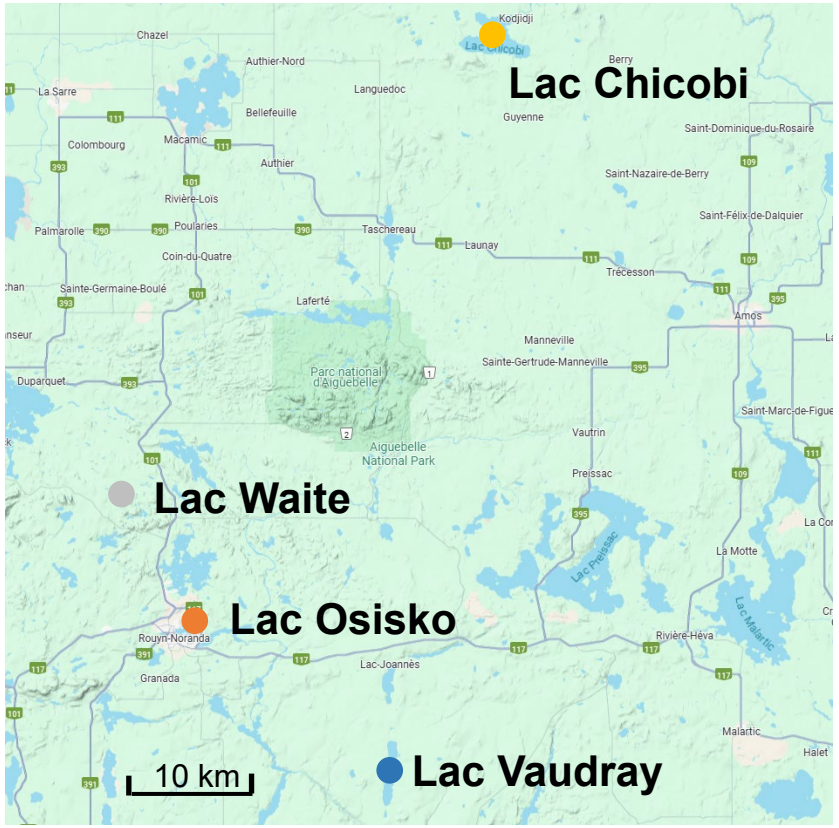
Sédiments lacustres – localisation & paramètres physiques





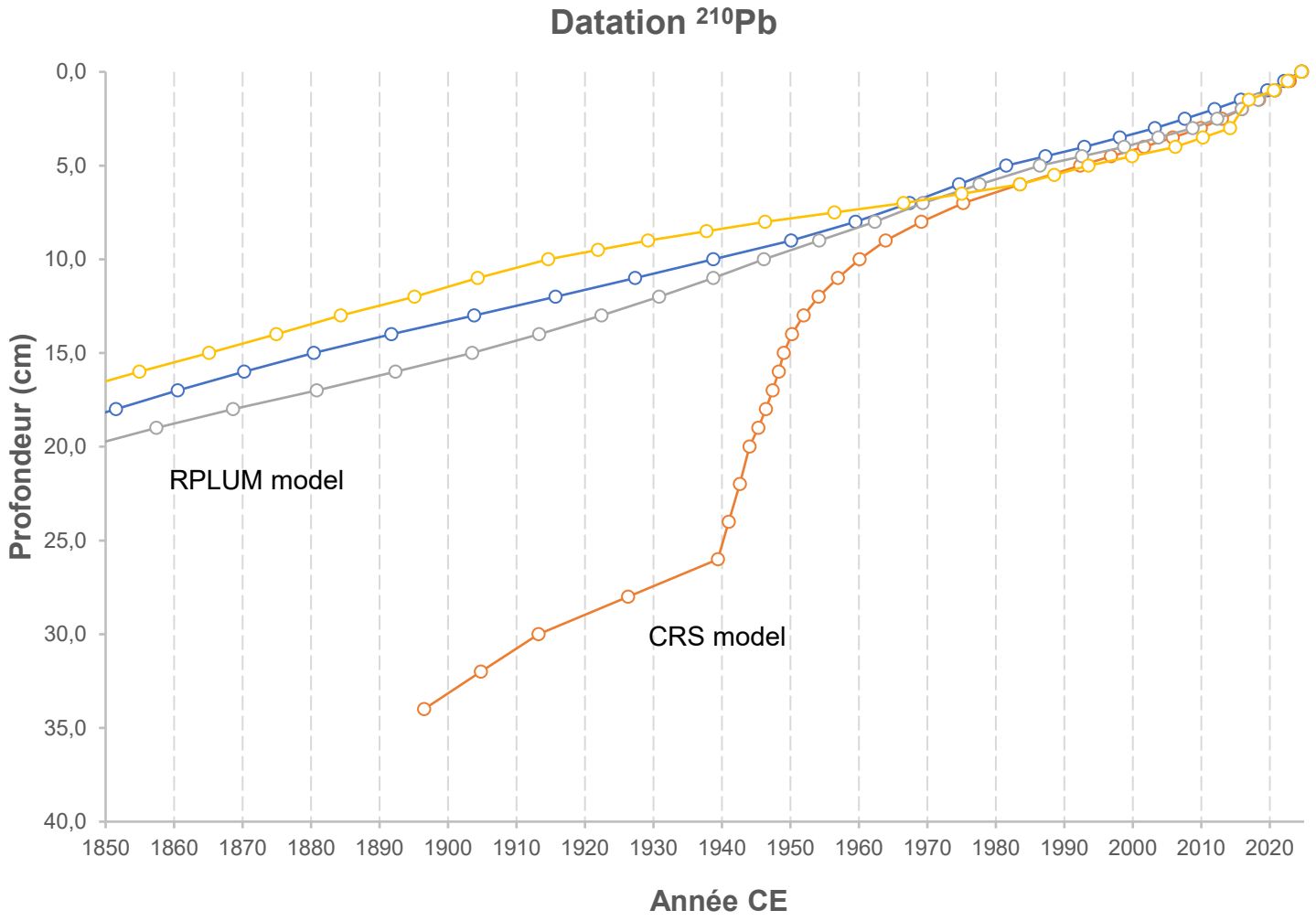
Sédiments lacustres – Profils de [métaux]

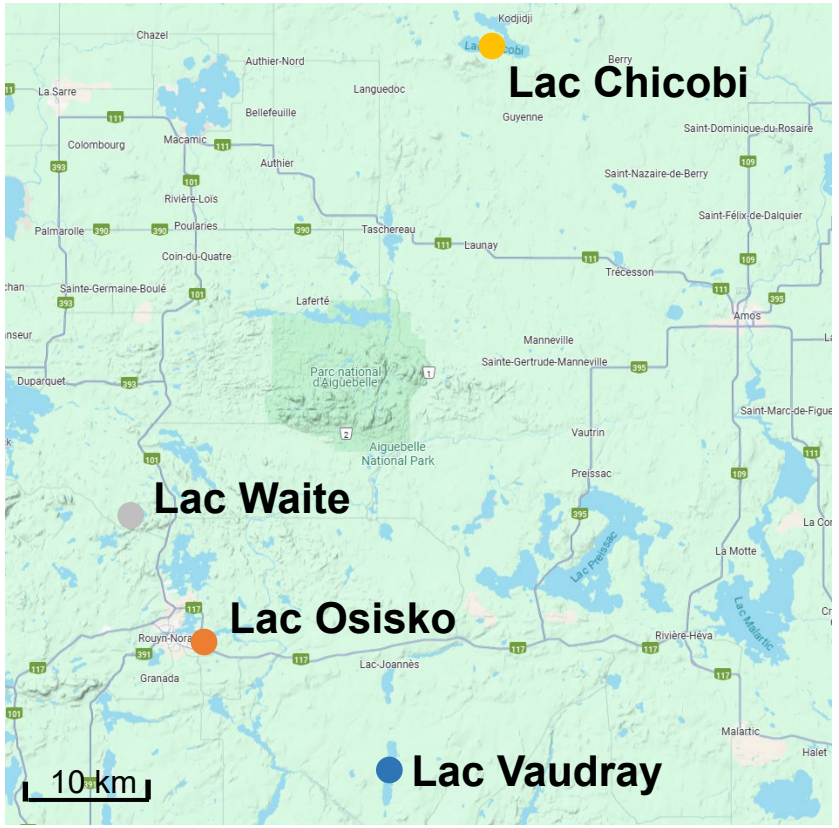




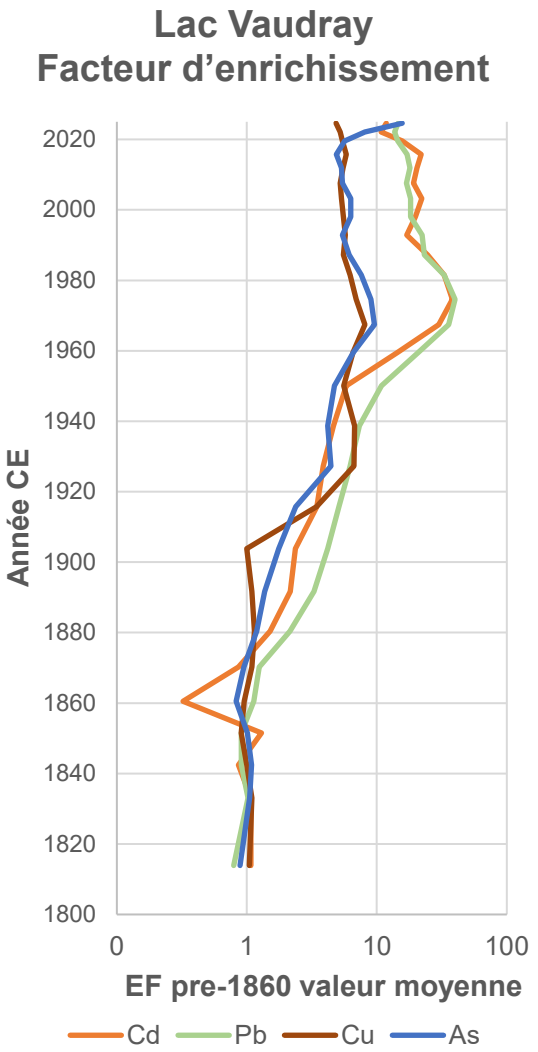
Canadian Sediment Quality Guidelines- Canadian council of Ministers of the Environment

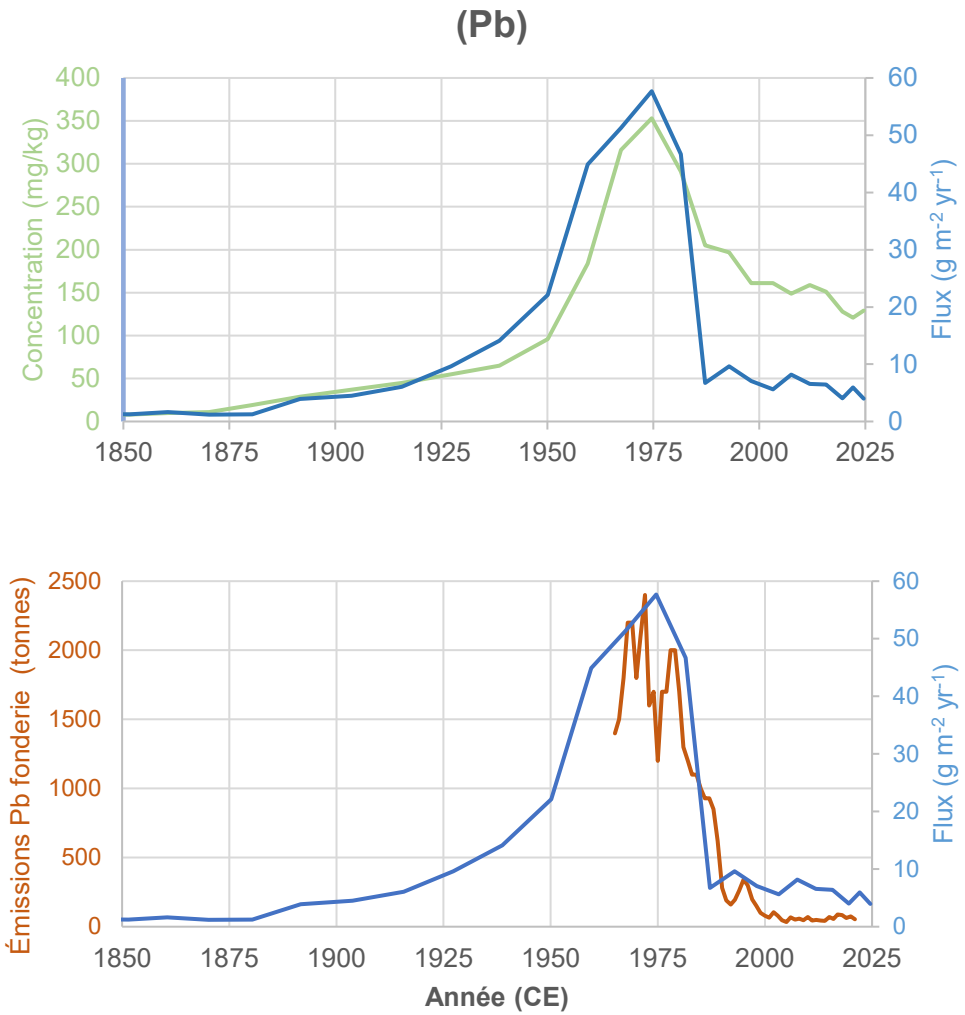
Sédiments lacustres – Datation préliminaire



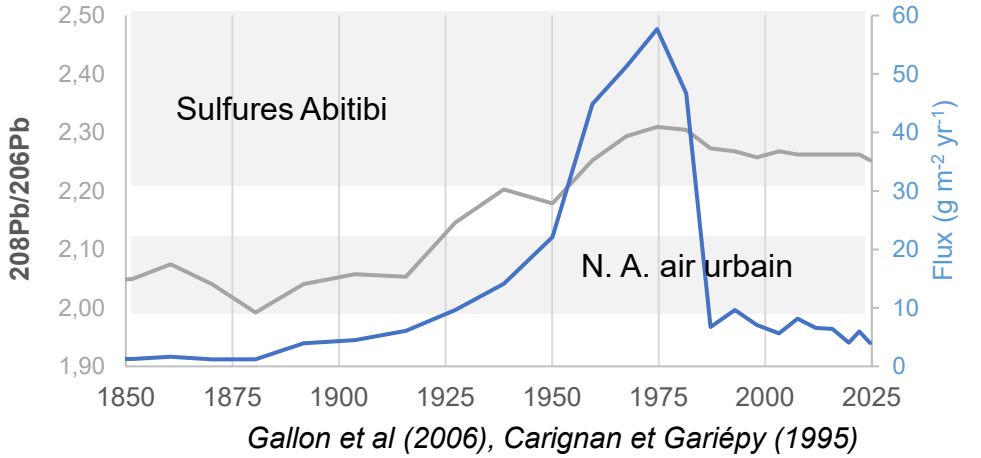


Sédiments lacustres – Source des métaux?

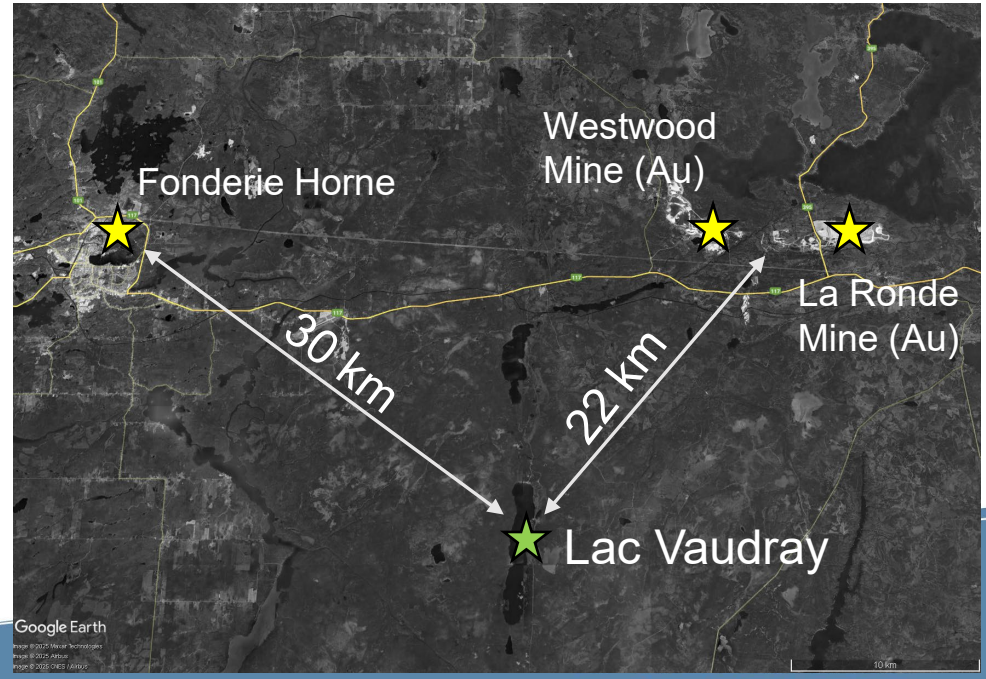




GSC bull. 584 (2005),
National Pollutant Release Inventory



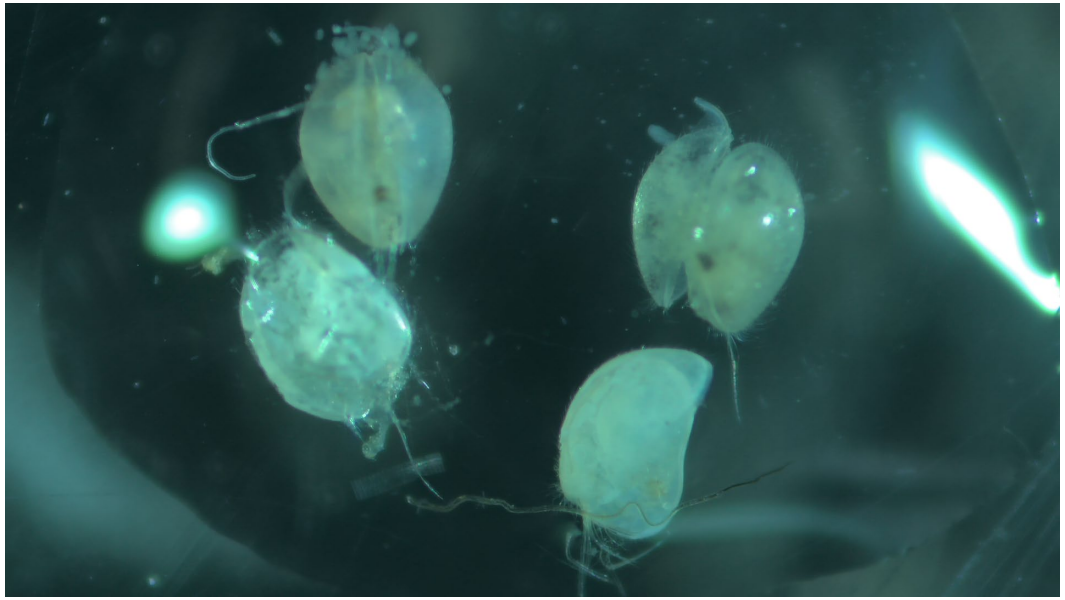
Gallon et al (2006), Carignan et Gariépy (1995)



Sédiments lacustres – À venir…

- Échantillonnage de lacs supplémentaires
- Datation, analyses géochimiques métaux émergeants et isotopes du Pb
- Intégration avec les autres archives environnementales

- Études des ostracodes en tant que sentinelles des stress environnementaux métalliques (isotopes agglomérés et géochimie des coquilles) – Doctorant Tiziano Lolli



Tourbières & vieilles pessières

Tourbières

Effectué:

- Sous échantillonnage et datation ^{210}Pb des tourbières Vaudray & Chicobi.
- Taux d'accumulation rapide, ~70 cm, ca 1850 dans le bas du monolithe.

À venir:

- Comparaison de trois méthodes de digestion.
- Datation des autres monolithes.
- Analyses géochimiques des monolithes.

Épinettes noires

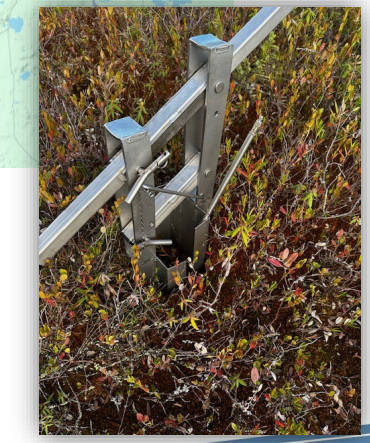
Effectué:

Datation et chronologie de croissance Vauze: 1949-2024 Vaudray: 1880-2024 Chicobi: 1930-2024

À venir:

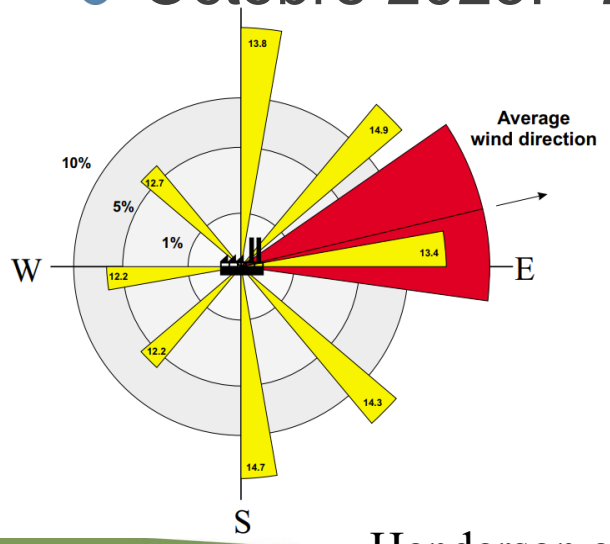
- Comparaison des trois méthodes de digestion sur des écorces calcinés.
- Analyses géochimiques écorces et cernes.

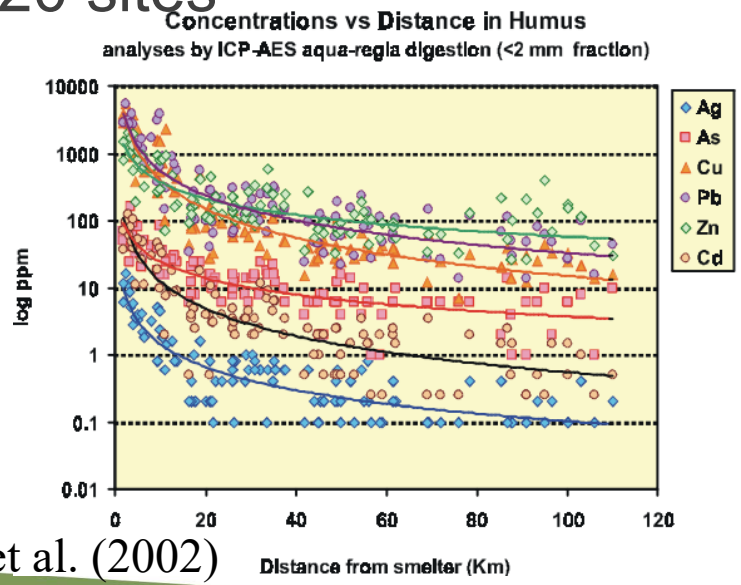
#



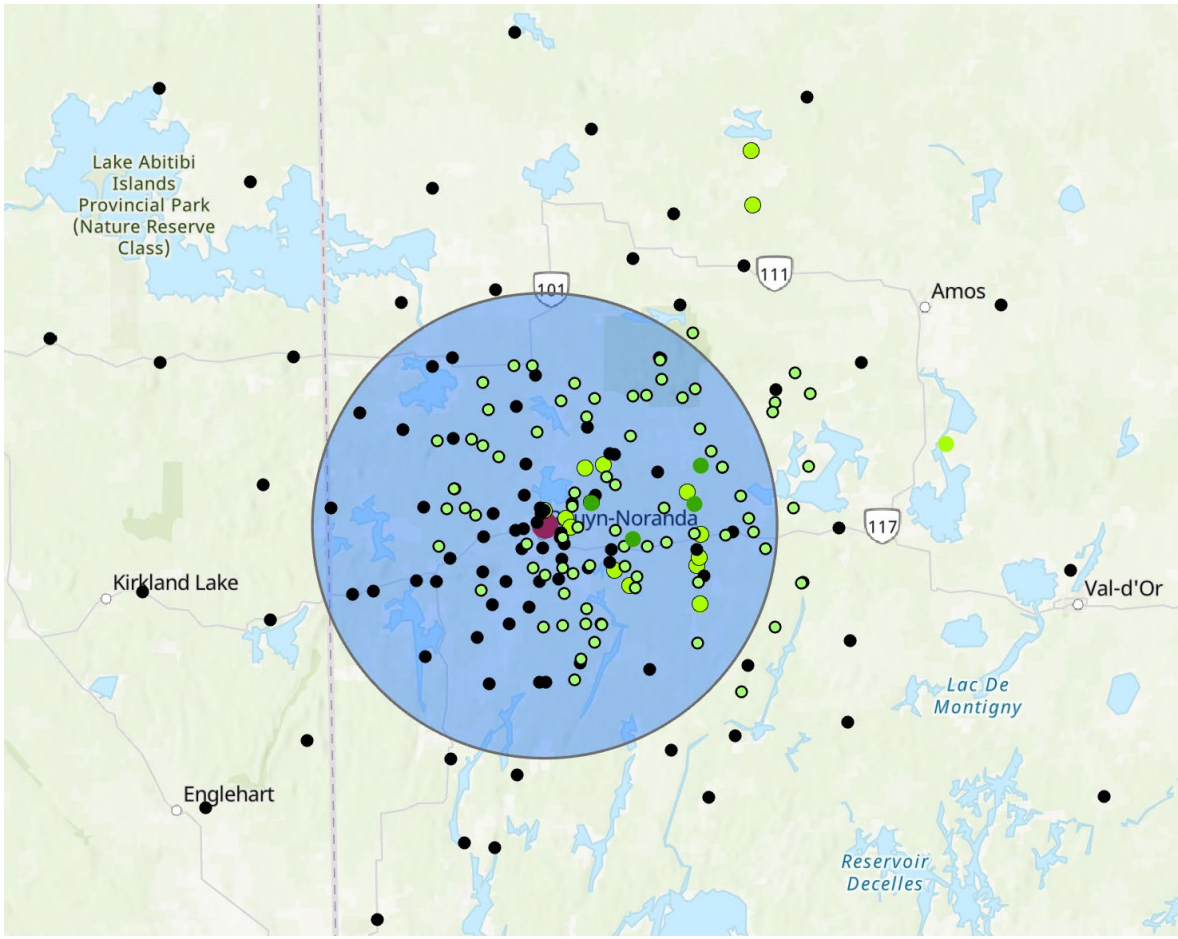
Modélisation spatiale des métaux en milieu forestier

- Fonderie Horne et stations MITE
- Rayon 40 km et zone d'échantillonnage
- Octobre 2024: 16 sites (7 pédons)
- Mai 2025: 80 sites (4 pédons)
- Octobre 2025: ~20 sites





Henderson et al. (2002)



Revoir les données MITE

- MITE : base de données sur les sols (complexe)
- 4 types de digestion : Aqua regia, Sodium pyrophasphate, multi-acide et hydroxylamine
- 3 méthodes d'analyse : ICP-AES, ICP-MS, INAA
- 3 granulométrie: 0.002mm, 0.063mm and 2mm
- 3 horizons pédologiques : H, B, C

Dataset	# Nb_échantillons	# Nb_éléments
AquaR_ICP_AES_002mm_B	26	34
AquaR_ICP_AES_002mm_C	21	34
AquaR_ICP_AES_063mm_B	105	30
AquaR_ICP_AES_063mm_C	105	30
AquaR_ICP_AES_2mm_B	107	34
AquaR_ICP_AES_2mm_C	108	34
AquaR_ICP_AES_2mm_H	113	36
Hydroxy_ICP_MS_2mm_B	13	57
Hydroxy_ICP_MS_2mm_C	13	57
INAA_063mm_B	18	39
INAA_063mm_C	15	39
INAA_2mm_B	20	39
INAA_2mm_C	18	39
INAA_2mm_H	20	37
Multi_acid_ICP_AES_2mm_B	32	44
Multi_acid_ICP_AES_2mm_C	30	44
Multi_acid_ICP_AES_2mm_H	23	29
Na_py_ICP_MS_2mm_H	104	54

Critères spécifiques pour les métaux lourds dans les sols

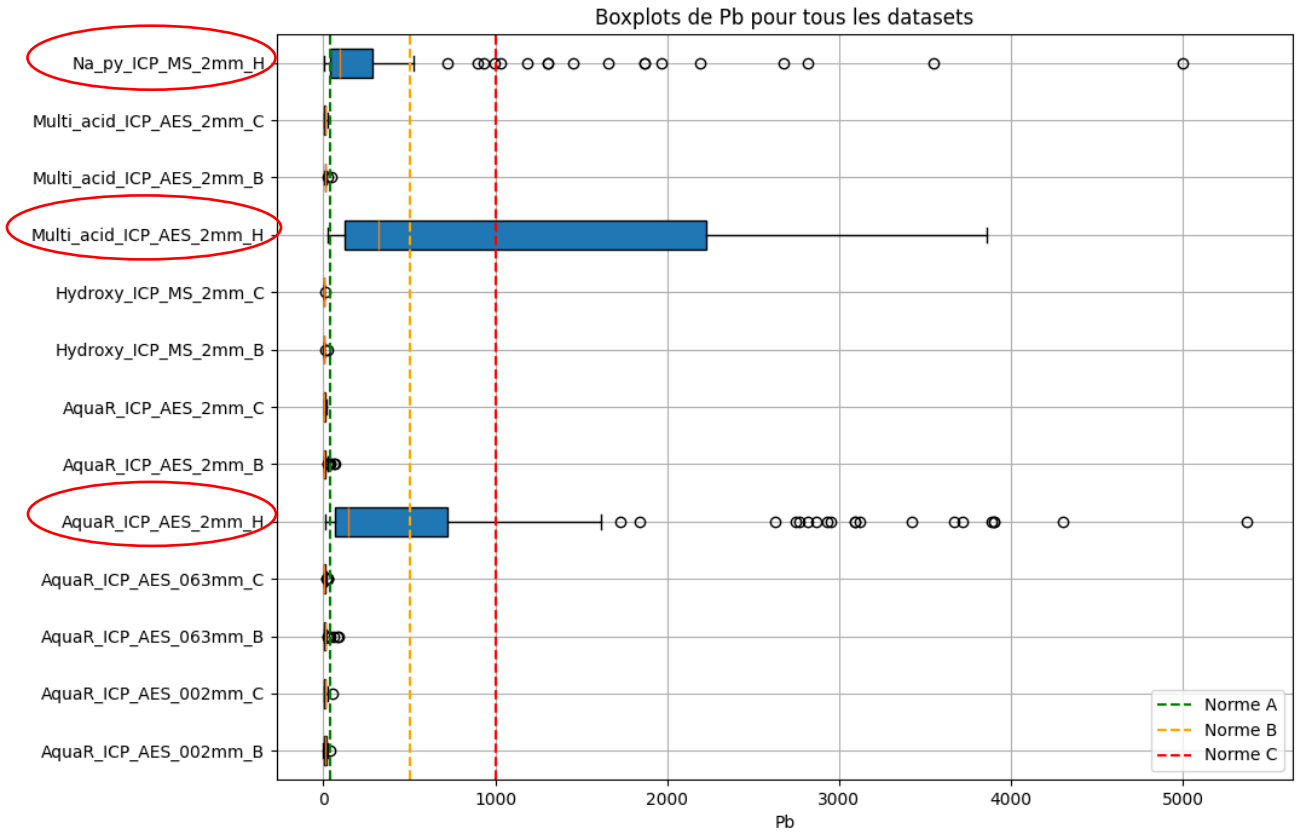
- Critère A : niveaux de fond naturels (province du supérieure)
- Critère B : protection des populations vulnérables (enfants et personnes âgées)
- Critère C : plus grande tolérance (exposition humaine est moins directe)

Élément	Code	# A (mg/kg)	# B (mg/kg)	# C (mg/kg)
Argent (Ag)	Ag	0.5	20	40
Arsenic (As)	As	5.0	30	50
Baryum (Ba)	Ba	240.0	500	2000
Cadmium (Cd)	Cd	0.9	5	20
Cobalt (Co)	Co	30.0	50	300
Chrome total (Cr)	Cr	100.0	250	800
Cuivre (Cu)	Cu	65.0	100	500
Étain (Sn)	Sn	5.0	50	300
Manganèse (Mn)	Mn	1000.0	1000	2200
Mercure (Hg)	Hg	0.3	2	2
Molybdène (Mo)	Mo	8.0	10	40
Nickel (Ni)	Ni	50.0	100	500
Plomb (Pb)	Pb	40.0	500	1000
Sélénium (Se)	Se	3.0	3	10
Zinc (Zn)	Zn	150.0	500	1500

https://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide-intervention/annexe2.pdf

Analyse des résultats de MITE

- Résultats MITE sur le plomb (Pb)
- Effet significatif des combinaisons (digestion/analyse/granulo/pédologie)
- Horizon H:
  - plus grande variabilité statistique;
  - concentrations plus élevées.
- Extraction multiacide:
  - concentrations élevées;
  - variabilité accrue (dépasse significativement le critère C).



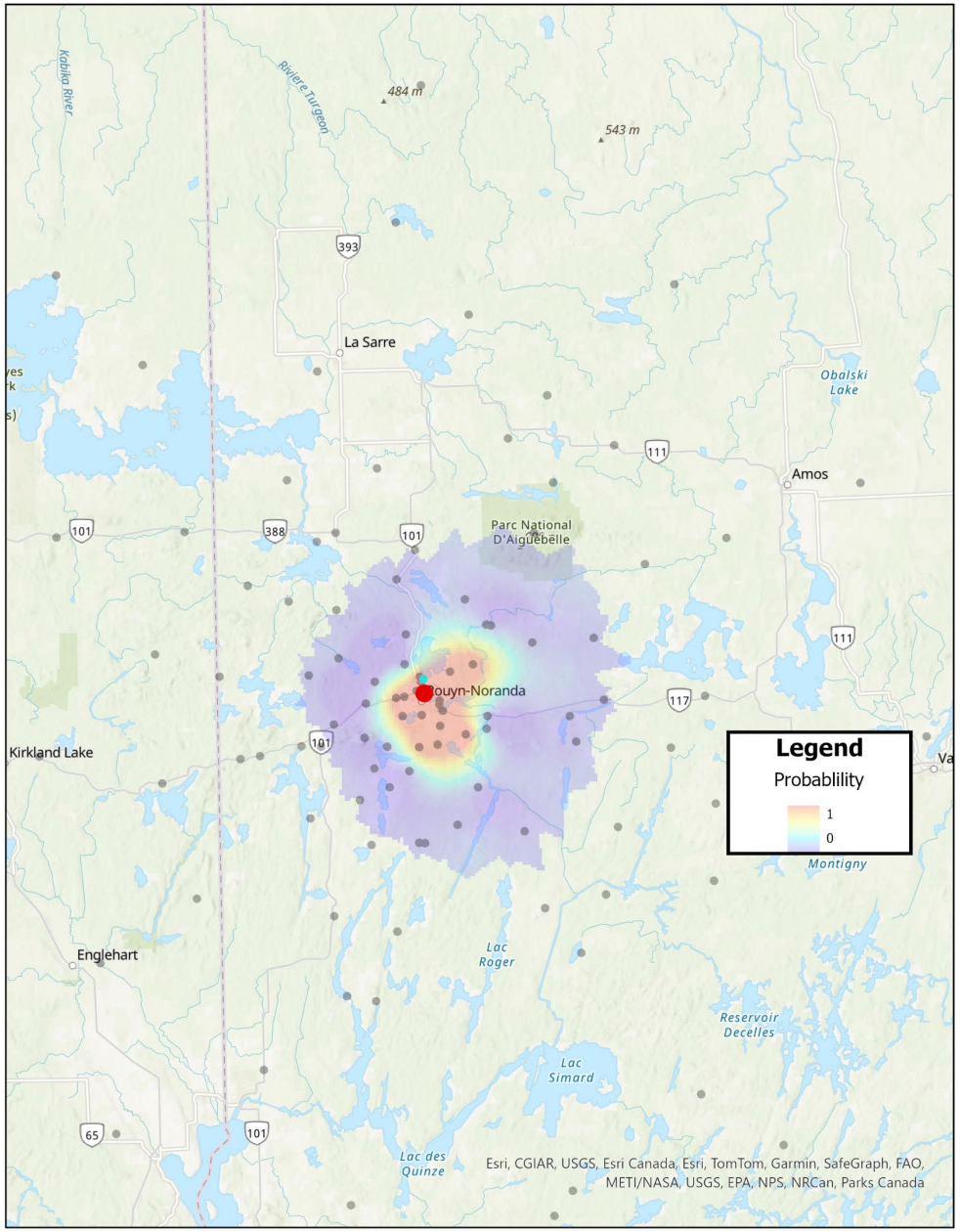
Modélisation données MITE

- Pb dans l'humus (Multi-acid + AquaR)
- Méthodologie :
  - krigeage ordinaire: modélisation initiale
  - Vario omnidirectionnel: nombre limité de données.
- Limites: incertitude des estimations non disponibles
- Krigeage d'indicatrice: quantifier incertitude pour interpréter le risque

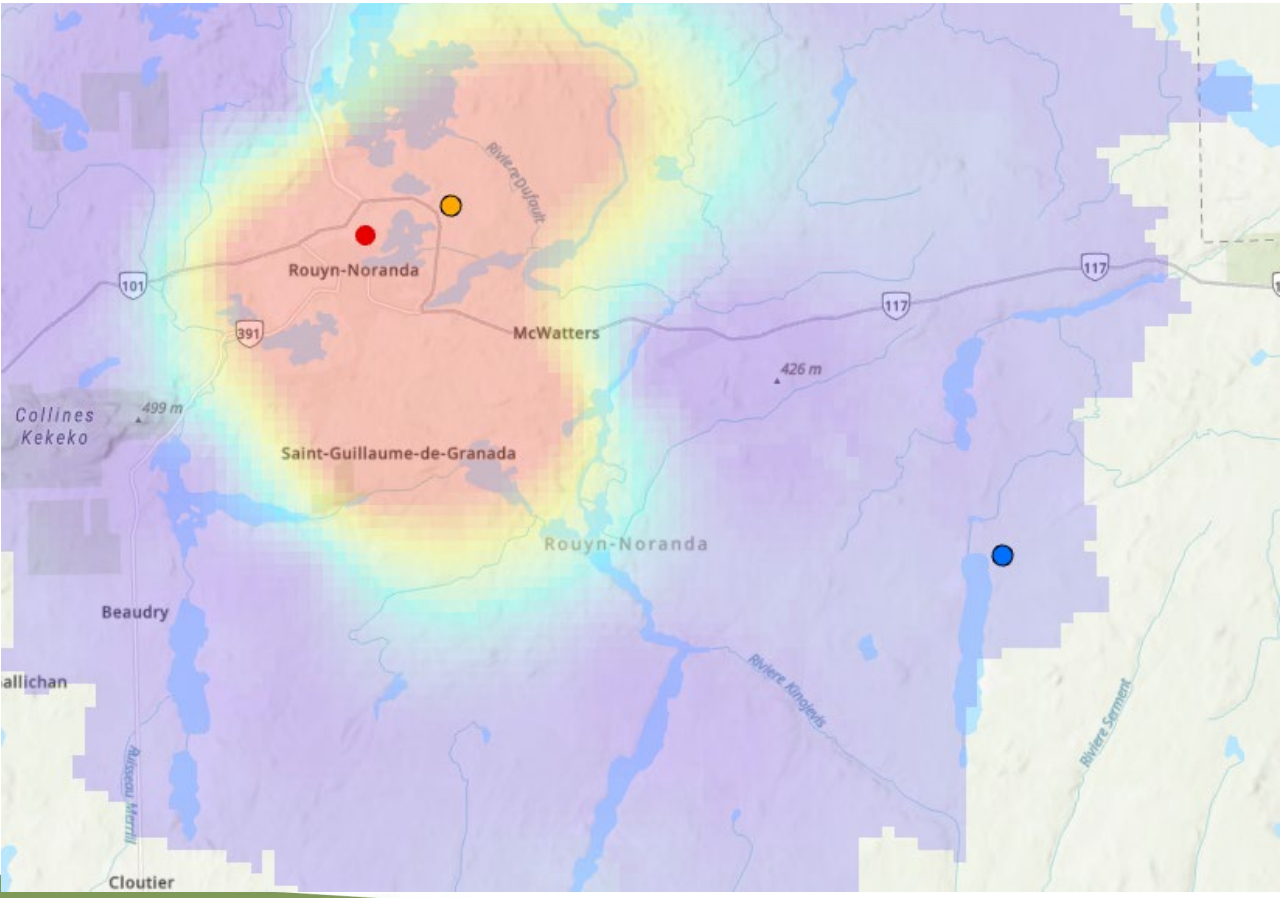
$$I(x;z) = \begin{cases} 1 & if\ Z(x) > z \\ 0 & else \end{cases}$$

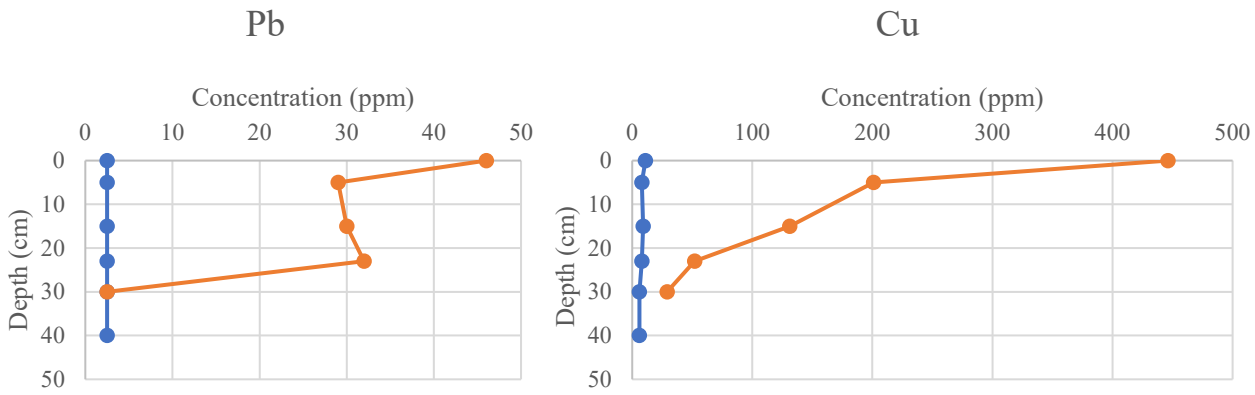
- Cartes: probabilité dépasser critères (z): A (40ppm), B (500ppm) et C (1000ppm)

$$P(Z(x) > z)$$

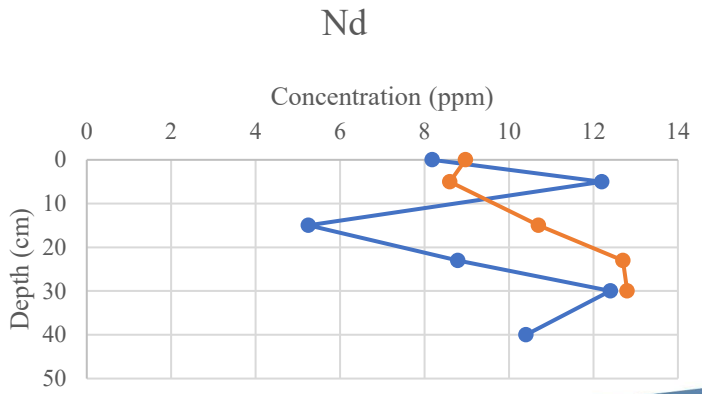


Résultats 2024 - Concentration sol minéral





Anthropique



Géogénique

Modélisation spatiale des métaux en milieu forestier

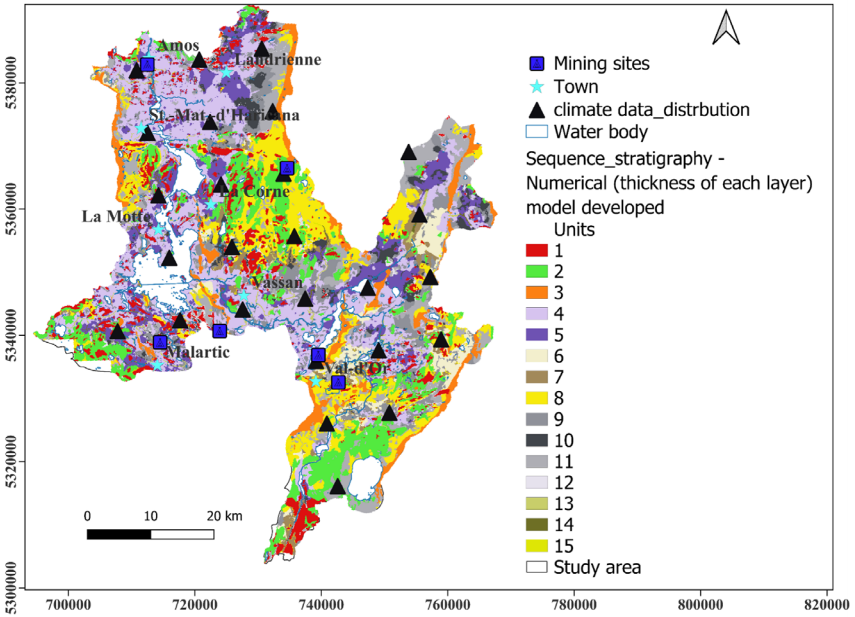
Travaux à venir

- Modélisation géostatistique
- Modélisation par apprentissage machine
- Combinaison des deux méthodes
- Carte de probabilité des critères spécifiques pour les métaux lourds dans les sols
- Origine des métaux : anthropique vs géogénique
- Modélisation spatiale des métaux dans les sols en Abitibi - maîtrise de Renato Quijada-Campos

UQÀM

Estimation stochastique de la recharge

- Vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination de surface par la recharge (Scanlon et al., 2002).
- Gestion de l'exploitation des eaux souterraines repose sur la recharge des aquifères.
- Estimation de la recharge demeure difficile à quantifier: incertitudes inhérentes (Healy, 2010).
- Évaluation de l'incertitude rarement appliquée dans les études d'estimation de la recharge (Xie et al., 2019).
- Estimation stochastique de la recharge et modélisation des eaux souterraines en Abitibi - Doctorat de Kassahun Aweke Arega

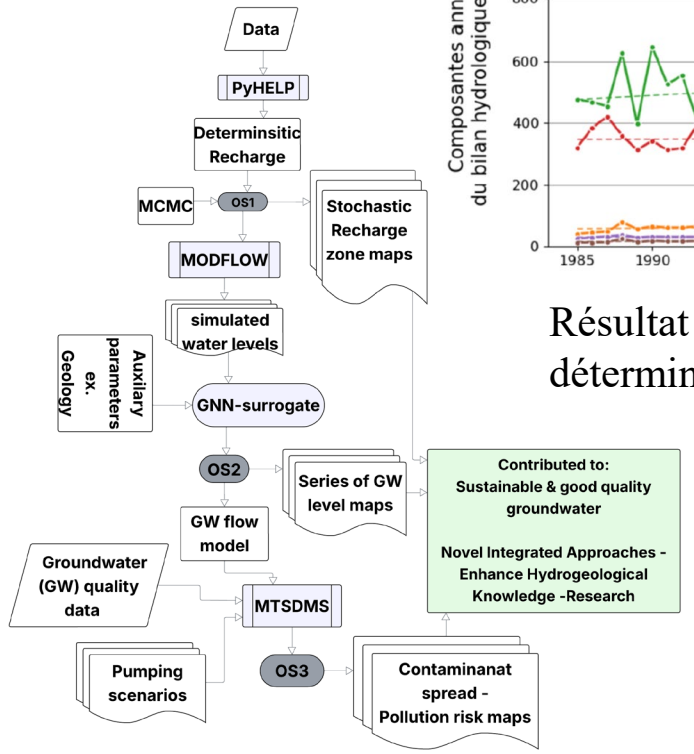


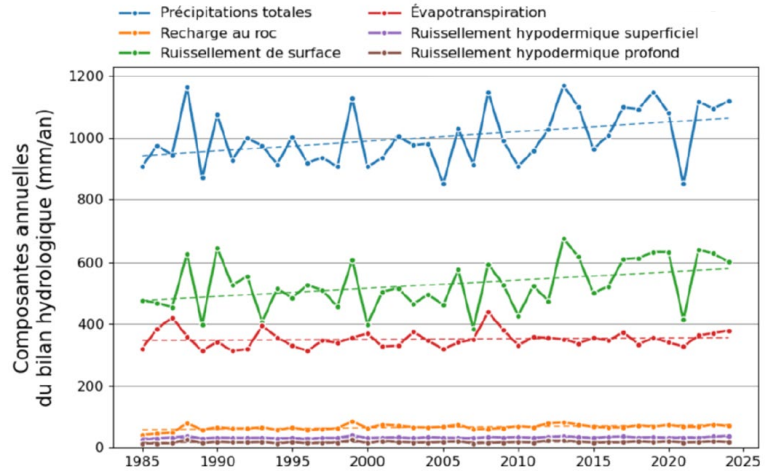
Sous-bassin de la rivière Harricana

POLYTECHNIQUE MONTREAL

Estimation stochastique de la recharge

- Estimation stochastique de la recharge et quantifier l'incertitude - identifier les zones vulnérables.
- Modélisation prédictive des niveaux d'eau souterraine - scénarios climatiques et anthropiques;
- Simulation du transport des contaminants - évaluation du risque.





Résultat préliminaire: bilan hydrique déterministe (pyHelp)

Contact Information

- Josué J. Jautzy
  josue.jautzy@nrcan-rncan.gc.ca
- Joëlle Marion
  joelle.marion@nrcan-rncan.gc.ca
- Nicolas Benoit
  nicolas.benoit@nrcan-rncan.gc.ca

Thank you / Merci!

© His Majesty the King in Right of Canada, as represented by the Minister of Natural Resources, 2022

Table 8. Concentration values of metals in snow from various sources, including the classification of Galloway et al. (1982).

Reference	Sample type	Location	Designation	Zn ppb[1]	Pb ppb	Cu ppb	Ni ppb	Cd ppb
Bulk precipitation								
Galloway et al. (1982)	precipitation (wet & dry)		***urban***	18–280 (34)	5.4–147 (44)	6.8–120 (41)	2–114 (12)	0.48–2.3 (0.7)
Galloway et al. (1982)	precipitation (wet & dry)		***rural***	1–311 (36)	0.6–64 (12)	0.4–150 (5.4)	0.6–48 (2.4)	0.008–46 (0.5)
Galloway et al. (1982)	precipitation (wet & dry)		***remote***	0.016–0.32 (0.22)	0.02–0.41 (0.09)	0.035–0.85 (0.06)	<DL <DL	0.004–0.639 (0.008)
Snow			***Industrial and urban***					
this study	snowpack	10 km from Rouyn-Noranda, Quebec	industrial, urban	10.9	7.98	31.5		0.28
Kiiza et al. (2000)	snowpack	10 km from Rouyn-Noranda, Quebec	industrial, urban	19.4	48.87	40.16		0.30
Reimann and De Caritat (1998)	snowpack	Kola Peninsula, Russia	industrial	17.3	8.43	690.50	853	315.095
Pilgrim and Hughes (1994)	snowpack	Belledune, New Brunswick	industrial	108.9	648.76			12.52
Gorzelska (1989)	snowpack	Inuvik (average), Nunavut	industrial	41.4	279.90	0.49	22	0.05
this study	snowpack	15 km from Rouyn-Noranda, Quebec	urban	5.6	3.28	11.66		0.17
Kiiza et al. (2000)	snowpack	15 km from Rouyn-Noranda, Quebec	urban	9.6	20.58	14.70		0.17
Jonasson (1973)	fresh snow	Ottawa, Ontario	urban	18–192 (25)	55–410 (83)	15–69 (19)	17–21 (19)	0.1–1 (0.7)
Jeffries and Snyder (1981)	snowpack	Sudbury, Ontario	urban			52.00		
Simonetti et al. (1996)	snowpack	outside of Montréal, Quebec	urban	11.7–169 (18)	0.24–0.95 (0.59)	0.59–0.94 (0.92)		0.049–0.115 (0.084)
			Rural					
this study	snowpack	25 km from Rouyn-Noranda, Quebec	rural	3.2	1.34	3.6		0.12
Kiiza et al. (2000)	snowpack	25 km from Rouyn-Noranda, Quebec	rural	4.6	6.99	4.80		0.09
Simonetti et al. (1996)	meltwater snowpack	western Quebec	rural	2.1–5.4	0.52–2.54	0.39–4.01		0.018–0.097
Simonetti et al. (1996)	meltwater snowpack	Lamothe (65 km east of Noranda)	rural	5.4	2.44	4.01		0.92
Barrie and Vet (1984)	snowpack	Val-d'Or region, western Quebec	rural		1.86–7.15 (2.11)	0.67–5.03 (1.27)	0.60 (0.60)	
Jonasson (1973)	snowpack	eastern Ontario	rural	10	8			
			Remote					
this study	snowpack	>200 km from Rouyn-Noranda, Quebec	remote	2.6	0.76	1.2		0.11
Kiiza et al. (2000)	snowpack	>200 km from Rouyn-Noranda, Quebec	remote	2.8	2.13	1.80		0.05
	snowpack	Kola Peninsula, Russia	remote	3.52	0.75	0.34	0.22	0.04
Barrie and Vet (1984)	snowpack	northern Quebec	remote		0.8–12.4	0.2–1.5	0.9–25	
Jickells et al. (1992)	fresh fallen snow	Scottish Highlands	remote	0.3–63 (4.2)		0.4–5 (0.7)		
Gorzelska (1989)	fresh fallen snow	20 km from Inuvik, Nunavut	remote	0.8	0.63	0.26	0.18	0.012
Gorlach and Boutron (1992)	recent snow	Antarctic	extreme remote	0.0042	0.0054	0.01		0.00031
Suttie and Wolf (1992)	recent snow	Antarctic	extreme remote	0.0004	0.004	0.01		0.00008
Davidson et al. (1981)	recent snow	Greenland	extreme remote	0.21	0.14	0.04	0.05	0.011
Boutron et al. (1993)	fresh snow	Dye 3, Greenland	extreme remote	0.016–0.300	0.013–2.7	0.013–2.65		0.0002–0.0145
Wolff and Peel (1985)	fresh snow	Dye 3, Greenland	extreme remote	0.008–0.048	0.005–0.09	0.002–0.015		0.0002–0.0013

DL = detection limit
[1] Parts per billion (ppb) are the units equivalent to µg/L of thawed snow.