

Biogéochimie et exploration minérale en contexte boréal – phase 2

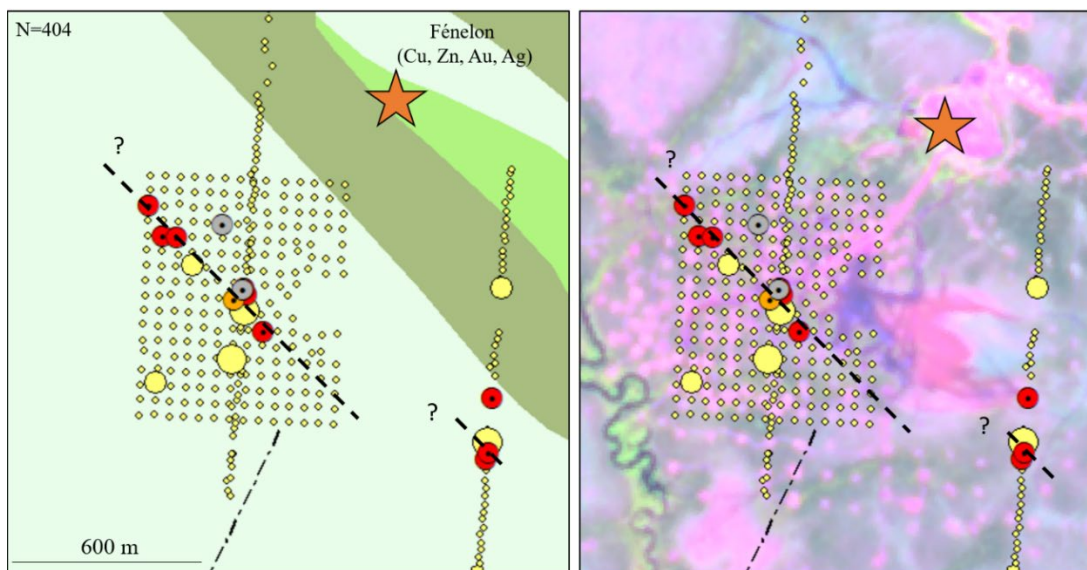
Biogeochemistry and Mineral Exploration in the Boreal Zone – Phase 2

Morgane Gigoux, Ph. D., CONSOREM

Joëlle Marion, M. Sc., CGC

Silvain Rafini, Ph. D., INRS

Sylvain Trépanier, géo., M. Sc. A., chercheur associé



Avertissement

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics au bénéfice de l'ensemble de la communauté géoscientifique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Gigoux, M., Marion, J., Rafini, S., et Trépanier, S. 2024. Biogéochimie et exploration minérale en contexte boréal. Rapport, projet CONSOREM 2023-03, 25 pages.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite du CONSOREM.



Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1
Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@ugac.ca

Site Web : www.consorem.ca



Résumé

Les résultats de la phase 1 ont démontré que 60 % du signal géochimique des écorces d'épinettes noires est contrôlé par les paramètres environnementaux (tourbière et pH) et métaboliques (croissance et diamètre; voir fiche synthétique A.1.4 dans Rafini et Trépanier, 2023). Cette phase 1 a été limitée aux écorces dans des contextes d'exploration loin de minéralisations connues (bruit de fond), et qui n'ont pas été réduites en cendre avant analyses. L'ensemble de ces choix ont des implications sur les résultats et les taux de succès/échecs de la méthode. Par ailleurs, les aiguilles et les rameaux de l'épinette noire sont également potentiellement des tissus pertinents pour l'exploration. Chacun de ces tissus présente des forces et des faiblesses qu'il est important de qualifier et de quantifier. La réduction en cendre est aussi pratiquée, et elle permet notamment d'augmenter de quelques ordres de grandeur les concentrations de certains éléments comme l'or par exemple, au détriment de certains éléments volatils qui seront perdus. De premiers conseils stratégiques adressés au praticien, depuis la planification du levé jusqu'à l'étape d'interprétation des données, ont été suggérés afin d'optimiser le succès d'un levé biogéochimique. Néanmoins, il est important de souligner que lors de la phase 1 du projet, aucune donnée n'a été collectée directement au-dessus d'un gisement connu ou dans des zones minéralisées identifiées dans le SIGÉOM.

La phase 2 du projet a ainsi permis de travailler sur plusieurs levés en contexte minéralisé afin de répondre à la question de l'efficacité de la méthodologie en contexte d'exploration, qui restait en suspens jusqu'à maintenant. L'ensemble des levés travaillés en contexte aurifère (indices et/ou mines) en Abitibi démontrent un succès pour la détection de l'or dans les écorces non réduites en cendre, avec plus de 50 % des échantillons anomaux et l'ensemble des échantillons supérieurs à la limite de détection. Les études de cas provenant du Manitoba démontrent que la méthode biogéochimique est également efficace pour la détection de certains minéraux critiques et stratégiques, particulièrement lorsque les rameaux et les écorces sont combinés et réduits en cendre pour optimiser la détection de Li et Ta, ce qui a été démontré dans le secteur du gisement de Tanco, une pegmatite de type lithium-césium-tantale (LCT; Fedikow *et al.*, 1990-1992). La comparaison des gisements de Twin Lake (Au, Ghorbani *et al.*, 2022) et de Tanco (LCT) a démontré que les facteurs d'enrichissement entre le niveau de base et l'empreinte étaient nettement supérieurs en biogéochimie (jusqu'à 100 000 fois pour Ta) par rapport aux méthodes conventionnelles habituellement utilisées en environnement secondaire (till, sédiments de fond de lac, sols).

Un autre aspect du projet souligne l'impact et l'importance de la contamination anthropique en contexte d'exploration minérale. Le nombre important d'anomalies résiduelles en Cu, As et Pb sur le levé de Patris, localisé à 30 km à l'est de la fonderie Horne, peut être clairement interprété comme étant directement lié aux rejets de la fonderie puisque rien d'autre ne saurait justifier de si importantes anomalies en Cu. Les valeurs brutes sont toutes de 100 % supérieures à la médiane en Cu dans les écorces (cf. phase 1). Les secteurs minéralisés représentent inévitablement des contextes contaminés étant donné les activités de forages, de déboisements, de re-végétalisation, d'extraction, de passages automobiles, etc. Les autres levés montrent systématiquement des contaminations en Pb et Bi dans les écorces réparties de façon homogène à l'échelle du levé. L'écorce a la capacité d'hyper-accumuler les éléments toxiques tels que le plomb, le mercure, ou encore le cadmium, qui sont rejetés par les parties vivantes de l'arbre. De ce fait, elle est extrêmement sensible à la contamination anthropique et notamment aux catalyseurs de voiture, une des causes principales des teneurs élevées en lanthanides, bismuth, plomb, tungstène, titane, etc., à proximité des routes et des chemins forestiers.

En parallèle, une phase expérimentale a également été développée en collaboration avec Joëlle Marion (Commission géologique du Canada), afin de pallier l'opacité des laboratoires commerciaux sur le processus détaillé de réduction en cendre des écorces d'épinettes. Les différents tests



réalisés ont démontré qu'il était nécessaire de chauffer les échantillons par paliers de 50 °C entre 250 et 350 °C avec une pause de 10 minutes entre chaque palier, afin d'éviter les phénomènes de combustion. La température finale doit être de 475 °C, comme décrite dans les protocoles de laboratoire et selon les conseils de Dunn (2007). La réduction en cendre réduit d'environ 30 à 35 fois le poids initial du matériel non réduit en cendre.

Deux sites ont été testés : Ménarik (Baie-James) et à proximité de la fonderie Horne à Rouyn-Noranda (Abitibi). Les analyses des cernes de croissances des épinettes ont été comparées aux teneurs analysées dans les écorces en cendre et non en cendre. Dans le premier cas de Ménarik, les teneurs en Cr, As et Ni sont très bien détectées à Ménarik 3, en cohérence avec les indices minéralisés connus à proximité. Des teneurs en lithium sont également détectées, soulevant la question d'un potentiel lithinifère dans le secteur. Il faut noter que le lithium n'est pas détecté dans les cernes de croissance de l'épinette et très faiblement dans les écorces non en cendre. Là encore, le protocole démontre l'intérêt de la réduction en cendre pour la détection du lithium. En contexte contaminé dans un rayon de moins de 10 km de la fonderie, les teneurs des écorces (non réduites en cendre) en As, Cr et Pb sont de 36 à 49 fois supérieures à la médiane des écorces en Abitibi. Ceci démontre l'ampleur de la contamination anthropique sur les écorces des épinettes noires dans la région de Rouyn-Noranda. Les concentrations des métaux dans les écorces sont nettement supérieures à celles enregistrées par les cernes de croissance des arbres.

Abstract

The results of phase 1 showed that 60% of the geochemical signal in black spruce bark is controlled by environmental parameters (bog and pH) and metabolic parameters (growth and diameter; see summary sheet A.1.4 in Rafini and Trépanier, 2023). Phase 1 was limited to bark samples collected in exploration contexts far from known mineralization (background noise) and that were not reduced to ash prior to analysis. All of these choices have implications for the results and success/failure rates of the method. In addition, black spruce needles and stems are also potentially relevant tissues for exploration. Each of these tissues has strengths and weaknesses that are important to qualify and quantify. Ashing is also commonly done, and it can increase the concentrations of certain elements, such as gold, by several orders of magnitude, at the expense of certain volatiles that will be lost. Initial strategic advice for practitioners, from survey planning to data interpretation, has been suggested to optimize the success of a biogeochemical survey. Nevertheless, it is important to note that during phase 1 of the project, no data was collected directly above a known deposit or in mineralized areas identified in the SIGÉOM.

Phase 2 of the project thus made it possible to work on several surveys in a mineralized context in order to answer the question of the methodology's effectiveness in an exploration context, which had remained unanswered until now. All surveys conducted in a gold context (prospects and/or mines) in the Abitibi demonstrate success in detecting gold in bark that was not ashed, with more than 50% of samples being anomalous and all samples being above the detection limit. Case studies from Manitoba show that the biogeochemical method is also effective for detecting certain critical and strategic minerals, particularly when stems and bark are combined and ashed to optimize the detection of Li and Ta, as demonstrated in the area of the Tanco deposit, a lithium-cesium-tantalum pegmatite (LCT; Fedikow *et al.*, 1990-1992). Comparing the Twin Lake (Au, Ghorbani *et al.*, 2022) and Tanco (LCT) deposits showed that the enrichment factors between the base level and the footprint were significantly higher in biogeochemistry (up to 100,000 times for Ta) compared to conventional methods commonly used in secondary environments (till, lake bottom sediments, soils).

Another aspect of the project highlights the impact and significance of anthropogenic contamination in the context of mineral exploration. The significant number of residual anomalies in Cu, As, and Pb on the Patris survey, located 30 km east of the Horne smelter, can clearly be interpreted as



being directly related to smelter discharges, since nothing else could justify such significant Cu anomalies. The raw values are all 100% above the median for Cu in the bark (see phase 1). The mineralized areas inevitably represent contaminated contexts given the activities of drilling, deforestation, revegetation, extraction, vehicle traffic, etc. The other surveys systematically show Pb and Bi contamination in bark distributed evenly across the survey area. Bark has the ability to hyperaccumulate toxic elements such as lead, mercury and cadmium, which are rejected by the living parts of the tree. As a result, it is extremely sensitive to anthropogenic contamination, particularly from car catalytic converters, one of the main causes of high levels of lanthanides, bismuth, lead, tungsten, titanium, etc., near roads and forest paths.

An experimental phase was concurrently developed in collaboration with Joëlle Marion (Geological Survey of Canada) to compensate for the lack of transparency of commercial laboratories on the detailed process of reducing spruce bark to ash. The various tests carried out showed that it was necessary to heat the samples in 50°C increments between 250°C and 350°C with a 10-minute pause between each increment to avoid combustion. The final temperature needs to be 475°C, as described in laboratory protocols and according to Dunn (2007). Ashing reduces the initial weight of the original material by approximately 30 to 35 times.

Two sites were tested : Ménarik (James Bay) and near the Horne smelter in Rouyn-Noranda (Abitibi). The analyses of spruce growth rings were compared to the contents analyzed in ashed and non-ashed bark. In the first case in Ménarik, the Cr, As and Ni contents were clearly detected at Ménarik 3, which is consistent with the known mineralized showings nearby. Lithium values were also detected, raising the question of lithium potential in the area. It should be noted that lithium was not detected in spruce growth rings and was detected at very low levels in bark that was not ashed. Here again, the protocol demonstrates the value of ashing for lithium detection. In a contaminated context within a radius of less than 10 km from the smelter, the concentrations of As, Cr and Pb in bark (not reduced to ash) are 36 to 49 times higher than the median for bark in the Abitibi. This demonstrates the extent of anthropogenic contamination of black spruce bark in the Rouyn-Noranda region. Metal concentrations in bark are significantly higher than those recorded in tree growth rings.



Table des matières

1	INTRODUCTION ET OBJECTIFS.....	7
2	CAS D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE.....	8
3	RÉSULTATS EN CONTEXTES MINÉRALISÉS	9
3.1	LEVÉS DU MANITOBA (DONNÉES PUBLIÉES).....	9
3.2	LEVÉS EN ABITIBI (DONNÉES DE COMPAGNIES MEMBRES DU CONSOREM)	9
3.2.1	<i>Levé de Patris (Exploration Midland, n=149).....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Levé de Fénelon (Wallbridge, n=407).....</i>	<i>14</i>
3.2.3	<i>Levé de Monique (Probe Gold, n=521)</i>	<i>16</i>
4	DÉVELOPPEMENT EXPÉRIMENTAL	17
4.1	PROTOCOLE DÉTAILLÉ (DÉVELOPPÉ EN JUILLET 2023 PAR JOËLLE MARION)	18
4.2	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	19
5	CONCLUSION	23
6	REMERCIEMENTS.....	24
7	RÉFÉRENCES	24



1 Introduction et objectifs

Depuis 2018, des levés biogéochimiques sont utilisés en exploration chez certaines compagnies minières au Québec, bien que la méthode existe depuis près d'un siècle. Il s'agit d'une méthodologie encore sous-utilisée en dépit de son potentiel. En cause, un certain scepticisme et une méconnaissance du monde végétal, bien éloigné de celui de la géologie et de l'industrie minière. Cette complexité dépend de différents paramètres qui vont interagir entre eux : les facteurs physico-chimiques et physiologiques de la plante, son métabolisme et ses interactions avec l'environnement vont venir se superposer au signal géologique et métallogénique. Par conséquent, plusieurs questions essentielles relatives à l'utilisation du signal biogéochimique dans les végétaux en exploration demeurent ouvertes : 1) est-on capable de détecter l'empreinte d'un gisement dans les tissus d'un arbre ? 2) si oui, quelle en est sa composition ? 3) quels sont les facteurs qui peuvent influencer la composition de l'empreinte et de quelle manière ? (Protocole d'échantillonnage, nature et épaisseur du sol, drainage, système racinaire, topographie, climat, métabolisme, géologie, contaminations, type de tissu échantillonné.); 4) quelles sont les méthodes statistiques et/ou géostatistiques appropriées au traitement de ces données et 5) quelles conclusions en tirer sur l'efficacité de la méthode en exploration ?

L'épinette noire est une essence uniquement présente en Amérique du Nord et naturellement absente ailleurs dans le monde (Gagnon et Morin, 2001). Quand on s'intéresse à l'épinette, il est nécessaire de comprendre son interaction avec son environnement. Les principaux paramètres qui peuvent influencer la géochimie des végétaux sont les suivants : le métabolisme et la croissance de la plante, le type de sol, la qualité du drainage du sol, l'épaisseur du sol, le type de dépôt de surface, la géomorphologie, la profondeur du système racinaire, les variations saisonnières, la contamination anthropique.

Les éléments nutritifs de la plante peuvent interférer directement avec ceux recherchés en exploration. La plante absorbe les éléments essentiels à sa croissance, mais également une partie de ceux qui ne sont pas nécessaires à sa survie. Généralement, ces éléments non-essentiels, surtout s'ils sont toxiques pour la plante (Pb, Cd, As, etc.), vont être rejetés par les parties vivantes de l'arbre (rameaux, aiguilles, feuilles) puis concentrés dans l'écorce externe par processus de translocation. Par exemple, Cu et Zn sont des micro-nutriments essentiels à la croissance de la plante tandis qu'Au et As ne le sont pas. Les macro- et micro-nutriments de la plante ainsi que leur comportement au sein des différents tissus sont bien documentés et synthétisés dans Dunn (2007).

L'effet des tourbières sur la géochimie de l'écorce a aussi été clairement démontré dans la phase 1, avec des teneurs jusqu'à 2-3 fois supérieures dans les écorces d'épinettes poussant directement dans les tourbières (Rafini et Trépanier, 2023).

La plupart des concentrations en métaux sont positivement corrélées à la pente et au diamètre de l'épinette. Il existe donc une relation claire entre la géochimie de l'épinette, son environnement et sa croissance. Certains de ces effets ont été quantifiés dans la phase 1 grâce à la méthode d'analyse en composante principale. Les résultats démontrent que 60 % du signal géochimique des écorces d'épinettes noires sont contrôlés par les paramètres environnementaux (tourbière, pH, pente, drainage) et métaboliques (croissance et diamètre; Gigoux et Trépanier, 2023; Rafini et Trépanier, 2023). La méthode statistique par analyse résiduelle sur composante principale a également été utilisée par la suite pour traiter ces données. Cette méthode a permis de faire ressortir les vraies anomalies du jeu de données, puisqu'elle permet de s'affranchir des trois premières composantes, pour faire ressortir le signal de la minéralisation potentielle dans le sol si présente. Néanmoins, la relation entre les différents horizons du sol et les tissus de l'épinette est mal connue. La question est de savoir s'il existe une corrélation entre la géochimie de l'horizon B et la géochimie des tissus de l'épinette. Une étude exposée dans Dunn (2007) montre une excellente corrélation entre les teneurs en Au et As dans l'horizon C et celles des écorces de



conifères (le sapin de Douglas et l'épinette d'Engelmann) en Colombie-Britannique. Cette relation est-elle valable en Abitibi ?

La démonstration pourrait aider à visualiser l'avantage ou non d'échantillonner une épinette plutôt qu'un sol en exploration. L'implication se joue au niveau des gains de temps et d'argent, selon la saison du levé, l'échantillonnage de sol étant plus contraignant en hiver par exemple. L'enjeu est aussi de savoir quel est le tissu de l'épinette le mieux corrélé au sol (tissus vivants ou mort). Cette étude a permis une constatation supplémentaire, soit la mauvaise qualité d'analyses pour l'or à partir des écorces non réduites en cendre. La réduction en cendre permet de mieux détecter certains éléments habituellement proches de la limite de détection. Cependant, il existe certaines zones grises autour du protocole de réduction en cendre au sein des laboratoires commerciaux. Le comportement des éléments peut être très hétérogène au cours de la chauffe et impliquer des facteurs d'enrichissement eux aussi très hétérogènes.

Ajoutés à ces divers paramètres d'influence, les effets de la contamination anthropique en Abitibi ne sont pas toujours simples à quantifier et peuvent être significatifs. Les écorces sont exposées aux dépôts passifs de pollution atmosphérique, de pluies acides, de poussières de route, mines et autres. Des études dendrochimiques sur des troncs d'épinettes noires autour de Rouyn-Noranda montrent clairement les impacts des émissions sur les teneurs en Pb, As et Cd, dans un rayon de plusieurs dizaines de kilomètres (Savard *et al.*, 2006; Dinis *et al.*, 2021), concentrations qui se retranscrivent également dans les sols. Certaines zones sont donc à éviter en contexte d'exploration afin de limiter les biais de contamination.

Pour donner suite au projet 2022-03, une seconde phase du projet a été suggérée pour valider l'application de la méthode biogéochimique en contextes minéralisés. Les principaux objectifs sont les suivants : 1) travailler sur les données d'écorces d'épinettes noires en contexte minéralisé; 2) développer des protocoles expérimentaux pour améliorer le QA/QC et avoir un meilleur contrôle sur le protocole de réduction en cendre et 3) poursuivre l'optimisation de la stratégie d'échantillonnage en vue de planifier des levés d'acquisition de données au Québec en 2024-2025.

2 Cas d'étude et méthodologie

Huit levés d'épinettes noires ont été travaillés en contexte minéralisé : trois d'entre eux sont issus de publications scientifiques et rapports publics (Twin Lakes, Tanco et Tansim), et cinq sont des levés de membres du CONSOREM (Fenelon-Wallbridge, Malartic-O3 Mining, Patris-Exploration Midland, Francoeur-UQAT, Monique-Probe Gold). Les contextes métallogéniques sélectionnés sont aurifères et lithinifères.

Méthodologie

Afin de faire ressortir les échantillons anomaux, l'utilisation des statistiques multivariées a été privilégiée. Ainsi, la méthode par analyse résiduelle sur composante principale (Trépanier, 2005; Bonham-Carter et Grunsky, 2018) a été utilisée, permettant de filtrer les effets des tourbières et du métabolisme, dans le but de calculer les anomalies résiduelles et les seuils anomaux pour chacun des métaux d'intérêt (p. ex. Cu, Zn, Ni, Ag, Pb, Hg, Li, Cs). L'or a été exclu des calculs statistiques au regard des mauvaises qualités de détection et d'analyse sur les écorces non réduites en cendre des levés compilés dans la phase 1 (52 % des données < limite de détection). Seuls des seuils anomaux à partir des valeurs brutes ont été suggérés pour détecter les écorces anormales en or en fonction de la présence de tourbières ou non. La méthodologie est détaillée dans Rafini et Trépanier (2023), fiche 1.A.4. « Levés biogéochimiques en exploration minérale ».

Les seuils anomaux à utiliser pour les autres métaux à partir de la distribution des valeurs résiduelles ont été directement intégrés dans les calculs d'indices rendus accessibles dans le logiciel LithoModeleur, v. 4.4.2, dans le module « environnement secondaire ». Les différentes



étapes d'accès à la méthode dans LithoModeleur sont détaillées dans la présentation associée à ce rapport.

La valeur résiduelle calculée est la différence entre la valeur observée et la valeur prédite par la régression linéaire multiple. Les seuils sont déterminés à partir des ruptures de pente de la distribution normale des valeurs résiduelles et des populations d'échantillons qui s'éloignent de cette distribution normale. Le détail de la méthodologie est illustré dans la fiche synthétique A.1.4 dans Rafini et Trépanier, 2023.

À ce jour, la méthode de calcul n'a été validée que pour les écorces non en cendre. Il serait nécessaire de déterminer les seuils anomaux pour les écorces en cendres afin de pouvoir appliquer la même méthodologie. Puisque la plupart des éléments sont sur-concentrés au cours de la réduction en cendre, les seuils seront totalement différents et nettement supérieurs à ceux calculés pour les écorces non en cendres. Des données préliminaires comparatives d'écorces en cendres et non en cendres sur le levé de Monique (Probe Gold) permettent déjà de discuter des facteurs d'enrichissement (section 4 de ce rapport), et du comportement de certains éléments au cours de la chauffe. Certains éléments sont perdus avec l'augmentation de la température (p. ex. Hg), alors que d'autres sont enrichis (p. ex. Au, Li) avec des facteurs d'enrichissement plus ou moins homogènes d'un élément à l'autre.

3 Résultats en contextes minéralisés

3.1 Levés du Manitoba (données publiées)

L'étude comparative des levés de Twin Lakes (Au, Ghorbani *et al.*, 2022) et de Tanco (LCT, Fedikow *et al.*, 1990-1992) a permis de mettre en évidence que les facteurs d'enrichissement en biogéochimie, entre le niveau de base et l'empreinte, sont nettement supérieurs aux méthodes conventionnelles utilisées dans l'environnement secondaire (till, sols, lacs). La médiane en lithium des écorces réduites en cendre est d'environ 1,1 ppm à Twin Lakes, ce qui est considéré comme le niveau de base puisqu'il s'agit d'un gisement aurifère non minéralisé en lithium. Tanco montre par contre une médiane de 83 ppm dans les écorces en cendre et de 199 ppm dans les aiguilles en cendres (Figure 1). L'empreinte minéralisée est ainsi enrichie d'environ 75 fois le niveau de base en lithium. En contexte de gîtes de type LCT, le tantale est un élément très délicat à analyser, même dans les écorces réduites en cendre. L'étude de Tanco montre que la réduction en cendre des rameaux pour la détection de Ta, semble bénéfique pour l'exploration des MCS. Ainsi, le facteur d'enrichissement du tantale est très important, jusqu'à 100 000 fois, puisqu'il est très mal détecté en dehors des contextes minéralisés dans les écorces.

3.2 Levés en Abitibi (données de compagnies membres du CONSOREM)

L'avantage des levés fait par les compagnies membres du CONSOREM est que les échantillons ont été analysés par le même laboratoire (Actlab) et *via* le même protocole d'analyse et de dissolution des écorces non en cendre (2G). Le levé de Monique fait exception avec certaines écorces qui ont été réduites en cendre afin d'avoir l'opportunité de comparer les résultats avec celles non réduites en cendre en contexte aurifère. La distribution spatiale des levés de la phase 1 et de la phase 2 est visible sur la Figure 2.

Le levé de Francoeur, réalisé juste au-dessus de zones minéralisées aurifères, ne sera pas discuté en détail ici. Il s'agit avant tout d'épinettes blanches qui ont été analysées par la méthode INAA, non réduit en cendre (Actlab, 2B), et qui ne sont donc pas directement comparables aux épinettes noires. Les résultats montrent néanmoins un succès incontestable pour la détection de l'or dans les tissus de l'épinette blanche avec une performance supérieure des rameaux par rapport aux écorces. L'avantage de cette méthode d'analyse est qu'elle permet l'analyse des éléments halogènes qui sont perdus lors de la réduction en cendre. Les éléments halogènes (p. ex. Br, Cl,

F) sont connus pour être des ligands importants dans le transport des métaux au sein des fluides hydrothermaux. Par conséquent, la coïncidence d'anomalies dans ces éléments révèle probablement des zones ayant connu une activité hydrothermale impliquant soit des fluides d'origine magmatique, soit des fluides météoriques ayant interagi avec des réservoirs crustaux riches en éléments halogènes tels que les évaporites (Dunn, 2007).

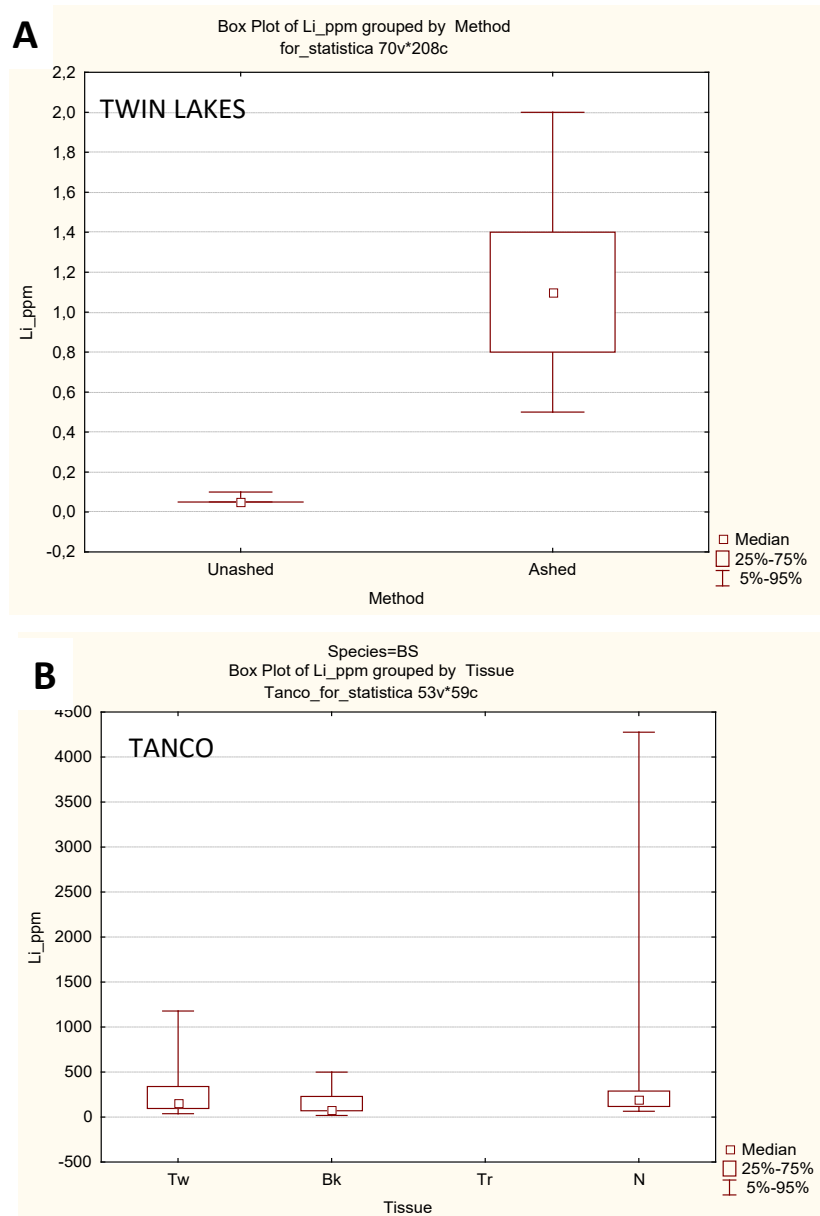


Figure 1. A) Diagramme boîte à moustache des teneurs en lithium (ppm) des écorces non en cendre (*Unashed*) et en cendre (*Ashed*) des écorces d'épinettes noires à Twin Lakes (Ghorbani *et al.*, 2022); B) Diagramme boîte à moustache des teneurs en lithium (ppm) de différents tissus d'épinette noire réduits en cendre à Tanco (Tw : rameaux, Bk : écorce, Tr : tronc, N : aiguille; Fedikow *et al.*, 1990-1992).

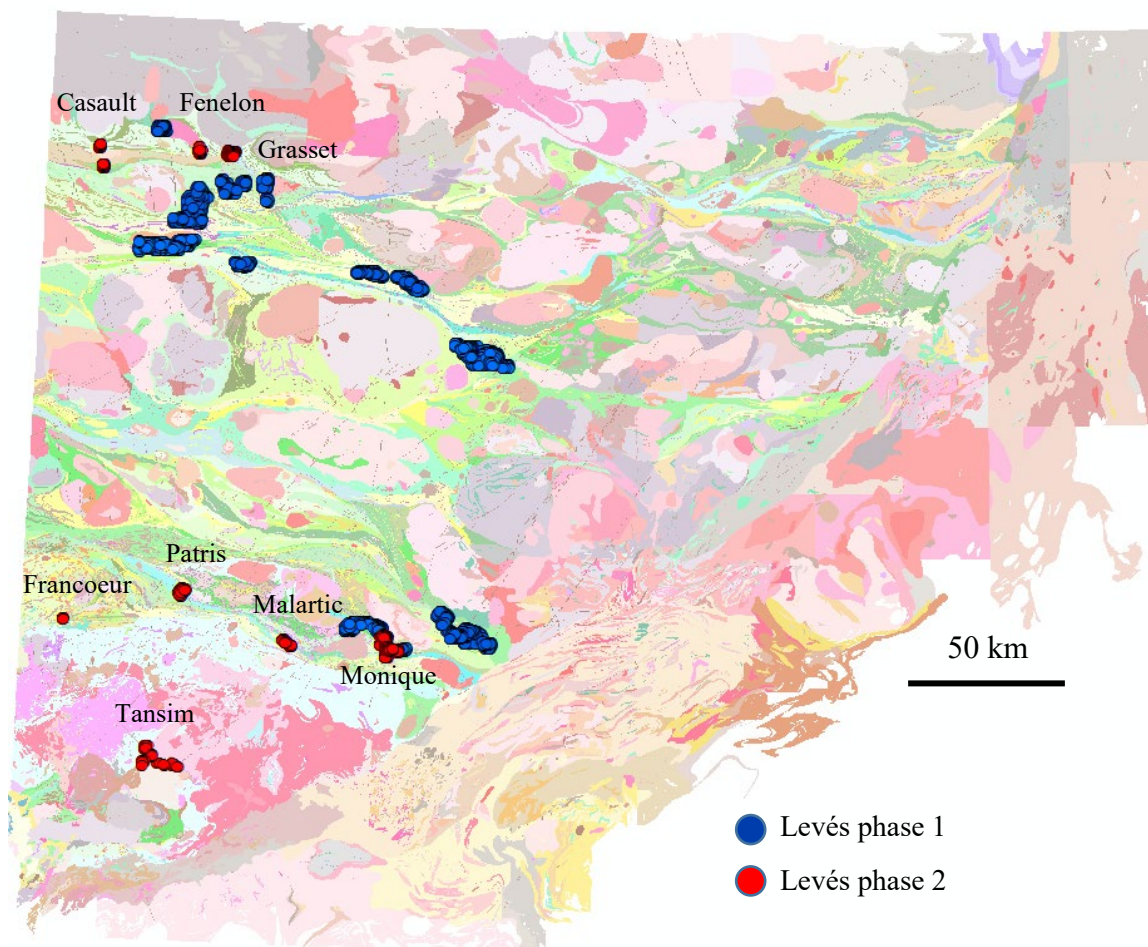


Figure 2. Distribution des levés d'épinettes noires travaillés au cours des phases 1 et 2 du projet en Abitibi. En bleu, les levés de la phase 1, en rouge, les levés de la phase 2; carte géologique du SIGÉOM, 2024.

Le levé de Tansim est un bon exemple de non-succès en exploration minérale pour plusieurs raisons (Lemieux et Beloborodov, 2021). Aucun paramètre physique tel que le diamètre des arbres, la densité végétale, la pente ou encore la nature des dépôts secondaires ne sont considérés. De plus, la majorité du levé se localise sur des dépôts glacio-lacustres et à proximité d'eskers, ce qui est clairement déconseillé en biogéochimie. Il aurait été plus judicieux de réaliser un maillage plus fin (au 25-50 m) sur des dépôts de till présents dans le secteur, plus près des indices minéralisés. La distance entre les épinettes est beaucoup trop élevée (plus de 300 m) pour avoir accès à un signal pertinent et rigoureux du sous-sol.

De plus, des problèmes d'échantillonnage ou analytiques sont fortement suspectés, puisque de nombreux éléments essentiels et non essentiels sont en dessous de la limite de détection, alors que les écorces ont été réduites en cendre (p. ex. Li, Ta, As, Na, Fe). Il faut noter que deux espèces différentes ont été échantillonnées, soient des épinettes noires et blanches, ce qui implique un métabolisme potentiellement différent ajoutant une variable inconnue supplémentaire.

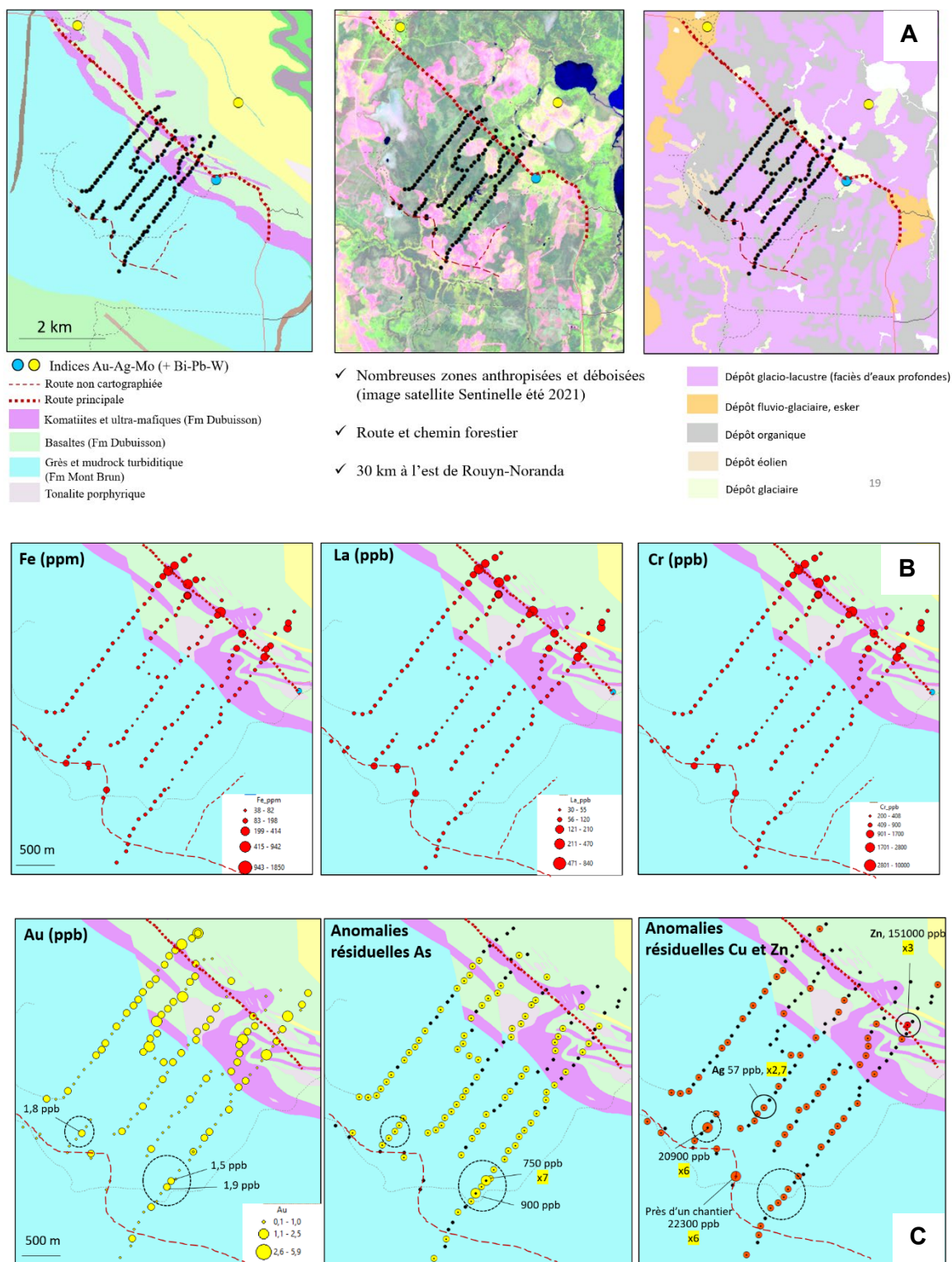
Les levés de Patris, Fénélon et Monique ont été travaillés en détail. Les résultats et interprétations sont les suivantes :

3.2.1 Levé de Patris (Exploration Midland, n=149)

Le contexte géologique du levé de Patris est présenté à la Figure 3A. Le levé est dominé par des dépôts glacio-lacustres et organiques. De nombreuses zones déboisées ainsi que des routes sont présentes sur le levé (Figure 3A). Les teneurs en Fe, La, Cr, W, Ti, et Ga sont maximales le long de la route principale et le long du chemin forestier, comme l'illustre la Figure 3B. Ces éléments sont directement liés à de la contamination anthropique, avec des valeurs brutes jusqu'à 42 fois supérieures à la médiane des écorces en Abitibi. Une étude de Fedikow *et al.* (1996) montre que Cr, Fe et les lanthanides sont des éléments très enrichis dans les brindilles et les aiguilles des épinettes noires le long de la route principale menant à la mine d'or McLellan, au Manitoba. La simple interpolation des données (n = 2 036) permet de retracer la route principale de la mine. Les pots d'échappement, les catalyseurs de voiture, les émanations, etc., à proximité de la mine en activité sont en cause. L'influence des routes est considérable jusqu'à 150 m de distance, les teneurs diminuant au-delà de cette distance.

Le levé de Patris est un succès pour la détection de l'or dans les écorces non réduites en cendres, avec 49 % des échantillons anomaux supérieurs au 95^e centile (seuil > 1 ppb) dont 5 % supérieurs au 97^e centile (Figure 3C). Les plus grosses anomalies se localisent essentiellement dans les roches mafiques à ultramafiques de la Formation de Dubuisson. Le calcul des anomalies résiduelles en As et Cu démontre que respectivement, 60 % et 42 % des échantillons sont anomaux sur l'ensemble du levé (Figure 3C). Il y a une seule anomalie résiduelle en Zn en bord de route et une seule en Ag dans les roches sédimentaires. Pour l'exploration, la stratégie serait de coupler les anomalies en or et celles en As afin de cibler des secteurs d'intérêt, le signal étant très homogène à l'échelle du levé. La conclusion ici est que le nombre d'anomalies résiduelles en As et Cu est bien trop élevé pour que celles-ci soient toutes indicatrices de minéralisation. La seule explication valable est que ces anomalies soient de source anthropique. En effet, Patris est localisé à 30 km au nord-est de la fonderie de Rouyn-Noranda (Figure 4). Les vents dominants sont très régulièrement nord-est, ce qui implique des dépôts atmosphériques de cuivre et d'arsenic dans un rayon d'au moins 50 km sur les tissus des épinettes noires, comme le démontre les études de Bonham-Carter *et al.* (2005), Dinis *et al.* (2021) et Hou *et al.* (2023) autour de la fonderie de Rouyn-Noranda. Ce sont des dépôts qui vont également s'accumuler dans les sols, puis être assimilés par les racines des arbres, l'écorce ayant une habilité à hyper-accumuler les éléments toxiques ou en surplus, rejetés par les tissus vivants.

Le cas du levé de Patris démontre l'impact direct de la contamination anthropique sur des levés d'exploration. Il est donc indispensable de qualifier et de quantifier, dans la mesure du possible, cette variable qui peut générer des biais importants dans la détermination des anomalies métalliques.



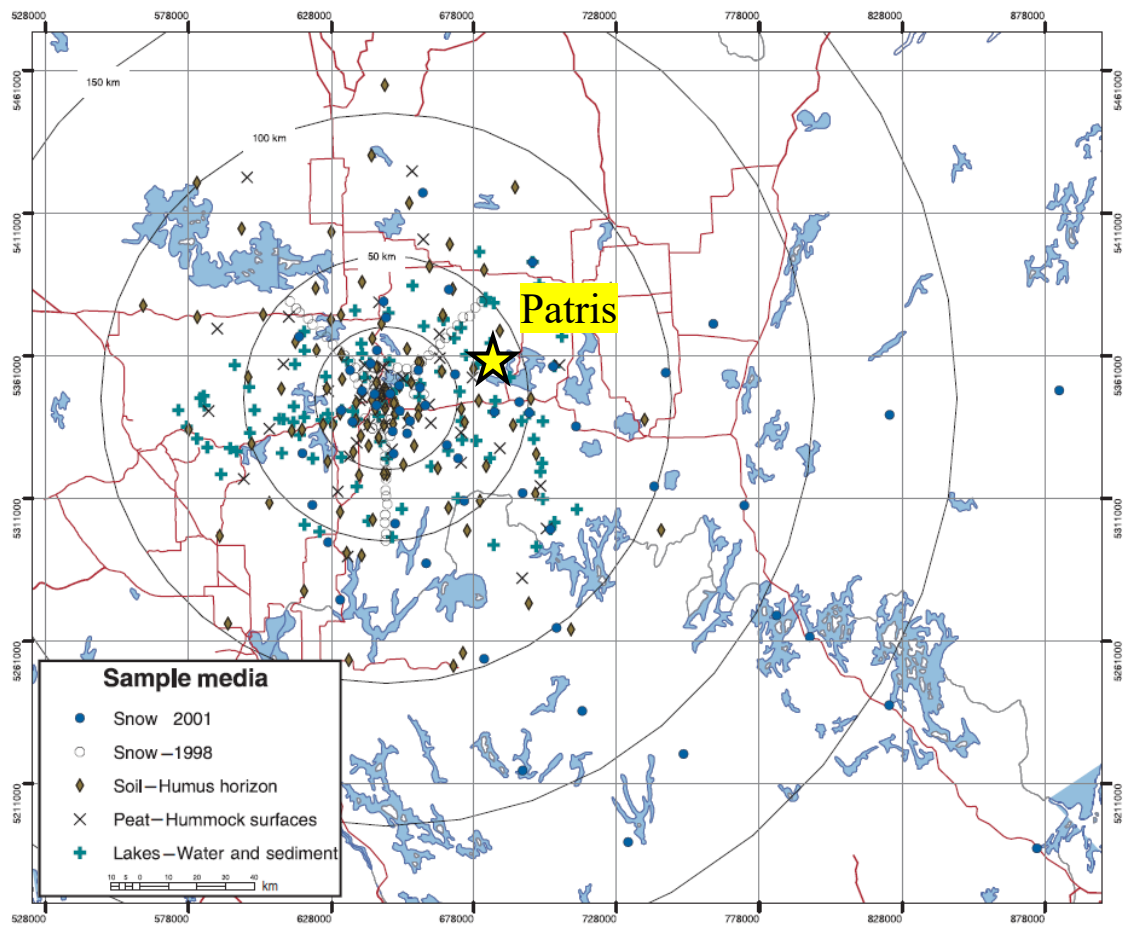


Figure 4. Localisation du levé de Patris dans un rayon d'influence de moins de 50 km de la fonderie de Rouyn-Noranda, comparativement aux travaux d'échantillonnage de Bonham-Carter *et al.* (2005).

3.2.2 Levé de Fénelon (Wallbridge, n=407)

Le contexte géologique du levé est présenté à la Figure 5A. Des anomalies résiduelles en Cu, Ag et Zn ont été détectées à Fénelon, combinées à la présence d'anomalies aurifères. Trois échantillons montrent des concentrations en or supérieures au 99^e centile (seuil en or dans les tourbières > 3,3 ppb). Le nord-ouest de l'Abitibi étant dominé par la présence de dépôts organiques et de tourbières ombrotrophes, les seuils de valeurs brutes dans les tourbières déterminées dans la phase 1 du projet ont été considérés. Le levé est un succès pour la détection de l'assemblage métallique correspondant à celui associé au gîte de Fénelon (Cu-Zn-Ag-Au), à moins de 600 m au nord-est du levé. Un autre point est que la disposition de ces anomalies semble s'aligner le long d'un axe NO-SE, qui correspond à l'orientation de la stratigraphie locale. De plus, ces anomalies sont proches des zones les plus riches en or en surface (comm. pers. Wallbridge), associées au pluton Jérémie, non cartographié sur la carte du SIGÉOM dans le secteur du levé.

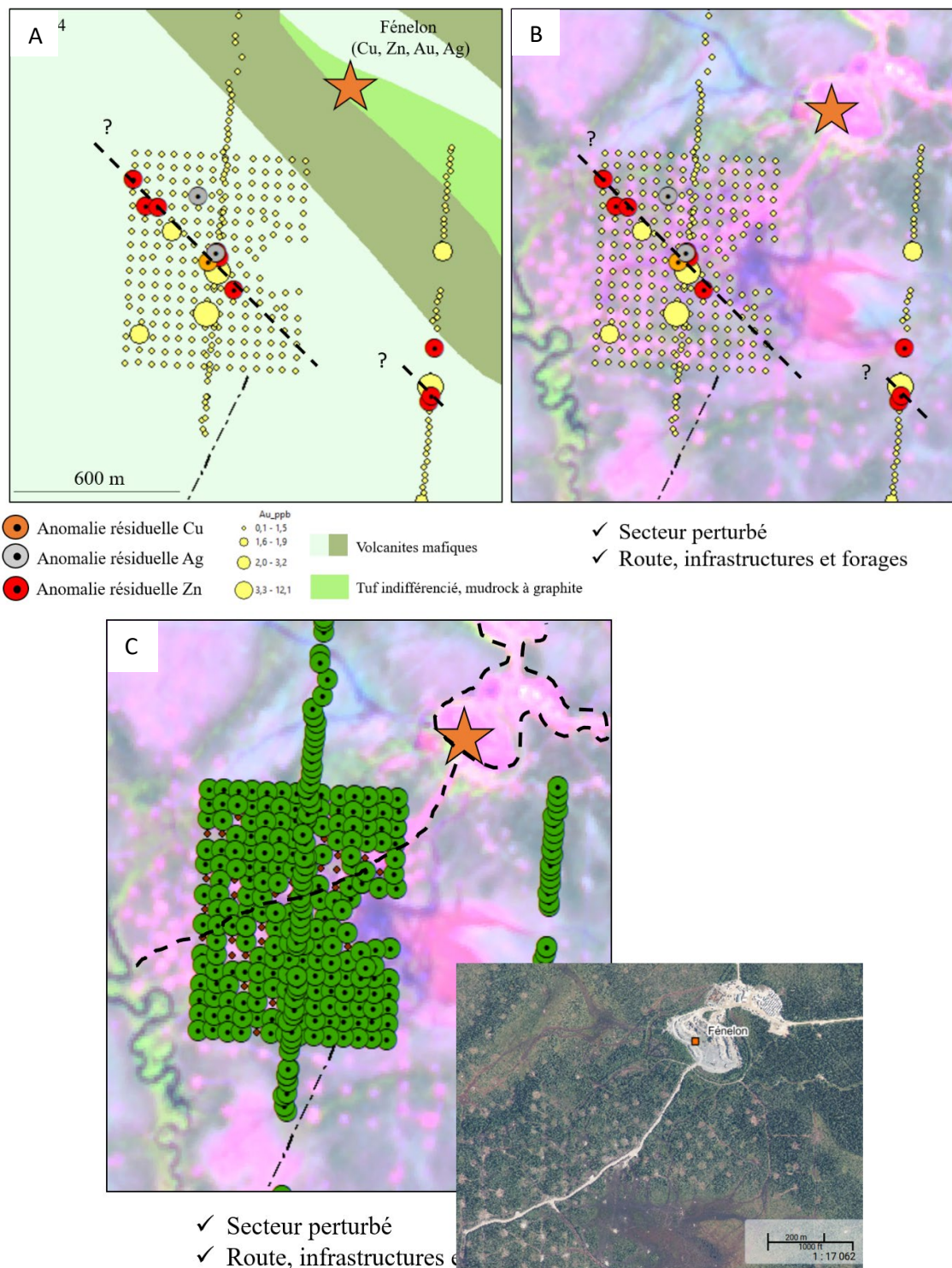


Figure 5. A) contexte géologique du levé de Fénelon et localisation des anomalies résiduelles en Cu, Zn, Ag et des anomalies en or (à partir des seuils de valeurs brutes établis pour les contextes tourbeux, phase 1; Rafini et Trépanier, 2023); B) imagerie satellite Sentinelle (été 2021; les trous de forage ainsi que les zones perturbées sont bien visibles en rose; C) distribution des anomalies résiduelles en Pb et tracé de la route et des infrastructures locales (en pointillés noirs), visibles sur l'image satellite de droite.

Fénelon est également une zone perturbée par la présence d'une route principale qui passe à travers le levé et les infrastructures du site de Fénelon au nord-est du levé. Le maillage des trous de forages est également bien visible sur l'imagerie satellite (Figure 5B), sur laquelle est superposé le levé d'épinettes. Cette empreinte anthropique se reflète à travers le nombre d'anomalies résiduelles en Pb sur l'ensemble du levé (Figure 5C). Il existe également de nombreuses anomalies en Bi sur le levé, élément qui se combine régulièrement avec Pb lorsque la source est anthropique. Cependant, la présence de tellures de bismuth est reconnue dans la minéralisation à Fénelon (Wallbridge, communication personnelle). Il est donc très difficile, dans ce contexte, de discriminer la part de la minéralisation de celle issue de la contamination.

3.2.3 Levé de Monique (Probe Gold, n=521)

Le contexte géologique du levé de Monique est illustré à la Figure 6A. La majeure partie du levé est réalisée au sud-ouest du Batholite de Pascalis-Tiblemont, au sein de roches volcaniques mafiques (Formation de Lanaudière) et des conglomérats du Groupe de Garden Island. Quelques épinettes ont également été échantillonnées à proximité de l'ancienne mine aurifère Monique. Les dépôts de surface dominants sont les sédiments glacio-lacustres et fluvio-lacustres. Les eskers ont été cependant contournés. Des tourbières ombrotrophes sont présentes dans le secteur. Il y a également la présence de chemins de fer et de routes de part et d'autre du levé. Une distance de plus de 200 m a été stratégiquement choisie par la compagnie pour l'échantillonnage des épinettes le long des routes et des chemins de fer afin de limiter la contamination potentielle, qui avait été démontrée le long des chemins de fer lors de la phase 1.

L'or à Monique est très bien détecté dans les écorces non réduites en cendre (Figure 6B). La majorité des anomalies se concentrent dans le bassin conglomératique. Des anomalies sont également visibles près de la mine Monique et à proximité des deux indices aurifères du SIGÉOM présents dans le secteur du levé (Figure 6A). Les anomalies résiduelles en arsenic se localisent également au sein du bassin conglomératique (Figure 6C). Cependant, les plus grosses anomalies (seuil 3, > 1050 ppb) se situent à proximité de la mine Monique, le long d'un ruisseau et non loin de la route principale. Or, aucune association d'arsénopyrite avec la minéralisation en or à Monique n'est connue. La question est donc de savoir quelle est la source de ces anomalies résiduelles autour de la mine, secteur fortement perturbé non loin du parc à stérile (accumulation de roches volcaniques mafiques et ultramafiques non minéralisées principalement). Quelle est la part de la contamination dans cette signature enregistrée dans les écorces ? La question reste en suspens. Néanmoins, la contamination en plomb sur l'ensemble du levé est bien visible à partir des calculs des anomalies résiduelles en plomb. L'écorce des épinettes est ainsi extrêmement sensible à toutes activités anthropiques à proximité des levés (chemins de fer, route, ancienne activité minière, chemins forestiers, etc.).

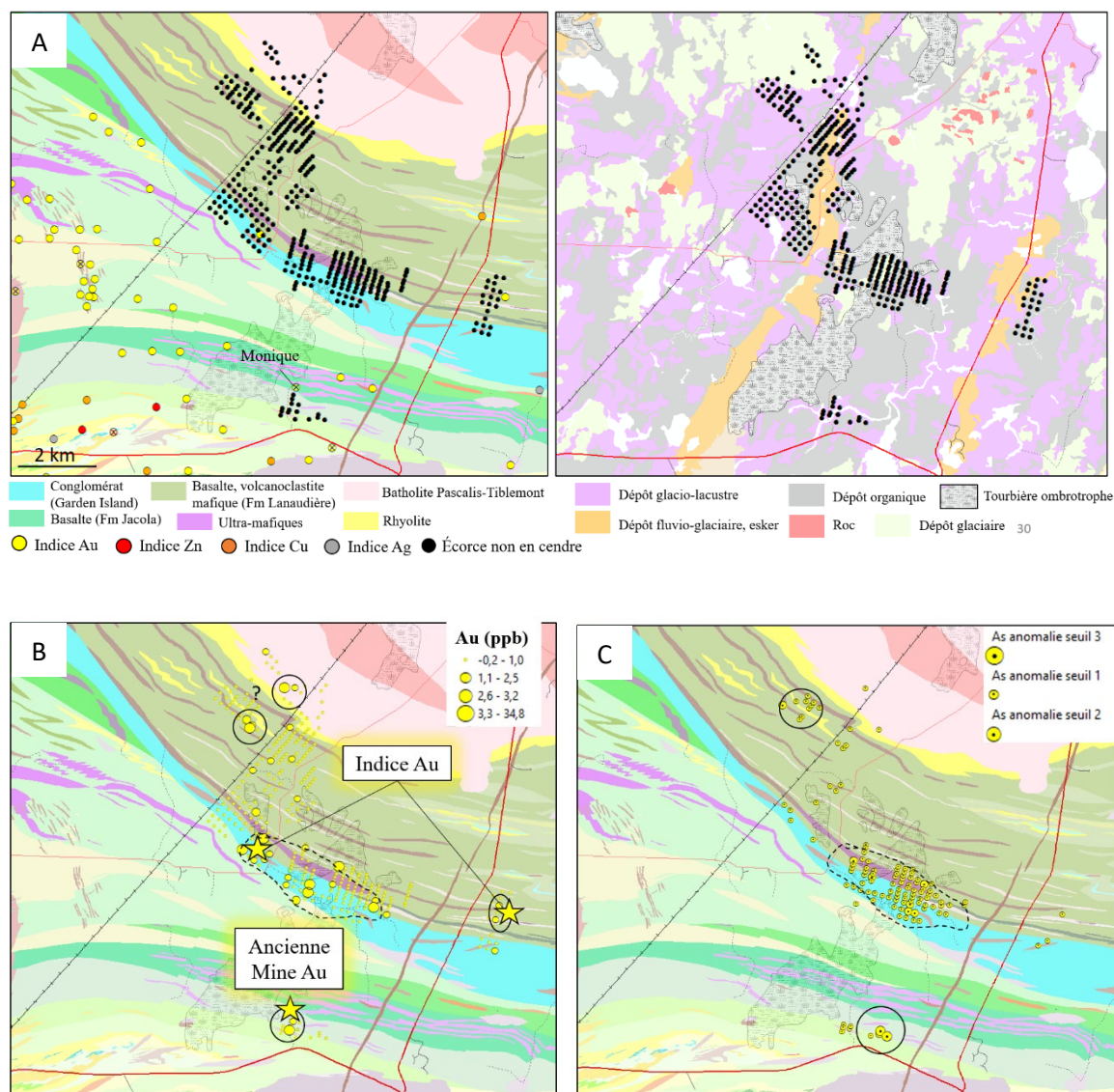


Figure 6. A) contexte géologique (socle à gauche et dépôts quaternaires à droite) du levé de Monique; B) localisation des anomalies en or (ppb) à partir des seuils de valeurs brutes déterminés dans la phase 1; C) localisation des anomalies résiduelles en arsenic (seuil 1, 2 et 3).

4 Développement expérimental

En collaboration avec Joëlle Marion de la Commission géologique du Canada (CGC) et avec Lise Rancourt de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), des tests de réduction en cendre sur des écorces d'épinettes noires collectées en Abitibi et à la Baie-James ont été réalisés afin d'avoir un meilleur contrôle sur la méthodologie et sur le processus de chauffe. En effet, il existe une certaine opacité sur les détails des étapes de réduction en cendre en sein des laboratoires commerciaux offrant actuellement la méthode (p. ex. ALS et Actlab). Le but de cet exercice est d'étudier les limites et les avantages de la méthodologie et d'expérimenter le protocole afin de comprendre le comportement des éléments au cours de la chauffe. Plusieurs références ont été consultées pour établir le protocole idéal (Dunn, 2007; Ghorbani *et al.*, 2022; Harju *et al.*, 1997).

4.1 Protocole détaillé (développé en juillet 2023 par Joëlle Marion)

- Préparation des creusets :

Le matériel disponible a été réparti dans 10 creusets en céramique de 15 ml dont 5 ont été recouverts d'un couvercle (Figure 7). Une pesée individuelle (creuset + échantillon) a été réalisée. Les creusets ont ensuite été déposés dans une fournaise servant à estimer les pertes au feu (LOI) à l'INRS (<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/BF51794C>).



Figure 7. A) Échantillons d'écorces d'épinettes noires; B) Pesée des écorces; C) Répartition des écorces dans des creusets en céramique de 15 ml avec couvercle et sans couvercle; D) Fournaise Lindberg Thermo Scientific utilisée pour la réduction en cendre.

- Réduction en cendre :

Le processus d'atteinte de température finale s'est fait par paliers de 50 °C entre 200 et 350 °C avec une pause de 10 minutes entre chacun afin de contenir le processus de combustion (Figure 8). Après une pause de 10 minutes à 350 °C, la température finale a été réglée à 475 °C. Une durée de 120 minutes a été nécessaire afin d'atteindre la température maximale en démarrant à la température de la pièce (22°C). Les creusets sont restés pendant 17 heures à une température constante de 475 °C (de 16 h à 9 h le lendemain). La fournaise a été éteinte et les échantillons refroidis ont été sortis et pesés.

- Dissolution et analyses :

Les cendres des écorces et les écorces non en cendre ont été dissoutes dans un mélange aqua regia et acide fluorhydrique (HF), puis analysées par Dual View ICP-AES (Agilent Technologies) et par ICap ICP-MS (Thermo Scientific). Les échantillons n'ont pas été rincés avant la digestion.

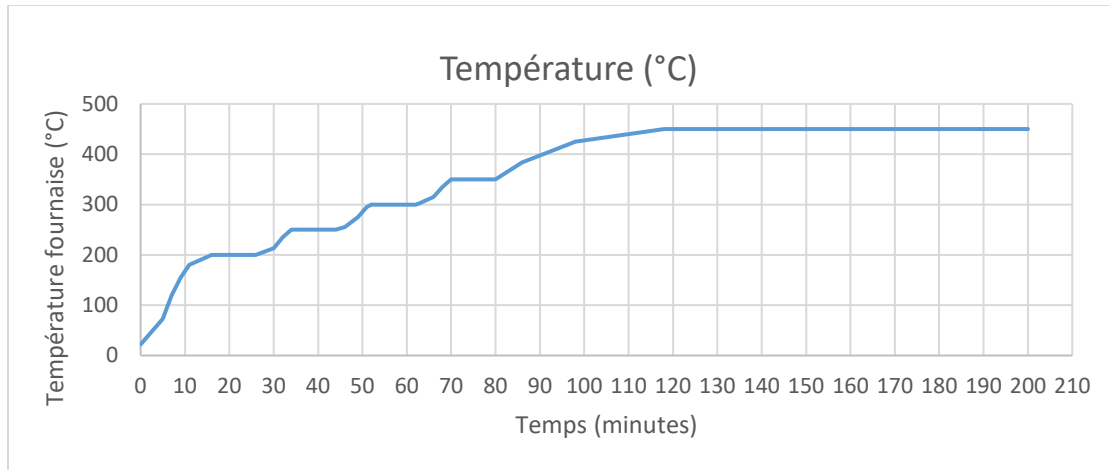


Figure 8. Évolution de la température à l'intérieur de la fournaise par paliers en fonction du temps d'après les tests réalisés par Joëlle Marion.

4.2 Résultats et interprétation

Les résultats obtenus ne montrent pas de différences entre les masses d'écorces avant/après sur les populations avec couvercle et sans couvercle.

La comparaison des résultats non en cendre versus en cendre montre une surconcentration d'environ 40 fois. Une dizaine de grammes d'écorce fournira environ 250 mg de cendre.

À Ménarik, secteur minéralisé en Ni, Cu, Cr, Au, Ag et platinoïdes (SIGÉOM, 2024), trois sites ont été échantillonnés : MK01, MK02 et MK03 (Figure 9). Un composite de 4 épinettes a été réalisé pour chacun des sites. Les résultats mettent en évidence que les teneurs dans les cernes de croissance sont souvent inférieures ou similaires à celles des écorces non en cendre (Figure 10). Par exemple, le chrome et l'arsenic ne sont pas détectés dans les cernes des épinettes du site MK01 tandis que le lithium n'est détecté dans les cernes de croissance d'aucun site (Figure 10A).

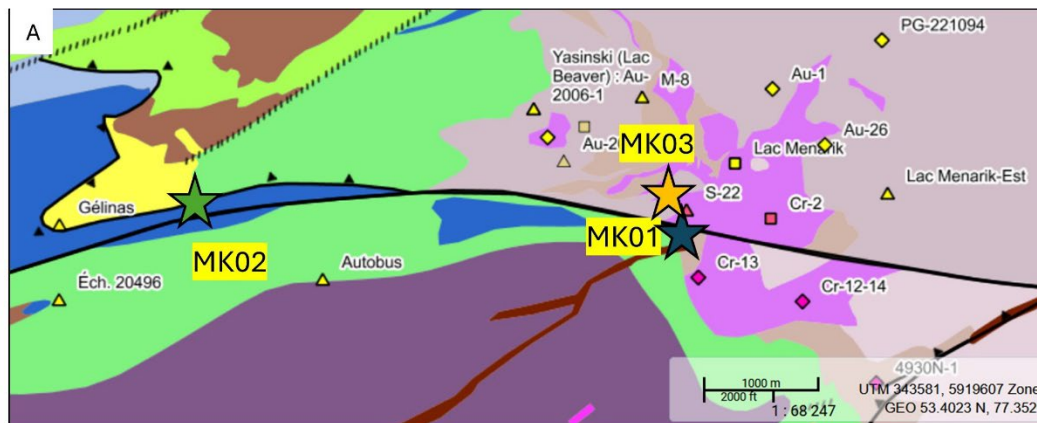
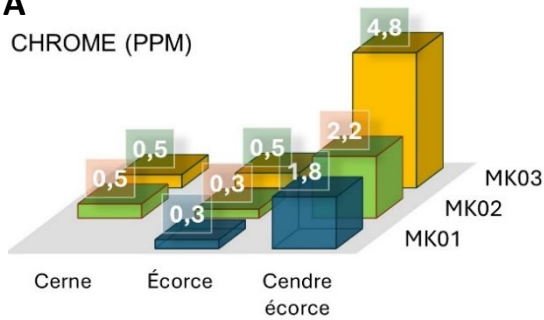


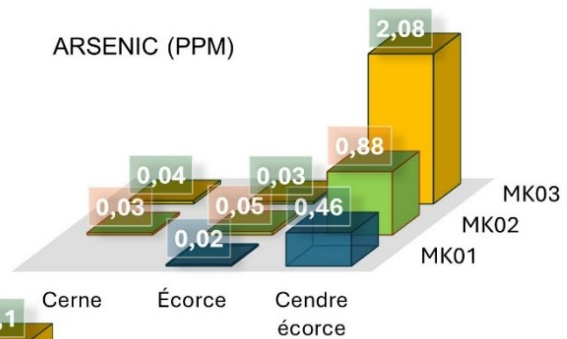
Figure 9. Carte géologique du secteur de Ménarik et localisation des sites d'échantillonnage (MK01, MK02 et MK03).

A

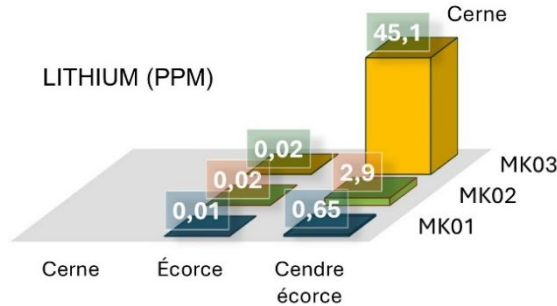
CHROME (PPM)



ARSENIC (PPM)



LITHIUM (PPM)



B

● Médiane écorce Abitibi (projet 2022-03)

--- MK03 en cendre

--- MK01 en cendre

--- MK02 en cendre

--- MK03 non en cendre

--- MK01 non en cendre

--- MK02 non en cendre

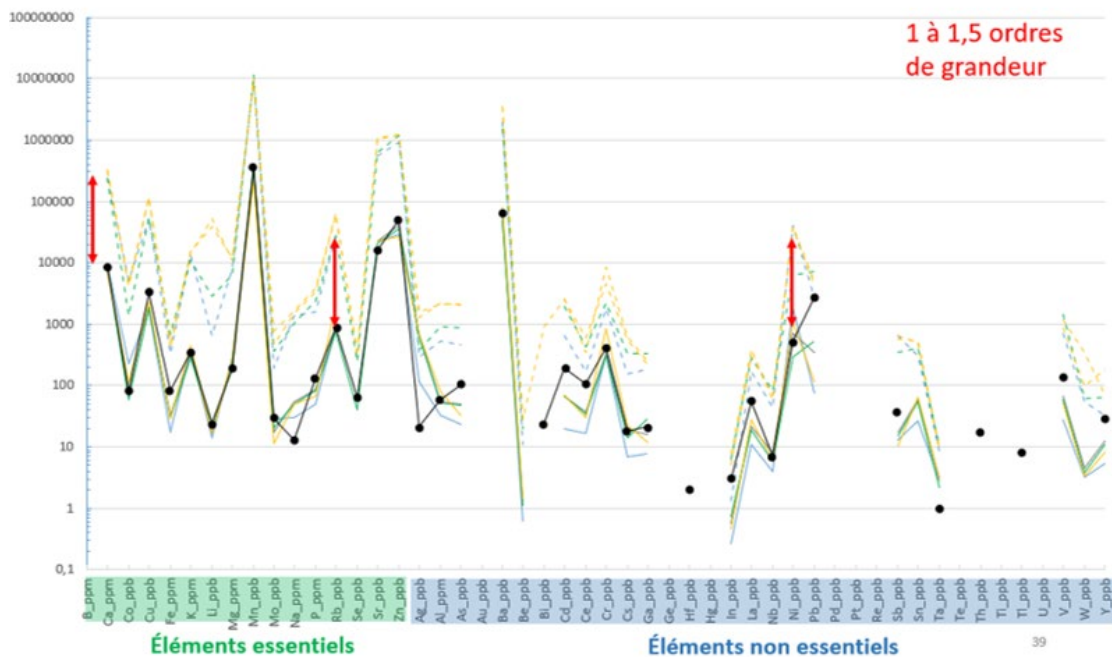


Figure 10 . A) Histogramme des teneurs (ppm) en Cr, As, Pb des 3 sites échantillonnés du secteur de Ménarik dans les cernes de croissance et les écorces des épinettes (en cendre et non en cendre); **B)** Comparaison des concentrations dans les écorces en cendre et non en cendre des trois sites à Ménarik. La médiane de chaque élément (essentiel en vert et non essentiel en bleu), déterminée au cours de la phase 1 du projet, a été reportée en noir sur le graphique.



De plus, le site MK03 semble se distinguer par des concentrations plus élevées en métaux dans les écorces en cendres. Cette différence entre les sites ne se perçoit que très faiblement avec les écorces non en cendres. La question du comportement de certains métaux au cours de la chauffe peut être soulevée. Puisque les teneurs en Li et As des écorces non en cendre à MK03 sont similaires aux autres sites; la différence apparaît uniquement après avoir réduit l'échantillon en cendre. Que se passe-t-il pour ces éléments au cours de la chauffe ?

Des réflexions plus poussées sont nécessaires sur ces aspects expérimentaux. Les teneurs sont néanmoins significatives à MK03, et nettement supérieures à la médiane des écorces en Abitibi. Il y a certainement un lien avec la composition du sol à proximité. Globalement, la réduction en cendre permet d'augmenter de 1 à 1,5 ordre de grandeur les concentrations dans les écorces (Figure 10A).

Le choix des creusets en céramique utilisés pour la réduction en cendre est à questionner. En effet, le lithium est un élément entrant dans la composition de la céramique, et pourrait être libéré au cours de la chauffe. Des tests expérimentaux ultérieurs à ce projet ont été menés afin d'évaluer l'influence des creusets en céramique comparativement à des capsules en aluminium. Les résultats montrent très clairement des contaminations en lithium au cours de la réduction en cendre. Ainsi, il est important de connaître la nature et la composition des contenants utilisés lors de la réduction en cendre au sein des laboratoires commerciaux, car ils peuvent être un facteur de contamination.

Pour ce qui est des résultats autour de la fonderie Horne (Figure 11), les teneurs en Pb et As dans les écorces montrent un facteur d'enrichissement très important (x36 à x49) par rapport à la médiane des écorces en Abitibi, ce qui souligne l'impact de la contamination des écorces dans un rayon d'une dizaine de kilomètres autour de la fonderie. Les concentrations dans les cernes de croissance sont encore là nettement plus faibles que celles enregistrées dans les écorces. Il est intéressant de noter également qu'en s'éloignant de 1,5 km (distance entre le site test et le site 2), les concentrations diminuent significativement. Les travaux de Bonham-Carter *et al.*, (2005) démontrent qu'il est nécessaire de s'éloigner de plus de 50 km pour atteindre à nouveau le bruit de fond en cuivre dans les échantillons de neige récoltés autour de la fonderie (Figure 12).

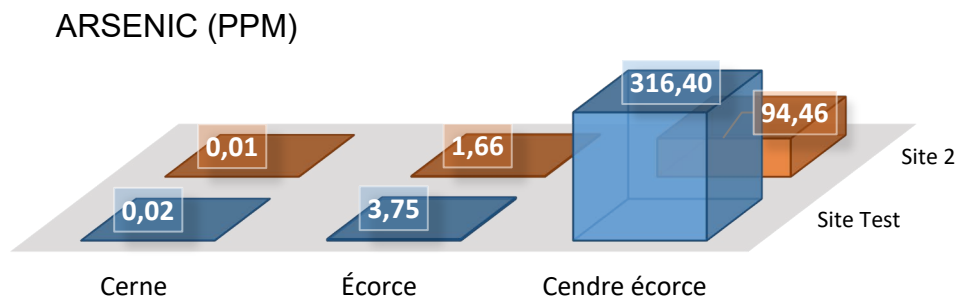


Figure 11. Histogrammes des concentrations en Pb (ppm) et As (ppm) dans les cernes, les écorces non en cendre et les écorces en cendre des épinettes noires sur le site test (8,5 km au NE de la fonderie) et sur le site 2 (à 10,5 km de la fonderie).

Ces résultats expérimentaux combinés aux résultats du traitement du levé de Patris démontrent que la fonderie constitue une des sources de pollution majeure à ne pas négliger pour l'exploration minérale au sud-est de l'Abitibi (même si les vents dominants sont généralement nord-est).

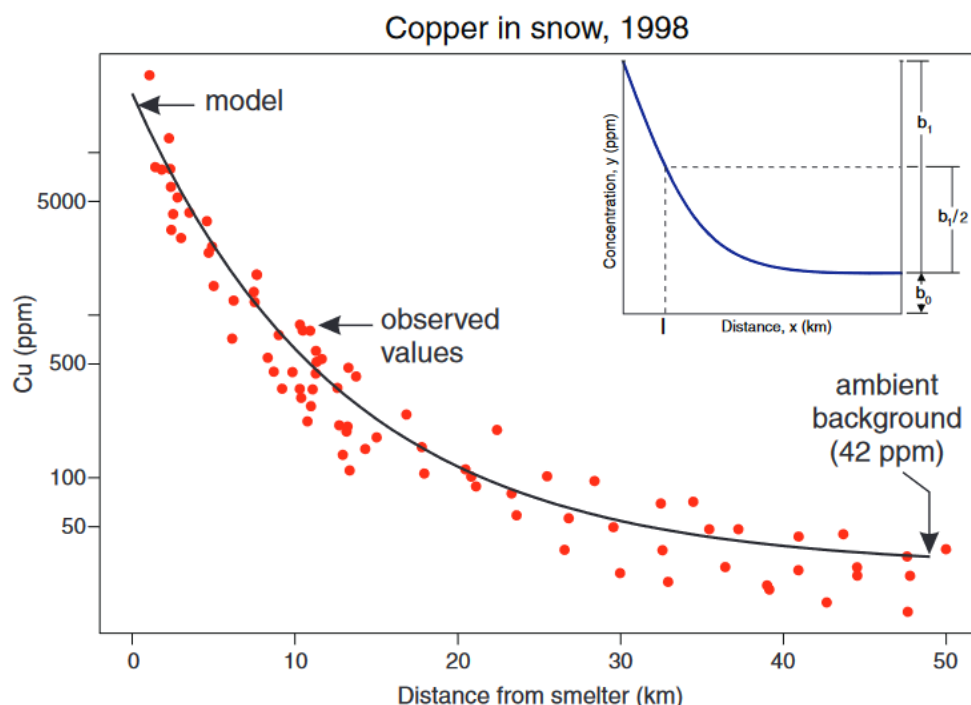


Figure 12. Évolution des teneurs en Cu (ppm) dans les échantillons de neige en fonction de la distance à la fonderie (Bonham-Carter *et al.*, 2005).

À Monique, 16 échantillons ont été analysés par les deux protocoles en cendre et non en cendre. Un tableau synthétique des résultats et des facteurs d'enrichissement pour chacun des éléments essentiels et non essentiels est visible à la Figure 13.

<i>Essentiels</i>															
<i>n=16</i>	B ppm	Ca ppm	Co ppb	Cu ppb	Fe ppm	K ppm	Li ppb	Mg ppm	Mn ppb	Mo ppb	Na ppm	P ppm	Rb ppb	Se ppb	Sr ppb
<i>Non cendre</i>	6	7515	172	3075	134,5	355	75	283	485500	20	21	122,5	1230	300	17650
<i>En cendre</i>	382,5	253500	8090	115500	6250	17050	1850	32500	17400000	900	1300	55550	55550	545500	99500
<i>Facteur</i>	64	34	47	38	46	48	25	114	36	45	61		45		31

<i>Non essentiels</i>															
	Ag ppb	Al ppm	As ppb	Au ppb	Ba ppb	Be ppb	Bi ppb	Cd ppb	Ce ppb	Cr ppb	Cs ppb	Ga ppb	Ge ppb	Hf ppb	Hg ppb
<i>Non cendre</i>	16	121,5	135	0,5	92250		11	319,5	78	900	149,5	26	4,5	0,8	79
<i>En cendre</i>	800	3570	1005000	16	96500		295	10010	3755	20000	1700	1000		40	52,7
<i>Facteur</i>	50	30	7444	32	1		27	31	11	22	11	38		50	42

	Nb ppb	Ni ppb	Pb ppb	Pd ppb	Pt ppb	Re ppb	Sb ppb	Sn ppb	Ta ppb	Te ppb	Th ppb	Tl ppb	U ppb	V ppb	W ppb
<i>Non cendre</i>	5	1130	2140	1,6	0,45	0,3	30		0,3		5,5	13,5	3	210	
<i>En cendre</i>	1745	43000	64900	227	2	25,4	1010			60	232	118,5	98	10000	9215
<i>Facteur</i>	349	38	30	142	4	85	34				42	9	33	48	461

Figure 13. Comparaison des concentrations des éléments dans les écorces en cendre et non en cendre du levé effectué sur la propriété Monique (Probe Gold).

La comparaison des résultats montre un facteur d'enrichissement médian de 45 pour les éléments essentiels et de 36 pour les éléments non essentiels. Cependant, il existe dans le détail une hétérogénéité des facteurs d'un élément à l'autre. Le lithium est enrichi 25x tandis que le magnésium l'est de 114x après réduction en cendre. Il faut noter que le facteur d'enrichissement du lithium est similaire à celui estimé à Twin Lake (22x). Certains éléments essentiels sont perdus au cours de la chauffe, comme le phosphore ou le sélénium. Par contre, l'or, élément non essentiel au métabolisme, est enrichi 32x. Il est intéressant de voir que le palladium est également enrichi 142x, ce qui est encourageant pour la détection des platinoïdes en contexte de gîtes de Ni-Cu par exemple. L'explication d'un tel facteur reste cependant encore en suspens. L'arsenic se comporte également de façon intrigante avec un facteur très important. C'est la raison pour laquelle des réflexions en cours vont être approfondies dans les prochaines années afin de mieux comprendre le comportement de ces éléments avec l'augmentation de la température. Ces tests démontrent aussi que ce qui est réalisé en laboratoire commercial n'est certainement pas linéaire, et qu'il reste encore à mieux contraindre ces phénomènes. Certains éléments non essentiels disparaissent également au cours de la chauffe comme Hg et Ge.

Enfin il est intéressant de constater que quelques éléments ne sont pas bien détectés, quel que soit le type de protocole adopté, comme Be, Sn, Ta et W par exemple. Une étude de Burnham et Amyotte (2023) met en évidence que l'utilisation des méthodes analytiques qui utilisent la dissolution par 4 acides permet d'augmenter la récupération de Li, Ta et Sn des rameaux et des écorces des épinettes noires. La comparaison des dissolutions par aqua regia et par 4 acides démontre que les valeurs obtenues par aqua regia sont proches de la limite de détection tandis que celles obtenues par 4 acides sont plus de 100x supérieures aux valeurs obtenues par aqua regia (Figure 14). La méthode de dissolution par aqua regia qui est la plus couramment utilisée par les laboratoires commerciaux dans les protocoles dédiés aux végétaux (p. ex. Actlab et ALS). Cette étude remet donc en question les protocoles commerciaux existants qui pourraient être optimisés. Il suffirait de confirmer les conclusions de cette étude en comparant les deux méthodes sur un gîte/indice de lithium en Abitibi. Cette démonstration expérimentale pourrait avoir un impact direct sur l'exploration des MCS au Québec, à partir de la méthode biogéochimique.

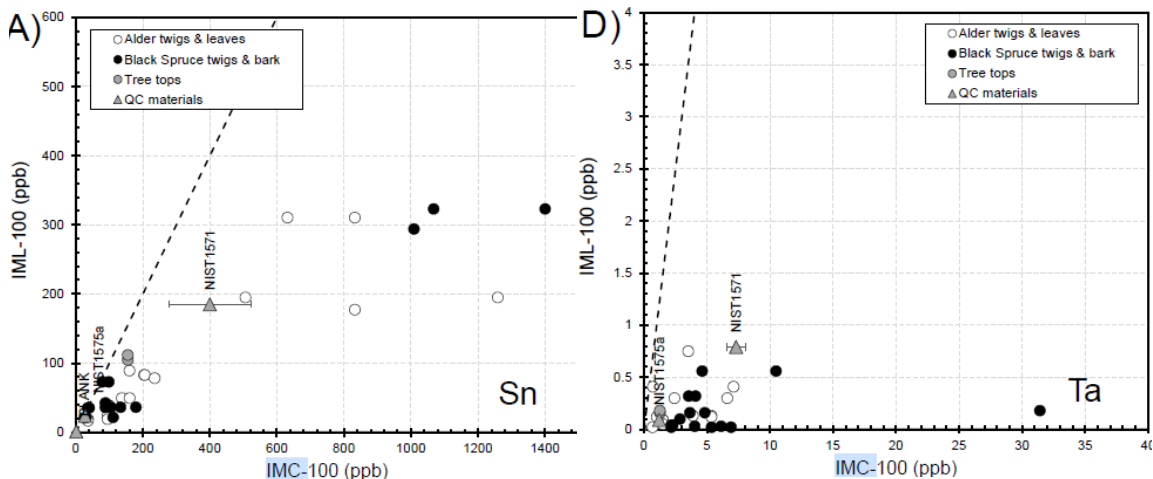


Figure 14. Comparaison des teneurs en Sn et Ta avec dissolution par aqua regia (IML) versus 4 acides (IMC) des écorces, rameaux et feuilles d'aulnes et d'épinettes noires (Burnham et Amyotte, 2023).

5 CONCLUSION

Cette seconde phase a démontré le succès de la méthode biogéochimique en contexte minéralisé aurifère sur l'ensemble des levés travaillés. Plusieurs publications démontrent également le potentiel de la méthode pour l'exploration des MCS, notamment pour la vectorisation des

minéralisations de type Li-Cs-Ta. La réduction en cendre des rameaux, combinée à celle des écorces, semble être une bonne stratégie d'exploration pour vectoriser vers des minéralisations de type Li-Cs-Ta.

Ce travail révèle également l'impact de la contamination anthropique sur l'exploration pour les métaux de base et pour l'or. Le bord des routes, les zones déboisées et les chemins forestiers, ainsi que la proximité d'usine/fonderie impliquent la génération d'anomalies qui n'ont aucun lien avec la minéralisation. L'écorce est un excellent réceptacle de la pollution atmosphérique. De plus, l'épinette est en interaction avec le sol dans lequel ses racines puisent ses nutriments, sol qui lui aussi accumule les métaux lourds au cours du temps. Il est très complexe de découpler la part de la pollution qui se dépose passivement sur les écorces de celle qui est accumulée dans les sols et qui se retrouve en partie « assimilée » par l'épinette via son métabolisme. L'utilisation des systèmes isotopiques en Pb pourrait aider à retracer cette pollution atmosphérique dans les écorces. Ces études sont déjà réalisées dans les cernes de croissance des épinettes en Abitibi et dans les érables autour de Montréal (Hou *et al.*, 2023; Marty *et al.*, 2024).

Les interactions entre les sols et les épinettes seront testées en contexte minéralisé lithinifère et de Ni-Cu dans le cadre d'un projet d'acquisition de données en cours de planification pour les deux prochaines années. Le but est de comparer la performance des analyses des écorces, des aiguilles, des rameaux et des sols dans un même contexte, et de valider le tout avec les données d'exploration existantes (lithogéochimie, forages, etc.). En parallèle, des protocoles de dissolution par la méthode 4 acides seront expérimentés et comparés aux protocoles classiques des laboratoires commerciaux, afin d'évaluer la performance de récupération de certains éléments d'intérêt pour l'exploration des MCS. D'autres tests expérimentaux seront menés en collaboration avec la Commission géologique du Canada et l'Institut national de la recherche scientifique afin d'améliorer et d'optimiser les protocoles actuels.

6 Remerciements

Je remercie Joëlle Marion, Sylvain Trépanier et Silvain Rafini pour leur implication et contribution respective aux résultats de ce projet. J'offre aussi un remerciement chaleureux à Colin Dunn qui m'a généreusement aiguillé et conseillé au début du projet.

7 Références

- Bonham-Carter, G.-F et Grunsky, E.-C. (2018). Two ideas for analysis of multivariate geochemical survey data: proximity regression and principal component residuals. *In* B.S. Daya Sagar, Qiuming Cheng, Frits Agterberg (eds.), *Handbook of Mathematical Geosciences, Fifty years of IAMG*, p911.
- Bonham-Carter, G.-F, Henderson, P.-J., Kliza, D.-A., Kettles, I. M. (2005). Smelter emissions deposited in the environment around the Horne smelter, Quebec: comparison of regional snow, peat, soil, and lake-sediment and lake-water surveys. *In* *Metals in the Environment around smelters at Rouyn-Noranda, Quebec, and Belledune, New Brunswick: results and conclusions of the GSC MITE Point Sources Project*, Geological Survey of Canada, Bulletin 584, 19p.
- Burnham, O.-M. et Amyotte, E.-G. (2023). Revised methods for the multi-element analysis of vegetation by acid-digestion and inductively coupled plasma mass spectrometry at the geoscience laboratories. *In* Hechler, J.-H. (ed.), *Summary of Fieldwork Other Activities 2023*, Ontario Geological Survey, Open File Report 6405, 32, 1-18.
- Dinis, L., Bégin, C., Savard, M.-M., et Parent, M. (2021). Impacts of smelter atmospheric emissions on forest nutrient cycles: evidence from soils and tree rings. *Science of the Total Environment*, 751, 141527.



- Dunn, C.-D. (2007). Biogeochemistry in mineral exploration. *In* M. Hale (ed.), Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Elsevier, vol. 9, p. 462.
- Fedikow, M.-A.-F., Dunn, C.-E., Martins, T., Lee, S.-K.-Y. (1990-1992). Biogeochemistry data from a vegetation orientation in the area of the Tanco pegmatite², Bernik Lake, southeastern Manitoba (NTS 52L6). Data Repository Item DRI2017001, Manitoba Geological Survey. Aucun rapport.
- Fedikow M.-A.-F., Ferreira, K.J., et Chackowsky, L. (1996). Geochemistry of black spruce (*Picea mariana*) needles and twigs growing over zones of gold mineralization and associated polarization responses, Dot Lake Area, Agassiz metallotect. Economic Geology report ER96-1.
- Gagnon, R. et Morin, H. (2001). Les forêts d'épinette noire du Québec : dynamique, perturbations et biodiversité. *Le Naturaliste Canadien*, 125, 26-35.
- Ghorbani, Z., Gholizadeh, F., Casali, J., Hao., C., Cavallin., H.-E., Van Loon., L.-L., Banerjee, N.-R. (2022). Application of multivariate data analysis to biogeochemical exploration at the Twin Lakes Deposit, Monument Bay Gold project, Manitoba, Canada. *Chemical Geology*, 593, 120739.
- Gigoux, M. et Trépanier, S. (2023). Évaluation de l'efficacité de la méthode biogéochimique d'échantillonnage d'écorce d'épinette en exploration. *Projet CONSOREM 2022-03*, livraison en format PowerPoint.
- Harju, L., Lill, J.-O., Saarela, K.-E., Heselius, S.-J., Hernberg, F.-J. (1997). Analysis of trace elements in trunk wood by thick-target PIXE using dry ashing for preconcentration. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 358, 523-528.
- Hou, X., Parent, M., Savard, M., Tassé., N., Bégin, N., Marion, J. (2023). Lead concentrations and isotope ratios in the exchangeable fraction: tracing soil contamination near a copper smelter. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, 6, 229-236.
- Lemieux, O. et Beloborodov, A. (2021). Report on a biogeochemical survey, Tansim lithium project. GM 71941, Sayona, p31.
- Marty, C., Houle, D., Bilodeau-Gauthier, S., Gagnon, C. (2024). Using sugar maple tree rings to trace history lead pollution in eastern Canada temperate forest. *Applied Geochemistry*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105855>
- Rafini, S. et Trépanier, S. (2023). Guide d'utilisation de l'environnement secondaire pour l'exploration minérale. Rapport, projet CONSOREM 2022-01, 188 pages.
- Savard, M., Bégin, C., Parent, M., Marion, J., Smirnov, A. (2006). Dendrogeochemical distinction between geogenic and anthropogenic emissions of metals and gases near a copper smelter. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 6, 237-247.
- Trépanier, S. (2005). Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport, projet CONSOREM 2005-03, p82.

