



Rapport de l'activité 1.5.2 du mandat Retombées de l'Étude sur
l'état de santé des sols agricoles du Québec

Analyses des niveaux d'ÉTM (Cd, Co, Cr, Ni, Pb) et de soufre (S) extraits en solution Mehlich-3 dans les sols de l'ÉE SSAQ

Date : Février 2026

Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Ce rapport a été produit à l'attention du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progressé** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Marc-Olivier Gasser, Ph. D.

Chercheur en conservation des sols et l'eau

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418 643-2380 p. 650

marc-o.gasser@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Jean-Benoît Mathieu, M.Sc. IRDA

Mandela Jacques, M.Sc. IRDA

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D. IRDA

Équipe de réalisation

Mandela Jacques, M.Sc. IRDA

Jean-Benoît Mathieu, M.Sc. IRDA

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D. IRDA

Eduardo Chavez, agr., M.Sc. IRDA

Collaborateurs

Catherine Bossé, agr., IRDA

Bernard Montminy, IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries, de l'Alimentation du Québec



Ce rapport peut être cité comme suit :

Mathieu, J-B., Jacques, M., Gasser, M.-O., 2026. Interprétation des niveaux d'éléments traces métalliques et du soufre extraits Mehlich-3 dans les sols de l'ÉSSAQ. Activité 1.5.2 réalisée dans le cadre du mandat Retombées de l'ÉSSAQ. Rapport final. IRDA. 17 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les résultats de l'activité 1.5.2 du mandat accordé à l'IRDA par le MAPAQ et intitulé *Retombées de l'ÉSSAQ*. L'étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec avait révélé des enrichissements en Cu des sols cultivés par rapport aux sols témoins dans plusieurs séries de sols argileux et glaciaires (tills), et un enrichissement en Zn dans certaines séries de sols glaciaires (Rapport 1 de l'ÉSSAQ). Les sols recevant plus souvent des apports en amendements organiques étaient plus souvent enrichis en Cu et Zn et ces enrichissements étaient aussi élevés sinon plus en cultures pérennes qu'en cultures annuelles (Rapport 2 de l'ÉSSAQ). L'objectif de cette activité était de poursuivre l'analyse sur les autres éléments traces métalliques (ÉTM) (Cd, Co, Cr, Ni, Pb) extraits en solution Mehlich-3 et dosés au laboratoire, mais qui n'avaient pas été traités et rapportés dans les rapports de l'ÉSSAQ en 2023. Les teneurs en Mo Meh-3 ont été mesurées, mais étaient plus souvent sous la limite de détection dans la majorité des sols et donc n'ont pas été analysées et interprétées.

Les matériaux parentaux ou les dépôts de surface influencent quelque peu les teneurs en ÉTM observées, mais en général ces teneurs demeurent à l'intérieur des niveaux déjà observés dans des études antérieures réalisées au Québec. Les sols issus de matériaux glaciaires (tills) présentent en général des teneurs statistiquement plus élevées de Cd, Co, Ni et Pb, mais à l'inverse des teneurs plus faibles en Cr que les sols issus des autres matériaux parentaux. Les sols issus de dépôts sableux à squelettiques présentent en revanche les plus faibles teneurs en Cd et en Co, des teneurs intermédiaires en Cr et un peu plus élevées en Pb dans les horizons de surface Ap1 et Ap2. Ces teneurs en Pb plus élevées dans des sites témoins pourraient être reliées à des actions anthropiques. Les sols loameux présentent les teneurs les plus élevées en Cr notamment en profondeur dans l'horizon B et les plus faibles en Pb. Les sols argileux pour finir présentent en général des niveaux intermédiaires dans ces quatre ÉTM, sauf pour le Co et le Cd qui ont des teneurs plus élevées en profondeur dans l'horizon B. En général, les niveaux atteints demeurent en moyenne à l'intérieur des classes moyennes (50 à 75^e percentile des observations) définies par Deschenes e al. (2006), sauf pour le cobalt qui atteint plus souvent la classe élevée (75 à 99^e percentile) définie entre 0,29 à 1,18 mg/kg.

Les niveaux de soufre sont plus élevés dans certains sites témoins. Le pH plus acide (pH eau < 5,5) expliquerait ces teneurs plus élevées en S Meh-3. Les sols issus de matériaux sableux à squelettiques présentent en général des niveaux plus élevés de S Meh-3, suivis des sols issus de matériaux glaciaires et des sols loameux. Les sols argileux présentent les plus faibles teneurs en S Meh-3, près de la limite de détection de 5 mg/kg, sauf ceux du groupe 10 de la Plaine littorale dans le Bas-St-Laurent qui inclue la série De l'Anse et ses teneurs naturellement élevées de S en profondeur dans ses dépôts. Les apports en amendements organiques pourraient jouer un rôle dans l'accumulation de S Meh-3, comme pour les teneurs en P, Cu et Zn Meh-3, mais l'analyse statistique n'a pas révélé d'effet significatif de la fréquence d'apport des amendements organiques sur ces teneurs en S Meh-3. L'analyse sur les effets des systèmes de culture à révéler des teneurs plus faibles de S Meh-3 dans les systèmes maraichers incluant la pomme de terre.

L'analyse de ces ÉTM et du soufre dans les sols de l'ÉSSAQ aura permis de vérifier si les niveaux généralement rencontrés dans les différents sols et matériaux parentaux sont influencés par les activités agricoles ou autres actions anthropiques, s'ils reflètent davantage les niveaux naturels associés aux dépôts meubles ou s'ils sont influencés par l'acidité du sol. Ces connaissances seront utiles pour la fertilisation et la gestion des amendements organiques et des matières résiduelles fertilisantes.

Table des matières

Résumé.....	2
Éléments traces métalliques	5
Introduction	5
Matériel et Méthodes	5
Résultats 6	
Cadmium	6
Chrome.....	7
Cobalt.....	8
Nickel.....	9
Plomb	9
Matériaux parentaux et ÉTM	11
Systèmes de culture sur les ÉTM disponibles	11
Soufre.....	13
Conclusion.....	16
Références.....	17

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des teneurs en ÉTM extraits en solution Mehlich-3 selon Deschênes et al. (2006).....	5
Tableau 2 : Effet des matériaux parentaux sur les niveaux de Cd, Cr, Co, Ni et Pb extraits Mehlich-3.....	11
Tableau 3 : Effet du système de culture sur les niveaux de Cd, Cr, Co, Ni et Pb extraits Mehlich-3	12
Tableau 4 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec les matériaux parentaux sur les teneurs en S Meh-3; analyse de déviance.....	14
Tableau 5 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec les matériaux parentaux sur les teneurs en S Meh-3; analyse de déviance.....	14
Tableau 6 : Teneurs moyennes en soufre-M3 dans l'horizon Ap de différents matériaux parentaux	15

Liste des figures

Figure 1 : Teneurs en cadmium extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	6
Figure 2 : Teneurs en chrome extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	7
Figure 3 : Teneurs en cobalt extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	8
Figure 4 : Teneurs en nickel extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	9
Figure 5 : Teneurs en plomb extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	10
Figure 6 : Teneurs en soufre extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.	13

ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

INTRODUCTION

Les éléments traces métalliques (ÉTM) constituent une composante naturelle des sols, donc se retrouvent à des concentrations variables selon la nature et l'origine des dépôts meubles, bien que leurs concentrations puissent être fortement influencées par les pratiques agricoles et les activités humaines. Ils peuvent s'accumuler à la suite d'apports d'amendements organiques, d'engrais minéraux, de pesticides ou encore de retombées atmosphériques. Certains ÉTM, comme le Ni, le Cr ou le Mo, jouent un rôle essentiel dans la physiologie végétale et microbienne, tandis que d'autres, notamment le Cd et le Pb, sont reconnus pour leur toxicité même à de faibles concentrations. Le cobalt, bien que non essentiel aux plantes, se retrouve parfois dans les sols par l'intermédiaire des rations animales supplémentées utilisées dans certains systèmes d'élevage.

Au Québec, les données historiques sur les teneurs en ÉTM dans les sols agricoles demeurent limitées. Le dernier inventaire majeur, réalisé en 1990, avait mis en évidence des enrichissements en Cr, Cd et Pb extraits en solution Mehlich-3 dans des contextes de monoculture, particulièrement dans certaines zones de l'Abitibi et de la plaine du Saint-Laurent (Tabi et al., 1990). Basé sur trois bases de données incluant les données de l'Inventaire de 1990, Deschênes et al. (2006) ont classifié en cinq classes la distribution en percentiles des teneurs en ÉTM attendues dans les sols agricoles du Québec (Tableau 1).

Tableau 1 : Classification des teneurs en ÉTM extraits en solution Mehlich-3 selon Deschênes et al. (2006).

Classe	Distribution	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	Percentile	----- mg/kg -----						
1	< 25	< 0,05	< 0,15	< 0,21	< 1,1	< 0,25	< 1,6	< 1,2
2	25 - 50	0,05- 0,07	0,15- 0,22	0,21- 0,27	1,1-1,8	0,25- 0,36	1,6-2,1	1,2-1,9
3	50 - 75	0,07- 0,10	0,22- 0,29	0,27- 0,42	1,8-2,8	0,36- 0,57	2,1-2,6	1,9-3,0
4	75 - 99	0,10- 0,24	0,29- 1,18	0,42- 0,75	2,8-9,0	0,57- 2,05	2,6-5,7	3,0-14,0
5	> 99	> 0,24	> 1,18	> 0,75	> 9,0	> 2,05	> 5,7	> 14,0

Plus récemment, l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ, 2023) a offert un portrait actualisé pour d'autres ÉTM, révélant notamment des enrichissements en Cu et Zn dans plusieurs séries de sols argileux et glaciaires, ainsi qu'une influence marquée des systèmes de culture et des apports organiques (Rapports 1 et 2 de l'ÉESSAQ). Les sols recevant plus souvent des apports en amendements organiques sont plus souvent enrichis en Cu et en Zn et ces enrichissements sont plus souvent élevés en cultures pérennes qu'en cultures annuelles.

Dans la continuité de ces travaux, la présente analyse vise à présenter un aperçu de la distribution des ETM extraits en solution Mehlich-3 en fonction des matériaux parentaux et à vérifier si les sols agricoles du Québec présentent également un enrichissement en ÉTM disponibles moins documentés dans ce contexte, soit le Pb, le Cd, le Co, le Cr, qui sont susceptibles d'être mobilisés ou accumulés selon les pratiques culturales et les propriétés des sols. Le Mo se retrouvant plus souvent sous la limite de détection des méthodes d'analyse n'a pas été couvert par cette analyse. L'objectif était d'évaluer si les systèmes de culture influencent les concentrations de ces ÉTM et de déterminer dans quelle mesure les sols cultivés se distinguent des sols témoins échantillonnés dans le cadre de l'EESSAQ.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les teneurs en ÉTM et en soufre dans les sols extraits en solution Mehlich-3 avaient été analysées sur l'ensemble des sols minéraux présent dans l'ÉESSAQ sauf pour quelques échantillons de sols des groupes 24, 25 (Abitibi), 7 et 18, dont les analyses en ÉTM ont été perdues lors du transfert de données de l'appareil au laboratoire. Ces sols ont été réanalysés pour compléter l'analyse sur les 25 groupes de séries de sol. Les résultats ont été compilés et transférés dans le BD_EESSAQ (version 2025_05) pour fin d'analyses statistiques.

RÉSULTATS

Cadmium

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique non essentiel et toxique (Genchi et al., 2020). Il s'accumule dans les sols agricoles en grande partie en raison d'apports anthropiques comme les engrais phosphatés, les pesticides, les boues d'épuration et les retombées industrielles. Sa mobilité est renforcée dans les sols acides ou pauvres en matière organique, augmentant ainsi les risques de transfert vers les plantes. Le Cd est facilement absorbé par les racines via des transporteurs destinés au zinc ou au calcium, entraînant une accumulation dans les tissus végétaux et divers effets toxiques, dont une perturbation de la croissance et de la nutrition minérale (Lux et al., 2011; Stephan Clemens, 2006). Dans le cadre de l'EESQAQ, l'étude du Cd vise à évaluer son enrichissement potentiel dans les sols cultivés du Québec et identifier les facteurs qui influencent sa biodisponibilité.

Globalement, les teneurs en Cd-M3 des sols de l'EESQAQ dans les horizons Ap1 et Ap2 se maintiennent entre les classes 2 et 3 (0,05 à 0,10 mg/kg), selon la classification proposée par Deschênes et al. (2006) (Figure 1). Toutefois, des teneurs en Cd significativement plus élevées (classe 4 : 0,10 à 0,24 mg/kg) ont été observées dans les matériaux glaciaires sur certains sites témoins par rapport aux sites cultivés. Dans l'horizon B, les teneurs en Cd n'ont pas dépassé 0,06 mg/kg en moyenne, se rapprochant de la classe 1 (< 0,05 mg/kg), quel que soit le type de matériau parental considéré.

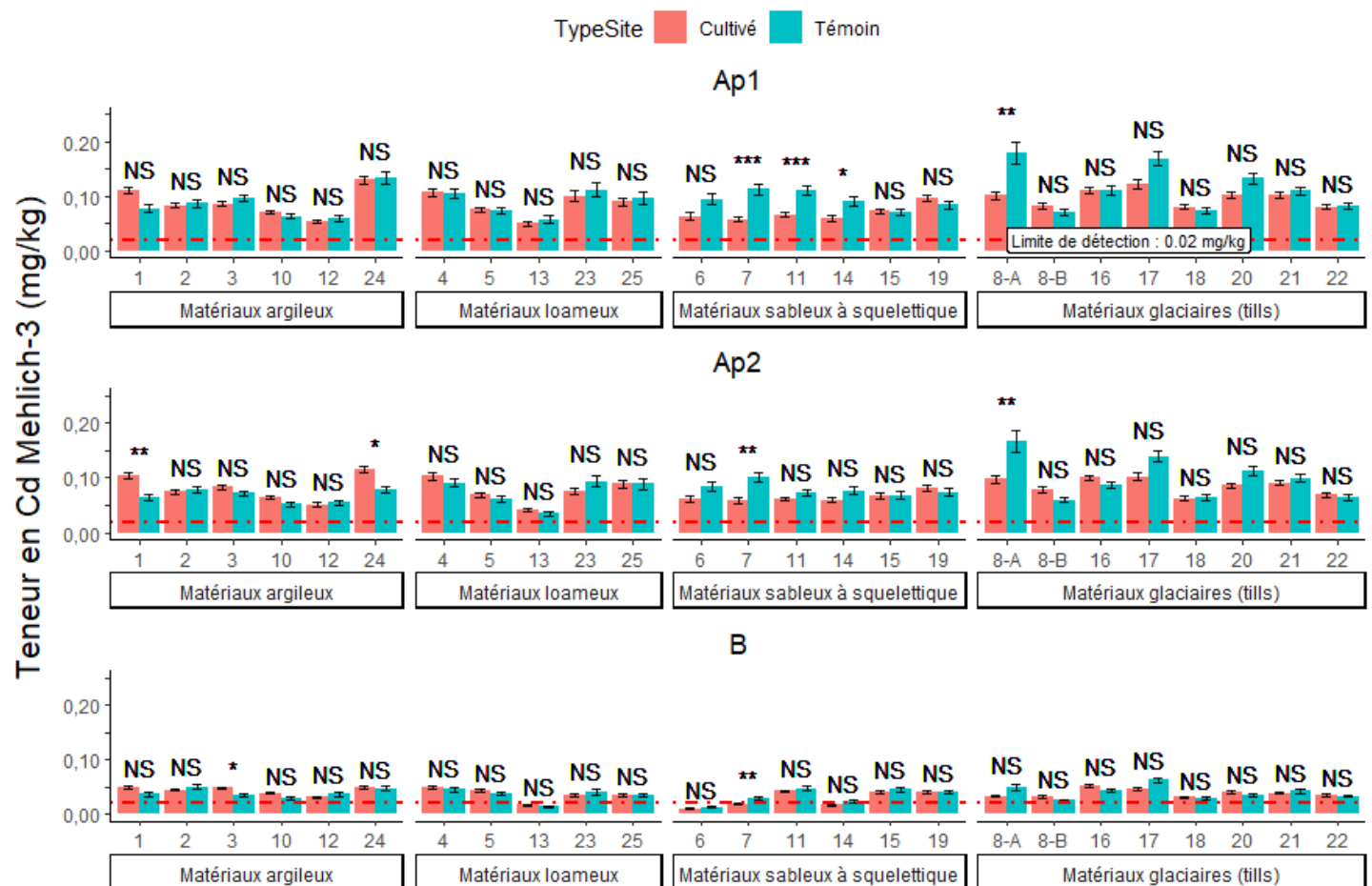


Figure 1 : Teneurs en cadmium extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

Des teneurs en Cd significativement plus élevées dans les sols témoins par rapport aux sols cultivés ont été observées dans les groupes de sols issus de matériaux sableux et dans les tills. Cette situation peut s'expliquer de manière cohérente par un ensemble de mécanismes complémentaires : d'abord, l'héritage géogénique des tills glaciaires, qui peuvent contenir

des minéraux naturellement plus riches en Cd tels que les sulfures, carbonates ou phosphorites ; ensuite, un pH systématiquement plus acide dans les sols témoins (pH < 6) issus de matériaux parentaux glaciaires-tills (Gasser et al., 2023), condition qui favorise la labilité et la mobilité du Cd (Zhang et al., 2024); enfin, la présence dans les prairies et jachères d'une matière organique plus stable, susceptible de retenir le Cd au sein de complexes organo-minéraux et d'en limiter le transfert vers les plantes. L'ensemble de ces mécanismes concorde avec les connaissances actuelles sur l'influence de l'origine géologique, du pH et de la matière organique sur le comportement du Cd dans les sols.

Chrome

La contamination des sols agricoles par le chrome peut provenir à la fois de sources anthropiques et naturelles. L'épandage de MRF ou d'engrais de ferme constitue des sources potentielles, puisque ces matières peuvent contenir des ÉTM issus des eaux usées urbaines, industrielles ou des élevages. À cela s'ajoutent les retombées liées aux activités de galvanoplastie, à l'utilisation de pigments contenant du chrome, ainsi qu'aux résidus miniers. Enfin, certains engrais phosphatés peuvent apporter de faibles quantités de chrome en tant qu'impureté. Les sources naturelles ne doivent pas être négligées. Le chrome peut être libéré progressivement dans les sols par l'altération de roches mères riches en minéraux ferromagnésiens, notamment les roches ultramafiques ou basaltiques. Par ailleurs, les dépôts atmosphériques issus des émissions industrielles peuvent contribuer à une accumulation diffuse de chrome à la surface des sols, même en l'absence de source locale directe. Ainsi, la présence de chrome dans les sols agricoles résulte souvent d'une combinaison de processus naturels et d'apports liés aux activités humaines, dont l'importance relative varie selon le contexte géologique et l'intensité des pressions anthropiques.

La plupart des sols cultivés analysés dans le cadre de l'ÉSSAQ ont tendance à avoir des teneurs en Cr Meh-3 plus élevées que les sols témoins, mais peu sont significativement enrichis sur tout le profil, sauf quelques groupes dans les matériaux sableux à squelettiques et les tills (groupes) 7, 14 et 8-B en particulier). Les différences sont également moins marquées entre matériaux parentaux. Selon les critères proposés par Deschênes et al. (2006), les niveaux varient en général de très faibles (classe 1 : <0, 21 mg/kg) à moyen (classe 3 : 27 à 42 mg/kg) sauf pour les sols loameux du groupe 25 formé des séries Baby et Duhamel de l'Abitibi-Témiscamingue, qui atteignent des niveaux élevés (classe 4 : 42 à 75 mg/kg) en profondeur dans l'horizon B.

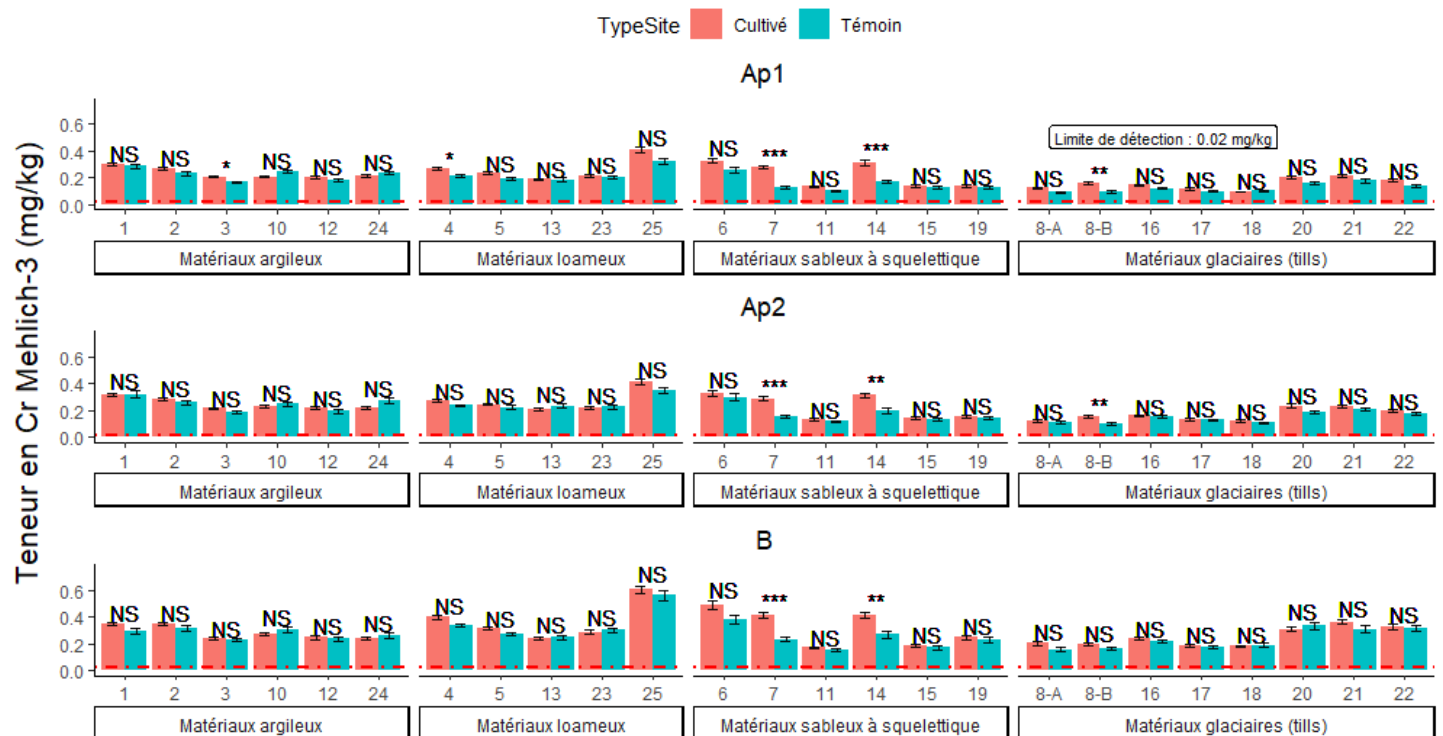


Figure 2 : Teneurs en chrome extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

Cobalt

Le cobalt (Co) est un élément trace présent naturellement dans les sols agricoles, où sa disponibilité est surtout influencée par le pH et la matière organique. Il n'est pas essentiel pour la majorité des plantes, mais contribue indirectement à la fixation de l'azote chez les légumineuses via la synthèse de vitamine B12 par leurs bactéries symbiotiques (Hu et al., 2021). En agriculture, il provient principalement des amendements organiques et des déjections d'animaux supplémentés. Le Co demeure surtout important pour la santé des ruminants, où il est indispensable. Au Québec, les teneurs dans les sols sont généralement faibles et rarement préoccupantes.

Sur les trois horizons considérés dans le cadre de l'EESQAQ et pour l'ensemble des groupes de séries, les sols issus de matériaux parentaux sableux à squelettiques sont caractérisés par les teneurs en Co les plus faibles et aucune différence significative n'a été observée dans les sols cultivés et les sols témoins (Figure 3). Les teneurs en Co les plus élevées ont été mesurées dans les sols issus de matériaux parentaux argileux et les tills. Cependant, les valeurs étaient sous le seuil critique de 1,1 mg/kg (Giroux et al., 1992) ou se retrouve en majorité dans la classe 4 (0,29 - 1,18 mg/kg) de Deschênes et al. (2006), à l'exception des sols du groupe 20 formés des séries de sols Magog, Calais et Dufferin qui dépassent ces critères dans l'horizon B. Ces tills riches en Co en profondeur sont de classes de drainage mauvaises et sont caractérisés dans le cadre de l'EESQAQ par des sites ayant reçus des apports fréquents d'engrais organiques.

Les sites cultivés ont tendance à avoir des teneurs en Co plus élevées que les sites témoins sauf pour les sols de matériaux sableux qui ne présentent pas de telles différences. Presque tous les sols cultivés de la région de la plaine de Montréal (groupes 2, 3, 4, 5, 6, 8-A, 8-B,) sont plus enrichis en CoMeh-3 sur au moins un horizon. En revanche, les sites témoins des sols argileux du groupe 12 (Horizon Ap1) et des tills du groupe 17 (Horizon B) présentent des niveaux plus élevés par rapport aux sites cultivés. Les sites témoins de ces groupes étaient soit des sites non cultivés, comme des contours de champs en herbacées (3 sites/8) ou des vergers (2/8).

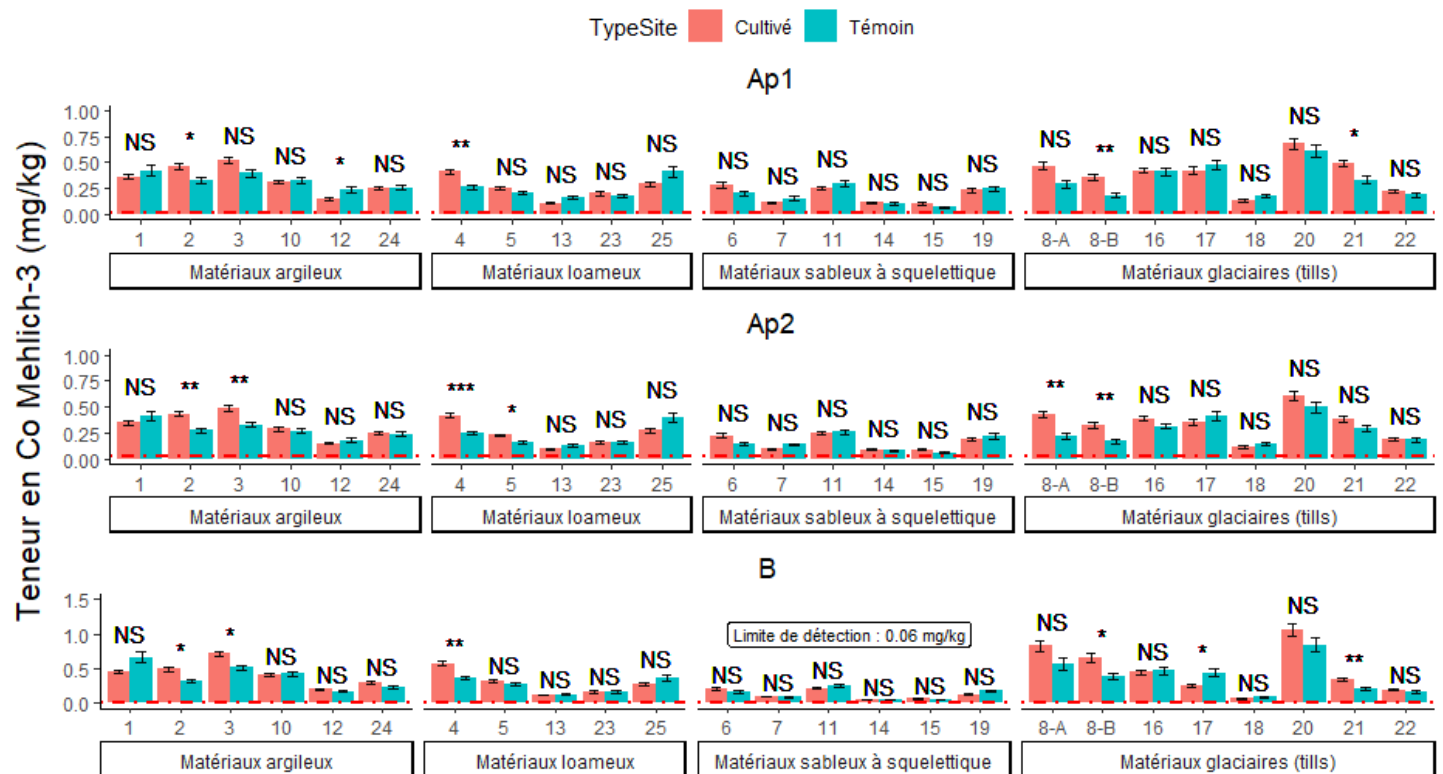


Figure 3 : Teneurs en cobalt extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

Nickel

La contamination par le nickel dans les sols agricoles résulte de sources naturelles (roches mères) et anthropiques (épandages, industrie). Le nickel est reconnu essentiel ou bénéfique pour les animaux, mais pour les plantes, les informations sont contradictoires (Hébert, 1998). Les fumiers, les engrais et la pierre à chaux contiennent généralement beaucoup moins de Ni que les sols agricoles, sauf lorsqu'il s'agit de sources d'oligoéléments d'origine industrielle. Quant aux résidus industriels et municipaux, les charges maximales permises de Ni sont de nature à limiter l'accumulation de nickel à des niveaux d'innocuité (Hébert, 1998).

Les teneurs en Ni mesurées dans les sols de l'ÉÉSSAQ ne dépassent pas le seuil de 2,07 mg/kg considéré comme le 99^e percentile (classe 5) des observations recueillies sur différents sols du Québec (Deschenes et al., 2006). Les groupes de séries de sols 20 (Tills Magog, Calais et Dufferin) et 1 (Sols argileux Sainte-Rosalie et Saint-Urbain) présentent toutefois des valeurs plus élevées qui s'y rapprochent. Le peu d'effet du type de site cultivé ou témoin ne permet pas de conclure à des contaminations de nature anthropique, comme des épandages de boues industrielles ou autres. Les variations sembleraient davantage liées à la nature des dépôts meubles. Les tills du groupe 20 présentent à cet égard des teneurs plus élevées en Ni extraits Mehlich-3 qui pourraient être reliées à la nature des dépôts meubles.

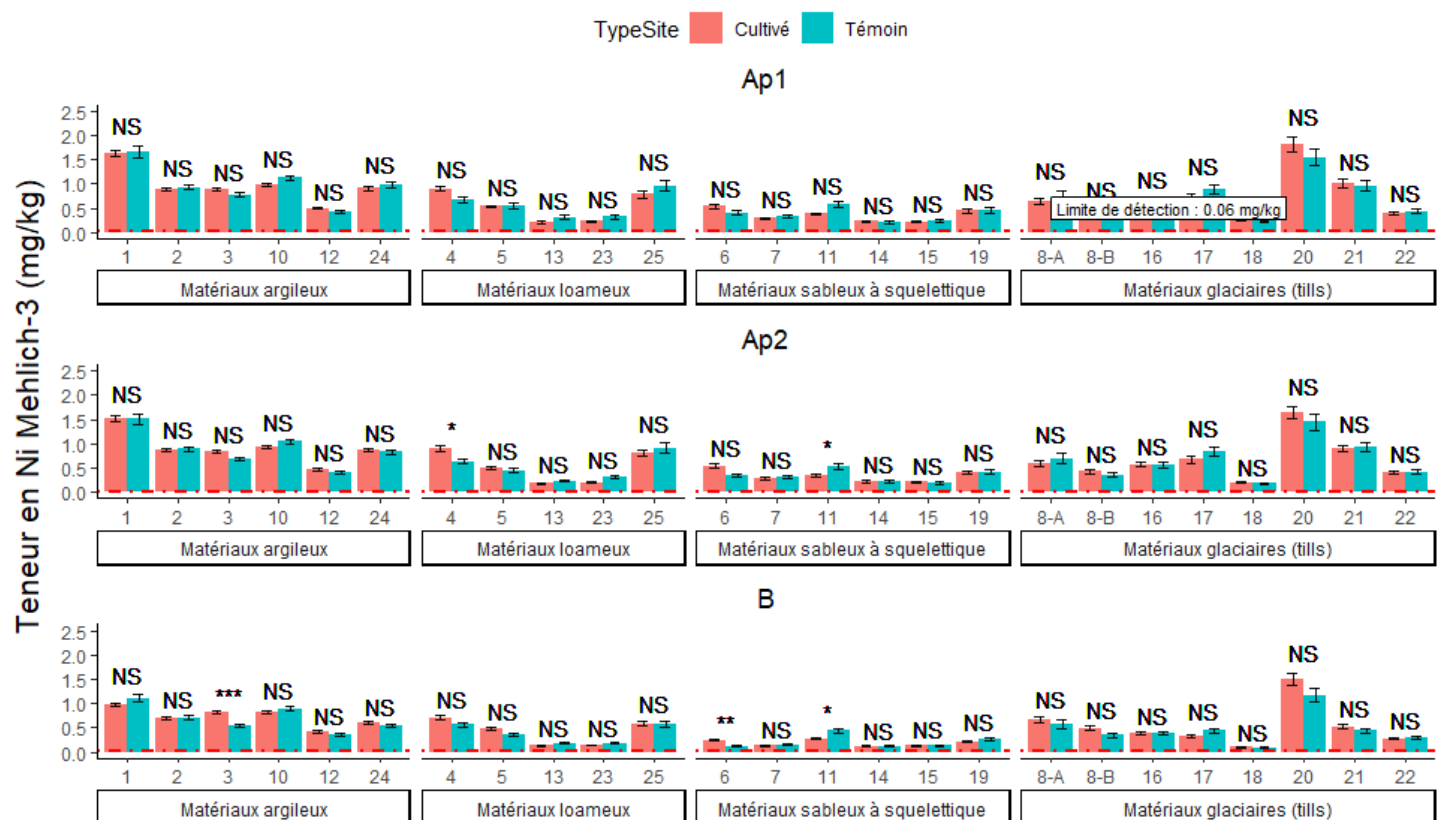


Figure 4 : Teneurs en nickel extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

Plomb

Le plomb demeure un contaminant environnemental majeur, issu à 98 % de activités humaines notamment des activités industrielles et minières, des déchets électroniques et de certaines pratiques agricoles (Ali et al., 2024). Sa persistance dans les sols entraîne des risques importants pour la santé humaine et pour les écosystèmes.

La présence de plomb dans les sols agricoles suscite des préoccupations croissantes en matière de santé publique et de durabilité agroécologique. Les révisions récentes des lignes directrices canadiennes pour la qualité des sols rappellent qu'aucun seuil sécuritaire n'a été identifié pour l'exposition au plomb, justifiant l'adoption de valeurs plus protectrices pour les milieux agricoles (seuil de 61 mg/kg équivalent à une réduction de 0,5 point de quotient intellectuel; Analyse totale), où les aliments cultivés peuvent contribuer à l'exposition humaine (CCME, 2025).

Au Québec, plusieurs évaluations environnementales soulignent que les données disponibles demeurent fragmentaires, limitant la capacité du MAPAQ à caractériser adéquatement les contaminants inorganiques dans les sols agricoles et à orienter les interventions de gestion du risque. Une étude publiée par Giroux en 1992 estime à 5 mg/kg le seuil critique de la teneur en Pb disponible du sol. Deschenes et al. (2006) ont retenu une teneur supérieure à 5,7 mg/kg de Pb Meh-3 dans la classe 5, représentant le 99^e percentile des observations mesurées au Québec, qu'on pourrait considérer comme teneur très élevée.

Les analyses ont révélé que certains groupes de séries de sols témoins ont des teneurs en PbMeh-3 plus élevées que les sols cultivés et atteignent parfois la classe 5, soit des teneurs très élevées (Figure 5). Cet effet peut être dû à des activités antérieures sur certains sites sélectionnés comme témoins (boisés, friches et pelouses, vergers). Deux groupes de séries de sols témoins dépassent même la limite très élevée en PbMeh-3 (4,8 mg/kg) établie par Giroux et al. (1992) (groupes 6 et 17). Des sites avec des teneurs supérieures à 10 mg/kg ont observé dans deux vergers (groupes-séries 7 et 11 - 37,6 mg/kg) et un boisé (groupes-séries - 36,9 mg/kg). La contamination au plomb pourrait provenir de pesticides et dans certains cas a été relié aux munitions de chasse. Les ions de Pb sont aussi reconnus pour être plus mobiles en sols sableux. Finalement, les variations naturelles existent, la plupart des sols issus des matériaux glaciaires (tills) semblent présenter des niveaux naturellement plus élevés, sauf les groupes de séries de sols 18 (Chapais, Leeds et Charlevoix) et 22 (Amqui, Quisibi et Comis).

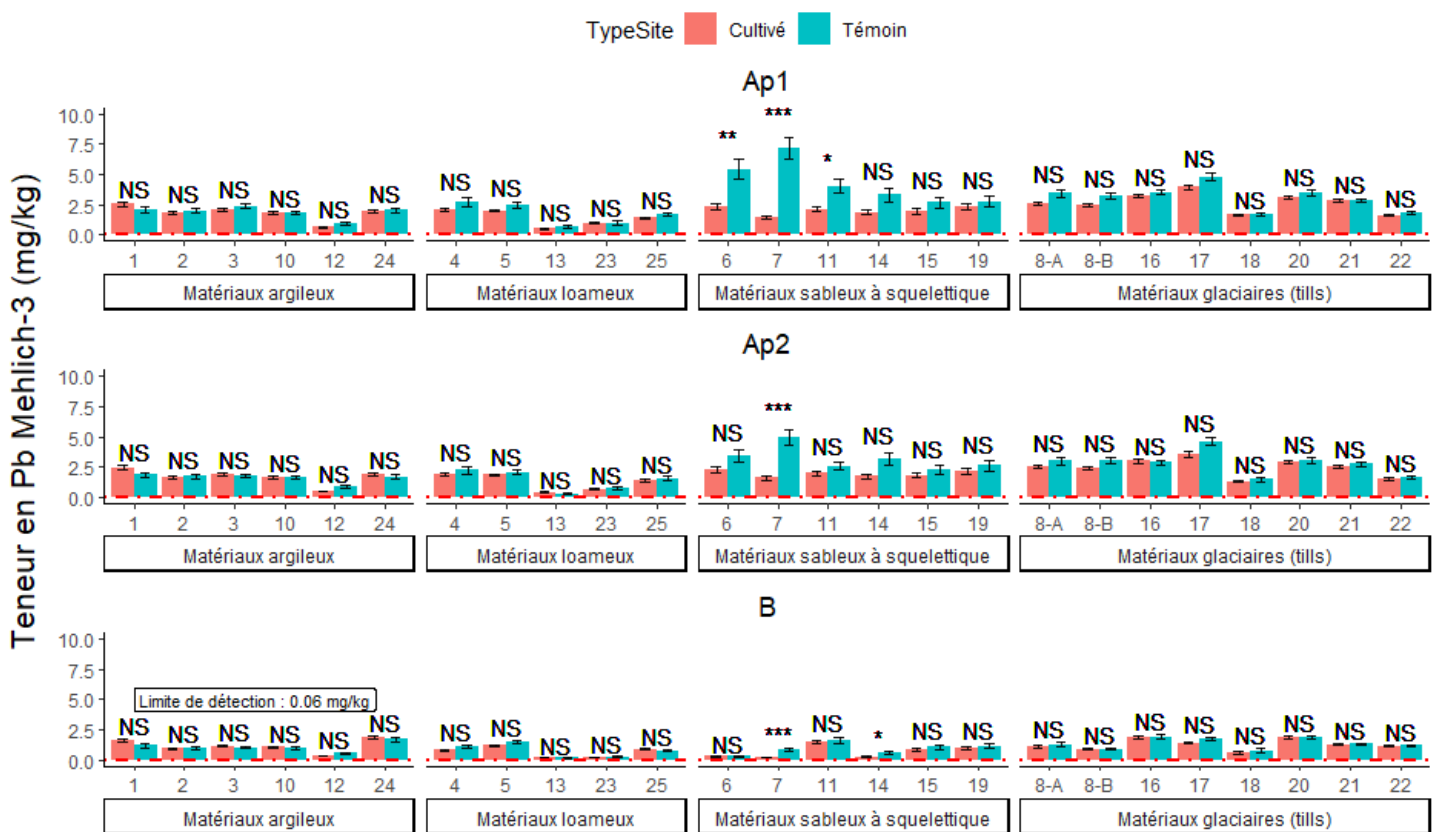


Figure 5 : Teneurs en plomb extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

Matériaux parentaux et ÉTM

Les teneurs des cinq ÉTM extraits en solution Meh-3 ont été comparées statistiquement par matériaux parentaux et sont présentées au Tableau 2. Les sols issus de matériaux glaciaires (tills) présentent en général des teneurs statistiquement plus élevées de Cd, Co et Pb, mais à l'inverse des teneurs plus faibles en Cr que les sols issus des autres matériaux parentaux. Les sols issus de dépôts sableux à squelettiques présentent en revanche les plus faibles teneurs en Cd, Co et Ni, des teneurs intermédiaires en Cr et un peu plus élevées en Pb dans les horizons de surface Ap1 et Ap2. Les sols loameux présentent les teneurs les plus élevées en Cr notamment en profondeur dans l'horizon B et les plus faibles en Pb. Enfin, les sols argileux présentent en général des niveaux intermédiaires dans ces quatre ÉTM, sauf pour Cd, Co Ni qui ont des teneurs plus élevées en profondeur dans l'horizon B, ainsi qu'en Cr et Ni dans les horizons Ap1 et Ap2. En général, les niveaux atteints demeurent en moyenne à l'intérieur des classes moyennes (50 à 75^e percentile des observations) définies par Deschenes e al. (2006), sauf pour le cobalt qui atteint plus souvent la classe élevée (75 à 99^e percentile) définie entre 0,29 à 1,18 mg/kg. En conclusion, les matériaux parentaux ou les dépôts de surface influencent quelque peu les teneurs observées, mais en moyenne demeure à l'intérieur des niveaux moyens qui ont généralement été observés pour ces ÉTM dans les études antérieures.

Tableau 2 : Effet des matériaux parentaux sur les niveaux de Cd, Cr, Co, Ni et Pb extraits Mehlich-3.

Horizon	Matériau parental†	Cadmium	Chrome	Cobalt	Nickel	Plomb
----- mg/kg -----						
Ap1	Argileux	0,088 ab*	0,22 b	0,31 b	0,877 c	1,76 a
	Loameux	0,084 ab	0,23 b	0,26 ab	0,748 bc	1,67 a
	Sableux à squelettiques	0,075 a	0,19 ab	0,16 a	0,536 ab	2,67 b
	Glaciaires (till)	0,105 b	0,14 a	0,37 b	0,357 a	2,83 b
Ap2	Argileux	0,074 ab	0,25 b	0,29 b	0,86 c	1,64 a
	Loameux	0,074 ab	0,25 b	0,23 b	0,639 bc	1,59 a
	Sableux à squelettiques	0,068 a	0,20 ab	0,14 a	0,504 ab	2,41 b
	Glaciaires (till)	0,093 b	0,17 a	0,31 b	0,338 a	2,67 b
B	Argileux	0,042 b	0,27 ab	0,39 b	0,703 c	1,21 b
	Loameux	0,036 ab	0,36 b	0,31 b	0,412 b	0,71 a
	Sableux à squelettiques	0,029 a	0,28 ab	0,11 a	0,205 a	0,87 ab
	Glaciaires (till)	0,043 b	0,24 a	0,35 b	0,525 bc	1,40 b

Systèmes de culture sur les ÉTM disponibles

L'analyse a révélé que certains sols témoins ont des teneurs en PbMeh-3 et en CdMeh-3 plus élevées que les sols cultivés. Cet effet peut être dû à des activités antérieures sur certains sites sélectionnés comme témoins (boisés, friches et pelouses, vergers). La réaction plus acide des sols témoins, ceux en friches notamment, pourrait expliquer en partie ces plus grandes teneurs en ÉTMs extractibles. Deux groupes-séries (6 et 17) de sols témoins dépassent même les limites très élevées en PbMeh-3 établies à 4,8 mg/kg par Giroux et al. (1992) ou à 5,7 mg/kg par Deschênes et al., (2006). Inversement, les sols cultivés ont des teneurs en CoMeh-3 et en CrMeh-3 plus élevées que les sols témoins dans la plupart des cas. Presque tous les sols cultivés de la région de la plaine de Montréal (groupes 2, 3, 4, 5, 6, 8-A, 8-B,) ont des teneurs plus élevées en CoMeh-3 sur au moins un horizon, alors que la plupart des sols cultivés ont tendance à avoir des teneurs en CrMeh-3 plus élevées que les sols témoins, mais peu sont significativement enrichis sur tout le profil (groupes 14 et 8-B seulement).

Les tendances mentionnées précédemment se manifestent également dans les comparaisons entre systèmes de cultures : les teneurs en Pb et Cd extraits mehlich-3 sont plus élevées dans les sols sous systèmes de culture moins intensifs (Ex. Pb Meh-3 : Pérennes > Friche-pelouses > Non cultivés > Annuelles + Pérennes > Maraîchers > Annuelles) alors que les

teneurs en Cr et Co extraits Mehlich-3 sont significativement plus élevées dans les sols sous cultures annuelles (Tableau 3). Il reste à déterminer la provenance de ces enrichissements dans les sols, à savoir si les amendements organiques pourraient être responsables des teneurs élevées en Cr et Co, et quels phénomènes peuvent causer des teneurs anormalement élevées en Pb et en Cd dans les vergers, boisés, friches et pelouses.

Tableau 3 : Effet du système de culture sur les niveaux de Cd, Cr, Co, Ni et Pb extraits Mehlich-3

Horizon	Système de culture†	Cadmium	Chrome	Cobalt	Nickel	Plomb
mg/kg						
Ap1	Non cultivé (n = 62)	0,082 a	0,176 ab	0,283 bc	0,595 ab	2,336 bc
	Friche-pelouse ‡ (n =31)	0,096 ab	0,176 ab	0,245 abc	0,672 b	2,436 c
	Pérennes (n =58)	0,097 b	0,167 a	0,224 a	0,557 ab	2,555 c
	Annuelles+pérennes‡ (n =93)	0,086 a	0,194 abc	0,258 ac	0,534 a	2,004 ab
	Annuelles (n =143)	0,083 a	0,217 c	0,313 b	0,613 ab	1,929 a
	Maraîcher (n =16)	0,081 ab	0,233 bc	0,255 abc	0,611 ab	1,851 abc
Ap2	Non cultivé	0,072 a	0,204 ab	0,226 b	0,579 bc	2,222 ab
	Friche-pelouse	0,088 a	0,204 ab	0,204 a	0,638 bc	2,191 ab
	Pérennes	0,080 a	0,197 a	0,204 a	0,53 a c	2,299 b
	Annuelles+pérennes‡	0,073 a	0,213 ab	0,242 ab	0,48 a	1,868 ab
	Annuelles	0,080 a	0,228 b	0,284 b	0,615 b	1,823 a
	Maraîcher	0,068 a	0,245 ab	0,221 ab	0,496 abc	1,798 ab
B	Non cultivé	0,035 ab	0,267 a	0,252 a	0,41 ab	1,086 ab
	Friche-pelouse	0,039 abc	0,3 ab	0,244 a	0,46 b	1,149 b
	Pérennes	0,042 c	0,26 a	0,249 a	0,415 ab	1,191 b
	Annuelles+pérennes ‡	0,035 a	0,284 ab	0,273 a	0,359 a	0,938 ab
	Annuelles	0,040 bc	0,295 b	0,297 a	0,448 b	0,879 a
	Maraîcher	0,032 abc	0,304 ab	0,265 a	0,438 ab	0,863 ab

Nous pouvons tout de même avancer, avec ces résultats, que bien qu'il semble y avoir une faible augmentation des teneurs en cobalt et en chrome disponible en lien avec l'intensification des pratiques agricoles et quelques cas épars de dépassements des seuils en plomb disponible dans certains sols témoins, rien n'indique qu'il y ait un accroissement problématique de ces ÉTMs dans les sols dû aux activités agricoles.

SOUFRE

Le soufre est un élément essentiel pour la nutrition des plantes et des animaux. Avant ces vingt dernières années, la nutrition en soufre des plantes a toujours été reléguée en second plan en raison des besoins plus faibles en soufre par rapport aux principaux éléments nutritifs et des niveaux de soufre assez élevés dans les sols dus principalement aux pluies acides et aux apports plus fréquents en engrais de ferme. La mise en place de mesures pour réduire les dépôts de polluants acidifiants a conduit ces dernières années à la réduction des dépôts atmosphériques de soufre et à des carences en soufre de plus en plus fréquentes dans les sols agricoles (Scherer, 2009; Vermeiren et al., 2018).

La distribution des niveaux de soufre Mehlich-3 observés dans les différents groupes de séries de sols et présentés à la Figure 6, ne permet pas de conclure à des différences très souvent significatives entre sites témoins et cultivés. Les niveaux de soufre ont tendance à être plus élevés dans certains sites témoins et le pH plus acide (pH eau < 5,5) de ces sols pourrait expliquer ces teneurs plus élevées en S Meh-3, tel que rapporté dans le rapport de l'activité 1.1. Les sols issus de matériaux sableux à squelettiques présentent en général des niveaux plus élevés de S Meh-3, suivis des sols issus de matériaux glaciaires et des sols loameux. Les sols argileux présentant les plus faibles teneurs en S Meh-3, près de la limite de détection de 5 mg/kg, sauf ceux du groupe 10 de la Plaine littorale du Bas-St-Laurent qui inclue la série De l'Anse et ses teneurs naturellement élevées de S en profondeur dans ses dépôts.

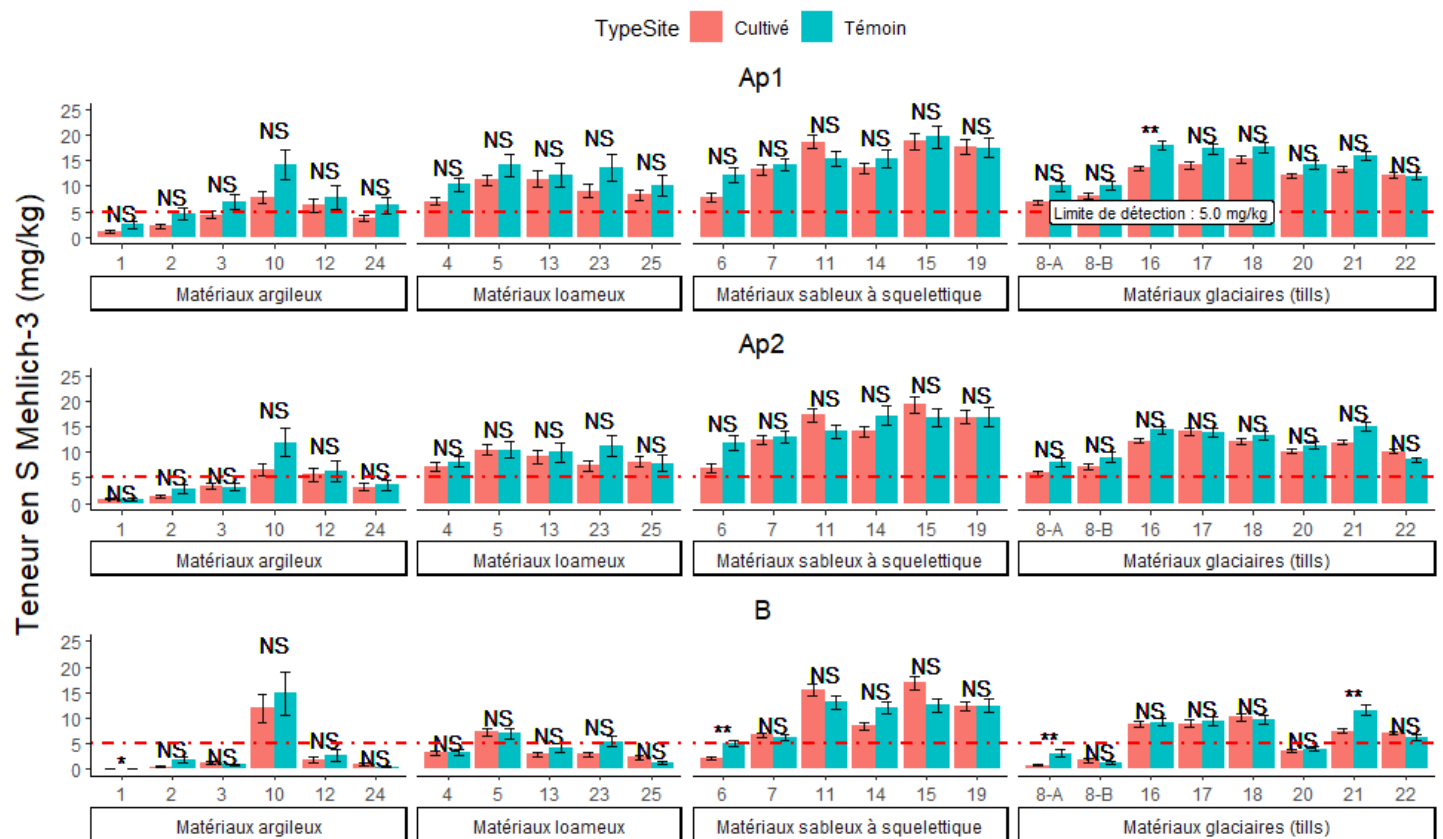


Figure 6 : Teneurs en soufre extrait Mehlich-3 dans les différents groupes de séries de sols et matériaux parentaux dans les horizons Ap1, Ap2 et B.

On pourrait poser l'hypothèse que les seuils critiques plus élevés pour l'indice de saturation en phosphore dans les sols sableux et les tills podzolisés permettent d'appliquer des quantités plus importantes d'amendements organiques et par conséquent en P, Cu, Zn et S, favorisant une accumulation plus importante de S Meh-3, comme pour le P Meh-3. Toutefois, une analyse de déviance (Analyse de variance ajustée par maximum de vraisemblance) considérant la fréquence d'application des amendements organiques et les matériaux parentaux en interaction n'a révélé d'effet statistiquement

significatif que pour l'effet du matériau parental et de faibles interactions avec la fréquence d'apports en amendements organiques dans les horizons Ap1 et Ap2.

Tableau 4 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec les matériaux parentaux sur les teneurs en S Meh-3; analyse de déviance.

Effets	Horizon Ap1	Horizon Ap2	Horizon B
	----- Probabilité de chi ² -----		
Matériau parental (M)	< 0,001*	0,008	-
Fréquence d'apport d'amendements organiques (AO)	NS	NS	-
M x AO	0,21	0,12	-
	Teneur en S Meh-3 mg/kg		
Matériaux argileux	7,11 c	6,04 c	0,53
Matériaux glaciaires (tills)	13,65 b	11,60b	5,96
Matériaux loameux	10,46 a	9,41 b	4,11
Matériaux sableux à squelettique	14,79 b	14,72 a	9,80
Apports fréquents	11,77 b	10,85 a	3,54
Apports_occasionnels	10,07 a	9,18 a	3,31
Sans_AEO	11,45 b	9,82 a	3,25

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif

Une analyse de déviance sur les systèmes de culture a révélé un effet des systèmes de culture et une interaction importante de ces systèmes avec le matériau parental. Les systèmes en culture maraichères et fruitières incluant la pomme de terre présenteraient des niveaux beaucoup plus faibles que les autres systèmes de culture.

Tableau 5 : Effets de la fréquence d'apport d'amendements organiques et son interaction avec les matériaux parentaux sur les teneurs en S Meh-3; analyse de déviance.

Effets	Horizon Ap1	Horizon Ap2	Horizon B
	----- Probabilité de chi ² -----		
Matériau parental (M)	0,008	< 0,001	0,002
Système de culture (SC)	< 0,001	0,03	0,003
M x SC	< 0,001	0,008	< 0,001
	Teneur en S Meh-3 mg/kg		
Matériaux argileux	7,11 c	6,04 c	0,53
Matériaux glaciaires (tills)	13,65 b	11,60b	5,96
Matériaux loameux	10,46 a	9,41 b	4,11
Matériaux sableux à squelettique	14,79 b	14,72 a	9,80
Non-cultivés	12,132 b	10,041 b	6,51 a
Friches et pelouses	10,968 b	8,934 b	4,738 a
Système à dominance de cultures pérennes	11,081 b	9,212 b	6,21 a
Cultures annuelles associées aux cultures pérennes	10,161 b	9,124 b	5,3 a
Système en cultures annuelles	10,805 b	10,264 b	4,69 a
Cultures maraichères et fruitières	1,447 a	1,514 a	1,203 a

*Les valeurs de probabilité de F en gras sont inférieures à 0,10. Les autres valeurs entre 0,10 et 0,20 sont présentées pour indiquer des tendances
NS : non-significatif

Une autre analyse de la distribution des teneurs en S dans l'horizon Ap (combinant les teneurs des horizons Ap1 et Ap2 sur 20 cm) selon différents facteurs biophysiques a été réalisée dans l'activité 1.1 et met en évidence des niveaux plus élevés de soufre dans les sols issus de matériau parental sableux à squelettiques ou de dépôts glaciaires (tills), par rapport aux autres sols argileux et loameux.

Tableau 6 : Teneurs moyennes en soufre-M3 dans l'horizon Ap de différents matériaux parentaux

Indicateurs	Matériau parental	Zone	Moyenne
S M3 (Horizon Ap - mg/kg)	Argileux		5,07 (a)
	Loameux		9,30 (b)
	Sabl. à squel. + Tills		12,57 (c)

Sabl. à squel. : Sableux à squelettiques

N.B. : Les sols dont le pH eau était inférieur à 5,5 ainsi que les sols argileux de la série De l'Anse présentant des valeurs extrêmes ont été retirés de l'analyse.

CONCLUSION

L'objectif de cette activité visait à compléter l'information sur l'état de santé des sols agricoles du Québec en portant un regard sur les teneurs en éléments traces métalliques (ÉTM) (Cd, Co, Cr, Ni, Pb) et en soufre extraits en solution Mehlich-3, qui n'avaient pas été traités et rapportés dans les rapports de l'ÉÉSSAQ en 2023. Les teneurs en Mo Meh-3 ont été mesurées, mais étaient plus souvent sous la limite de détection dans la majorité des sols et donc n'ont pas été analysées et interprétées.

Les matériaux parentaux ou les dépôts de surface influencent quelque peu les teneurs observées, mais ces teneurs en général demeurent à l'intérieur des niveaux déjà observés pour ces ÉTM dans des études antérieures réalisées au Québec. Les sols issus de matériaux glaciaires (tills) présentent en moyenne des teneurs statistiquement plus élevées de Cd, Co, Ni et Pb, mais à l'inverse des teneurs plus faibles en Cr que les sols issus des autres matériaux parentaux. Les sols du groupe 20 des séries Magog, Calais et Dufferin présentent des teneurs naturellement plus élevées de Co et de Ni Meh-3.

Les sols issus de dépôts sableux à squelettiques présentent en revanche les plus faibles teneurs en Cd et en Co, des teneurs intermédiaires en Cr et un peu plus élevées en Pb dans les horizons de surface Ap1 et Ap2. Ces teneurs en Pb plus élevées dans des sites témoins pourraient être reliés à des actions anthropiques. Les sols loameux présentent les teneurs les plus élevées en Cr notamment en profondeur dans l'horizon B et les plus faibles en Pb. Les sols argileux pour finir présentent en général des niveaux intermédiaires dans ces quatre ÉTM, sauf pour le Co et le Cd qui ont des teneurs plus élevées en profondeur dans l'horizon B. Les sols du groupe 1 des séries Sainte-Rosalie et Saint-Urbain présentent des teneurs naturellement plus élevées de Ni Meh-3.

En général, les niveaux atteints en ÉTM demeurent en moyenne à l'intérieur des classes moyennes (50 à 75^e percentile des observations) définies par Deschenes e al. (2006), sauf pour le cobalt qui atteint plus souvent la classe élevée (75 à 99^e percentile) définie entre 0,29 à 1,18 mg/kg.

Les niveaux de soufre ont tendance à être plus élevés dans certains sites témoins et le pH plus acide (pH eau < 5,5) de ces sols pourrait expliquer ces teneurs plus élevées en S Meh-3, tel que rapporté dans le rapport de l'activité 1.1. Les sols issus de matériaux sableux à squelettiques présentent en général des niveaux plus élevés de S Meh-3, suivis des sols issus de matériaux glaciaires et des sols loameux. Les sols argileux présentent les plus faibles teneurs en S Meh-3, près de la limite de détection de 5 mg/kg, sauf ceux du groupe 10 de la Plaine littorale dans le Bas-St-Laurent qui inclue la série De l'Anse et ses teneurs naturellement élevées de S en profondeur dans ses dépôts. Les apports en amendements organiques pourraient jouer un rôle dans l'accumulation de S Meh-3, comme les teneurs en P, Cu et Zn Meh-3, mais l'analyse statistique n'a pas révélé d'effet significatif de la fréquence d'apport des amendements organiques sur ces teneurs en S Meh-3. L'analyse sur les effets des systèmes de culture à révéler des teneurs plus faibles de S Meh-3 dans les systèmes maraichers incluant la pomme de terre.

L'analyse de ces ÉTM et du soufre dans les sols de l'ÉÉSSAQ aura permis de vérifier si les niveaux généralement rencontrés dans les différents sols et matériaux parentaux sont influencés par les activités agricoles ou autres actions anthropiques, s'ils reflètent davantage les niveaux naturels associés aux dépôts meubles ou s'ils sont influencés par l'acidité du sol. Ces connaissances seront utiles pour la fertilisation et la gestion des amendements organiques et des matières résiduelles fertilisantes.

RÉFÉRENCES

- Ali, S., Naseer, S., & Rehman, M. (2024). Recent trends and sources of lead toxicity : a review of state - of - the - art nano - remediation strategies. *Journal of Nanoparticle Research*, 26(168), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s11051-024-06081-5>
- CCME. (2025). Conseil canadien des ministres de l'environnement. Recommandations canadiennes pour la qualité du sol visant la protection de l'environnement et de la santé humaine: Plomb. Dans *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement*, 1999.
- Gasser, M.-O., Bossé, C., Clément, C. C., Bernard, C., Mathieu, J.-B., & Tremblay, M.-È. (2023). Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 190 pages. www.irda.qc.ca
- Deschênes, L., R. Chassé, M. Giroux, C. Bastien, L. Jean, V. Bécaert, D. Martineau et G. Côté, G. 2006. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. *École polytechnique de Montréal PARDE*, 147p + annexes
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., & Carocci, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *Cd*, 1–24.
- Giroux, M., Rompré, M., Carrier, D., Audesse, P., & M, L. (1992). Caractérisation de La Teneur En Métaux Lourds et Disponibles Des Sols Du Québec. *Agrosol*, Vol. 5, No. 2, 9 pages.
- Hu, X., Wei, X., Ling, J., & Chen, J. (2021). Cobalt : An Essential Micronutrient for Plant Growth ? *12(November)*, 1–24. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>
- Lux, A., Martinka, M., Vaculik, M., & White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere : a review. *62(1)*, 21–37. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- Stephan Clemens. (2006). Evolution and function of phytochelatin synthases. 163. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.11.010>
- Zhang, Z., Zhong, J., Guo, X., Xu, C., Huang, D., Liu, J., & Chen, X. (2024). Differential effects of pH on cadmium accumulation in *Artemisia argyi* growing in low and moderately cadmium - contaminated paddy soils. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00690-x>