

Les éléments traces métalliques (ÉTM)

Leur accumulation dans les sols agricoles du Québec

Marcel Giroux¹, Louise Deschênes², Raynald Chassé³

Aide à la rédaction : Rémi Carrier

Chaque année, on estime qu'environ 31 millions de tonnes d'engrais de ferme et près d'un million de tonnes de matières résiduelles fertilisantes sont épandues sur les terres agricoles du Québec. Certaines de ces matières fertilisantes contiennent des teneurs relativement élevées en éléments traces métalliques (ÉTM). C'est le cas, par exemple, des lisiers porcins et des boues d'épuration des eaux municipales, qui peuvent contenir des quantités appréciables de cuivre et de zinc. Une application répétée de ces matières fertilisantes peut accroître les teneurs en ÉTM dans les sols et en augmenter la biodisponibilité, ce qui peut être problématique dans certains cas. Un suivi analytique s'avère donc pertinent pour mesurer leur niveau d'accumulation et prévenir la contamination des sols. La liste des ÉTM les plus courants comprend des métaux et des métalloïdes dont certains sont considérés essentiels ou bénéfiques, en faible quantité, pour les plantes ou pour les animaux.

Tableau 1. ÉTM requis à faible dose par les plantes ou les animaux et ceux sans rôle connu.

Élément	Végétaux	Animaux et humains
Arsenic (As)	-	-
Bore (B)	+	+*
Cadmium (Cd)	-	-
Cobalt (Co)	-	+
Chrome (Cr)	-	+
Cuivre (Cu)	+	+
Fer (Fe)	+	+
Fluor (F)	-	+
Iode (I)	-	+
Manganèse (Mn)	+	+
Mercure (Hg)	-	-
Molybdène (Mo)	+	+
Nickel (Ni)	+**	+
Plomb (Pb)	-	-
Selenium (Se)	-	+
Zinc (Zn)	+	+

+ : requis - : non requis

* : Certaines études récentes indiquent que le bore serait requis pour les animaux et les humains.

** : Certaines études récentes indiquent que le nickel serait requis pour les végétaux.

Mobilité et biodisponibilité des éléments traces dans le sol

Le sol est une matrice complexe qui exerce un effet tampon important sur les équilibres entre les ÉTM du sol et ceux en solution. Il est important que le sol conserve cette capacité régulatrice, qui protège la chaîne alimentaire des risques de contamination. Ce sont principalement la matière organique et l'argile qui permettent au sol de régulariser la mobilité et la biodisponibilité des



Parcelles de longue durée à la ferme expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon.

ÉTM, mais le pH du sol joue également un rôle important. Un pH acide favorise la solubilité de la plupart des ÉTM et accroît leur biodisponibilité tandis qu'un pH basique produit l'effet inverse et peut même, dans certains cas, provoquer une carence nutritive pour les plantes. Le molybdène est le seul élément qui fait exception à cette règle.

De la même façon qu'une surfertilisation répétée peut entraîner la saturation des sols par le phosphore, des apports trop élevés d'ÉTM peuvent, à long terme, saturer les pôles fixateurs

du sol. Une fois ces sites de fixation trop saturés, le pouvoir tampon du sol diminue considérablement, ce qui a pour conséquence de modifier les équilibres sol-solution et d'accroître la biodisponibilité des ÉTM. La présence d'une trop grande quantité d'ÉTM biodisponibles peut affecter les plantes et les organismes qui vivent dans le sol, jusqu'à atteindre un niveau de toxicité. Puisque les conséquences peuvent être très sérieuses, il est important de prévenir cette forme de dégradation des sols.

Selon l'inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec, réalisé par Tabi *et al.* (1990), près de 50 000 ha de sols agricoles ont montré des augmentations significatives de la teneur en ÉTM dans la couche arable. Actuellement, le phénomène d'accumulation des ÉTM dans les sols agricoles est observé principalement pour le cuivre et le zinc à cause de leur teneur élevée dans certains engrais de ferme et certaines matières résiduelles fertilisantes. Aucun cas de phytotoxicité n'est encore rapporté au Québec, mais de tels cas ont été observés en Bretagne. (Aurousseau 2001. [Les apports de métaux lourds sur les sols de Bretagne](#)).

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2. École Polytechnique de Montréal

3. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

Tableau 2. Classification des sols selon leur teneur naturelle en ÉTM mesurée avec la méthode Mehlich-3.

Classe	Distribution centile	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	< 25	< 15,2	< 1,1	< 1,2	< 0,15	< 0,21	< 0,05	< 0,25	< 1,6
2	25 - 50	15,2-25,3	1,1-1,8	1,2-1,9	0,15-0,22	0,21-0,27	0,05-0,07	0,25-0,36	1,6-2,1
3	50 - 75	25,3-35,0	1,8-2,8	1,9-3,0	0,22-0,29	0,27-0,42	0,07-0,10	0,36-0,57	2,1-2,6
4	75 - 99	35,0-98,6	2,8-9,0	3,0-14,0	0,29-1,18	0,42-0,75	0,10-0,24	0,57-2,05	2,6-5,7
5	> 99	> 98,6	> 9,0	> 14,0	> 1,18	> 0,75	> 0,24	> 2,05	> 5,7

Deschênes *et al.*, 2006.

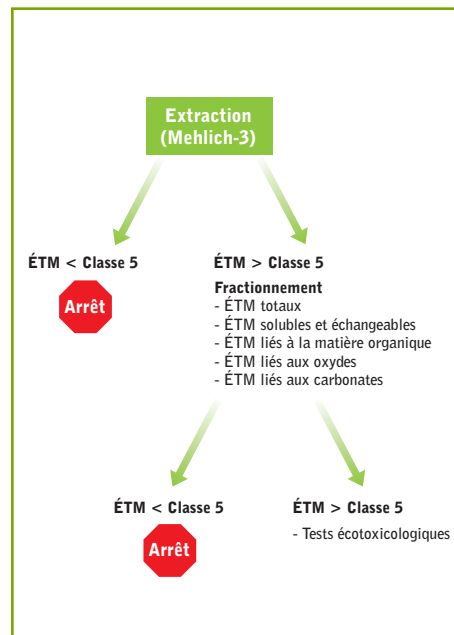
Mise au point d'une procédure d'évaluation des teneurs en ÉTM dans un sol

La mise au point d'une méthode analytique éprouvée et le développement de critères d'interprétation des teneurs en ÉTM sont essentiels au suivi de la contamination des sols. Afin de déterminer la mobilité, la biodisponibilité et le niveau d'accumulation des ÉTM dans les sols, une méthode analytique en trois étapes a été développée en partenariat entre l'École Polytechnique de Montréal, le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) et l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). La première étape sert à déterminer les teneurs en ÉTM labiles du sol grâce à la méthode Mehlich-3, en usage dans les laboratoires d'analyse des sols agricoles du Québec. Dans les cas d'accumulation importante, la deuxième étape pousse le suivi plus loin et précise l'accumulation des ÉTM dans les différentes fractions du sol. Si une mobilité chimique excessive et une contamination importante de certaines fractions sont détectées, il est possible que la chaîne alimentaire soit affectée. Des tests écotoxicologiques impliquant des organismes vivants peuvent alors être réalisés en troisième étape.

ÉTAPE 1

La première étape consiste à déterminer la teneur des sols en ÉTM labiles grâce à la méthode d'extraction Mehlich-3, qui sert chaque année à analyser plusieurs dizaines de milliers de sols agricoles du Québec. Cette méthode extrait les ÉTM labiles par chélation avec EDTA en milieu acide. Des critères d'interprétation des résultats, basés sur la distribution centile des ÉTM dans les sols, permettent de comparer les teneurs du sol étudié avec la distribution naturelle des sols du Québec (tableau 2). Ceci permet de déceler les cas d'accumulation trop importante. Les sols dont la teneur d'un ou de plusieurs ÉTM atteint le niveau centile 99% sont

considérés comme très enrichis. Il est alors recommandé de pousser plus loin le suivi à l'étape 2, car la méthode Mehlich-3 ne permet pas à elle seule de déterminer la biodisponibilité et la mobilité des ÉTM. En effet, de nombreux facteurs chimiques, physico-chimiques et pédologiques ont également une influence sur la disponibilité des ÉTM.



Méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol.

ÉTAPE 2

La deuxième étape consiste en une caractérisation chimique plus détaillée du sol pour déterminer les accumulations des ÉTM dans les différentes fractions. Les fractions les plus importantes à caractériser sont la fraction organique, la fraction des oxydes libres et la fraction échangeable. Cette caractérisation peut également se faire dans les couches inférieures du profil de sol ou sur un sol témoin non contaminé, de même nature pédologique, afin de connaître les teneurs naturelles du sol et de

mieux cibler l'impact des apports sur la mobilité des ÉTM. Des valeurs de référence ont été établies pour chacune des fractions. Les critères sont disponibles en ligne sur le site de l'IRDA dans le rapport de recherche de Deschênes *et al.* (2006) pour interpréter les résultats. Si la teneur en ÉTM d'une ou de plusieurs fractions atteint un niveau excessif et révèle une mobilité trop élevée, il peut s'avérer nécessaire d'effectuer divers tests écotoxicologiques à l'étape 3.

ÉTAPE 3

La troisième étape concerne les sols susceptibles d'atteindre des niveaux à risque pour la chaîne alimentaire, occasionnant des désordres aux organismes du sol, à ses fonctions enzymatiques ou au développement des plantes. Des tests comme la germination et la croissance de l'orge ou la reproduction et la létalité des vers de terre permettent d'évaluer la biodisponibilité des ÉTM et leur impact sur le milieu. La toxicité des lixiviats du sol est également testée sur la daphnie en milieu aquatique. La mesure de la stabilité enzymatique du sol s'est avérée quant à elle un test sensible pour faire ressortir les effets toxiques des ÉTM au niveau microbien du sol. Il est important de combiner plusieurs tests représentatifs des différentes voies d'exposition à la toxicité et de les comparer aux analyses chimiques afin d'obtenir plus d'informations sur l'impact des contaminants.

Application de la méthode

Portrait après 25 ans d'épandage de lisier de porc

La procédure mise au point a été validée lors d'une caractérisation du cuivre et du zinc dans les sols de parcelles fertilisées avec du lisier de porc pendant 25 ans. Ces parcelles avaient été établies dans le cadre d'un projet de recherche visant à connaître l'impact à long terme de l'application de lisier de porc sur les propriétés des sols. Depuis 1979, ces parcelles cultivées en maïs ont reçu des doses annuelles de lisier variant entre 0 et 108 t/ha en moyenne. Les parcelles témoins n'ont reçu aucun lisier et ont été fertilisées avec des engrais minéraux seulement. En 1999, une prairie de trèfle et de fléole a remplacé la culture du maïs, et c'est en 2003 que le cuivre et le zinc des sols ont été caractérisés.

Après 25 ans d'application de lisier de porc, les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans les sols ont été grandement affectées. Les teneurs en cuivre et en zinc total dans la couche 0-10 cm ont doublé avec la dose de 108 t/ha de lisier. Les teneurs en cuivre et en zinc extraits avec la méthode Mehlich-3 ont été respectivement cinq et dix fois plus élevées dans les parcelles recevant la dose maximale de lisier, comparativement aux parcelles témoins (tableaux 3 et 4). L'accumulation du cuivre et du zinc Mehlich-3, représentant la fraction labile, s'est donc faite à un rythme plus important que l'accroissement de la charge totale dans les sols. Le même phénomène a été observé pour le cuivre et le zinc présents dans la fraction organique.

L'expérimentation a démontré que des apports à long terme peuvent également avoir des effets sur la fraction échangeable, très mobile. Les accumulations observées dans les teneurs totales et dans les différentes fractions ont saturé partiellement les sites de fixation, ce qui a accru la mobilité du cuivre et du zinc. Les modèles prévisionnels actuels pour déterminer la capacité réceptrice en ÉTM des sols à long terme sont basés sur des projections de charge totale apportée. Ils ne prennent pas en compte l'additivité des ÉTM (Cu + Zn) ni leur interaction (Cu x Zn). Nos travaux ont également démontré qu'il faudrait accorder une plus grande importance aux effets des apports sur les fractions mobile, labile, modérément labile et organique. L'épandage de doses élevées de lisier n'est plus pratique courante aujourd'hui, car la réglementation sur le phosphore limite les applications. Ceci va contribuer à restreindre le taux d'enri-



chissement des sols. Cependant, les apports de cuivre et de zinc d'avant la réglementation ont tout de même enrichi certains sols de façon appréciable. Actuellement environ 5% des sols agricoles québécois analysés dépassent les

seuils critiques de 9 mg/kg de cuivre et 14 mg/kg de zinc. Il y a donc un enrichissement par rapport aux teneurs naturelles des sols (voir tableau 2), sans doute d'origine anthropique.

Tableau 3. Profil de fractionnement du cuivre dans la couche de surface d'un sol (0-10 cm) fertilisé au lisier de porc pendant 25 ans.*

	Moyenne des sols du Québec	Sols témoins sans lisier	Sols avec lisiers 108 t/ha	Centile 99
	----- (mg/kg) -----			
Échangeable	0,05	0,07	0,22	0,15
Organique	3,60	1,73	8,01	10,20
Oxyde	4,80	3,17	11,86	16,50
Labile (Mehlich-3)	2,20	1,15	6,23	9,00
Total	19,20	9,44	21,00	47,90
Échangeable / total	0,26 %	0,74 %	1,05 %	---
Labile / total	11,45 %	12,18 %	29,70 %	---

Tableau 4. Profil de fractionnement du zinc dans la couche de surface d'un sol (0-10 cm) fertilisé au lisier de porc pendant 25 ans.*

	Moyenne des sols du Québec	Sols témoins sans lisier	Sols avec lisiers 108 t/ha	Centile 99
	----- (mg/kg) -----			
Échangeable	0,07	0,09	0,90	0,18
Organique	3,70	2,00	20,64	7,60
Oxyde	5,00	2,37	38,30	12,40
Labile (Mehlich-3)	1,80	0,83	16,40	14,00
Total	62,80	42,20	84,10	115,40
Échangeable / total	0,11 %	0,21 %	1,07 %	---
Labile / total	2,87 %	1,97 %	19,50 %	---

N.B. Nous ne présentons ici que les résultats des tests chimiques des étapes 1 et 2. La partie sur les tests écotoxicologiques est présentée dans le rapport de Deschênes *et al.* (2006).

* Ces tableaux sont tirés de l'article publié dans Agrosol juin 2005 vol.16 (1), *Études sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs.*

Prévenir la contamination des sols par les ÉTM

Réduire les apports d'ÉTM dans l'alimentation

L'alimentation des animaux est en grande partie responsable des teneurs élevées en cuivre et en zinc dans les déjections porcines. Le cuivre aide à régulariser la flore intestinale des porcs et élimine les risques de gastroentérite. Le zinc quant à lui est utilisé surtout dans les maternités. Le taux d'excrétion de ces ÉTM est très élevé et ces métaux se retrouvent ensuite dans les déjections animales, puis dans les champs. L'étude sur la caractérisation des lisiers de porc effectuée en Chaudière-Appalaches par *Seydoux et al. (2005)* a confirmé les fortes teneurs en cuivre et en zinc des lisiers, explicables par un apport alimentaire élevé et un très faible taux de rétention par l'animal. Le milieu agricole doit être sensibilisé au risque de contamination des sols associé à l'ajout d'ÉTM aux rations animales. D'autres productions ont également recours à cette pratique, comme la production avicole. Des solutions alternatives devraient être préconisées. La mise au point de produits probiotiques est actuellement à l'étude et semble prometteuse. Une vérification des dosages dans les aliments du bétail aiderait également à détecter les apports excessifs.

Analyser les matières fertilisantes pour les ÉTM

L'utilisation des matières résiduelles fertilisantes (MRF) en agriculture est réglementée en fonction, entre autres, de leur teneur en ÉTM. Les MRF sont classifiées selon 2 catégories C1 et C2. Le critère C1 est attribué à des MRF qui ne provoqueront pas d'accumulation dans les sols pour un usage normal pendant une période aussi longue que 100 ans. Le critère C2 indique qu'un produit peut être valorisé, mais en assurant un contrôle des charges appliquées. Si la valeur dépasse le critère C2, les MRF ne peuvent être appliquées sur des terres agricoles.

Il existe également des critères pour les ÉTM dans les engrais minéraux, sous la surveillance de l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Ces critères constituent une ligne de défense importante face à la contamination des sols par les MRF ou les engrais minéraux. Les engrais de ferme ne sont toutefois pas soumis à ces critères. Certains de ces engrais dépassent le critère C1, et même dans certains cas le critère C2 énoncé pour la valorisation des MRF. La teneur en ÉTM des engrais de ferme n'est que très rarement déterminée. Une analyse plus régulière aiderait à mesurer le niveau d'enrichissement et serait utile pour se fixer des objectifs de réduction à la source des apports d'ÉTM, comme le secteur porcin l'a fait pour le phosphore avec les phytases.

Pour en connaître davantage sur les critères de valorisation agricole des MRF, consulter le *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes*

Analyser les sols pour les ÉTM

L'analyse des sols permet de faire le point sur l'accumulation des ÉTM. La procédure décrite et les critères établis fournissent des moyens pour prévenir la contamination des sols. Les charges annuelles d'ÉTM appliquées étant généralement faibles, les teneurs des sols ne changent que lentement. Une analyse effectuée sur une période de 10 ans est suffisante au suivi des ÉTM des sols. Il est important de disposer d'une bonne caractérisation initiale dans les différents champs de la ferme avec la méthode Mehlich-3, afin d'y référer pour mesurer les changements qui peuvent survenir dans le temps. Cette analyse peut aussi être utile pour

détecter les risques de carences en éléments mineurs pour les végétaux. On peut donc en même temps suivre les ÉTM aux plans agronomique et environnemental.

Compte tenu de la valeur des terres agricoles, il peut être important pour les producteurs d'obtenir une analyse des teneurs en ÉTM lors d'achat de nouvelles terres, comme cela se fait pour les sites industriels et commerciaux. Il est à souhaiter que la procédure d'analyse mise au point facilite et accroisse le nombre de suivis relatifs aux ÉTM accumulés dans les sols, dans le contexte d'une agriculture durable et respectueuse des ressources, au bénéfice des générations futures.

Réalisation et financement



Avec le partenariat du :
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
- Centre d'expertise en analyse environnementale

Ce document a été produit grâce au soutien de :



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Pour en savoir davantage

Marcel Giroux, agronome, M. Sc.

418 644-6838

marcel.giroux@irda.qc.ca



www.irda.qc.ca