

CARACTÉRISATION DES BOUES D'ÉPURATION MUNICIPALES

PARTIE II :

ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

Vincent Perron, B. Sc., étudiant à la maîtrise en science de l'environnement à l'Université du Québec à Montréal

Marc Hébert, agr., M. Sc., Direction des politiques en milieu terrestre, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

En septembre 2007, *VECTEUR environnement* a publié un article présentant les propriétés agronomiques des boues issues des deux principaux types de stations d'épuration des eaux usées municipales retrouvées au Québec, c'est-à-dire les stations mécanisées et celles de type étangs (Perron et Hébert, 2007). Dans le but de compléter la caractérisation physicochimique de ces boues, le présent article abordera la question des éléments traces métalliques (ÉTM).

Introduction

Les ÉTM sont des éléments métalliques ou des métalloïdes dont la concentration n'excède pas 1000 mg/kg dans un échantillon ou un milieu donné (Basta *et al.*, 2005). Certains ÉTM sont des oligo-éléments essentiels ou bénéfiques aux êtres vivants, tels le cuivre et le zinc. D'autres, comme le cadmium, le mercure et le plomb, sont des contaminants stricts, puisqu'ils n'ont pas d'utilité connue pour les êtres vivants (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

Toutefois, qu'il s'agisse d'ÉTM utiles ou non aux êtres vivants, la présence excessive de certains d'entre eux dans les sols agricoles peut engendrer des phénomènes de toxicité chez les plantes ainsi que chez les animaux et les humains qui en consomment (MENV, 2004). C'est pourquoi le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) a établi les teneurs limites en contaminants chimiques que peuvent contenir les boues municipales destinées à l'épandage agricole. À cet effet, selon leur teneur en 11 ÉTM, les boues municipales, appelées également biosolides municipaux, peuvent être classées en deux catégories, soit C1 ou C2 (MENV, 2004). Comme elles contiennent peu d'ÉTM, les boues municipales classées C1 n'ont pas de restriction d'épandage. Par contre, celles classées C2, étant légèrement plus contaminées, ne peuvent être épandues à plus de 22 tonnes (base sèche)/ha/5 ans sur une même parcelle (MENV, 2004). Ceci a pour but de limiter l'accumulation à long terme

d'ÉTM dans les sols. Les boues municipales ne se classant pas minimalement C2 sont dites « hors catégorie » et ne peuvent être épandues sur les terres agricoles (MENV, 2004). Les biosolides municipaux destinés à la valorisation agricole font l'objet de nombreux contrôles afin de s'assurer qu'ils respectent ces critères (MDDEP, 2006).

Malgré ce fait, il subsiste toujours une certaine part d'inquiétude chez de nombreux acteurs agricoles et autres intervenants face à la valorisation des biosolides municipaux en agriculture, notamment en raison de la présence d'ÉTM. Cet article, deuxième d'une série de deux, vise donc à comparer les teneurs en ÉTM des boues issues des deux principaux types de stations d'épuration du Québec, à présenter l'évolution de la concentration des ÉTM présents dans les boues de stations mécanisées depuis 1988 et à comparer les teneurs en ÉTM des biosolides municipaux avec celles des boues de fosses septiques et des principaux engrais de ferme produits au Québec.

Méthodologie

Les données brutes utilisées pour comparer les teneurs actuelles en ÉTM des boues de stations mécanisées et de celles de type étangs proviennent de la base de données *Suivi des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux* (SOMAE) gérée par la direction des infrastructures du ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR). Cette base de données en ligne contient les résultats d'analyse de boues

fournis volontairement par les exploitants d'une centaine de stations de type étangs et d'une quarantaine de stations mécanisées. Toutefois, seules les stations d'épuration ayant fourni des résultats récents (entre les années 2000 et 2006) ont été retenues dans cette étude, c'est-à-dire 35 stations mécanisées et 68 stations de type étangs. La comparaison des teneurs en ÉTM des boues issues de ces deux types de stations a été effectuée à l'aide des résultats de l'analyse de boues la plus récente de chacune des stations sélectionnées. Pour chaque station de type étangs, une teneur moyenne a été calculée pour tous les ÉTM à partir des données de boues les plus récentes de chacun des étangs constitutifs (étangs n° 1-2-3-4), et ce, en raison de la similarité entre les teneurs en ÉTM des boues issues de ces derniers. Les ÉTM retenus sont ceux suivis par le MDDEP : il s'agit de l'arsenic (As), du cadmium (Cd), du cobalt (Co), du chrome (Cr), du cuivre (Cu), du mercure (Hg), du molybdène (Mo), du nickel (Ni), du plomb (Pb), du sélénium (Se) et du zinc (Zn) (MENV, 2004). Bien qu'ils ne soient pas des ÉTM, l'aluminium (Al) et le fer (Fe) ont également été retenus, car leur présence dans les boues municipales affecte la disponibilité du phosphore pour les plantes.

Afin d'étudier l'évolution des teneurs en ÉTM des biosolides municipaux depuis 1988, les résultats d'analyse de boues de 14 stations mécanisées, présentés dans St-Yves et Beaulieu (1988), ont été comparés aux résultats de l'analyse de boues la plus récente (2002-2006) de ces mêmes 14 stations retrouvées dans SOMAE.

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé pour comparer les teneurs actuelles en ÉTM des boues issues des stations mécanisées et de type étangs. La comparaison des teneurs en ÉTM des boues de 1988 et de celles de 2002-2006 a, pour sa part, été effectuée à l'aide du test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Le seuil de signification a été établi à $\alpha = 0,05$. Ces tests

statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel JMP 5.1 de SAS Institute inc.

Mentionnons que 12 données d'analyse sur les 2 108 extraites de SOMAE ont été exclues de l'étude comparative des teneurs actuelles en ÉTM des boues issues des stations mécanisées et de celles de type étangs, soit moins de 1 % de l'ensemble des données. Huit données sur 280 (3 %) ont également été exclues de l'étude sur l'évolution des teneurs en ÉTM des boues de stations mécanisées depuis 1988. De ces 20 données éliminées, cinq ont été identifiées *a priori* comme étant des erreurs de laboratoire par un analyste du MAMR. Les 15 autres étaient anormalement élevées ou basses par rapport à la moyenne des données des stations sélectionnées (différence de plus de deux ordres de grandeur). Ces données aberrantes pourraient être attribuables à des erreurs de laboratoire, de saisie de données ou d'unité de mesure.

Enfin, les teneurs moyennes en ÉTM des engrais de ferme et des boues de fosses septiques ont été calculées à l'aide de résultats d'analyse récents (2000-2006) provenant de diverses sources québécoises, et ce, dans le but de les comparer à celles des boues municipales. Les contenus en arsenic, en sélénium et en plomb du fumier de bovins et le contenu en molybdène du fumier de volailles ont été établis en partie à partir de données datant de 1994, en raison du manque de données récentes. Aucun test statistique n'a été effectué.

Résultats et discussion

Représentativité des échantillons

Comme précisé dans Perron et Hébert (2007), l'échantillon de 35 stations mécanisées et celui de 68 stations de type étangs sont représentatifs de la situation québécoise, à l'exception des très grandes villes, comme Montréal, Longueuil et Québec, qui ne figurent pas dans SOMAE. L'échantillon de stations mécanisées comprend néanmoins celles des villes de Laval et de Sherbrooke.

L'échantillon de 14 stations mécanisées constitué pour étudier l'évolution des teneurs en ÉTM des boues depuis 1988 est également représentatif, puisqu'il couvre environ 17 % de l'ensemble des stations mécanisées retrouvées au Québec.

Teneurs actuelles en ÉTM des boues municipales

Le tableau 1 présente les teneurs en oligo-éléments et en contaminants stricts des boues municipales. Les résultats révèlent que les boues de stations mécanisées possèdent en moyenne des teneurs moindres en ces ÉTM que les boues d'étangs. La plupart des différences sont d'ailleurs hautement significatives sur le plan statistique.

Les teneurs plus élevées en ÉTM des boues d'étangs sont à première vue paradoxales, puisque les stations de type étangs sont généralement localisées dans les petites municipalités, tandis que les stations mécanisées se retrouvent dans de plus grandes villes davantage industrialisées. Ce résultat peut s'expliquer de deux façons. Tout d'abord, en séjournant beaucoup plus longtemps au fond des bassins que les boues de stations mécanisées, les boues d'étangs subissent d'importantes pertes de matière organique par le processus de décomposition (Perron et Hébert, 2007), ce qui a pour effet de concentrer les ÉTM. De plus, de nombreuses stations de type étangs n'ont toujours pas été vidangées depuis leur mise en activité. Ainsi, une fraction des boues qui s'accumulent dans ces stations est le produit de l'épuration des eaux usées datant du début des années 1990, c'est-à-dire avant la mise en place de certains programmes gouvernementaux de réduction des contaminants dans l'environnement.

Les résultats démontrent également que les boues municipales présentent des teneurs variables en ÉTM d'une station à l'autre, comme en témoignent les coefficients de variation qui sont supérieurs à 50 % (tableau 1). Cette variabilité importante est

Tableau 1

Comparaison des teneurs en ÉTM, en Al et en Fe des boues issues des deux principaux types de stations d'épuration des eaux usées municipales retrouvées au Québec pour la période 2000-2006

ÉTM	TYPE DE STATION				Valeur <i>p</i> ^ε
	Mécanisées (n = 35)		Étangs (n = 68)		
	Moyenne [†]	c.v. (%) [‡]	Moyenne [†]	c.v. (%) [‡]	
Oligo-éléments pour les plantes ou les animaux					
As	3,8	75	7,2	145	0,01
Co	6,5	69	10,5	82	0,02
Cr	33	51	55	70	< 0,001
Cu	402	83	680	87	< 0,001
Mo	5,4	62	9,6	101	< 0,01
Ni	25	91	36	109	0,01
Se	1,8	78	2,5	74	0,03
Zn	398	74	689	58	< 0,001
Contaminants stricts					
Cd	1,3	55	3,3	91	< 0,001
Hg	0,7	106	1,2	107	0,07
Pb	28	69	61	50	< 0,001
Coagulants					
Al	25 700	73	37 600	89	0,04
Fe	13 600	72	21 500	72	< 0,001
Al + 0,5 Fe ^ε	34 100	53	46 800	66	0,045

[†] mg/kg (base sèche)

[‡] c.v. (%) = écart-type/moyenne * 100

^ε Valeur *p* selon le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($\alpha = 0,05$). Les valeurs *p* < 0,05 indiquent des différences statistiquement significatives.

^ε Calculé à partir des données brutes d'aluminium et de fer.

due au fait que le niveau de contamination de l'affluent de chaque station est fort variable tout comme leur degré d'efficacité à épurer les eaux usées (MAMR, 2006).

En termes de classification, 29 % des boues de stations mécanisées analysées dans le cadre de cette étude sont de catégorie C1, 69 % sont de catégorie C2 et seulement 3 % sont hors catégorie. Le cuivre est responsable de l'unique dépassement des critères C2. En ce qui concerne les boues de stations de type étangs, 11 % sont de catégorie C1, 64 % sont de catégorie C2 et 25 % sont hors catégorie. Les principaux éléments responsables des dépassements des critères C2 pour ce type de boues sont le cadmium, le cuivre et le molybdène. Ces trois ÉTM ont d'ailleurs tendance à s'accumuler davantage dans les boues

des premiers étangs. Il est important de mentionner que les boues municipales classées hors catégorie ne peuvent être épandues directement sur les terres agricoles. Toutefois, ces boues peuvent être compostées et le compost produit peut être valorisé s'il respecte les critères C2 (MDDEP, 2004).

Teneurs actuelles en aluminium et en fer

Les stations d'épuration, qu'elles soient mécanisées ou de type étangs, utilisent régulièrement des produits chimiques pour améliorer l'enlèvement de la matière organique et du phosphore. Environ la moitié des quelque 700 stations d'épuration du Québec emploie de tels produits, principalement sous forme de sels d'aluminium ou de fer, de chlorure ferrique ou de sulfate

ferreux (MENV, 2001). L'aluminium et le fer présents dans ces produits ont tendance à s'accumuler dans les biosolides municipaux (MENV, 2001), ce qui expliquerait leurs teneurs élevées en ces deux éléments (tableau 1). L'acheminement vers certaines stations d'épuration des résidus de traitement de l'eau potable riches en aluminium peut également expliquer ce résultat. Les boues d'étangs contiennent toutefois plus d'aluminium et de fer que les boues de stations mécanisées, possiblement en raison du phénomène de concentration lié à l'oxydation de la matière organique. Par ailleurs, les teneurs en aluminium et en fer ont tendance à être plus élevées dans les boues des derniers étangs en raison de l'ajout fréquent de coagulants en amont de ceux-ci (MENV, 2001).

Comme l'utilisation de coagulants à base d'aluminium et de fer vise principalement à précipiter le phosphore des eaux usées dans les boues, il faut s'attendre à ce que le phosphore contenu dans ces dernières soit moins soluble et donc moins disponible pour les plantes à la suite de leur épandage. Selon l'équation $\% P \text{ disponible} = 70 - (Al_{total} + 0,5 Fe_{total} - 20\ 000)/2000$ (Webber, 2003; MENV, 2004), les pourcentages moyens de disponibilité du phosphore à court terme des boues de stations mécanisées et de type étangs seraient respectivement de 63 % et de 57 %. La disponibilité du phosphore des boues issues de certains étangs de déphosphatation pourrait toutefois être très faible, diminuant ainsi leur valeur fertilisante. De telles boues ne devraient pas être épandues sur des sols sableux déjà pauvres en phosphore.

Évolution des teneurs en ÉTM des boues de stations mécanisées

Le tableau 2 présente les teneurs moyennes en ÉTM des boues produites en 1988 et au cours de la période 2002-2006 par 14 stations d'épuration mécanisées. Les résultats démontrent que les teneurs en contaminants stricts des boues de stations mécanisées ont diminué de plus de

Tableau 2

Comparaison des teneurs en ÉTM des boues de 14 stations mécanisées générées en 1988 et au cours des années 2002-2006

ÉTM	ANNÉES				Δ (%) €	Valeur p [€]
	1988		2002-2006			
	Moyenne [†]	c.v. (%) [‡]	moyenne [†]	c.v. (%) [‡]		
Oligo-éléments pour les plantes ou les animaux						
As	2,5	63	4,3	82	+ 72	0,01
Co	6,3	60	7,9	52	+ 25	0,27
Cr	44	117	33	44	- 25	0,77
Cu	723	53	521	89	- 28	0,09
Mo	11	31	6,9	59	- 36	0,08
Ni	25	68	34	92	+ 36	0,39
Se	0,7	154	2	89	+ 186	< 0,01
Zn	573	77	392	84	- 32	0,12
Contaminants stricts						
Cd	3,5	83	1,2	44	- 66	< 0,01
Hg	1,9	164	0,9	57	- 53	0,11
Pb	123	81	29	55	- 76	< 0,001

[†] mg/kg (base sèche). Les valeurs moyennes présentées dans les tableaux 1 et 3 sont plus représentatives de la situation actuelle (n plus élevés).

[‡] c.v. (%) = écart-type/moyenne * 100

[€] Pourcentage de variation des teneurs moyennes en ÉTM des boues de stations mécanisées entre 1988 et 2002-2006 [(valeur 2002-2006 - valeur 1988)/valeur 1988].

[€] Valeur p selon le test de Wilcoxon pour échantillons appariés ($\alpha = 0,05$). Les valeurs p < 0,05 indiquent des différences statistiquement significatives.

50 % depuis 1988. La variation du mercure est toutefois non significative sur le plan statistique en raison du coefficient de variation élevé pour l'année 1988. Ces diminutions peuvent être attribuables à la mise en œuvre, depuis 1988, de divers programmes et règlements visant la réduction des rejets de contaminants chimiques dans l'environnement et les eaux usées.

Pour les oligo-éléments, la situation est fort variable. Il est tout de même intéressant de constater une tendance à la baisse des teneurs des boues de stations mécanisées en cuivre et en molybdène (tableau 2), les deux principaux ÉTM responsables des dépassements occasionnels des critères C2. Dans le cas du cuivre, la baisse pourrait s'expliquer par le fait que la corrosivité de l'eau potable est mieux contrôlée par les municipalités depuis 1988 (ce qui réduit la corrosion des tuyaux de cuivre) et que les tuyaux de cuivre de nombreuses résidences ont été remplacés par d'autres matériaux.

Pour le molybdène, une partie de la baisse pourrait être attribuable à l'amélioration de la technique de dosage de cet ÉTM en laboratoire.

Contrairement au cuivre et au molybdène, les teneurs en arsenic et en sélénium des boues de stations mécanisées sont significativement à la hausse (tableau 2). Pour l'arsenic, la source de l'augmentation est inconnue, mais l'ensemble des boues analysées respecte le critère C1 pour cet élément (13 mg As/kg). Quant au sélénium, l'augmentation est probablement attribuable à l'utilisation accrue du disulfure de sélénium dans les cosmétiques, shampooings et savons. Les autres oligo-éléments ne présentent pas de tendance statistique définie ($p > 0,10$).

De façon globale, les dépassements des critères C2 sont quatre fois moins élevés actuellement comparativement à 1988. La qualité des boues s'est donc grandement

améliorée depuis une quinzaine d'années au Québec. En outre, l'apport d'ÉTM de sources industrielles ou commerciales serait relativement faible de nos jours. En effet, les teneurs moyennes en ÉTM des boues de stations mécanisées (villes industrialisées) sont très semblables à celles des boues de fosses septiques provenant des résidences isolées (tableau 3, p. 46).

Comparaison des boues municipales avec les engrais de ferme

Les résultats présentés au tableau 3 indiquent qu'en général, les teneurs moyennes en oligo-éléments des boues de stations mécanisées sont du même ordre de grandeur que celles des principaux engrais de ferme produits au Québec. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Peckenham (2005, cité par MDDEP, 2006). Les boues de stations mécanisées présentent toutefois les plus fortes teneurs en chrome et en nickel. Le fumier de volailles possède les plus fortes concentrations en arsenic et le lisier de porcs contient davantage de cuivre et de zinc, en raison de l'ajout de suppléments minéraux dans les rations animales. À ce sujet, plusieurs lisiers de porcs excèdent les critères C2 pour le cuivre et le zinc, bien que ceux-ci ne s'appliquent pas aux engrais de ferme.

Quant aux contaminants stricts, les boues de stations mécanisées en contiennent généralement davantage que les engrais de ferme. Les teneurs moyennes en cadmium, mercure et plomb des boues de stations mécanisées respectent toutefois les critères C1. Les teneurs moyennes en cadmium et en plomb de ces boues sont également inférieures à celles des sols argileux naturels du Québec (tableau 3, p. 46).

Conclusion

Cette étude démontre que la qualité des boues des stations mécanisées du Québec s'est grandement améliorée au cours des 15 dernières années, avec une réduction importante de leurs teneurs en

Tableau 3

Teneurs moyennes en ÉTM (mg/kg sur base sèche) de diverses matières fertilisantes épanchées sur les terres agricoles du Québec au cours de la période 2000-2006

Matières fertilisantes	Oligo-éléments (plantes et/ou animaux)								Contaminants stricts		
	As	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Se	Zn	Cd	Hg	Pb
Lisier de porcs en croissance ¹	1	2,9	8,6	839	4,1	11	1,9	1 475	0,5	0,02	2,5
Fumier de bovins ²	0,6	1,9	6,9	36	2,2	5,6	0,4	156	0,2	0,02	1,4
Fumier de volailles ³	9	4	4,7	192	5	12	1,3	399	0,4	0,1	2
Boues de stat. mécanisées ⁴	3,8	6,5	33	402	5,4	25	1,8	398	1,3	0,7	28
Boues d'étangs ⁵	7,2	10,5	55	680	9,6	36	2,5	689	3,3	1,2	61
Boues de fosses septiques ⁶	4,3	8,3	21	246	5,7	18	1,3	418	1,7	0,7	34
Critères C1 ⁷	13	34	210	400	5	62	2	700	3	0,8	150
Critères C2 ⁸	40	150	1 060	1 000	20	180	14	1 850	10	5	300
Sols-argiles du Québec ⁹	---	23	82	33	---	42	---	96	1,4	0,06	42
c.v. (%) ¹	13	79	117	35	61	87	80	46	9	112	63
c.v. (%) ²	---	78	87	59	54	88	---	45	13	37	---
c.v. (%) ³	54	35	78	49	---	6	---	20	39	26	47
c.v. (%) ⁴	75	69	51	83	62	91	78	74	55	106	69
c.v. (%) ⁵	145	82	70	87	101	109	74	58	91	107	50
c.v. (%) ⁶	93	98	67	71	79	67	122	57	78	136	65

^{1,2,3,4,5,6} Teneurs moyennes exprimées en mg/kg (base sèche) ainsi que les coefficients de variation (c.v. % = écart-type/moyenne * 100) qui s'y rattachent. Les teneurs moyennes qui ne sont pas associées à des coefficients de variation ont été calculées à partir de deux données.

^{7,8} Tiré de MENV (2004). La teneur limite du critère C2 pour le cuivre est portée à 1 500 mg Cu/kg pour les résidus > 2,5 % P2O5 (b.s.) et pour les biosolides municipaux provenant d'étangs.

⁹ Tiré de Giroux *et al.* (1992). Les sols argileux du Québec comprennent entre autres les séries de sols Kamouraska, St-Urbain et Hébertville.

cadmium (66 %), en mercure (53 %) et en plomb (76 %). De plus, contrairement à la croyance populaire, les boues de stations mécanisées (des plus grandes villes) sont généralement moins contaminées en ÉTM que les boues d'étangs (des plus petites villes). Ceci s'explique par le fait que les étangs oxydent davantage la matière organique, ce qui concentre les ÉTM dans la matière sèche des boues. D'autre part, les teneurs similaires en ÉTM des boues de fosses septiques et de celles issues des stations mécanisées indiquent que les apports industriels d'ÉTM dans les eaux usées municipales sont relativement faibles actuellement (sauf exception).

Par ailleurs, certains ÉTM présents dans les boues municipales sont considérés comme étant des oligo-éléments pour les plantes ou les animaux, tels le cuivre et le zinc. Les boues de stations mécanisées possèdent d'ailleurs des teneurs en ces ÉTM qui sont similaires à celles des principaux engrais de ferme produits au Québec. Les teneurs moyennes en contaminants stricts (cadmium, mercure, plomb) de ces boues sont par contre plus élevées. Elles respectent néanmoins les critères C1 du MDDEP et sont inférieures aux teneurs naturelles des sols agricoles du Québec (cadmium et plomb). La valorisation de la majorité des boues de stations mécanisées s'avère donc faisable et sécuritaire en ce qui concerne les ÉTM.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les nombreuses personnes qui ont commenté l'article, soit messieurs Alain Roseberry et Michel Laurin, de la Direction des infrastructures du MAMR, ainsi que Bernard Lavallée du MDDEP et Marcel Giroux de l'IRDA. Merci également à monsieur Richard Beaulieu du MDDEP et aux nombreux intervenants externes pour leur collaboration.

Bibliographie

Basta, N. T., J. A. Ryan et R. L. Chaney. (2005). « Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability ». *Journal of Environmental Quality*, 34 (1), p. 49-63.

Giroux, M., M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux. (1992). « Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec ». *Agrosol*, 5 (2), p. 46-55.

MAMR. (2006). *Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2005*. Ministère des Affaires municipales et des Régions, Direction des infrastructures, Québec, 26 p.

MDDEP. (2006). *Questions et réponses sur des éléments soulevés par le documentaire Tabou(e)! sur la valorisation des boues municipales*. [En ligne]. [www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/documentaire/tabou\(e\).asp](http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/documentaire/tabou(e).asp).

MENV. (2001). *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique*. Ministère de l'Environnement, Québec.

MENV. (2004). *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Critères de référence et normes réglementaires*. Ministère de l'Environnement, Québec, 127 p.

Perron, V. et M. Hébert. (2007). « Caractérisation des boues d'épuration municipales – Partie I : Paramètres agronomiques ». *VECTEUR environnement*, 40 (4), p. 48-52.

St-Yves, A. et R. Beaulieu. (1988). *Caractérisation des boues de 34 stations d'épuration des eaux usées municipales (janvier, février 1988)*. Ministère de l'Environnement, Québec, 11 p.

Tremel-Schaub, A. et I. Feix. (2005). *Contamination des sols. Transferts des sols vers les plantes*. Paris : EDP Sciences/ADEME, 413 p.

Webber, M. D. (2003). « Valorisation agricole des biosolides municipaux : Revue de littérature et recommandation concernant l'impact des sels d'aluminium et de fer sur la disponibilité du phosphore du sol ». *Agrosol*, 14 (1), p. 22-27. ◀