

# Valorisation agricole de biosolides municipaux à Ville de Saguenay : impact à moyen terme sur le contenu en métaux des sols récepteurs

\*V. PERRON<sup>1</sup> et M. HÉBERT<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ - V. Perron et M. Hébert, Valorisation agricole de biosolides municipaux à Ville de Saguenay : impact à moyen terme sur le contenu en métaux des sols récepteurs. *Agrosolutions* 19 (1) : 15-24.** Sur le territoire agricole de Ville de Saguenay, une étude a été réalisée afin de préciser le degré d'enrichissement en métaux de l'horizon 0-20 cm de 26 parcelles ayant reçu en moyenne 7 épandages de boues municipales entre 1991 et 2006. Durant cette période, une charge moyenne de 20,4 tonnes de boues municipales/ha (b.s.) a été appliquée sur ces parcelles. Le degré d'enrichissement en métaux a été évalué en comparant la teneur de ceux-ci dans les horizons 0-20 cm et 40-60 cm (témoin) et en calculant les bilans de charge. Les épandages répétés des boues de Ville de Saguenay sur les parcelles échantillonnées ont entraîné une accumulation en mercure (total) ainsi qu'en cuivre, en plomb et en zinc (Mehlich-3) dans la couche de labour. Par contre, les teneurs maximales mesurées sont nettement inférieures aux critères de référence utilisés au Québec pour juger de la qualité des sols agricoles. De plus, les boues de Ville de Saguenay présentent des teneurs en mercure et en plomb à la baisse depuis 1990, ce qui devrait atténuer l'enrichissement de la couche de labour en ces deux ÉTM dans le futur. Aucune accumulation significative en aluminium et en cadmium (Mehlich-3) n'a été répertoriée. Les applications répétées des boues de Ville de Saguenay ont également engendré une augmentation importante de l'indice de saturation en phosphore des parcelles réceptrices, malgré le fait que la majorité des sols de celles-ci étaient faiblement saturés en cet élément (< 4%). Ceci suggère que les boues de Ville de Saguenay ne sont pas très enrichies en aluminium.

**Mots clés :** Biosolides municipaux, valorisation agricole, enrichissement, métaux Mehlich-3 et métaux totaux.

**ABSTRACT - V. Perron and M. Hébert, Land application of biosolids in Saguenay: impact on the metal content of soils on the mid-term. *Agrosolutions* 19 (1): 15-24.** In the Saguenay region (Québec, Canada), a field study was done to evaluate metal accumulations of the soil surface layer (0-20cm) with 26 fields that received a mean of 7 spreadings of municipal biosolids between 1991 and 2006. This corresponds to a cumulative mean loading of 20,4 t/ha (d.w.b.). Metal accumulations were evaluated by comparing the surface layer to the 40-60 cm layer, as a control, and by using loading calculations. Cumulative spreadings of biosolids on soils caused a significant increase with mercury (total) and with copper, lead and zinc (Mehlich 3) in the upper layer. However, final soil contents were well below agricultural soil reference criteria used in the province of Québec. Because lead and mercury contents of Saguenay biosolids are decreasing since 1990, further accumulations of these metals in receiving soils are likely to be lower in the future. No significant accumulation with aluminium and cadmium (Mehlich-3) was shown. Repeated land application of biosolids also increased the phosphorus saturation index of soils, still most final values are low (< 4%). Findings suggest that biosolids produced by the City of Saguenay are not highly enriched by aluminium.

**Key words:** Biosolids, land application, metal accumulation, Mehlich-3 and total metals.

1. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Pares (MDDEP), Édifice Marie-Guyart, 9<sup>e</sup> étage, 675, boul. René-Lévesque Est, Québec (Québec), G1R 5V7, Canada.

\*Auteur pour la correspondance : téléphone : 514 522-9488, courriel : vincent.perron@videotron.ca .

## Introduction

Au Québec, plus d'un million de tonnes de matières résiduelles fertilisantes (MRF) sont appliquées annuellement sur les sols agricoles. De ce nombre, environ 8% sont des boues d'épuration des eaux usées municipales, également appelées biosolides municipaux (Fleury *et al.*, 2006). Leur contenu en azote et en phosphore est comparable à celui des principaux engrais de ferme, ce qui justifie leur recyclage en agriculture (Perron et Hébert, 2007a). Le recyclage de ces boues n'est toutefois pas très répandu dans la province, puisqu'il implique seulement 0,2% des sols agricoles (Fleury *et al.*, 2006).

La valorisation des boues municipales en agriculture suscite une certaine part d'inquiétude chez de nombreux intervenants, notamment en raison de la présence d'éléments traces métalliques (ÉTM) dans celles-ci. La mise en oeuvre de plusieurs programmes et règlements visant la réduction des rejets de contaminants chimiques dans l'environnement et les eaux usées a toutefois réduit le contenu en ÉTM des boues municipales au cours des 15 dernières années, particulièrement de celles produites dans les grandes villes. Actuellement, les biosolides municipaux des grandes villes ne contiennent en moyenne pas plus d'ÉTM que les boues de fosses septiques des résidences isolées, lesquelles ne reçoivent aucun apport d'ÉTM de source industrielle. Ceci suggère que les apports d'ÉTM d'origine industrielle sont généralement marginaux de nos jours (Perron et Hébert, 2007b).

Certains contaminants stricts, comme le cadmium et le plomb, présentent des teneurs similaires dans les boues municipales et les sols argileux du Québec. Par contre, d'autres ÉTM, tels le cuivre, le mercure et le zinc, sont nettement plus concentrés dans les boues municipales (Perron et Hébert, 2007b). Les applications répétées de biosolides municipaux entraînent donc forcément l'accumulation de ces ÉTM dans les sols récepteurs. L'accumulation d'oligo-éléments peut être avantageuse d'un point de vue agronomique, notamment en augmentant la productivité végétale et la valeur nutritive des récoltes (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Par contre, à l'instar

des contaminants stricts, l'accumulation excessive de certains oligo-éléments peut engendrer des phénomènes de toxicité chez les plantes ou chez les animaux et les humains qui en consomment (Tremel-Schaub et Feix, 2005). À titre d'exemple, des cas de phytotoxicité au cuivre et au zinc ont été rapportés dans des sols agricoles de Bretagne dont les teneurs en ces deux éléments (extraits à l'EDTA) étaient supérieures à 120 mg/kg (Giroux *et al.*, 2005). Il importe donc de s'assurer que les applications répétées de boues et de lisiers n'entraînent pas d'accumulation à long terme d'ÉTM dans les sols agricoles dépassant les critères toxicologiques.

De nombreuses études françaises en parcelles expérimentales ont démontré que les épandages répétés de boues municipales aux doses réglementaires n'entraînent pas d'impact significatif sur le contenu en métaux totaux et disponibles des parcelles réceptrices à court et à moyen terme (2 à 10 ans) (Baize *et al.*, 2006). Or, certains modèles théoriques, notamment celui élaboré par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) en 2001, démontrent qu'à long terme (100 ans), les épandages répétés de biosolides municipaux sur les mêmes parcelles pourraient entraîner des accumulations non négligeables d'ÉTM totaux (Beausoleil et Fouchécourt, 2001). Ce modèle de l'INSPQ précise que le niveau d'accumulation serait principalement lié aux teneurs en ÉTM des boues épandues, mais également à leur teneur en phosphore. À ce sujet, les doses d'épandages de boues municipales, étant généralement limitées au Québec par les recommandations agronomiques en phosphore des plans agroenvironnementaux de fertilisation (PAEF) exigés en vertu du Règlement sur les exploitations agricoles (REA), limitent indirectement les charges de métaux appliquées sur les parcelles agricoles réceptrices.

Les études en parcelles expérimentales et de modélisation ont ainsi permis de limiter certaines zones d'incertitude relativement à l'impact des applications répétées de biosolides municipaux sur le contenu en ÉTM des sols récepteurs. Cependant, les études en parcelles expérimentales n'intègrent qu'une fraction des conditions réelles d'exploitation agricole. De plus, elles sont souvent de courte durée pour des raisons

de financement. Quant aux modèles théoriques sur les risques à long terme, ils sont basés sur des postulats. Il importe donc d'obtenir des données à plus long terme sur l'enrichissement des sols dans un contexte réel d'exploitation agricole qui intègre à la fois l'évolution de la qualité des boues municipales épandues, des entreprises agricoles et des contraintes réglementaires québécoises.

Pour obtenir de telles données terrain, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) s'est associé à Ville de Saguenay. Il s'agit d'une des villes pionnières en matière de valorisation des boues municipales au Québec, puisqu'elle a débuté son programme de valorisation agricole en 1990. Actuellement, près des deux tiers des boues produites dans les stations d'épuration des eaux usées des arrondissements de Jonquière, Chicoutimi et La Baie sont valorisées par épandage. Plusieurs parcelles situées sur le territoire agricole de Ville de Saguenay ont donc reçu de nombreuses applications de boues municipales depuis 1990 et les données relatives à ces apports ont été conservées par la ville. La présente étude a été réalisée sur le territoire agricole de Ville de Saguenay pour ces différentes raisons.

L'objectif principal de cette étude est donc de déterminer l'impact à moyen terme des épandages répétés de boues municipales sur les teneurs en métaux des sols récepteurs dans des conditions réelles d'exploitation agricole.

## Matériel et méthode

### Description des parcelles échantillonnées

Cette étude a été effectuée en juin 2007 sur 26 parcelles agricoles réparties dans neuf fermes localisées dans les arrondissements de Jonquière, Chicoutimi et La Baie de Ville de Saguenay. Les neuf fermes retenues représentaient plus de 20% de l'ensemble de celles participant au programme de valorisation agricole de Ville de Saguenay depuis 1990. La majorité des parcelles sélectionnées était sous prairie ( $n = 18$ ), ce qui est représentatif du contexte agricole du Saguenay-Lac-St-Jean où les fermes en

production laitière sont prépondérantes. Les autres parcelles sélectionnées étaient destinées à la culture de céréales ( $n = 8$ ). Selon les cartes pédologiques de la région de Chicoutimi élaborées par Raymond (1971) et les résultats des analyses granulométriques effectuées dans le cadre de la présente étude, les sols des parcelles retenues étaient de séries Alma et Taillon. Ces deux séries de sols sont très semblables en terme de texture (loam). Elles sont habituellement associées géographiquement et dominant le paysage agricole de la région (Raymond, 1971). Elles ont également un contenu similaire en métaux (Tabi *et al.*, 1990; Giroux *et al.*, 1992).

Le pH moyen des 26 parcelles échantillonnées était de 6,0 (tableau 1), soit une valeur se situant dans l'intervalle optimal pour la disponibilité des éléments fertilisants et l'activité des microorganismes dans les sols agricoles (CRAAQ, 2003). En

ce qui a trait à la matière organique contenue dans l'horizon de surface des parcelles retenues, elle atteignait un taux moyen de 7,0%, c'est-à-dire un taux correspondant à une bonne productivité et à une bonne capacité de minéralisation (CRAAQ, 2003). Avec une valeur moyenne de 3,0%, l'indice de saturation en phosphore des sols échantillonnés (P-Mehlich-3/Al-Mehlich-3) se situe dans la moyenne des sols agricoles de la région du Saguenay-Lac-St-Jean (Beaudet *et al.*, 2005). Cet indice de saturation en phosphore est considéré comme étant faible selon Giroux et Tran (1996), ce qui implique des besoins élevés en phosphore pour maximiser la croissance des plantes (CRAAQ, 2003).

Le nombre d'épandages a constitué le principal critère de sélection des parcelles dans cette étude. Les 26 parcelles échantillonnées ont reçu en moyenne 7 épandages de biosolides municipaux, pour une charge

totale moyenne de 20,4 t/ha (base sèche). Un minimum de 4 et un maximum de 12 épandages ont été réalisés sur ces parcelles. La plus faible charge totale de boues épandues était de 11,7 t/ha, tandis que la plus forte était de 32,7 t/ha (tableau 1).

Aucune application de fumier de volailles ou de lisier de porcs n'a été réalisée sur les parcelles visées dans cette étude. Certaines parcelles ont toutefois reçu de légères doses de fumier de bovins ou d'engrais chimiques.

### Caractéristiques et représentativité des boues municipales

Les boues municipales appliquées sur les 26 parcelles provenaient des stations d'épuration des eaux usées des arrondissements de Jonquière, Chicoutimi et La Baie. Ces stations sont dites mécanisées et utilisent le procédé de traitement biologique par boues activées (MAMR, 2006). Elles

**Tableau 1. Caractéristiques des 26 parcelles échantillonnées.**

Ferme	Parcelle	Superficie (ha)	Classe texturale <sup>1</sup>	Série <sup>2</sup>	Début valo. <sup>3</sup>	Nombre d'épandages	Charge totale de boues (t/ha b.s.)	Charge totale de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha b.s.)	M. O. (%)	pH	P/Al (%)
A	1	2,9	L-Li	Taillon	1999	6	19,1	846	5,9	6,2	4,4
A	2	4,7	L-Li	Taillon	1999	6	19,6	867	6,7	6,2	2,6
A	3	9,3	L-Li	Taillon	1999	6	21,1	925	6,3	6,3	4,1
A	4	15,3	L-Li	Taillon	1999	7	22,9	1 001	6,1	6,1	4,9
A	5	4,8	L-Li	Taillon	1999	6	20,4	898	6,2	5,7	2,9
A	6	28,8	L-Li-A	Alma	1998	8	26,4	1 154	5,8	6,3	4,3
A	9	2,4	L-Li	Alma	1996	7	20,1	825	10	6,1	1,0
A	10	34,8	L-Li	Alma	1996	9	30,4	1 280	8,5	5,7	2,2
B	4	24	L-A	Taillon	1991	9	20,4	889	7,7	6,2	0,7
B	6	5,9	L-Li	Taillon	2000	5	11,3	473	6,1	6,5	0,7
C	13	9,4	L	Taillon	1997	4	12,1	509	9,4	6,1	1,3
D	21	9,9	L-Li	Taillon	1991	9	23,5	1 018	9,7	5,9	0,7
D	23	7,2	L	Taillon	1991	12	32,7	1 498	13	6,1	3,2
D	25	3,8	L	Taillon	1991	10	27,7	1 233	7,0	6,2	1,6
E	2	4,9	L-Li	Alma	1991	5	12,3	602	7,3	6,0	3,1
E	4a	6,1	L-Li	Alma	1991	5	13,5	633	9,3	5,7	2,1
E	4b	6,1	L	Alma	1991	5	13,5	633	7,6	5,8	2,7
F	21	15,9	...	Taillon	1999	4	14,2	567	4,0	7,3	6,7
F	22	2,4	...	Taillon	1999	4	16,9	686	3,4	7,5	2,9
F	23	2,5	...	Taillon	1999	4	16,9	687	2,2	6,5	1,7
F	24	1,0	...	Taillon	1999	4	16,9	689	3,5	6,2	4,4
G	22	2,6	L-Li	Alma	1992	11	26,8	1 189	8,0	5,2	0,5
G	23	5,4	L	Alma	1992	11	26,8	1 189	8,0	6,0	1,7
G	24	2,7	L-Li	Alma	1992	11	26,8	1 189	8,6	5,9	1,8
H	17	7,8	L	Alma	1998	7	24,9	1 122	7,5	6,5	3,7
I	10	4,2	L	Alma	2003	4	12,9	505	7,5	6,0	2,5
Moyenne	...	...	...	...	...	7	20,0	889	7,0	6,0	3,0

1. Établie selon les analyses granulométriques

2. Établie selon les cartes pédologiques de la région de Chicoutimi (Raymond, 1971)

3. Année du premier épandage

sont de plus dotées d'équipements de dés-hydratation mécanique qui produisent des boues de siccité variant entre 15 et 18 % de matière sèche. Les teneurs moyennes en métaux totaux des boues de l'arrondissement Jonquière pour les années 1990 et 2006 sont présentées au tableau 2. Ces données proviennent d'analyses réalisées par Ville de Saguenay. Les résultats démontrent que les boues de cet arrondissement présentent des teneurs en de nombreux ÉTM qui sont à la baisse depuis 1990. Le contenu de ces boues en cadmium, en cobalt, en chrome, en nickel et en plomb (totaux) est actuellement plus faible que celui des sols agricoles des séries Alma et Taillon de la région du Saguenay-Lac-St-Jean (ratio boue/sol).

Les teneurs en ÉTM des boues de l'arrondissement Jonquière sont représentatives de celles des boues des arrondissements Chicoutimi et La Baie. Par contre, elles possèdent des teneurs en aluminium nettement plus élevées, puisque la station d'épuration de l'arrondissement Jonquière utilise fréquemment des sels d'aluminium et traite les boues issues de la filtration de l'eau potable (Ville de Saguenay, données non publiées, 2007). Par ailleurs, les boues de Ville de Saguenay possèdent des teneurs en ÉTM similaires à celles des boues produites par la majorité des stations mécanisées québécoises. Elles contiennent toutefois nettement moins de cuivre et de zinc (tableau 2).

## Échantillonnage des sols

Les 26 parcelles agricoles retenues ont été échantillonnées selon la méthodologie spécifiée dans le *Guide d'échantillonnage des sols à des fins d'analyses environnementales* (CEAEQ, 2001). Pour chaque parcelle, un parcours aléatoire d'échantillonnage a été conçu à l'aide des plans de ferme des agriculteurs. Afin de ne pas biaiser les résultats, certains endroits n'ont pas été échantillonnés, notamment les zones nouvellement défrichées, les lieux de stockage des boues municipales, les dépressions majeures, les monticules ainsi que les bords de champs et de fossés. Le nombre de points de prélèvements de chacun des parcours a été établi à dix pour les parcelles de dix hectares et moins et à quinze pour les parcelles de plus de dix hectares.

À chacun des points de prélèvements, l'horizon de surface (0-20 cm) et l'horizon 20-40 cm ont été échantillonnés successivement à l'aide d'une tarière Edelman pour sols argileux, tandis que l'horizon 40-60 cm a été prélevé à l'aide d'un tube d'échantillonnage de plus faible diamètre, afin d'éviter que cet horizon ne soit contaminé par les particules de sols provenant des horizons supérieurs. Toutefois, l'horizon 40-60 cm de six parcelles a dû être échantillonné à l'aide d'une tarière Edelman pour sables grossiers en raison de la présence de cailloux. Dans chacune des 26 parcelles, deux échantillons composés ont été constitués à l'aide des prélèvements

des horizons 0-20 et 40-60 cm. L'horizon 20-40 cm n'a pas été conservé. Un total de 52 échantillons composés a donc été constitué. Afin de limiter le risque de contamination croisée, les équipements d'échantillonnage ont été méticuleusement brossés entre chaque prélèvement. Les échantillons ont été conservés à 4 °C dans des sacs de plastique ou des pots de verre puis acheminés aux laboratoires d'analyse.

## Analyses des sols en laboratoire

Le contenu en mercure total des 52 échantillons composés a été analysé par le laboratoire Maxxam Analytique inc. de Ville de Saguenay selon la méthode par spectrométrie d'absorption atomique avec formation de vapeur froide (AA). Ce laboratoire a également effectué les analyses granulométriques des échantillons de surface.

Le Centre d'expertise et d'analyse environnementale du Québec (CEAEQ) de Laval a pour sa part évalué le contenu en métaux labiles de l'ensemble des échantillons de sols en duplicata selon la méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon (ICP-MS) après extraction selon la méthode Mehlich-3 (CEAEQ, 2005). Les analyses ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre de masse Agilent 7500ce. Le CEAEQ de Laval a également analysé le pH des 26 échantillons de surface selon la méthode électrométrique (CEAEQ, 2006). Le contenu en matière organique de ces mêmes échantillons a également été déterminé par ce laboratoire selon la méthode par perte au feu (CEAEQ, 2003).

## Sélection des métaux

Bien que de nombreux métaux aient fait l'objet d'analyses en laboratoire, seuls certains d'entre eux ont été retenus *a priori* dans cette étude. Tout d'abord, le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le plomb (Pb) ont été sélectionnés, car ils constituent des contaminants stricts et leur accumulation dans les sols agricoles suscite les plus vives inquiétudes (Basta *et al.*, 2005). Les oligo-éléments possédant un ratio boue/sol supérieur à 1 ont également été retenus (tableau 2), puisqu'ils présentent un risque d'accumulation dans les sols. Il s'agit du cuivre (Cu) et du zinc (Zn). Malgré qu'il présente un ratio boue/sol < 1, l'aluminium (Al) a aussi été retenu en raison de son

**Tableau 2. Contenu en métaux totaux des boues municipales produites à la station d'épuration des eaux usées de l'arrondissement Jonquière pour les années 1990 et 2006.**

Années	Métaux totaux (mg/kg b.s.)											
	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
1990	...	0,4	3,0	7,5	28	235	3,1	7,0	21	99	0,6	337
2006	31 800	3,0	0,9	4,5	22	194	0,8	4,1	20	23	1,9	239
Sols agricoles (Saguenay) <sup>1</sup>	36 200	...	1,1	19	41	20	0,04	...	27	36	...	86
Ratio boue/sol <sup>2</sup>	0,9	...	0,8	0,2	0,5	10	20	...	0,7	0,6	...	2,7
Boues de stations mécanisées (Qc) <sup>3</sup>	25 700	3,8	1,3	6,5	33	402	0,7	5,4	25	28	1,8	398

1. Contenu moyen en métaux totaux de l'horizon de surface des sols agricoles des séries Alma et Taillon situées dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean (tiré de Giroux *et al.*, 1992).

2. Ratio entre les teneurs moyennes en métaux totaux des boues de l'arrondissement Jonquière (2006) et celles de l'horizon de surface des sols agricoles des séries Alma et Taillon situées dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean.

3. Teneurs moyennes en métaux totaux des boues de stations mécanisées générées au Québec entre les années 2000-2006 (tiré de Perron et Hébert, 2007b).

impact potentiel sur l'indice de saturation en phosphore (P) des sols agricoles récepteurs. Le sélénium (Se) n'a pas été retenu, car il est supplémenté dans les rations animales et se retrouve dans les fumiers de bovins. Les parcelles ayant reçu ce type d'engrais ont donc potentiellement été enrichies en Se. Quant à l'arsenic (As) et au molybdène (Mo), leurs teneurs étaient relativement faibles dans les boues et la mobilité de ces anions dans le sol rendait la comparaison des couches de sols difficile.

L'analyse totale a été préconisée pour le Hg, puisque cet élément n'est pas disponible pour les plantes (Tremel-Schaub et Feix, 2005). La méthode Mehlich-3 a pour sa part été retenue pour les autres métaux sélectionnés, puisqu'elle permet d'évaluer la fraction biodisponible de ceux-ci dans le sol, c'est-à-dire la fraction la plus à risque d'un point de vue écotoxicologique selon Tremel-Schaub et Feix (2005). Cette méthode s'avère également plus sensible que l'analyse totale pour mettre en évidence les accumulations de métaux provenant des applications répétées d'engrais organiques sur des sols agricoles (Giroux *et al.*, 2005).

En se basant sur le contenu moyen en métaux totaux de l'horizon de surface des sols agricoles des séries Alma et Taillon situées dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean établi par Giroux *et al.* (1992) (tableau 2), les charges cumulées de métaux totaux appliquées sur les 26 parcelles échantillonnées correspondraient à des enrichissements théoriques de l'ordre de 1% pour le Cd, le Pb et l'Al, de 2% pour le Zn, de 10% pour le Cu et de 20% pour le Hg (tableau 3). Les enrichissements théoriques relativement faibles en Cd, en Pb, en Al, en Zn et en Cu justifient d'autant plus l'utilisation de la méthode Mehlich-3.

## Traitement des données

Les teneurs en Hg total et en Al, Cd, Cu, Pb et Zn Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm (témoin) des parcelles échantillonnées ont été comparées afin de déterminer s'il y a eu, à moyen terme, accumulation de ces métaux dans la couche de labour (0-20 cm). Cette approche a été retenue en raison du manque d'informations sur les concentrations initiales (avant 1990) de ces métaux dans la couche de labour des 26 parcelles à l'étude.

Les teneurs en Al, Cu et Zn Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm (témoin) des parcelles échantillonnées ont été comparées à l'aide du test de Student pour échantillons appariés. Le test de Wilcoxon pour échantillons appariés a pour sa part été utilisé afin de comparer les teneurs en Hg total et en Pb Mehlich-3 des deux horizons, puisque les distributions de données n'étaient pas conformes à la loi normale. Aucune comparaison statistique n'a pu être effectuée pour le Cd, car la limite de détection de la méthode d'analyse utilisée était trop élevée (0,5 mg Cd/kg). Le seuil de signification ( $\alpha$ ) a été établi à 0,05 pour l'ensemble des tests statistiques. Ceux-ci ont été effectués à l'aide du logiciel JMP 6.0 de SAS Institute inc.

Mentionnons que la comparaison des teneurs en métaux entre les horizons 0-20 et 40-60 cm s'appuie sur deux hypothèses. La première est qu'avant les premiers

épandages de boues municipales (1990), les métaux visés dans cette étude présentaient des teneurs homogènes dans le profil vertical (0-60 cm) des sols agricoles des séries Alma et Taillon. Afin de valider cette hypothèse, les teneurs de fond en métaux Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm présentées dans Tabi *et al.* (1990) ont été comparées statistiquement à l'aide d'un test de Student pour échantillons appariés ( $\alpha = 0,05$ ). Ces teneurs de fond proviennent d'un inventaire portant sur la dégradation des sols de la région du Saguenay-Lac-St-Jean réalisé à la fin des années 1980 par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Les résultats issus de cette comparaison (tableau 4) confirment que pour le Cu, le Zn et le Pb, leur distribution dans le profil vertical (0-60 cm) était homogène avant la mise en place du programme de valorisation agricole de Ville de Saguenay. Par contre, les teneurs en Al et en Cd avaient initialement

**Tableau 3. Charges totales de métaux totaux appliquées en moyenne sur les 26 parcelles échantillonnées et enrichissement maximal théorique de leur horizon de surface.**

Métaux	Charge totale moyenne (kg/ha) <sup>1</sup>	Enrichissement maximal théorique (mg/kg sol) <sup>2</sup>	Enrichissement maximal théorique (%) <sup>3</sup>
Al	658	250	0,7
Cd	0,02	0,008	0,7
Cu	4,8	1,8	9,1
Hg	0,02	0,008	19,0
Pb	0,9	0,34	0,9
Zn	5,4	2,0	2,4

1. Calculée à l'aide des doses de chaque épandage de boues réalisé sur chacune des parcelles et des teneurs annuelles moyennes en métaux des boues de la station d'épuration des eaux usées de l'arrondissement Jonquière.

2. Calculé avec un facteur de conversion de 2,24 pour une couche de 17 cm (CRAAQ, 2003). Ce facteur de conversion a été ajusté pour une couche de 20 cm. Les valeurs supposent qu'aucun élément ne migre sous la couche de surface ou n'est exporté hors de la parcelle (prélèvement par les plantes, ruissellement).

3. Calculé selon la formule suivante : enrichissement maximal théorique (mg/kg) / teneur moyenne des séries Alma et Taillon (tableau 2) \* 100

**Tableau 4. Teneurs moyennes en métaux Mehlich-3 (mg/kg) des horizons 0-20 et 40-60 cm des sols agricoles des séries Alma et Taillon mesurées avant 1990 <sup>1</sup>.**

Horizon du sol (cm)	Al	Cd	Cu	Pb	Zn
0-20	1764	0,18	1,0	1,0	1,1
40-60	1235	0,15	1,2	0,94	1,2
Écart (%)	43	20	-18	10	-9
Valeur $p$ <sup>2</sup>	0,025	0,03	0,28	0,58	0,70

1. Adapté de Tabi *et al.*, 1990. Les données proviennent d'un inventaire effectué dans la région du Saguenay-Lac-St-Jean quelques années avant le début du programme de valorisation agricole (1990).

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



**Tableau 6. Distribution en rangs centiles des teneurs en métaux Mehlich-3 et totaux (mg/kg) dans les sols agricoles du Québec <sup>1</sup>.**

Métaux	Centiles				
	25 %	50 %	75 %	95 %	> 99 % <sup>2</sup>
Al (Mehlich-3)	814	917	1054	1502	...
Cd (Mehlich-3)	< 0,05	0,07	0,10	...	> 0,24
Cu (Mehlich-3)	< 1,1	1,8	2,8	...	> 9,0
Pb (Mehlich-3)	< 1,6	2,1	2,6	...	> 5,7
Zn (Mehlich-3)	< 1,2	1,9	3,0	...	> 14,0
Hg (Total)	0,035	0,040	0,050	0,080	...

1. Les valeurs pour le Cd, le Cu, le Pb et le Zn sont tirées de Deschênes *et al.* (2006) et celles pour l'Al et le Hg proviennent de Giroux *et al.* (1992).

2. Les critères du 99<sup>e</sup> centile représentent des concentrations jugées critiques face à l'accumulation de métaux dans les sols (Deschênes *et al.*, 2006).

fait, et puisque les boues de Ville de Saguenay présentent des teneurs en Hg total à la baisse depuis 1990 (figure 1), les applications répétées des boues de Ville de Saguenay ne devraient pas entraîner d'enrichissement critique en Hg total dans l'horizon de surface des parcelles réceptrices, même à plus long terme.

### Plomb (Mehlich-3)

Comme le Pb Mehlich-3 présentait une distribution homogène dans le profil vertical (0-60 cm) des sols des séries Alma et Taillon avant 1990 (tableau 4), l'écart moyen de 62 %, observé entre les teneurs en Pb Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm (tableau 5), témoigne d'un enrichissement significatif en cet élément dans la couche de labour des parcelles ayant reçu les boues de Ville de Saguenay. La signature des sols récepteurs a donc été sensiblement modifiée.

Toutefois, la teneur moyenne en Pb Mehlich-3 (0,81 mg Pb/kg) de l'horizon de surface des parcelles échantillonnées est considérée comme étant très faible, lorsqu'on considère les teneurs normales en cet élément dans les sols du Québec (tableau 6). De plus, la teneur maximale en Pb Mehlich-3, observée dans l'horizon 0-20 cm de l'ensemble des 26 parcelles (2,05 mg Pb/kg), est nettement inférieure à la concentration jugée critique pour les sols agricoles (> 5,7 mg Pb/kg). L'enrichissement en Pb Mehlich-3 devrait d'ailleurs s'atténuer dans les prochaines années, puisque depuis 2001, les boues de Ville de

Saguenay contiennent moins de Pb que les sols récepteurs de la région (figure 1). En somme, l'accumulation de Pb mesurée dans cette étude n'est pas préoccupante d'un point de vue environnemental ni à court, ni à long terme. Comme les teneurs en Pb des biosolides produits par les autres stations mécanisées du Québec sont similaires à celles de Ville de Saguenay (tableau 2), leur épandage ne devrait pas occasionner d'accumulation importante de Pb Mehlich-3 dans les sols agricoles de la province.

### Cadmium (Mehlich-3)

Bien qu'aucune comparaison statistique n'ait pu être effectuée pour le Cd (Mehlich-3) en raison de la limite de détection trop élevée de la méthode d'analyse utilisée (0,5 mg Cd/kg), une évaluation de la charge totale de Cd appliquée sur les parcelles a tout de même été réalisée. En moyenne, celle-ci était de 0,02 kg Cd total/ha (tableau 3) et de 0,035 kg Cd total/ha sur une période de 10 ans. Or, selon Baize *et al.* (2006), les flux de Cd  $\leq 0,150$  kg Cd total/ha/10 ans n'entraîneraient pas d'impact significatif sur la teneur des sols en Cd disponible et total à moyen terme. Ainsi, il y a lieu de penser que les sols agricoles recevant les boues de Ville de Saguenay n'ont pas été sensiblement enrichis en cet élément. Ceci est renforcé par le fait que depuis 2000 (à l'exception de 2004), les boues de Ville de Saguenay contiennent moins de Cd que les sols récepteurs (figure 1). Cette situation est également observée pour la majorité des boues produites dans les stations mécanisées du Québec (Perron et Hébert, 2007b).

### Cuivre (Mehlich-3)

Comme le Cu Mehlich-3 présentait une distribution homogène dans le profil vertical (0-60 cm) des sols des séries Alma et Taillon avant 1990 (tableau 4), l'écart moyen de 11 %, observé entre les teneurs en Cu Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm (tableau 5), témoigne d'un enrichissement significatif en cet élément dans la couche de labour des parcelles ayant reçu les boues de Ville de Saguenay.

Par contre, la teneur moyenne en Cu Mehlich-3 de l'horizon de surface (2,74 mg Cu/kg) (tableau 5) se situe dans la médiane québécoise et est nettement inférieure à la concentration critique pour les sols agricoles (> 9,0 mg Cu/kg) (tableau 6). La teneur maximale en Cu Mehlich-3 mesurée dans la couche de labour de l'ensemble des 26 parcelles échantillonnées (4,8 mg Cu/kg) tend à se rapprocher davantage de cette concentration critique. En considérant les taux actuels d'épandages de boues, l'enrichissement en Cu Mehlich-3 pourrait donc potentiellement mener dans plusieurs décennies à un dépassement de la teneur critique de 9,0 mg Cu/kg.

À l'instar des lisiers de porcs, les biosolides produits dans certaines stations mécanisées d'épuration du Québec contiennent des teneurs en Cu qui sont de trois à quatre fois plus élevées que celles des boues de Ville de Saguenay (Perron et Hébert, 2007b). Puisque qu'il a été démontré que les applications répétées des boues municipales peuvent induire un enrichissement en Cu Mehlich-3 à la surface des sols récepteurs, l'application de telles boues sur des parcelles ayant fait l'objet de nombreux épandages de lisiers ou de biosolides municipaux ne devrait pas être effectuée sans avoir préalablement analysé le contenu en Cu Mehlich-3 des sols récepteurs.

### Zinc (Mehlich-3)

Le Zn Mehlich-3 présentait une distribution homogène dans le profil vertical (0-60 cm) des sols des séries Alma et Taillon avant 1990 (tableau 4). Ainsi, l'écart moyen de 44 %, observé entre les teneurs en Zn Mehlich-3 des horizons 0-20 et 40-60 cm (tableau 5), témoigne d'un enrichissement

significatif en cet élément dans la couche de labour des parcelles ayant reçu les boues de Ville de Saguenay.

Mentionnons cependant que la teneur moyenne en Zn Mehlich-3 de l'horizon de surface des sols échantillonnés (1,18 mg Zn/kg) est considérée comme étant très faible (tableau 6). De plus, la teneur maximale en Zn Mehlich-3 mesurée dans l'horizon de surface de l'ensemble des 26 parcelles échantillonnées (2,7 mg Zn/kg) se situe bien en deçà de la concentration jugée critique (> 14 mg Zn/kg). Ainsi, cet enrichissement devrait davantage être considéré comme un accroissement de la fertilité des sols, plutôt qu'une contamination des sols en cet élément.

À l'instar du Cu, il n'est toutefois pas recommandé d'épandre des boues très riches en Zn sur des parcelles déjà enrichies en cet élément, notamment celles ayant fait l'objet d'applications répétées de lisiers de porcs ou de boues municipales, sans effectuer d'abord une analyse du contenu en Zn Mehlich-3 des sols récepteurs.

### Aluminium (Mehlich-3)

L'écart moyen de 18% observé entre les horizons 0-20 et 40-60 cm des 26 parcelles à l'étude (tableau 5), étant sensiblement inférieur à celui prévalant avant 1990 (tableau 4), suggère qu'il n'y a pas eu d'accumulation significative d'Al Mehlich-3 dans la couche de labour des sols ayant reçu les boues de Ville de Saguenay. Mentionnons que la teneur moyenne en Al Mehlich-3 de l'horizon 0-20 cm de l'ensemble des 26 parcelles à l'étude (1485 mg Al/kg) est similaire à la teneur moyenne régionale actuelle (1424 mg Al/kg) (Beudet *et al.*, 2005). Ces résultats tendent à démontrer que les boues de Ville de Saguenay ne sont pas très enrichies en Al Mehlich-3.

### Indice de saturation en phosphore

La disponibilité du P des sols est fortement corrélée à leur indice de saturation en P (P/Al Mehlich-3) (Giroux et Tran, 1996). Ainsi, la disponibilité du P dépendra de l'évolution conjointe des teneurs en Al et en P Mehlich-3 des sols recevant des boues municipales. Les résultats de cette étude

**Tableau 7. Synthèse des estimés d'enrichissement moyen en métaux de l'horizon de surface des 26 parcelles échantillonnées et de leur incidence sur l'environnement.**

Métaux	Enrichissement (%)	Dépassement observé des critères de qualité des sols	Dépassement probable à long terme des critères de qualité des sols
Al (Mehlich-3)	0	...	...
Cd (Mehlich-3)	0	Non	Non
Cu (Mehlich-3)	11	Non	Oui
Pb (Mehlich-3)	62	Non	Non
Zn (Mehlich-3)	44	Non	Non
Hg (Total)	20	Non	Non
P/Al (Mehlich-3)	300	...	...

démontrent que l'indice moyen de saturation en P de l'horizon de surface des parcelles échantillonnées (3%) est supérieur à celui mesuré par Tabi *et al.* (1990) dans les séries Alma et Taillon (1%). Or, cet écart est suffisamment élevé pour indiquer une certaine amélioration de la fertilité des sols récepteurs. Cette amélioration serait en grande partie attribuable aux boues municipales qui ont constitué la principale source d'apport de P Mehlich-3. Une étude du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario a d'ailleurs démontré que les épandages répétés de boues municipales augmentent la teneur en P disponible des sols récepteurs (OMAFRA, 1996).

Ces résultats contrastent avec l'une des recommandations de Webber (2003) à l'effet qu'il n'est pas conseillé d'épandre des biosolides municipaux riches en Al sur des sols non argileux et faiblement saturés en P (< 4%). Cette recommandation vise à éviter la diminution possible de l'indice de saturation en P des sols récepteurs de même que la disponibilité du P pour les plantes. Or, il a été démontré que l'indice moyen de saturation en P des 26 parcelles échantillonnées dans le cadre de la présente étude s'est accru à la suite des applications répétées des boues de Ville de Saguenay, et ce, malgré le fait que 80% de ces parcelles avaient un indice de saturation en P inférieur à 4% (tableau 1). Ce résultat suggère que la recommandation de Webber s'appliquerait plutôt à des boues ayant une teneur en Al supérieure à celle des boues de Ville de Saguenay (31 800 mg Al/kg), comme les boues issues des traitements physico-chimiques ou de déphosphatation.

Il est important de noter que les taux d'épandages au Québec sont limités par l'indice de saturation en P des sols, et ce, en vertu du REA (CRAAQ, 2003). L'augmentation de l'indice de saturation en P des sols à la suite des applications répétées de boues municipales contribuerait donc à réduire les taux d'épandages dans le futur. Dans la présente étude, l'ensemble des charges de boues épandues sur une période quinquennale (3,8 à 16,1 t/ha/5 ans sur base sèche) était inférieur à la charge maximale permise par le MDDEP (22 t/ha/5 ans sur base sèche). Ainsi, le P agirait comme un « filet de sécurité » permettant de limiter indirectement les charges de métaux appliquées sur les sols agricoles à long terme.

Mentionnons en terminant qu'une synthèse des principaux résultats concernant l'impact des épandages répétés des boues de Ville de Saguenay sur le contenu en métaux des sols récepteurs est présentée au tableau 7.

## Conclusion

Cette étude a démontré que les applications répétées des boues de Ville de Saguenay ont entraîné un enrichissement en Hg total ainsi qu'en Cu, en Pb et en Zn Mehlich-3 de la couche de labour des parcelles réceptrices. Ces enrichissements ne constituent toutefois pas un risque pour l'environnement, même à long terme. En effet, les sols présentent des teneurs se situant bien en deçà des critères de référence utilisés au Québec pour juger de la qualité des sols. À titre d'exemple, la teneur moyenne en Hg total de l'horizon de surface des parcelles échantillonnées est environ 165 fois inférieure à la concentration jugée critique

par le CCME. De plus, les boues de Ville de Saguenay présentent des teneurs en Hg total et en Pb Mehlich-3 qui sont à la baisse depuis quelques années, ce qui devrait atténuer l'enrichissement des sols en ces éléments dans le futur. La diminution des teneurs en Pb est telle, qu'actuellement, les boues de cette ville en contiennent moins que les sols agricoles de la région du Saguenay-Lac-St-Jean. L'accroissement de l'indice de saturation en P des sols recevant les boues de Ville de Saguenay, en limitant progressivement les taux d'épandages, devrait entraîner la diminution des charges de métaux appliquées sur les sols. Mentionnons qu'aucun enrichissement significatif en Al et en Cd n'a été révélé.

En somme, depuis la mise en œuvre du programme de valorisation agricole des boues de Ville de Saguenay en 1990, les applications répétées de ces boues n'ont pas entraîné à moyen terme d'impact négatif sur les teneurs en ÉTM de la couche de labour des sols récepteurs. Au contraire, les résultats de cette étude suggèrent que la fertilité des sols récepteurs s'est améliorée, notamment en raison de l'augmentation de leur contenu en Cu et en Zn Mehlich-3 et de leur indice de saturation en P. Cette augmentation du niveau de fertilité des sols est d'ailleurs corroborée par les augmentations de rendement observées par certains agriculteurs.

Plusieurs de ces résultats sont par ailleurs transposables à d'autres régions du Québec, puisque les teneurs en métaux des boues de Ville de Saguenay sont assez représentatives de celles des boues produites dans les autres stations mécanisées de la province. Par contre, ces dernières génèrent des boues plus riches en Cu et en Zn. L'application de telles boues sur des parcelles ayant fait l'objet de nombreux épandages de lisiers ou de boues municipales ne devrait pas être effectuée sans avoir préalablement analysé le contenu des sols récepteurs en ces deux éléments. De plus, par mesure préventive et pour des raisons agronomiques, les biosolides fortement chargés en Al, notamment ceux issus des traitements physico-chimiques ou de déphosphatation utilisant des quantités importantes de sels d'aluminium, ne devraient pas être épandus sur les sols ayant un très faible indice de saturation en P.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. Guy Gagnon, coordonnateur du programme de valorisation agricole de la Ville de Saguenay, ainsi que les agriculteurs pour leur étroite collaboration. Leurs remerciements s'adressent aussi à Mme Martine Lepage de Maxxam Analytique inc. et M. Jacques Boulerville du CEAEQ pour les analyses en laboratoire ainsi que M. Marcel Giroux de l'IRDA pour les nombreuses suggestions et Mme Elisabeth Groenveld du MDDEP pour la révision du manuscrit.

## Références

- Baize, D., C. Courbe, O. Suc, C. Schwartz, M. Tercé, A. Bispo, T Sterckman et H. Ciesielski. 2006. Épandages de boues d'épuration urbaines sur des terres agricoles : impacts sur la composition en éléments traces des sols et des grains de blé tendre. *Courrier de l'environnement de l'INRA* (53) : 35-61.
- 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) : 49-63.
- Beaudet, P., M. Grenier, M. Giroux et V. Girard. 2005. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. Québec : IRDA et MAPAQ, 108 p.
- CEAEQ. 2001. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cahier 5 : échantillonnage des sols. Québec : Le Griffon d'argile, 53 p.
- CEAEQ. 2003. Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte au feu (PAF). MA. 1010 – PAF 1.0. Ministère de l'Environnement du Québec, 9 p.
- CEAEQ. 2006. Détermination du pH : méthode électrométrique. MA. 100 – pH 1.1. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 12 p.
- CEAEQ. 2007. Détermination des métaux assimilables : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon. MA. 200 – Mét. Ass. 1.0. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 14 p.
- CCME. 2007. Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humaine -tableaux sommaires. Winnipeg : CCME, 6 p.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation, 1<sup>ère</sup> édition. Québec : CRAAQ, 295 p.
- Deschênes, L., R. Chassé, M. Giroux, C. Bastien, L. Jean, V. Bécaert, G. Martineau et G. Côté. 2006. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. Rapport final préparé pour le programme PARDE du MDDEP, 147 p. + annexes.
- Fleury, C., M. Hébert et M.-P. Lefebvre. 2006. Portrait de la valorisation agricole des MRF année 2004. Québec : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques en milieu terrestre. En ligne. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/articles/index.htm>.
- Fouchécourt, M.-O. et M. Beausoleil. 2001. Critères de santé humaine pour la valorisation agricole des matières fertilisantes. *Bulletin d'information en santé environnementale* 12 (3) : 1-6.
- 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) : 46-55.
- Giroux, M. et T.S. Tran, 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* 9 (2) : 51-57.
- Giroux, M., R. Chassé, L. Deschênes et D. Côté. 2005. Étude 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. *Agrosol* 16 (1) : 23-32.

- INSPQ, 2001. Évaluation des impacts à long terme de l'utilisation agricole de matières résiduelles fertilisantes au Québec – Mise en contexte et risques à la santé associés à l'apport de cadmium et de dioxines/furanes. Rapport Synthèse. Québec. INSPQ, 99 p.
- MAMR, 2006. Liste des stations d'épuration du Québec. Ministère des Affaires municipales et des Régions, Direction des infrastructures, 12 p.
- MENV, 2004. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Critères de référence et normes réglementaires. Québec. MENV, 127 pages.
- OMAFRA, 1996. Analytical results, findings and recommendations of the 1995 OMAFRA sewage biosolids field survey. Guelph (Ont. : OMAFRA, 49 p.
- Pereira, B. et P. Sonnet. 2007.  
La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en région wallonne. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. Université catholique de Louvain, Faculté d'ingénierie agronomique, biologique et environnementale, 27 p.
- Perron, V. et H. Hébert. 2007a. Caractérisation des boues d'épuration municipales - Partie I : Paramètres agronomiques. Vecteur environnement 40 (4) : 48-52.
- Perron, V. et H. Hébert. 2007b. Caractérisation des boues d'épuration municipales - Partie II : Éléments traces métalliques. Vecteur environnement 40 (5) : 45-50.
- Raymond, R. 1971. Pédologie de la région de Chicoutimi. Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, 120 p.
- Sloan, J. J., R. H. Dowdy, S. J. Balogh et E. Nater. 2001. Distribution of mercury in soil and its concentration in runoff from a biosolids-amended agricultural watershed. Journal of Environmental Quality 30 : 2173-2179.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec : Région agricole 12 - Saguenay-Lac-St-Jean et Côte-Nord. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture Canada, 67 p.
- Tremel-Schaub, A. et I. Feix, 2005.  
Contamination des sols. Transfert des sols vers les plantes. Paris : ADEME et EDP Sciences, 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 4 (1) : 22-27.