
**CONTAMINANTS D'INTERET EMERGENT
DANS LES BIOSOLIDES :
TENEURS ET EFFETS DES PROCÉDES DE TRAITEMENT**

**Campagne d'échantillonnage sur le terrain - Rapport final
N° de projet CCME : 447-2009**

Présenté au :

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT
123, rue Main, bureau 360
Winnipeg (Manitoba)
R3C 1A3

Présenté par :

Hydromantis, Inc.
Hamilton (Ontario)
N° de TPS : 102382843

Université de Waterloo
Waterloo (Ontario)

Université Trent
Peterborough (Ontario)

Le 30 juin 2010

PN 1448

Le présent rapport a été préparé par Hydromantis Inc, l'Université de Waterloo and l'Université Trent pour le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME). Ce rapport constitue uniquement un document de travail. Il contient des données recueillies pour le compte du CCME mais non approuvées par ce dernier. Le CCME n'est pas responsable de l'exactitude des données présentées dans cette publication; en outre, il n'offre aucune garantie quant aux opinions exprimées, pas plus qu'il ne les partage ou ne les appuie nécessairement.

© Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2010

REMERCIEMENTS

Le présent rapport a été préparé pour le Groupe de travail sur les biosolides (GTB), établi par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME).

Le présent rapport a été préparé pour le GTB du CCME par Hydromantis, Inc., Hamilton, Ontario.

Hugh Monteith, ingénieur (gestionnaire de projet)

Lars Sterne, ingénieur

Shujun Dong, ingénieur

Les personnes suivantes ont participé à la rédaction du rapport et leurs commentaires nous ont été d'une grande utilité :

Wayne J. Parker, Ph. D., ingénieur, département du génie civil et environnemental, Université de Waterloo, Ontario.

Chris Metcalfe, Ph. D., Études sur l'environnement et les ressources, Université Trent, Peterborough, Ontario.

Les auteurs souhaitent remercier le personnel des usines de traitement des eaux usées sur les différents sites mentionnés dans le rapport, pour leur coopération et leur soutien lors de la cueillette et l'expédition des échantillons, ainsi que pour les plans des installations et les données d'opération.

Richard Grace, de la société Axys Analytical Services Ltd., a fourni une aide très appréciée lors de nos discussions sur les listes analytiques de produits pharmaceutiques et de soins personnels pouvant être évalués selon la méthode 1694 de l'EPA.

Les auteurs remercient également les gestionnaires de projet de laboratoire pour leur soutien logistique, leur patience et leur empressement à répondre à nos questions :

Teresa Rawsthorne, AXYS Analytical Services Ltd., Sydney, Colombie-Britannique.

Lindsay Zuiker, ALS Laboratory Group, Waterloo, Ontario.

Tracy Metcalfe, Études sur l'environnement et les ressources, Université Trent, Peterborough, Ontario.

Tim Anderson, de la société Hydromantis, nous a apporté une aide précieuse lors de l'acquisition et de l'organisation de l'équipement d'échantillonnage utilisé par le personnel de l'usine de traitement aux différents sites.

SOMMAIRE

Contexte

Le Groupe de travail sur les biosolides (GTB) a été constitué par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) afin d'étudier la gestion des biosolides et de formuler des recommandations applicables à l'échelle nationale. Partout au Canada, les stations d'épuration des eaux usées (STEP) génèrent des matières résiduelles (boues d'épuration) qui peuvent nécessiter un traitement supplémentaire avant de les utiliser ou de les éliminer afin d'assurer la protection de la santé humaine et de l'environnement. Lorsque les boues traitées sont de qualité adéquate pour être épandues sur le sol, on les appelle des biosolides. Parmi les options qui s'offrent pour gérer les biosolides, il y a leur élimination (p. ex. l'enfouissement sanitaire et l'incinération), la récupération d'énergie (p. ex. le traitement thermique), leur utilisation agricole comme source de nutriments, la végétalisation de sites dégradés (mines et carrières), leur utilisation en foresterie et la fabrication de produits commerciaux (composts et granules).

La destination finale des biosolides est souvent déterminée par la qualité de leurs constituants, comme les nutriments, les métaux, les agents pathogènes et les contaminants à l'état de trace. L'épandage des biosolides se pratique au Canada depuis des décennies. À l'heure actuelle, 11 éléments traces métalliques, tels que le cadmium, le plomb et le mercure, ainsi que des agents pathogènes sont analysés de façon systématique avant l'épandage. D'autres constituants qu'on considérait préoccupants dans les années 1990 tels que les BPC, les dioxines et furannes, ainsi que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont aussi fait l'objet d'études approfondies à cette époque. Ces contaminants organiques ont été considérés dans la revue de littérature réalisée préalablement à la présente étude terrain (Hydromantis et coll., 2009). Puisque la littérature n'a révélé que de faibles teneurs de ces composés organiques dans les biosolides, la plupart des provinces n'en font pas le suivi dans les biosolides. C'est pourquoi ils ne font pas non plus partie de la liste des contaminants analysés dans le cadre de la présente étude.

À l'heure actuelle, on connaît mal les risques associés à la détection d'autres catégories de microconstituants dans les biosolides qu'on appelle dorénavant les contaminants d'intérêt émergent (CIE). Les CIE englobent un éventail de produits pharmaceutiques, de produits de soins personnels et de contaminants industriels tels que les plastifiants, les agents tensio-actifs et les composés ignifuges bromés. Même si la littérature scientifique fait état de la présence de ces CIE dans les biosolides, aucune étude n'a encore permis d'établir un inventaire complet des CIE dans les biosolides canadiens.

Le CCME a donc lancé un appel de propositions pour documenter la présence de CIE dans les biosolides et les boues de fosses septiques en général et pour mener une campagne d'échantillonnage ciblée dans des stations d'épuration canadiennes représentatives. Cela en vue de fournir un inventaire des CIE dans les biosolides canadiens et pour évaluer le rendement d'enlèvement des CIE par différents procédés de traitement. Les résultats de cet échantillonnage s'ajouteront aux connaissances et aideront le CCME à évaluer et à gérer les risques associés aux CIE dans les biosolides destinés à l'épandage, à la végétalisation de lieux dégradés et à la fabrication d'amendements de sol commerciaux.

Objectifs

Les objectifs du projet de recherche intégral sont les suivants:

1. Réaliser une revue de littérature exhaustive sur les CIE dans les biosolides au Canada et ailleurs, fondée sur la consultation de la documentation technique et d'interlocuteurs du secteur des eaux usées;
2. Réaliser une étude sur le terrain et analyser les CIE dans des échantillons de biosolides et de boues de fosses septiques produits au Canada;
3. Mesurer l'occurrence et quantifier les intervalles de teneur des CIE dans les biosolides canadiens;
4. Évaluer les technologies de traitement des boues et recommander celles qui permettent de diminuer les teneurs en CIE dans les biosolides résultant;
5. Proposer des bonnes pratiques;
6. Identifier les lacunes dans les connaissances et les besoins de recherche relativement aux CIE dans les biosolides;
7. Produire un rapport final à l'intention des responsables de ce projet de recherche au CCME.

Un premier rapport (Hydromantis et coll., 2009) a consisté en une revue de la littérature sur la présence des CIE dans les boues et les biosolides municipaux provenant de divers procédés de traitement. Ce rapport a rempli le premier objectif du projet de recherche. Le présent rapport, répond pour sa part aux objectifs 2 à 7 et fournit les résultats de la campagne d'échantillonnage visant à caractériser les CIE dans les boues et les biosolides provenant de 11 stations d'épuration des eaux usées au Canada.

Procédés de traitement des boues et des biosolides étudiés

Le **tableau S-1** résume les procédés étudiés. Certains procédés intègrent plusieurs étapes de traitement (p. ex. : traitement biologique + déshydratation; chaulage + compostage), tandis que d'autres n'en font intervenir qu'une seule (p. ex. : déshydratation dans un sac géotextile, déshydratation par filtre à bandes). Le tableau indique également la catégorie de stabilisation (A ou B) des biosolides résultant de ces traitements, en fonction des critères de réduction des agents pathogènes de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (EPA). Les résidus soumis aux procédés de traitement étudiés sont nommés « boues d'alimentation » dans le présent rapport.

Tableau S-1. Procédés de traitement des boues et des biosolides à l'étude

Procédé	Nombre de sites
Digestion aérobie thermophile autotherme	1
Digestion anaérobie mésophile	2
Compostage	3
Stabilisation alcaline	1
Séchage thermique (pelletisation)	1
Déshydratation en sac géotextile	1
Déshydratation par filtre-presse	2

Onze sites d'échantillonnage ont été choisis par le GTB du CCME en fonction d'un certain nombre de critères, dont la présence d'un programme d'épandage des biosolides, la capacité de la station d'épuration, la situation géographique et le procédé de traitement des boues. La capacité de traitement des eaux usées des STEP et l'importance de l'agglomération urbaine n'ont pas été retenues comme facteurs discriminants. Le **tableau S-2** présente les caractéristiques de ces sites d'échantillonnage.

Tableau S-2. Caractéristiques des sites d'échantillonnage de boues et de biosolides

Municipalité	Région du Canada	Type de traitement des liquides (eaux usées)	Procédé de traitement des solides		Commentaires
			Boue d'alimentation	Solides ou biosolides finaux	
Gander, T.-N.-L.	Atlantique	Séparation hydrodynamique	Solides bruts issus du séparateur hydrodynamique	Solides déshydratés par filtre à bande	Aucun procédé de stabilisation
Moncton, N.-B.	Atlantique	Traitement primaire	Biosolides partiell. stabilisés par traitement à la chaux	Biosolides compostés	
Usine N-Viro, Halifax, N.-É.	Atlantique	voir sous « Commentaires »	Résidus combinés de diverses provenances	Biosolides issus de la stabilisation alcaline	L'usine ne traite pas les eaux usées, mais accepte les résidus de diverses provenances
Saguenay, Qc	Centre	Boues activées	Boues activées	Boues activées déshydratées par filtre à bande	Aucun procédé supplémentaire de stabilisation
Vallée-de-la-Gatineau, Qc	Centre	Réception et déshydratation de boues de fosses septiques	Boues déshydratées	Boues compostées avec ajout de copeaux de bois	Aucun procédé de stabilisation
Eganville, Ont.	Centre	Aération prolongée	Boues activées ou boues de fosses septiques (effluents entrants séparés)	Combinaison de digestion aérobie des boues et déshydratation en tube géotextile	On traite également les boues de fosses septiques séparément par filtration en sac géotextile
Smiths Falls, Ont.	Centre	Boues activées classiques et filtration	Boues primaires et boues activées déshydratées	Pellets produits par séchage thermique	
Saskatoon, Sask.	Ouest	Enlèvement biologique des nutriments	Boues primaires et secondaires combinées	Biosolides liquides mésophiles digérés anaérobiquement	
Prince Albert, Sask.	Ouest	Boues activées normales	Boues primaires et boues activées déshydratées	Biosolides compostés	
Red Deer, Alb.	Ouest	Enlèvement biologique des nutriments	Boues primaires et secondaires combinées	Biosolides mésophiles digérés anaérobiquement et déshydratation lagunaire	
Salmon Arm, C.-B.	Ouest	Enlèvement biologique des nutriments	Boues primaires et secondaires combinées	Biosolides autothermes déshydratés digérés aérobiement	

Méthodes d'échantillonnage

Les échantillons de boues d'alimentation, ainsi que de boues déshydratés et de biosolides résultant du traitement, ont été prélevés entre juillet et novembre 2009, et ce à trois reprises, dans neuf des onze municipalités canadiennes ciblées. Aux deux autres sites, seulement deux séries d'échantillons ont été prélevées plutôt que trois, à cause de problèmes mécaniques dans le procédé de traitement ou en raison de contraintes financières. Pour tenir compte des pertes potentielles de contaminants d'intérêt émergent dans les effluents liquides secondaires, comme le surnageant du digesteur ou les lixiviats issus des plateformes de compostage, des échantillons de ces liquides ont également été prélevés et analysés en vue d'obtenir un meilleur bilan massique global.

Le matériel d'échantillonnage (cuillères, baguettes, louches, etc.) était fait d'acier inoxydable, de verre ou de Téflon[®]. Des contenants d'échantillons prélavés ont été fournis aux STEP par les laboratoires d'analyse, avec les glacières, les instructions concernant l'emballage des échantillons, les blocs réfrigérants, le matériel d'emballage supplémentaire, ainsi que les formulaires de traçabilité.

Dès le départ, il était convenu que l'échantillonnage serait réalisé par des employés des stations d'épuration. Pour s'assurer que les procédures de prélèvement et d'expédition soient suivies, une série d'exposés sur Internet a été présentée au personnel des STEP. Ces informations abordaient plusieurs sujets, dont la terminologie, les matériaux appropriés pour les dispositifs d'échantillonnage, la création d'échantillons composites à partir d'échantillons ponctuels prélevés dans différents effluents ou à différents emplacements dans les amas de biosolides, l'emballage des glacières pour fins de transport, la logistique d'expédition, ainsi que les mesures de santé et de sécurité appropriées pour le prélèvement d'échantillons. Les communications par téléphone et par courrier électronique ont ensuite été utilisées lors de la collecte et de l'expédition des échantillons pour répondre aux questions spécifiques du personnel des STEP.

Les échantillons étaient expédiés par les STEP aux laboratoires par service de messagerie de 24 heures. Les livraisons se faisaient au plus tard le jeudi après-midi pour éviter les réceptions durant les fins de semaine. À leur arrivée au laboratoire, les échantillons étaient traités et réfrigérés ou congelés jusqu'à leur analyse.

Sélection des contaminants à analyser

Les catégories de contaminants d'intérêt émergent qui auraient potentiellement pu faire l'objet de cette campagne d'échantillonnage sont nombreuses. La précédente revue de la littérature (Hydromantis et coll., 2009) a permis d'identifier de nombreux types de CIE déjà étudiés, dont des agents ignifuges bromés (polybromodiphénylséthers (PBDE) et autres), des plastiques, des agents plastifiants, des composés alkylphénoliques et leurs dérivés éthoxylés, des alkylbenzènes sulfonates linéaires, des composés organiques perfluorés, des hormones naturelles et synthétiques, des produits pharmaceutiques, des substances odorantes de musc synthétique, des composés antibactériens, des composés d'ammonium quaternaire et des siloxanes de méthyle volatils.

La revue de littérature avait également documenté l'occurrence et le taux d'enlèvement des CIE dans les traitements de boues, mais ne portait pas sur les risques pour la santé humaine ou l'environnement associés à la présence de ces CIE dans les biosolides. La revue de littérature a

été utile pour sélectionner les substances à analyser, puisqu'elle a permis de relever l'absence quasi totale de données sur ce qu'il advient des CIE dans les traitements autres que la digestion anaérobie.

Trois critères principaux ont justifié le choix des CIE à analyser dans la présente étude :

- (1) l'importance éventuelle de leur effet sur l'environnement et sur la santé humaine d'après d'autres revues de littérature et le jugement professionnel;
- (2) l'existence de méthodes d'analyse appropriées pour déterminer les teneurs dans les boues et les biosolides, qui sont des matrices difficiles pour la mesure de teneurs de l'ordre du ng/L et du µg/L;
- (3) les contraintes budgétaires.

La plupart des produits pharmaceutiques détectables dans les matrices d'eaux usées et de boues peuvent s'inscrire dans cinq listes analytiques différentes (Grace, 2009), avec des coûts unitaires se rattachant à chacune. Les discussions avec les laboratoires d'analyse participants (AXYS Analytical Services, ALS Analytical Group et l'Université Trent) ont conduit à l'établissement d'une liste globale de composés considérés comme répondant aux trois critères exposés ci-dessus. La liste compte 57 composés pharmaceutiques, 3 composés alkylphénoliques (dont le bisphénol A), 11 substances odorantes de musc synthétique, 11 éléments traces métalliques, ainsi que des macronutriments dont certaines formes ioniques d'azote et de phosphore. Il aurait été manifestement souhaitable d'inclure plus de groupes de contaminants à cette campagne d'échantillonnage, mais les contraintes budgétaires l'en ont empêché. La liste finale des contaminants sélectionnés est présentée dans le **tableau S-3**.

Tableau S-3. Liste des contaminants sélectionnés pour l'étude sur les biosolides

Composés pharmaceutiques - Groupe 1 (acides positifs)		Composés pharmaceutiques - Groupe 2 (acides négatifs)	Substances odorantes
Acétaminophène	Norgestimate	Furosémide	DPMI
Azithromycine	Ofloxacin	Gemfibrozil	ADBI
Caféine	Ormétoprime	Glipizide	AHDI
Carbadox	Oxacilline	Glibenclamide (glyburide)	HHCB
Carbamazépine	Acide oxolinique	Hydrochlorothiazide	AHTN
Céfotaxime	Pénicilline G	2-hydroxy-ibuprofène	ATII
Ciprofloxacine	Pénicilline V	Ibuprofène	Musc moskène
Clarithromycine	Roxithromycine	Naproxène	Musc tibétène
Clinafloxacine	Sarafloxacine	Triclocarban	Musc cétone
Cloxacilline	Sulfachloropyridazine	Triclosan	Musc ambrette
Déhydronifédipine	Sulfadiazine	Warfarine	Musc xylène
Diphénhydramine	Sulfadiméthoxine	Composés alkylphénoliques	Éléments traces métalliques
Diltiazem	Sulfamérazine	Bisphénol A	Arsenic (As) – total
Digoxine	Sulfadimidine	Octylphénol	Cadmium (Cd) – total
Digoxigénine	Sulfaméthizole	Nonylphénol	Chrome (Cr) – total
Enrofloxacine	Sulfaméthoxazole		Cobalt (Co) – total
Érythromycine-H ₂ O	Sulfanilamide		Cuivre (Cu) – total
Fluméquine	Sulfathiazol		Plomb (Pb) – total
Fluoxétine	Thiabendazole		Mercure (Hg)
Lincomycine	Triméthoprim		Molybdène (Mo) – total
Loméfloxacine	Tylosin		Nickel (Ni) – total
Miconazole	Virginiamycine		Sélénium (Se) – total
Norfloxacine	1,7-Diméthylxanthine		Zinc (Zn) – total

Le groupe 1 des composés pharmaceutiques comprend un certain nombre d'antibiotiques fréquemment détectés et d'autres groupes de composés pharmaceutiques pertinents (fluoroquinolones, macrolides et composés de sulfamides, ainsi que la carbamazépine et la triméthoprim (anticonvulsif), l'acétaminophène (analgésique) et des stimulants comme la caféine et la diphénhydramine). Le groupe 1 comprend donc des composés présents dans les biosolides qui pourraient avoir un impact sur l'environnement. Le groupe 2 compte une liste plus

courte de composés pharmaceutiques, mais dont un certain nombre sont largement utilisés et fréquemment détectés, dont l'ibuprofène et le naproxène (médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens), le triclosan et le triclocarban (composés antibactériens), et le gemfibrozil (régulateur de lipides). Les groupes 1 et 2 sont des composés pharmaceutiques acides, selon la procédure d'extraction. La différence entre les deux groupes tient à la technique d'analyse, soit la spectrométrie de masse à ionisation par électronébulisation positive (groupe 1) ou négative (groupe 2).

En raison de la diversité des composés sélectionnés, trois laboratoires différents ont participé à l'analyse. AXYS Analytical Services Ltd, à Sydney en Colombie-Britannique, s'est chargé de l'analyse des composés pharmaceutiques à l'aide de la méthode EPA 1694 (EPA, 2007). Le Worsfold Water Quality Centre de l'Université Trent, à Peterborough en Ontario, a analysé les substances odorantes de musc synthétique et les composés alkyphénoliques, dont le bisphénol A, par chromatographie en phase liquide suivie de spectrométrie de masse en tandem (LC/MS/MS). Pour des raisons de logistique, les échantillons destinés au laboratoire de l'Université Trent ont d'abord transité par le laboratoire AXYS. Le laboratoire ALS Laboratory Group de Waterloo, en Ontario, a pour sa part réalisé les analyses de métaux et de nutriments.

Résultats de la campagne d'échantillonnage

Éléments traces métalliques (métaux)

À proprement parler, les métaux analysés ne sont pas considérés comme des contaminants d'intérêt émergent, puisqu'ils sont déjà largement documentés dans la littérature et qu'ils sont réglementés par des normes provinciales sur l'épandage. Ces métaux n'ont donc été analysés que lors de la première série d'échantillonnage, et uniquement pour permettre une comparaison générale avec des données plus anciennes. Les résultats sont présentés au **tableau S-4**. Les valeurs médianes de teneur, incluant ou non les résultats de non détection, sont toutes en deçà des teneurs limites utilisées par les diverses provinces au Canada. Le cadmium n'a été détecté que dans deux des onze échantillons de biosolides. Du cuivre, du mercure et du zinc ont été trouvés dans tous les échantillons de biosolides. Bien que les teneurs en cuivre, en mercure et en molybdène aient dépassé les teneurs limites pour le compost tout usage du CCME, respectivement pour 2, 4 et 1 échantillons, ces teneurs plus élevées n'empêchent pas des usages bénéfiques avec les biosolides pour l'amendement des sols.

La plupart des métaux persistent après le traitement des boues, c.-à-d. que les procédés ne réduisent pas significativement la masse initialement présente dans les boues d'alimentation, même si des métaux peuvent s'échapper dans les effluents secondaires liquides tels que les lixiviats, les filtrats et les surnageants. Ainsi, la seule méthode pour en réduire davantage les teneurs dans les biosolides, s'il le faut, est la réduction à la source.

En ce sens, des mesures très efficaces ont été prises au Canada au cours des trente dernières années pour réduire à la source les teneurs de tous les métaux dans les biosolides. Les teneurs actuelles de cadmium, de chrome, de plomb et de nickel ont diminué de plus de 90 % par rapport au niveau de 1981. La revue de la littérature (Hydromantis et coll. 2009) précise que les diminutions de teneurs en métaux comme le nickel, le chrome et le cadmium, ont effectivement eu lieu au cours des années 1980 et 1990 grâce à la réduction à la source, comme le prétraitement et les restrictions d'usage des égouts. D'ailleurs, lorsqu'on compare les teneurs en métaux des boues de fosses septiques compostées (Vallée-de-la-Gatineau) avec les valeurs médianes des biosolides, les teneurs de métaux sont approximativement les mêmes, une observation également

rapportée par Perron et Hébert (2007) avec un plus grand nombre de sites.

Tableau S-4. Teneurs en métaux dans 11 échantillons de boues traitées et de biosolides canadiens

Métal (total)	N ^{bre} d'échantillons avec détection (sur 11)	Teneur (mg/kg MS – poids sec)			Critères pour le compost tout usage de catégorie A (CCME, 2005)
		Médiane de tous les échantillons	Médiane des échantillons avec détection	Teneur maximale	
Arsenic (As)	7	1,4	2,6	6,7	13
Cadmium (Cd)	2	<1,0	1,1	1,2	3
Chrome (Cr)	10	18,1	20,3	120	210
Cobalt (Co)	7	2,6	2,9	4,2	34
Cuivre (Cu)	11	271	271	890	400
Plomb (Pb)	9	22,5	24,7	55,5	150
Mercure (Hg)	11	0,68	0,68	3,2	0,8
Molybdène (Mo)	8	1,8	3,5	8,6	5
Nickel (Ni)	9	9,9	10,5	21,1	62
Sélénium (Se)	6	1,3	2,2	3,2	2
Zinc (Zn)	11	331	331	647	700

Note : Les métaux marqués **en gras** ont été détectés dans tous les échantillons de boues traitées et de biosolides. Quelques «boues traitées», suite au traitement, n'avaient pas le statut de biosolides au plan microbien. Voir la note au bas du tableau S-1.

Toutes les valeurs médianes pour les teneurs en métaux des biosolides respectaient les critères de qualité les plus stricts pour l'épandage de compost tout usage du CCME (2005), même si quelques dépassements ont été observés pour le cuivre, le mercure et le molybdène avec certains échantillons de biosolides. Ces données confirment que la réduction à la source des métaux dans le secteur industriel a été un succès, et que la majorité des métaux présents dans les biosolides provient désormais principalement de sources domestiques plutôt que de sources industrielles.

Produits pharmaceutiques, composés alkylphénoliques et substances odorantes

Les analyses pharmaceutiques comprenaient des listes de composés acides positifs et acides négatifs. Au total, les deux listes comptaient 57 composés. Parmi les 57 composés pharmaceutiques analysés, 20 n'ont jamais été détectés dans les boues traitées et les biosolides, comme le montre le **tableau S-5**. De même, le nonylphénol ainsi que quatre composés de musc nitré n'ont jamais été détectés. Les seuils de détection ont été déterminés pour chaque composé dans chaque matrice, et par conséquent il n'y a pas de seuil de détection unique.

Seuls 4 des 57 composés pharmaceutiques (7 %) ont été détectés dans tous les 31 échantillons de boues traitées et de biosolides. Ces quatre composés pharmaceutiques sont le triclocarban, la carbamazépine, la diphenhydramine et le miconazole. Deux composés polycycliques odorants, HHCB et AHTN, ont aussi été détectés dans tous les échantillons de boues traitées et de biosolides. La fréquence d'apparition et les teneurs médianes des composés organiques à analyser sont présentées dans le **tableau S-6**.

Tableau S-5. Composés jamais détectés dans les boues traitées et les biosolides

Composés pharmaceutiques		Substances odorantes et composés alkylphénoliques
Acétaminophène	Pénicilline G	Nonylphénol
Carbadox	Sarafloxacin	Musc moskène
Céfotaxime	Sulfachloropyridazine	Musc tibétène
Clinafloxacin	Sulfadiazine	Musc cétone
Cloxaciline	Sulfadiméthoxine	Musc ambrette
Fluméquine	Sulfadimidine	
Loméfloxacin	Sulfaméthizole	
Norgestimate	Sulfathiazol	
Ormétoprime	Tylosin	
Oxacilline	Warfarine	

Note. Voir la note au bas du tableau S-4 pour la distinction entre «boues traitées» et biosolides.

Tableau S-6. Présence et teneur médiane des composés organiques détectés dans les boues traitées et les biosolides

Composé	Fréquence de détection (%)	Teneur médiane (ng/g MS – matière sèche)	Composé	Fréquence de détection (%)	Teneur médiane (ng/g MS – matière sèche)
HHCB	100 %	3470	Gemfibrozil	52 %	56
Triclocarban	100 %	1930	Triméthoprime	42 %	31,2
AHTN	100 %	1340	Déhydronifédipine	42 %	7
Miconazole	100 %	441	Sulfaméthoxazole	39 %	5,2
Diphénhydramine	100 %	420	Furosémide	32 %	543
Carbamazépine	100 %	66,6	2-hydroxy-ibuprofène	26 %	497
Triclosan	97 %	6085	Enrofloxacin	23 %	22,2
ATII	96 %	255	Octylphénol	18 %	50
Ciprofloxacin	94 %	3610	1,7-Diméthylxanthine	13 %	378
Ofloxacin	87 %	276	Sulfanilamide	13 %	63,1
Bisphénol A	86 %	325	Glibenclamide	13 %	11,5
Azithromycine	84 %	205	Hydrochlorothiazide	10 %	143
Fluoxétine	84 %	53,9	Sulfamérazine	10 %	17,9
Naproxène	81 %	98,1	Virginiamycine	6 %	197
Clarithromycine	74 %	41,8	Digoxine	6 %	192
Thiabendazole	74 %	17,9	Digoxigénine	6 %	128
Érythromycine-H ₂ O	74 %	12,5	Musc xylène	5 %	530
DPMI	73 %	82,5	ADBI	5 %	60
Ibuprofène	68 %	522	Lincomycine	3 %	71,1
Diltiazem	68 %	29,8	Pénicilline V	3 %	59,3
AHDI	64 %	158	Glipizide	3 %	11,4
Caféine	61 %	266	Acide oxolinique	3 %	1,9
Norfloxacin	58 %	558	Roxithromycine	3 %	0,8

Note. Voir la note au bas du tableau S-4 pour la distinction entre «boues traitées» et biosolides.

Bien que 20 composés pharmaceutiques aient été détectés dans plus de 75 % des échantillons de boues d'alimentation, seulement 10 des 57 produits pharmaceutiques (18 %) ont été détectés dans plus de 75 % des échantillons de biosolides susceptibles d'être épandus. L'analyse a révélé une plus grande proportion de composés pharmaceutiques détectés dans les boues d'alimentation lorsqu'elles provenaient de fosses septiques (49 % à la station de la Vallée-de-la-Gatineau) plutôt que d'eaux usées d'un système d'égout municipal.

Comme suite au traitement des boues d'alimentation, un grand nombre de composés pharmaceutiques étaient détectés moins fréquemment. Cela suggère que, de façon générale, les traitements de boues réduisent les teneurs de CIE dans les biosolides résultants, bien que la capacité de réduction des CIE dépende du procédé utilisé. Cependant, la fréquence de détection de substances odorantes est demeurée assez semblable dans les boues d'alimentation et les boues traitées ou les biosolides.

Quelques composés pharmaceutiques (12/57) ont été mesurés à des teneurs supérieures à 1 000 ng/g de matières solides sur base de matière sèche (1 mg/kg MS) dans les boues traitées et les biosolides produits par les stations d'épuration. Le triclosan et le triclocarban (des antibactériens) et la ciprofloxacine (un antibiotique) sont les composés dont la teneur dépassait le plus souvent 1 000 ng/g MS (pour 9 des 11 sites). À quelques sites, les teneurs de triclosan et de ciprofloxacine dans les boues traitées ou les biosolides dépassaient 10 000 ng/g MS. Les substances odorantes HHCB et AHTN ont montré des teneurs médianes supérieures à 1 000 ng/g MS pour 10 et 6 des 11 sites, respectivement. La teneur médiane de bisphénol A dépassait 1 000 ng/g MS dans 3 des 11 sites étudiés.

Une teneur élevée de CIE, comme avec le triclosan, la ciprofloxacine, le BPA, le HHCB et l'AHTN peut être un critère pour déterminer les CIE qui devraient faire l'objet d'une évaluation des risques poussée. Il faut cependant considérer également d'autres critères de sélection, comme la persistance, le potentiel de bioaccumulation et la toxicité, qui sont au moins aussi importants dans l'évaluation des risques.

Plusieurs composés pharmaceutiques (près de 30 % de ceux analysés) n'ont pas été détectés dans les biosolides. Les valeurs fournies au **tableau S-6** pourraient aider les scientifiques à juger si les teneurs des CIE qui continuent d'être détectés après les traitements représentent encore un risque ou non suite à l'épandage.

Dans quatre des 11 sites d'échantillonnage, les procédés de traitement de boues d'alimentation comportaient la production d'effluents liquides secondaires (filtrat de presse de déshydratation, lixiviat de plateforme de compostage, par exemple) ayant des teneurs élevées de certains des composés pharmaceutiques hydrophiles, qui peuvent impliquer un pourcentage significatif de la masse de CIE entrante. Dans quelques cas, le calcul de la masse de composés pharmaceutiques dans le filtrat donnait un résultat supérieur à la masse dans les intrants (par exemple, avec l'ibuprofène et la carbamazépine à Eganville; l'acétaminophène et la déhydronifédipine à Gander). Puisque certains composés dans les boues d'alimentation peuvent être transférés aux effluents secondaires aqueux, la réduction de fréquence de détection des CIE observée dans les boues traitées et les biosolides n'est pas uniquement fonction de l'efficacité d'un traitement à diminuer ou à éliminer les CIE dans l'ensemble du système. À l'exception de la teneur de bisphénol A (BPA) dans le filtrat de la presse de Gander, la masse de BPA dans les lixiviats

représentait entre 1 % et 7 % de la masse de BPA des boues d'alimentation. La masse des substances odorantes dans les effluents secondaires ou dans les lixiviats représentait moins de 1 % de leur masse dans les boues d'alimentation. Comme on pouvait s'y attendre avec des composés hydrophobes, il y a généralement eu une faible perte des substances odorantes et du BPA des boues d'alimentation vers les effluents liquides.

On a observé que le compostage des boues (traitement aérobie) se soldait généralement par une plus grande efficacité d'enlèvement de la plupart des CIE, y compris les composés pharmaceutiques et les substances odorantes. Plusieurs autres composés pharmaceutiques ont été enlevés efficacement en milieu aérobie comparativement au milieu anaérobie. Les composés enlevés de façon efficace en milieu aérobie comptent notamment l'azithromycine, la ciprofloxacine, le miconazole, le triclosan, le triclocarban, la diphénhydramine, le gemfibrozil, le thiabendazole et la carbamazépine. Cependant, quelques produits pharmaceutiques, tels que le naproxène, ont résisté au compostage et, apparemment, augmenté en teneur. À l'inverse, la digestion anaérobie mésophile des boues s'est révélée efficace pour réduire sensiblement les teneurs de naproxène, comme le laissait prévoir la revue de littérature (Hydromantis et coll., 2009). En se basant sur les résultats partiels pour 2 STEP, la digestion anaérobie serait également supérieure au compostage pour réduire la teneur en acétaminophène. En général, cependant, la digestion anaérobie était moins efficace que le compostage pour éliminer les CIE.

Un très petit nombre de composés semblent se prêter à une réduction des teneurs à la fois par traitement biologique aérobie et anaérobie. Il s'agit notamment de la sulfaméthoxazole, de la triméthoprime, du diltiazem et de la caféine. Quelques composés pharmaceutiques détectés semblent difficiles à enlever avec presque tous les procédés évalués. Il s'agit notamment du furosémide (un diurétique), de la carbamazépine (un antiépileptique) et de l'ofloxacine (un antibiotique).

De façon générale, pour les composés analysés à la fois dans cette étude et dans une étude américaine de l'EPA (*Targeted National Sewage Sludge Survey* ou TNSSS), la fréquence de détection et les teneurs mesurées sont semblables. Parmi les neuf composés directement comparables, le ratio des teneurs médianes (selon la TNSSS/la présente étude) se situe entre 0,6 et 2,7. De ces 7 composés, 6 montrent toutefois un ratio supérieur à 1, ce qui indique que les teneurs médianes dans les boues des États-Unis sont légèrement plus élevées que dans les boues et les biosolides canadiens évalués dans cette étude. Pour les deux autres composés pharmaceutiques (triclocarban et ofloxacine), les teneurs moyennes dans les boues américaines dépassent d'un ordre de grandeur celles observées dans les boues et les biosolides analysés dans cette étude. Les teneurs médianes supérieures avec l'étude américaine pourraient être expliquées par une proportion élevée de boues non traitées dans cette étude où le type de traitement des boues n'était pas une considération majeure. Les résultats de la TNSSS peuvent servir d'indicateur général des composés présents dans les boues et les biosolides canadiens, à la différence toutefois que certains composés sont présents dans les échantillons canadiens à des teneurs sensiblement inférieures que dans les échantillons américains.

Des similitudes se dégagent par ailleurs entre les résultats de cette étude terrain et d'autres observations documentées dans la revue de littérature (Hydromantis, 2009). Dans les deux cas, la digestion anaérobie se révèle un bon moyen d'éliminer la sulfaméthoxazole (antibiotique) et le naproxène (anti-inflammatoire non stéroïdien), de même que l'ibuprofène, quoique dans une moindre mesure. Des composés tels que la carbamazépine (antiépileptique), le triclosan et le triclocarban (antimicrobiens), le bisphénol A, et les muscs polycycliques HHCb et AHTN ont

soit résisté à la digestion anaérobie ou ont vu leur teneur augmenter dans les boues traitées. L'efficacité d'autres procédés de traitement de boues ou de biosolides est demeurée incertaine, car peu documentée dans la littérature.

Efficacité globale des procédés à enlever les CIE

Un indicateur a été développé pour évaluer l'efficacité d'enlèvement des composés pharmaceutiques, des composés alkylphénoliques et des substances odorantes, par les divers procédés de traitement des boues. Pour ce faire, on a attribué une cote qui va de 1, pour un composé enlevé à plus de 90 %, jusqu'à 5 pour un composé dont le taux d'enlèvement était supérieur à -50 % (un taux négatif signifie que la masse totale de CIE dans les extrants était supérieure à la masse dans les intrants). En additionnant les cotes individuelles attribuées pour chacun des composés détecté (pointage total), puis en divisant par le nombre de composés détectés par site, on a pu calculer un score moyen pour chaque procédé. Plus le score moyen est bas (c.-à-d. près de 1), plus le procédé est efficace pour enlever les produits pharmaceutiques. Les résultats de cette comparaison sont présentés au **tableau S-7**.

Le **Tableau S-7** montre la capacité globale de certains procédés à réduire la charge de CIE depuis les boues d'alimentation jusqu'aux boues traitées ou aux biosolides. Un score moyen élevé d'implique toutefois pas une remise en cause du procédé, car ces procédés de traitement n'ont été ni conçus ni mis en œuvre spécifiquement pour l'élimination de ces contaminants. Le score moyen d'enlèvement des CIE dans les boues d'alimentation n'est pas non plus le reflet de l'efficacité globale d'une station d'épuration qui comprend plusieurs autres procédés.

Tableau S-7. Efficacité relative des procédés de traitement des boues d'alimentation pour enlever les contaminants d'intérêt émergent visés par l'étude

Municipalité	Procédé de traitement	Pointage total	Nombre de composés	Efficacité d'enlèvement des CIE (score moyen)
Vallée-de-la-Gatineau	Biologique – aérobie (compost)	49	27	1,81
Moncton	Biologique – aérobie (compost)	57	31	1,84
Prince Albert	Biologique – aérobie (compost)	72	29	2,48
Eganville (boues de fosses septiques)	Physique – déshydratation en sac géotextile	85	28	3,04
N-Viro, Halifax	Physico-chimique (stabilisation alcaline)	115	35	3,29
Red Deer	Biologique – digestion anaérobie mésophile	115	34	3,38
Salmon Arm	Biologique – digestion aérobie autotherme	111	32	3,47
Saskatoon	Biologique – digestion anaérobie mésophile	118	34	3,47
Smiths Falls	Physique – séchage thermique	101	27	3,74
Gander	Physique – déshydratation par filtre-pressé	102	27	3,78
Saguenay	Physique – déshydratation par filtre-pressé	108	27	4,00

Note. Voir la note au bas du tableau S-4 pour la distinction entre «boues traitées» et biosolides.

Le compostage est le traitement le plus efficace pour réduire la charge des composés sélectionnés provenant des boues d'alimentation. La digestion anaérobie fonctionne moins bien que le compostage aérobie. Un des résultats les plus surprenants de l'étude est le faible taux d'enlèvement des composés pharmaceutiques par le procédé de digestion aérobie autotherme, contrairement à ce à quoi on aurait pu s'attendre avec un procédé aérobie qui fonctionne à température élevée, ce qui devrait se traduire par des taux d'élimination plus élevés que la

digestion anaérobie. La raison de cette faible performance est incertaine et a été signalée plus loin (section Lacunes dans les connaissances).

La filtration par sac géotextile et la stabilisation alcaline sont les plus efficaces des procédés non biologiques. Les procédés n'employant que la déshydratation des solides ont été les moins efficaces. Toutefois, le faible rendement de ces procédés n'est pas surprenant, car ils ne sont pas conçus pour enlever les CIE, mais plutôt comme dispositifs de séparation physique des solides. La déshydratation peut cependant trouver son utilité dans une chaîne de traitement des boues pour enlever des composés hydrosolubles.

Bonnes pratiques

Les résultats d'échantillonnage jettent un éclairage intéressant sur les différents procédés de traitement et leur capacité à enlever les métaux, les composés pharmaceutiques, les substances odorantes et les composés alkylphénoliques présents dans les boues d'alimentation. Le nombre de stations pour chacun des différents procédés étudié n'a cependant pas été suffisamment élevé pour en tirer des conclusions statistiquement valides. Certains des procédés n'étaient représentés que par un seul site. Il est donc difficile d'affirmer catégoriquement, à partir de cette étude préliminaire, quels procédés devraient être classés comme « meilleures pratiques de gestion ».

Métaux

La plupart des métaux impliqués dans les procédés industriels d'importance (la galvanoplastie ou la finition de surface, par exemple) ont vu leurs teneurs dans les biosolides diminuer de façon importante au cours de deux ou trois dernières décennies. Cette diminution est presque entièrement due aux mesures de réduction à la source ou aux substitutions (par exemple, le remplacement du cadmiage par le placage d'autres métaux). Ces mesures devraient continuer d'être exigées et appliquées. Les deux métaux observés régulièrement à la plus forte teneur dans les biosolides et les boues traitées sont le cuivre et le zinc, qui sont couramment utilisés dans la plomberie en milieu résidentiel, commercial et institutionnel. Si les teneurs dans les biosolides en justifient le coût, il serait possible de réduire les teneurs en ces métaux dans les biosolides en remplaçant les tuyaux et les accessoires de plomberie par d'autres, par exemple ceux fabriqués en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en polyéthylène haute densité (PEHD)

Produits pharmaceutiques, composés alkylphénoliques et substances odorantes

En ce qui concerne l'enlèvement de composés pharmaceutiques des boues d'alimentation, la technologie qui semble être la plus efficace est le compostage, procédé biologique aérobie qui fonctionne à des températures thermophiles (55 °C environ). La digestion anaérobie enlève pour sa part seulement un petit nombre de composés pharmaceutiques, probablement en raison des différents consortiums microbiens présents dans les deux milieux et de l'absence d'oxygène. Si l'évaluation des risques exigeait un plus grand taux d'enlèvement des CIE dans les biosolides, une combinaison de traitements pourrait alors être utilisée comme barrière multiple pour réduire davantage les teneurs finales dans les biosolides. Pour les petites municipalités, le procédé de déshydratation par filtration en sac géotextile pourrait offrir un certain enlèvement des composés pharmaceutiques à faible coût.

Si certains composés pharmaceutiques préoccupants sont difficiles à enlever par les procédés de traitement évalués, il est possible d'envisager d'en empêcher le dépôt préalable dans les boues d'alimentation, en amont. Ce concept préventif pourrait être mis en œuvre par deux changements de conception et d'exploitation dans les STEP. Tout d'abord, il faut savoir que bon nombre des

composés pharmaceutiques sont hydrophobes, et sont donc fixés aux solides du décanteur primaire (boues primaires). Par conséquent, ces matières organiques ne sont pas soumises au traitement biologique aérobie des eaux usées (traitement secondaire) qui aurait pu améliorer l'enlèvement de ces composés. La réduction globale des composés pharmaceutiques pourrait donc être améliorée en supprimant la décantation primaire, comme ce qui existe dans les procédés à aération prolongée (boues activées) et dans les étangs aérés des petites municipalités. Cependant, la mise en œuvre d'une telle pratique représenterait un changement radical dans les modes de conception et d'exploitation actuelles de plusieurs STEP.

Une autre approche consisterait en un pré-traitement des boues primaires, soit par digestion aérobie ou par d'autres traitements tels que l'ozonation, avant de les mélanger avec les boues secondaires. Cela réduirait également les teneurs de composés pharmaceutiques dans les boues d'alimentation. La préozonation des boues combinées (primaires/secondaires) permettrait également une certaine réduction des CIE.

Il est aussi possible, dans une certaine mesure, de réduire à la source les composés pharmaceutiques par des programmes de collecte et par la sensibilisation du public au fait de ne pas jeter les médicaments inutilisés dans les eaux usées via les cabinets de toilettes. La substitution des médicaments semble davantage difficile à mettre en œuvre, étant donné que les patients ont besoin de leurs médicaments. D'autres CIE non médicamenteux, tels que des substances odorantes, des agents tensio-actifs et des antimicrobiens pourraient cependant être substitués par d'autres composés.

Selon leur mode d'action, certains produits pharmaceutiques peuvent être métabolisés dans l'organisme et excrétés dans les urines et d'autres sont excrétés dans les selles. Pour les composés qui sont excrétés dans l'urine, l'utilisation de cabinets de toilette équipés de collecteurs d'urine pourrait limiter les teneurs en composés entrant dans l'effluent d'eaux usées. Un tel changement dans les technologies de substitution serait cependant long à mettre en œuvre dans l'ensemble du pays.

Lacunes dans les connaissances et besoins de recherche

Ce projet a permis d'étudier en détails le potentiel d'enlèvement des CIE par les procédés de traitement des boues et des biosolides couramment utilisés au Canada. L'étude a fourni de précieux renseignements sur le sort des CIE sélectionnés, mais, comme c'est souvent le cas, l'acquisition de nouvelles connaissances a conduit à de nouveaux questionnements. Ci-dessous se trouve une liste de lacunes dans les connaissances et de besoins de recherche révélés par le projet d'échantillonnage et la précédente revue de littérature (Hydromantis, 2009). Ils sont présentés sans ordre d'importance particulier.

La campagne d'échantillonnage portait sur un groupe restreint de composés pharmaceutiques, de substances odorantes et de composés alkylphénoliques. Les contraintes budgétaires ont empêché l'analyse d'autres catégories de CIE, notamment d'autres composés pharmaceutiques, des hormones naturelles et synthétiques et des produits chimiques industriels (esters de phtalates, polybromodiphényls éthers (PBDE) et autres agents retardeurs de flammes, composés organiques perfluorés, alkylphénols éthoxylés, composés d'ammonium quaternaire). On n'a pas non plus analysé des constituants de produits de soins personnels (insectifuges, écrans solaires, parabènes, siloxanes organiques, assouplisseurs de tissu, agents de blanchiment optiques, etc.). Une étude à grande échelle, similaire à la présente étude, pour ces nombreux types de CIE devrait être envisagée dans le but de mieux comprendre le comportement des CIE dans les

procédés de traitement des boues. [Au moment de rédiger ce rapport, Environnement Canada menait autre étude de terrain dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques, pour analyser dans des échantillons d'effluents liquides et solides d'eaux usées une gamme de CIE, dont certains produits pharmaceutiques et produits de soins personnels, des agents ignifuges bromés, des composés organiques perfluorés, des siloxanes de méthyle volatiles, des éthoxylates de nonylphénol, ainsi que 18 métaux (Smythe, 2010).]

La présente étude a donné des résultats inattendus, certains positifs et d'autres moins. Un résultat inattendu a été l'enlèvement d'un certain nombre de CIE organiques par le procédé de déshydratation par filtration en sac géotextile à la station de traitement d'Eganville, en Ontario. La campagne d'échantillonnage comportait un seul site avec ce procédé. D'autres sites utilisant la même technologie devraient être étudiés de la même manière, afin de déterminer si ce procédé représente effectivement un moyen économique permettant un meilleur enlèvement des CIE comparativement à d'autres procédés de déshydratation à l'étude. Les tests supplémentaires devraient tenir compte, entre autres facteurs, du type de solides entrants (boues primaires, boues de fosses septiques, boues activées), de la répartition des CIE dans le filtrat des sacs, des effets possibles du gel et du dégel, ainsi que du temps de rétention et de l'éventuelle activité microbienne aérobie/anaérobie dans les sacs géotextiles.

La digestion aérobie autotherme s'est révélée moins efficace qu'on aurait pu prévoir pour l'enlèvement des produits pharmaceutiques, des substances odorantes et des composés alkylphénoliques. Il s'agit d'un procédé aérobie qui fonctionne à température élevée, ce qui aurait dû se traduire par des taux d'élimination plus rapides. En effet, la digestion aérobie thermophile adiabatique (DATA) est similaire au compostage qui sont tous deux des procédés aérobie où les températures atteignent des conditions thermophiles. Il est possible que le temps d'exposition à des températures élevées (environ 55 °C), relativement court lors de la phase thermophile de l'ATAD, réduise le nombre et la variété de microorganismes capables de dégrader les CIE. D'autres études avec ce type de procédé devraient être entreprises afin d'expliquer la différence avec le compostage.

On a observé que la production de biosolides par compostage des boues se traduit généralement par une plus grande efficacité d'enlèvement de la plupart des CIE. Cependant, quelques composés pharmaceutiques, tels que le naproxène, résistent au compostage et se concentrent davantage. La digestion anaérobie mésophile des boues s'est par contre révélée efficace pour diminuer sensiblement les teneurs de naproxène, mais a connu moins de succès pour l'enlèvement global des CIE. Il est possible qu'une combinaison de procédés, par exemple une digestion anaérobie, suivie d'une déshydratation et d'un compostage, offre un moyen d'enlever davantage de CIE, y compris certains de ceux qui n'ont pas été analysés. Il serait utile d'étudier, dans un projet pilote ou à grande échelle dans des installations existantes, cette chaîne de traitements pour déterminer les avantages possibles de différentes conditions redox pour enlever ou détruire les CIE.

En général, les traitements biologiques des boues d'alimentation ont été plus efficaces à enlever les CIE que les procédés physiques et physico-chimiques. Cependant, parmi les procédés physico-chimiques le procédé de stabilisation alcaline N-Viro semblait offrir les meilleures performances. La campagne d'échantillonnage comportait cependant un seul site avec ce procédé (le site d'Halifax). La station de Moncton, au Nouveau-Brunswick, utilisait des boues partiellement stabilisés à la chaux comme matière première pour le compostage, mais l'accent était mis sur le compostage plutôt que sur la stabilisation à la chaux. Il serait donc souhaitable

d'entreprendre d'autres analyses pour les procédés de stabilisation alcaline à la chaux pour documenter l'enlèvement des CIE.

Le séchage thermique (pelletisation) ne s'est pas révélé efficace pour réduire les teneurs en CIE, ce qui n'est pas étonnant, puisque le procédé n'a pas été conçu à cet effet. Il pourrait être possible, toutefois, de modifier les conditions d'opération du procédé pour permettre une meilleure décomposition thermique ou chimique des CIE.

Finalement, il est très important d'évaluer si les teneurs de produits pharmaceutiques et d'autres CIE mesurées dans les biosolides épandus présentent un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement. L'EPA procède actuellement à de telles évaluations des risques (Hébert, 2010). Les résultats de telles études aideront à déterminer s'il est nécessaire de réduire encore plus les teneurs de certains composés.

Des études menées par Carballa et coll. (2007b) ont indiqué que la préozonation des boues d'alimentation destinées au procédé de digestion anaérobie permettait généralement d'améliorer l'enlèvement de plusieurs catégories de CIE. Étant donné qu'il est peu probable de réduire à la source les apports de produits pharmaceutiques aux stations d'épuration des eaux usées, il faudrait envisager d'améliorer l'enlèvement de ces composés par la préozonation ou par d'autres procédés lors du traitement des boues. Cela pour les boues destinées à tous types de procédés et non pas uniquement les boues destinées à la digestion anaérobie.

Conclusions

Les conclusions qui suivent se rapportent aux contaminants d'intérêt émergent ciblés par l'étude.

1. Les contaminants métalliques présents dans les biosolides ne sont en général pas affectés par le procédé de traitement des boues, contrairement aux contaminants organiques. Le mercure fait peut-être exception, puisqu'il peut être activé biologiquement dans les milieux anaérobies, puis faire l'objet de pertes par désorption ou volatilisation.
2. Toutes les teneurs médianes en métaux dans les boues et les biosolides respectent les critères de qualité les plus stricts pour l'épandage, même si des dépassements ont été observés avec quelques échantillons de biosolides dans les cas du cuivre, du mercure et du molybdène.
3. Les teneurs de métaux dans les boues de fosses septiques et les biosolides étaient très similaires, ce qui indique que les métaux dans les biosolides proviennent dorénavant principalement de sources domestiques plutôt qu'industrielles.
4. Bien que 24 des 71 composés pharmaceutiques, composés alkylphénoliques et substances odorantes aient été détectés dans plus de 75 % des échantillons de boues d'alimentation des procédés de traitement, seulement 14 (20 %) de ces composés ont été détectés dans plus de 75 % des échantillons de biosolides résultant et susceptibles d'être épandus.
5. Les antibactériens triclosan et triclocarban, l'antibiotique ciprofloxacine et la substance odorante HHCB étaient les composés les plus fréquemment détectés (sur au moins 9 des 11 sites) à une valeur dépassant 1 000 ng/g MS (base de matière sèche).
6. La fréquence de détection et les teneurs mesurées sont généralement comparables à celles des composés correspondants de l'enquête nationale américaine de l'EPA sur les boues d'épuration (TNSSS).
7. Les procédés de stabilisation des boues d'alimentation utilisant un traitement biologique sont plus efficaces pour diminuer les teneurs de CIE organiques que les procédés non biologiques.

8. Parmi les procédés de traitement biologique, le procédé de compostage (aérobie) semble globalement plus efficace pour l'enlèvement des CIE (en fréquence de détection et en teneur), comparativement à la digestion anaérobie mésophile.
9. Des composés tels que la ciprofloxacine, le miconazole, le triclosan, le gemfibrozil, le thiabendazole, le carbamazépine, le bisphénol A, ainsi que les substances odorantes HHCB, AHTN, AHDI et ATII, sont réduits de façon efficace par le compostage, mais pas par la digestion anaérobie.
10. Le procédé de digestion aérobie autotherme était beaucoup moins efficace dans la réduction des teneurs en CIE que le compostage ou la digestion anaérobie mésophile.
11. Le sac filtrant en géotextile, utilisé pour déshydrater des boues municipales et de fosses septiques, a permis de réduire le nombre de CIE présents (détectés), bien que le mécanisme en cause soit incertain.
12. Parmi les procédés physiques et physico-chimiques, le sac filtrant en géotextile et la stabilisation alcaline N-Viro semblaient offrir les meilleures performances pour l'enlèvement des CIE.
13. Le séchage thermique (pelletisation) employé seul ne s'est pas révélé efficace pour réduire les teneurs en CIE, ce qui n'est pas étonnant, puisque le procédé n'a pas été conçu à cet effet.
14. Les procédés de déshydratation mécanique des boues d'alimentation employés seuls sont parmi les moins efficaces pour réduire les teneurs en CIE.
15. Quelques composés pharmaceutiques dont la sulfaméthoxazole, la triméthoprime, la caféine et le diltiazem semblent facilement enlevés par traitement biologique, qu'il soit aérobie ou anaérobie.
16. Quelques composés pharmaceutiques détectés semblent difficiles à enlever, peu importe le procédé. Il s'agit notamment du diurétique furosémide, de l'antiépileptique carbamazépine, et de l'antibiotique ofloxacine.
17. La teneur de naproxène semble augmenter sensiblement lors du compostage aérobie, peut-être en raison de la biotransformation d'autres composés analogues. Il semble enlevé plus facilement par digestion anaérobie.
18. Bien que de nombreux CIE restent physiquement associés à la phase solide des boues ou des biosolides, certains composés peuvent s'échapper dans les effluents liquides secondaires (filtrat de déshydratation, lixiviat, surnageant du digesteur, par exemple). Il s'agit notamment du furosémide, de l'ibuprofène et du 2-hydroxy-ibuprofène, du naproxène, de l'acétaminophène, de la caféine, de la carbamazépine, de la clarithromycine, de la déhydronifédipine, de l'érythromycine-H₂O, de la sulfaméthoxazole et du triméthoprime.
19. Les effluents liquides secondaires retiennent cependant moins de 1 % de la masse des substances odorantes des boues d'alimentation, et de 1 % à 6 % de la masse de bisphénol A.
20. Une combinaison de procédés (par ex. : digestion anaérobie + déshydratation + compostage, comme à Prince Albert; stabilisation à la chaux + compostage, comme à Moncton) permet les plus forts taux d'enlèvement de plusieurs CIE.
21. L'efficacité de l'enlèvement des CIE par digestion anaérobie tel qu'observé dans cette étude terrain est comparable aux résultats rapportés dans la littérature technique. Cependant, les données publiées au sujet de l'efficacité d'autres procédés quant à l'enlèvement des CIE sont rares.
22. Les teneurs de CIE mesurées dans les boues traitées et les biosolides dans le cadre de cette campagne d'échantillonnage ne peuvent être utilisées seules, et sans méthode appropriée d'évaluation, pour évaluer les risques pour la santé humaine ou

l'environnement résultant de l'épandage de biosolides, de la végétalisation de sites dégradés et de la production d'amendements de sols commerciaux.

Recommandations

1. Il convient de mener des évaluations de risques pour déterminer si les CIE comportent des risques pour la santé humaine ou l'environnement lorsqu'ils se retrouvent sur des sols amendés au moyen de biosolides. Selon la fréquence de détection et les teneurs observées dans les boues traitées et les biosolides, les composés susceptibles de faire partie d'une première évaluation des risques sont le triclosan et le triclocarban, la ciprofloxacine, les substances odorantes HHCB et AHTN, ainsi que le bisphénol A. Cependant d'autres facteurs de risque, tels que la persistance, le potentiel de bioaccumulation et la toxicité doivent également être considérés.
2. Il faudrait aussi réaliser une recherche à grande échelle, similaire à la présente étude, pour plusieurs autres types de CIE. Il s'agit d'autres catégories de composés pharmaceutiques, d'hormones naturelles et synthétiques, de produits chimiques industriels (esters de phtalates, agents ignifuges bromés (PBDE), de composés organiques perfluorés, alkylphénols éthoxylés, de composés d'ammonium quaternaire, ainsi que de produits de soins personnels (insectifuges, écrans solaires, parabènes, siloxanes organiques, assouplisseurs de tissus, agents de blanchiment optiques, etc.). Cela permettrait de mieux comprendre le comportement des CIE dans les procédés de traitement des boues.
3. D'autres stations utilisant la filtration en sacs géotextiles devraient être évaluées de manière similaire afin de déterminer si le procédé de déshydratation représente réellement un moyen économique et efficace pour enlever certains CIE. Les tests supplémentaires devraient tenir compte, entre autres facteurs, du type d'intrants (boues primaires, boues de fosses septiques, boues activées résiduelles), de l'enlèvement des CIE à même le filtrat des sacs, des effets possibles du gel et du dégel, ainsi que du temps de rétention dans les sacs géotextiles.
4. Il faudrait procéder à un échantillonnage sur d'autres stations employant le procédé de digestion aérobie autotherme. Cela afin de déterminer si la faible efficacité d'enlèvement des produits pharmaceutiques, des substances odorantes et des composés alkylphénoliques observée sur un site, par rapport à d'autres procédés aérobies tels que le compostage, était un événement isolé, ou si elle est représentative.
5. Une étude portant sur la possibilité de combiner divers procédés (par ex. : digestion anaérobie suivie de déshydratation et de compostage; stabilisation alcaline/à la chaux suivie de compostage), dans un projet pilote ou à grande échelle, serait souhaitable pour déterminer les avantages possibles de différentes conditions redox pour réduire les teneurs en CIE. Une telle étude pourrait également porter sur d'autres procédés qui n'ont pas été évalués lors de cette campagne.
6. Étant donné que cette étude ne recense qu'un seul procédé de stabilisation alcaline à la chaux, et puisque ce procédé semblait offrir les meilleures performances pour l'enlèvement des CIE parmi tous les procédés physiques et physico-chimiques, des analyses supplémentaires devraient être réalisées pour mieux documenter l'enlèvement des CIE par ce type de procédé.
7. Des études portant sur le prétraitement des boues d'alimentation, notamment par ozonation, devraient être réalisées pour déterminer le potentiel et le rapport coût-bénéfice d'une telle méthode quant à l'amélioration globale des taux d'enlèvement des CIE.
8. Les données obtenues par la présente étude et par d'autres études similaires devraient être transmises aux intervenants appropriés (ministères et sociétés d'état, fédérales et

provinciales impliqués en réglementation, municipalités et chercheurs universitaires) aux fins d'évaluation des risques.

Le rapport complet de cette étude a été publié en anglais sous le titre *Emerging substances of concern in biosolids : concentrations and effects of treatment process – Final report – Field sampling program*. Il est disponible en ligne sur le site internet du CCME.