OPTIONS POUR AMÉLIORER L'ÉLIMINATION ET LA RÉCUPÉRATION DES NUTRIMENTS

DANS LES EAUX USÉES MUNICIPALES AU CANADA

JAN OLESZKIEWICZ, UNIVERSITÉ DU MANITOBA

Recherche effectuée de 2013 à 2015

Réseau canadien de l'eau

OPTIONS POUR AMÉLIORER L'ÉLIMINATION ET LA RÉCUPÉRATION DES NUTRIMENTS

DANS LES EAUX USÉES MUNICIPALES AU CANADA

JAN OLESZKIEWICZ, UNIVERSITÉ DU MANITOBA

Recherche effectuée de 2013 à 2015

POURQUOI AVONS-NOUS RÉALISÉ CETTE RECHERCHE?

Au Canada, les eaux usées municipales produites par une population en croissance sont lourdement chargées en nutriments, notamment de l'azote (N) et du phosphore (P). Les connaissances scientifiques approfondies quant aux effets néfastes d'une charge excessive de nutriments dans un bassin versant et la sensibilisation accrue du public à cet égard forcent les municipalités à introduire des technologies de traitement ou à améliorer les procédés existants afin d'éliminer ces nutriments des eaux usées.

Les procédés classiques d'élimination des nutriments sont pour la plupart très énergivores ou requièrent de grandes quantités de produits chimiques donnant lieu à des émissions élevées de gaz à effet de serre. Les municipalités cherchent des procédés qui permettent l'élimination des nutriments tout en ayant des incidences sociales, environnementales et financières minimales — soit une approche dite du « triple résultat ».

Au cours des 20 dernières années, des chercheurs et des spécialistes du monde entier ont apporté de nombreuses améliorations aux procédés traditionnels d'élimination des nutriments. Ils ont développé de nouvelles technologies, notamment des procédés d'élimination de l'azote qui requièrent beaucoup moins d'énergie et des procédés de récupération et de réutilisation de l'eau, des nutriments et de l'énergie à partir des eaux usées. Cependant, l'adoption de ces nouvelles technologies varie selon la taille et la localisation des municipalités. En outre, certaines technologies n'ont pas fait l'objet d'essais dans un contexte climatique canadien, et il y a donc des lacunes de connaissances en matière de pratiques et de réglementation.

Ce projet de 2013-2015 visait à évaluer et à interpréter les recherches et pratiques actuelles concernant l'élimination et la récupération des nutriments afin de fournir une base de connaissances pour la conception, l'exploitation et la réglementation des usines de traitement des eaux usées (UTEU) municipales au Canada. Afin de déterminer la gamme des options pour éliminer, récupérer et réutiliser les nutriments, et afin d'analyser dans quelle mesure ces options peuvent être utilisées dans des conditions canadiennes, l'équipe de recherche a étudié ce qui suit :

- Les limites réalisables d'élimination des nutriments
- Les types et les configurations des systèmes de traitement utilisés au Canada, incluant les recommandations de mises à niveau
- Un sondage, par province, des facteurs réglementaires concernant la qualité de l'effluent
- La récupération des nutriments potentielle et réalisable en pratique dans des usines traditionnelles et des usines de pointe, y compris le retour sur investissement
- L'influence des facteurs climatiques dans le choix du procédé
- Les coûts opérationnels et les dépenses en immobilisations associés aux mises à niveau et aux nouvelles usines
- Les besoins en recherche et développement afin de mettre en pratique ces avancées

COMMENT LA RECHERCHE A-T-ELLE ÉTÉ RÉALISÉE?

1) ANALYSE DOCUMENTAIRE

Nous avons analysé plus de 400 articles, rapports et manuels sur l'élimination, la récupération et la réutilisation des nutriments des eaux usées municipales, remontant jusqu'en 2004, sauf lorsque l'information publiée avant cette date était jugée nécessaire. Nous avons ensuite résumé les conclusions sur les recherches et les pratiques, en décrivant les procédés de pointe et les tendances qui changeront bientôt la donne pour les UTEU.

2) SONDAGE EN LIGNE

Les questions du sondage concernant les UTEU portaient sur l'exploitation et les obstacles empêchant l'élimination, la récupération et la réutilisation des nutriments. Nous avons envoyé le sondage à 150 municipalités et 69 d'entre elles y ont répondu. Le sondage a fourni un portrait des paramètres économiques, réglementaires et opérationnels du traitement des eaux usées municipales au Canada.

3) ENTREVUES D'EXPERTS

Afin de bien cerner le contexte canadien de la pratique à la réglementation, nous avons interviewé des experts clés, dont des gestionnaires et opérateurs d'UTEU, des experts-conseils, des fournisseurs de technologies, des responsables de la réglementation et des universitaires reconnus. Ces entretiens en profondeur ont permis de sonder les opinions des divers intervenants concernant les

éléments de motivation, les obstacles, les lacunes de la recherche et l'avenir de l'élimination, de la récupération et de la réutilisation des nutriments au Canada. Ils nous ont aussi permis de recueillir plus de renseignements sur les procédés et leur rendement.

QUELS ONT ÉTÉ LES RÉSULTATS?

Les niveaux de traitement obtenus dans les UTEU au Canada peuvent être très variés, étant donné les différences dans les réglementations provinciales et les degrés divers de sensibilité des eaux réceptrices. Les UTEU côtières en Colombie-Britannique (C.-B.) et dans les Maritimes ne procèdent habituellement pas à l'élimination des nutriments. Ailleurs au Canada, on peut classer les systèmes de traitement en trois catégories :

ACRONYMES :

- Phosphore total (PT)
- Azote total (NT)
- Azote ammoniacal total (AAT)
- Précipitation chimique (Préc. chimique)
- Élimination biologique des nutriments (EBN)
- Boues activées classiques-aération prolongée (BAC-AP)
- Usine de traitement des eaux usées (UTEU)
- Carbone (C)
- Nitrification et dénitrification simultanées (NDS)

1. À la grandeur du pays, de nombreuses petites collectivités de moins de 3 000 habitants utilisent des systèmes de bassins d'épuration des eaux usées, souvent sans élimination d'azote ou de phosphore.
2. Dans l'Est du Canada, les municipalités utilisent généralement les boues activées classiques avec aération prolongée (BAC AP) pour éliminer les polluants organiques et oxyder l'azote ammoniacal en azote des nitrates. Certaines usines éliminent l'azote des nitrates par des procédés de nitrification et dénitrification simultanées (NDS). La plupart des usines éliminent aussi le phosphore, certaines à de faibles concentrations (c.-à-d. à moins de 0,3 mg PT/L) par précipitation chimique.
3. Dans l'Ouest du Canada, incluant les Prairies et le centre de la C.-B., les municipalités utilisent généralement des procédés d'élimination biologique des nutriments (EBN) pour éliminer l'azote et le phosphore, généralement à des concentrations de 15 mg NT/L et de 1 mg PT/L.

Aucune réponse précise n'a été trouvée quant à savoir quelle approche de la précipitation chimique ou de l'EBMN était la meilleure pour éliminer le phosphore. Ces deux procédés, quand ils sont bien conçus et bien réalisés au Canada, ont démontré des niveaux de fiabilité comparables et des concentrations de PT de 0,5 mg PT/L dans l'effluent. Cette concentration peut être davantage réduite en incorporant la filtration tertiaire à ces procédés.

La précipitation chimique est très précise et raisonnablement simple à contrôler, ce qui réduit les coûts d'investissement initiaux. Cependant les coûts d'exploitation sont plus élevés, surtout à cause de la hausse des prix du marché des produits chimiques qu'il faut transporter et entreposer. Les procédés d'EBN ont des coûts opérationnels inférieurs à long terme et ils dépendent moins des fluctuations des prix des produits chimiques. Les procédés d'EBN fonctionnent mieux avec des eaux usées riches en matière organique (une source de carbone pour les bactéries), mais ils nécessitent de plus gros réservoirs et des opérateurs plus expérimentés. L'enlèvement de l'azote des nitrates devrait aussi être fait pour assurer une déphosphatation biologique stable.

Puisqu'il n'y a pas de justification universelle pour le choix de l'élimination du phosphore par voie chimique ou biologique, le choix du procédé devrait se baser sur les conditions locales, y compris la capacité actuelle des réservoirs, les caractéristiques des eaux usées, la disponibilité des produits chimiques, les options de gestion des biosolides et l'empreinte carbone à long terme. Souvent, la meilleure solution à long terme pour obtenir des concentrations de phosphore inférieures à 0,5 mg PT/L est de combiner la précipitation chimique et l'EBN. L'EBN élimine la majorité du phosphore, tandis que le reste est retiré par précipitation chimique, ce qui permet de fortement réduire la quantité de produits chimiques utilisés et les coûts connexes.

Un autre facteur qui influence le choix du procédé d'élimination du phosphore (chimique ou biologique) est la forme du phosphore éliminé. La précipitation chimique produit des phosphates qui sont fortement liés à des métaux (comme le fer, l'aluminium, le calcium) et qui peuvent ne pas être biodisponibles lorsqu'épandus sur les terres agricoles. La récupération complète du phosphore peut uniquement se faire en produisant des cendres par incinération. Dans les procédés d'EBN, le phosphore est emprisonné dans des cellules bactériennes; il peut facilement être extrait et récupéré plus tard, et il est pleinement biodisponible lors de l'épandage terrestre.

LIMITES D'ÉLIMINATION DES NUTRIMENTS

Dans les zones écologiquement vulnérables où il importe de réduire le rejet de nutriments, les UTEU sont maintenant munies de divers processus de polissage qui ont tous pour but d'éliminer les solides en suspension des eaux usées traitées. Les plus populaires de ces processus de polissage sont les filtres à sable, qui incluent souvent des sels de fer ou d'aluminium pour éliminer davantage de phosphore soluble sur le filtre. Il est aussi possible d'ajouter du méthanol aux filtres pour aider à la croissance bactérienne et faciliter l'élimination de l'azote des nitrates (c.-à-d. la post-dénitrification). Avec le post-traitement et le meilleur procédé de séparation des

solides (comme une membrane d'ultrafiltration et l'osmose inverse), la limite actuelle d'élimination des nutriments réalisable avec cette technologie est 0,01 mg PT/L et moins de 3 mg NT/L.

Puisque l'azote est éliminé de façon biologique, la plus faible concentration possible de NT dans l'effluent dépend principalement de la présence dans les eaux usées brutes de fractions azotées organiques solubles et non biodégradables de NT, qui aboutissent telles quelles dans l'effluent. Le tableau 1 illustre des exemples d'élimination possible de PT, d'azote ammoniacal total (AAT) et de NT.

L'élimination de nutriments à de très faibles concentrations s'est révélée coûteuse comparativement au traitement classique. L'obtention de concentrations dans l'effluent inférieures à 0,3 mg PT/L et à 5 mg NT/L triple pratiquement les coûts d'exploitation par traitement classique sans procédé d'élimination des nutriments. Ce coût est à nouveau doublé lorsque le traitement vise à réduire les concentrations à 0,01 mg P/L et 2 mg N/L. Cela se traduit par une valeur actuelle nette de 200 $ US/kg pour l'élimination de 1 kg de PT à une concentration dans l'effluent de 1 mg/L, pour une UTEU servant une population de 150 000 habitants. Pour faire passer l'élimination de 1 kg de phosphore de 1 mg/L à 0,01 mg/L dans l'effluent, cela coûterait 560 $ US de plus par kilogramme de phosphore.

PROCÉDÉ	PT mg P/L	AAT mg N/L	NT mg N/L
BAC AP	5	< 3	25
BAC AP + NDS + PREC. CHIM.	0,3	< 1	< 7
EBN	< 0,5	< 1	< 7
BAC AP + NDS + PREC. CHIM. + FILTRE	< 0,1	< 1	< 7
EBN + POST-DÉNITRIFICATION + PREC. CHIM. + MEMBRANE D'ULTRAFILTRATION	0,01	< 1	< 3

Tableau 1. Élimination possible du phosphore total, de l'azote ammoniacal total et de l'azote total par diverses configurations de procédés.

Puisque les nutriments rejetés dans les sources ponctuelles d'eaux usées municipales constituent seulement de 5 % à 20 % de la charge totale de nutriments dans le bassin versant, c'est là un prix élevé à payer pour une réduction supplémentaire relativement mince de la charge dans le bassin récepteur. Aux États-Unis et en Ontario, les partenariats de bassins versants ont démontré que le coût par kilogramme d'azote ou de phosphore éliminé du bassin versant par des pratiques agricoles axées sur la conservation était de 7 à 10 fois inférieur au coût d'élimination des nutriments à de très faibles concentrations dans les eaux usées municipales[2,3].

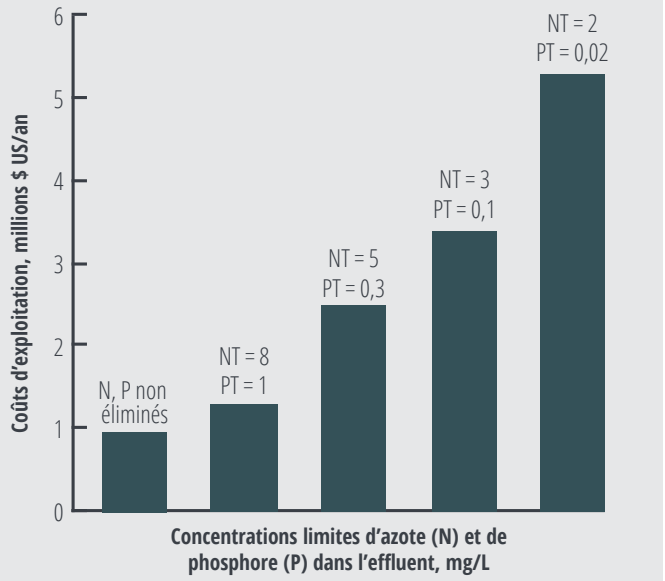
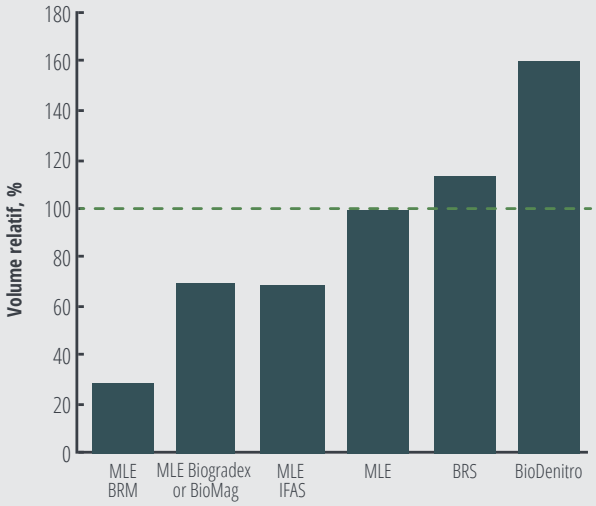


Figure 1. Coûts annuels d'exploitation pour l'élimination des nutriments dans une UTEU de 40 ML/j selon des exigences croissantes en matière de qualité des rejets (d'après Falk et coll., 2013)

PROCHAINES ÉTAPES

Les UTEU des municipalités en expansion disposent rarement de l'espace requis pour installer des technologies d'élimination des nutriments ou pour accroître leur capacité. Les nouveaux concepts retiennent davantage de biomasse dans le système existant, ce qui permet d'obtenir des taux supérieurs d'élimination par m^3 de réacteur (figure 2). Cela peut être facilité par l'utilisation du dégazage sous vide de la liqueur mixte (Biogradex), ce qui permet l'élimination adéquate de NT tout en augmentant la concentration de biomasse. Les bioréacteurs à membrane (BRM), qui retiennent la biomasse avec une membrane plutôt que par décantation dans un clarificateur, permettent jusqu'à 75 % de réduction du volume requis, comparativement à un procédé classique d'élimination de l'azote comme le système modifié Ludzack-Ettinger. Toutefois, malgré des améliorations, le procédé demeure coûteux et énergivore, car les membranes doivent être changées tous les huit ans.

Le procédé IFAS (integrated fixed film activated sludge) de boues activées à culture fixée combine les éléments de biomasse en suspension et de biofilm. Il s'agit essentiellement d'un système d'EBN auquel on ajoute un support plastique qui fournit une surface pour la croissance du biofilm et qui permet une réduction du volume jusqu'à 30 %. Même si les coûts additionnels de l'achat du support plastique sont comparables aux coûts de construction de réservoirs additionnels, le procédé IFAS est souvent envisagé pour des usines sans contrainte d'espace, étant donné sa fiabilité supérieure pendant les changements rapides de conditions opérationnelles, comme des baisses de température ou des débits par temps pluvieux.



NOTE :

MLE —Méthode Ludzack-Ettinger modifiée, le plus simple procédé d'élimination de l'azote avec des réservoirs distincts de nitrification et dénitrification; BRM - bioréacteur à membrane, on utilise une filtration membranaire au lieu de clarificateurs finaux; Biogradex et Biomag — modification du procédé améliorant la décantation dans les clarificateurs finaux; IFAS — boues activées à culture fixée, ce processus utilise simultanément la croissance bactérienne en suspension et sur un support plastique; BRS — bioréacteur séquentiel, étant donné l'alternance des conditions opérationnelles, le procédé combine toutes les zones du réacteur et le clarificateur final dans un même réservoir; BioDenitro — exemple d'un procédé classique de boues activées avec nitrification et dénitrification simultanées (BAC + NDS)

Figure 2. Volume relatif pour divers procédés d'élimination de l'azote

Le deuxième groupe des nouveaux procédés est celui des procédés de boues granulaires aérobies (BGA). Six usines BGA à grande échelle aux Pays-Bas, en Pologne, au Portugal et en Afrique du Sud utilisent une configuration spécifique du réacteur hydraulique et un traitement séquentiel des lots pour créer et maintenir des granules composés de bactéries présentes dans le procédé classique d'EBN. La distribution spécifique des différents groupes de bactéries au sein des granules permet d'éliminer simultanément le phosphore et l'azote dans un même réservoir aéré. La biomasse granulaire se dépose en quelques minutes, ce qui réduit significativement le volume comparativement à la biomasse floconneuse traditionnelle, pour laquelle il faut utiliser de grands clarificateurs secondaires. Les BGA permettent aussi de réduire de 50 % l'énergie électrique requise puisqu'il faut moins d'aération pour oxyder une unité de DCO (demande chimique en oxygène). Un des principaux problèmes ralentissant la mise en application des BGA en Amérique du Nord est le manque de mesures explicites du rendement permettant de concevoir des réacteurs à grande échelle qui favorisent la granulation, surtout pour la mise à niveau d'usines existantes à débit continu.

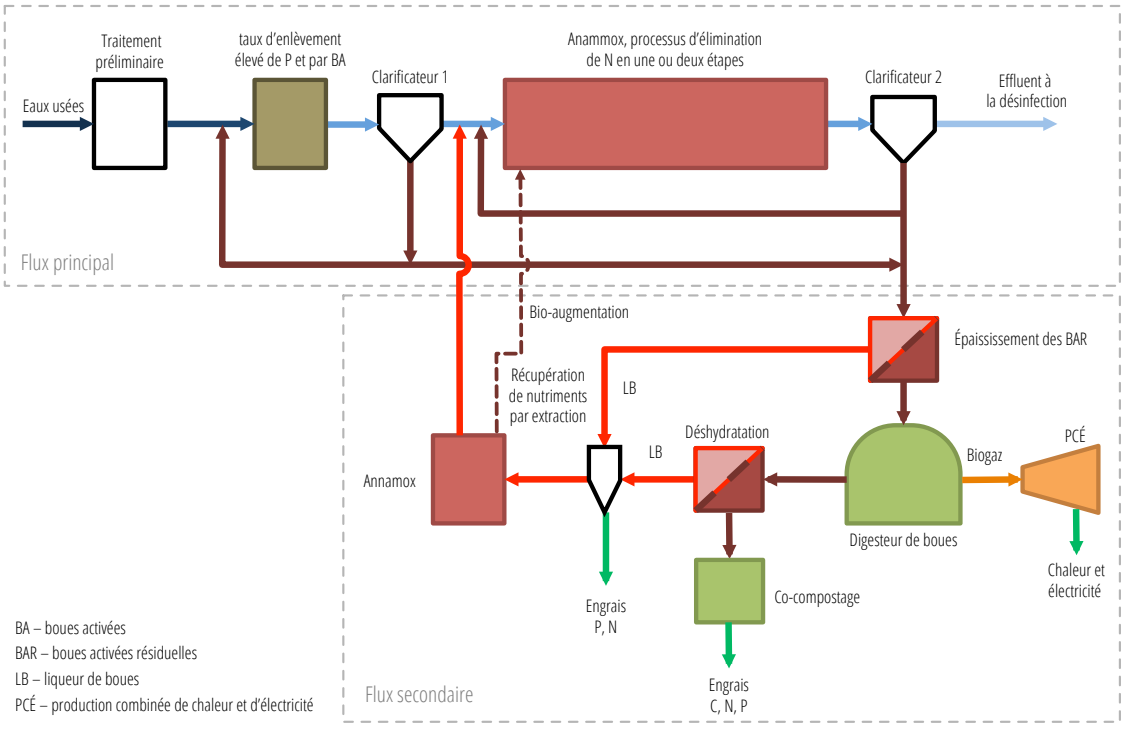


Figure 3. Diagramme des procédés dans une UTEU autosuffisante sur le plan énergétique (d'après Schaubroeck et coll., 2015).

RÉCUPÉRATION ET RÉUTILISATION

L'intérêt économique est l'un des plus importants facteurs incitant à la récupération des nutriments dans les eaux usées. Avec une population de bientôt 36 millions d'habitants, on estime qu'environ 43 000 tonnes de phosphore seront rejetées annuellement dans les eaux usées municipales du Canada. La récupération de cette quantité de phosphore réduirait de près de 1 million de tonnes les émissions de gaz à effet de serre et pourrait générer une source de revenus qui compenserait les coûts de l'élimination des nutriments.

De nombreuses UTEU doivent respecter la réglementation quant aux limites de phosphore dans leur effluent et elles utilisent des produits chimiques ferriques pour éviter des problèmes d'entartrage dans le flux d'eau à traiter. Dans ces conditions, la plupart du temps le calcul économique penche en faveur d'une récupération du phosphore grâce au magnésium plutôt que par précipitation ferrique. L'usine de Saskatoon (capacité de 120 000 m^3/j) utilise le procédé Ostara Pearl — une technologie canadienne, pour produire 250 tonnes/an de struvite de grande qualité utilisée comme engrais. Le rendement du capital investi dans 11 usines d'Amérique du Nord qui récupèrent actuellement le phosphore à partir des boues activées ou de la liqueur de boues digérées en anaérobiose varie de 7 à 14 ans et il dépend de la gravité initiale de l'entartrage, de l'amélioration du niveau de déshydratation des boues et de l'incidence de la récupération du phosphore sur la stabilisation de la concentration du phosphore dans l'effluent.

Figure 4. Comparaison des propriétés de décantation des boues granulaires aérobies et des boues activées. Photo : T. Devlin, Université du Manitoba

Deux approches de la récupération du phosphore sont présentées à la figure 5. Seulement 40 à 45 % de la charge de phosphore arrivant dans les eaux usées brutes peut être récupérée à partir des boues activées ou de la liqueur de déshydratation de boues digérées en anaérobiose. À partir des cendres, la récupération du phosphore peut être de presque 90 %. Cependant, cette méthode n'est pas utilisée à grande échelle à cause des puissants produits chimiques requis pour libérer le phosphore des cendres, ce qui rend le procédé non rentable au prix actuel des engrais. Par contre, la récupération à partir de la liqueur de boues est relativement simple et fournit un produit à des prix compétitifs. La figure 6 illustre les formes potentielles de struvite obtenues dans les systèmes récupérant le phosphore à partir de boues digérées en anaérobiose.

S'il y a de plus en plus d'installations qui récupèrent le phosphore, la récupération d'azote ne se fait que dans quelques usines de l'Union européenne. La récupération d'azote n'est rentable que dans certaines conditions, comme lorsque l'ammoniac récupéré est immédiatement utilisé sur place. Autrement, les coûts unitaires combinés de la production d'ammoniac et de son élimination subséquente des eaux usées à l'aide d'un procédé Anammox sont nettement inférieurs au coût unitaire de récupération de l'ammoniac, ce qui rend non rentable la récupération de l'azote.

La façon la plus simple et la plus courante de réutiliser les nutriments est d'épandre sur les terres agricoles les biosolides générés pendant le traitement des eaux usées. Cependant, étant donné le manque de renseignements scientifiques concernant l'impact potentiel des contaminants d'intérêt émergent, la population se soucie de plus de plus en plus de la qualité de ces solides. Conséquence de l'étalement urbain croissant, le public exige aussi des pratiques agricoles non odorantes. En outre, des recherches plus approfondies sont nécessaires sur la disponibilité utile pour les végétaux du phosphore et de l'azote dans les biosolides, surtout les biosolides provenant d'UTEU qui ont recours à la précipitation chimique plutôt qu'à l'élimination biologique du phosphore.

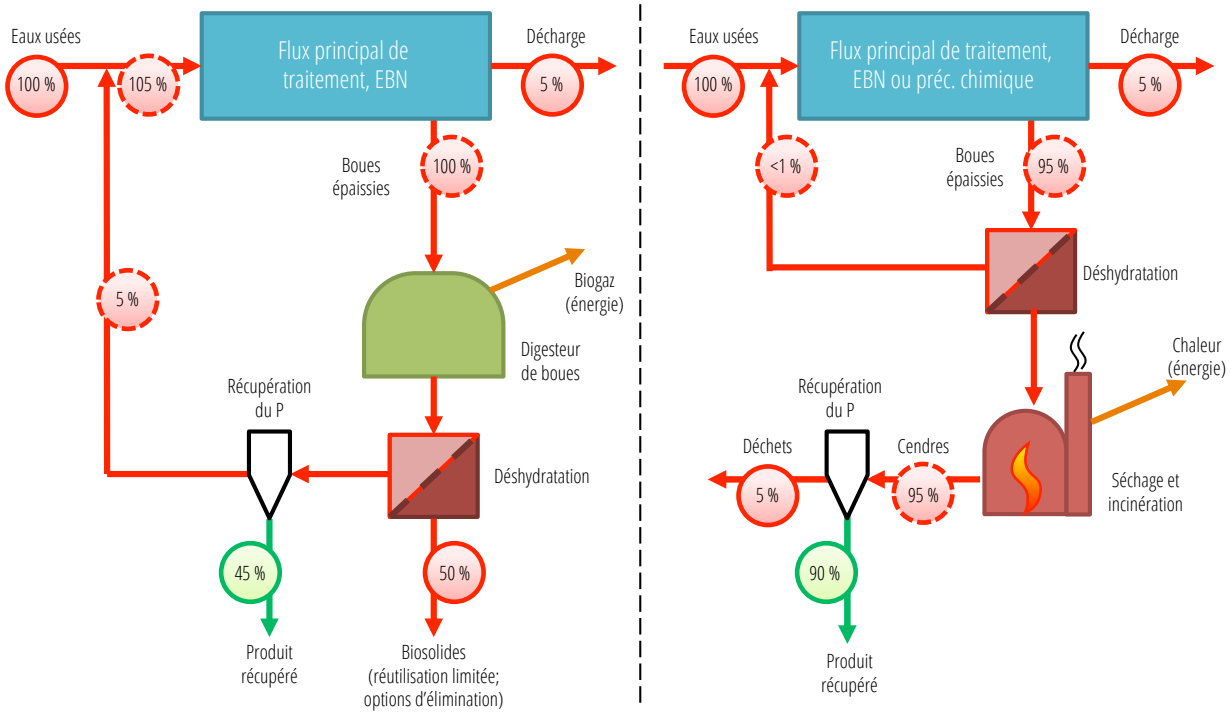


Figure 5. Méthodes potentielles de récupération du P. Le pourcentage de charge de P est indiqué dans les cercles.

Figure 6. Diverses formes de struvite récupérée. De gauche à droite : Ostara Pearl, méthode électrochimique, AirPrex. Photo : D. Kruk, Université du Manitoba

Ces connaissances sont importantes pour établir, et par la suite réglementer, la dose maximale de biosolides permettant une fertilisation optimale des terres sans risquer d'accroître le ruissellement des nutriments. On s'attend à ce que l'épandage terrestre des solides demeure une avenue importante pour la réutilisation des nutriments au Canada; toutefois, la forme des biosolides épandus doit se faire en fonction des conditions locales. C'est pourquoi les engrais à libération lente, comme ceux générés par la récupération du phosphore par extraction, ont trouvé un créneau au Canada. Actuellement, toute quantité d'engrais struvite produite aux usines d'épuration au Canada trouvera sa place sur le marché.

QUELLES SONT LES INCIDENCES POUR LES PARTIES PRENANTES ET LES DÉCIDEURS?

De nombreuses usines d'épuration canadiennes sont en mesure de diminuer significativement leur charge de nutriments en apportant des changements relativement peu coûteux à leurs procédés opérationnels. Ces usines ont l'occasion d'apporter des améliorations de façon proactive, avant la réglementation, étant donné les conditions qui y prévalent (p. ex., réservoirs surdimensionnés, charges réduites de contaminants, temps d'aération prolongé). L'introduction de normes plus strictes concernant l'effluent devrait être graduelle et ces normes devraient être équitables pour tous ceux qui contribuent à l'apport de nutriments dans le bassin versant, y compris les agriculteurs.

La modernisation des UTEU canadiennes donne en outre l'occasion d'introduire les plus récentes technologies d'élimination des nutriments, ce qui réduira de façon importante la demande énergétique et chimique et préparera les usines à un fonctionnement à long terme, indépendamment des fluctuations du marché.

La récupération du phosphore par extraction à partir de flux de liquides concentrés est une technologie éprouvée et économiquement viable pour les usines connaissant des difficultés opérationnelles dues à l'entartrage de l'équipement. La récupération réduit les coûts d'entretien et le coût global de l'élimination du phosphore, tout en fournissant simultanément une plus grande stabilité d'opération, une meilleure déshydratation des solides, et un produit à valeur ajoutée (engrais de qualité) dans un marché facile. Les responsables de la réglementation devraient encourager les procédés de récupération plutôt que de les exiger, puisque le rapport coûts-avantages est propre à chaque installation.

POUR JOINDRE LE CHERCHEUR, PRIÈRE DE LE FAIRE PAR COURRIEL À RESEARCHSPOTLIGHT@CWN-RCE.CA. CONSULTEZ NOTRE RÉPERTOIRE DE PROJETS À CWN-RCE.CA

RAPPORT RÉDIGÉ PAR DAMIAN KRUK, UNIVERSITÉ DU MANITOBA

ÉQUIPE DE RECHERCHE

JAN OLESZKIEWICZ, Université du Manitoba
DAMIAN KRUK, Université du Manitoba
TANNER DEVLIN, Université du Manitoba
QIUYAN YUAN, Université du Manitoba
MONIREH LASHKARIZADEH, Université du Manitoba
DONALD MAVINIC, Université de la Colombie-Britannique
SERGEY LOBANOV, Université de la Colombie-Britannique
GEORGE NAKHLA, Université Western Ontario
BARRY MACBRIDE, BDM Projects Ltd.

PARTENAIRES

AECOM CONSULTANTS INC.
DR. BERNHARD WETT, UNIVERSITY OF INNSBRUCK
OSTARA

RÉFÉRENCES

[1] FALK, M.W., D.J. REARDON, J.B.NEETHLING, D. CLARK, A. PRAMANIK (2013). « Striking the balance between nutrient removal, greenhouse gas emissions, receiving water quality, and costs », Water Environ. Res., vol. 85, p. 2307–16.

[2] NACWA (2015). Collaborating for healthy watersheds: How municipal and agricultural sectors are partnering to improve water quality. AGree, National Association of Clean Water Agencies, US Water Alliance, p. 38.

[3] CONSERVATION ONTARIO (2003). Watershed economic incentives through phosphorus trading and water quality. [WWW Document] URL http://www.conservation-ontario.on.ca/projects/pdf/reports/PHASE%20I/watershed_economic_incentives.pdf (accessed on 01/06/2015).

SCHAUBROECK, T., H. DE CLIPPELEIR, N. WEISSENBACHER, J. DEWULF, P. BOECKX, S.E. VLAEMINCK, B. WETT (2015). « Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion », Water Res., vol. 74, p. 166-179.