



# Défis et possibilités du Canada concernant la gestion des contaminants dans les eaux usées

Document complémentaire 4

Survol des technologies de traitement des eaux usées

Mars 2018

## Table des matières

Acronymes et abréviations .....	3
Préface .....	4
Objet et contexte .....	5
Sommaire du tableau.....	6
Tableau 1. Méthodes de traitement des eaux usées : substances préoccupantes éliminées, avantages concomitants et compromis .....	8
Références .....	24

*Le Réseau canadien de l'eau et le groupe national consultatif d'experts tiennent à remercier M. Patrick Coleman, ingénieur principal de procédé chez Black & Veatch, pour la révision de ce document complémentaire.*

*Ce projet a été réalisé avec l'appui financier de :  
This project was undertaken with the financial support of:*



Environment and  
Climate Change Canada

Environnement et  
Changement climatique Canada

## Acronymes et abréviations

BRM	Bioréacteurs à membrane
CAG	Charbon actif granulé
CAP	Charbon actif en poudre
COT	Carbone organique total
COV	Composé organique volatil
CPA	Composés pharmaceutiques actifs
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
EBN	Élimination biologique des nutriments
EI	Échange ionique
FAD	Flottation à l'air dissous
GES	Gaz à effet de serre
MF	Microfiltration
MVS	Matières volatiles en suspension
NF	Nanofiltration
OD	Oxygène dissous
OI	Osmose inverse
P	Phosphore
PE	Composés chimiques perturbant le système endocrinien (perturbateurs endocriniens)
POA	Procédés d'oxydation avancée
PPSP	Produits pharmaceutiques et produits de soins personnels
UF	Ultrafiltration
UV	Ultraviolet

## Préface

Alors que comme société nous produisons de plus en plus de substances chimiques, nombre d'entre elles aboutissent dans les eaux usées et ultimement dans nos écosystèmes naturels. Certaines de ces substances sont des contaminants qui peuvent être nocifs pour la santé des humains, du poisson et de la faune, et des cours d'eau du Canada. Pour mieux encadrer la capacité et les possibilités de gestion des contaminants dans les eaux usées au Canada, le Réseau canadien de l'eau (RCE) a entrepris un examen national des contaminants connus et des nouveaux contaminants préoccupants dans les eaux usées municipales et des options dont nous disposons à leur égard.

Grâce à l'appui financier de 400 000 \$ d'Environnement et Changement climatique Canada, le RCE a mis à profit son vaste réseau de communautés de chercheurs et de praticiens et a réuni un comité national d'experts ayant pour mandat d'évaluer les besoins et les possibilités du Canada pour gérer les nombreux contaminants présents dans les eaux usées domestiques. Le groupe y a travaillé d'octobre 2017 à mars 2018, en se penchant sur les questions fondamentales suivantes :

- De quels contaminants présents dans les eaux usées devrions-nous nous préoccuper le plus, maintenant et à l'avenir?
- De quelles options disposent nos diverses collectivités canadiennes pour gérer ces contaminants par le traitement des eaux usées?
- Quelles sont les possibilités et quels sont les compromis importants associés à ces choix de traitement, notamment en matière de récupération des ressources, de coûts, d'adéquation socio-économique et culturelle, et d'incidences sur des enjeux connexes comme les émissions de gaz à effet de serre?

Le comité était composé de huit éminents spécialistes de partout au Canada ayant des connaissances expertes diversifiées du traitement des eaux usées municipales, des contaminants classiques et des contaminants nouvellement préoccupants, des impacts environnementaux et écosystémiques, de la récupération des ressources des eaux usées, et des répercussions plus vastes d'ordre juridique et socio-économique des rejets d'effluents d'eaux usées. Le comité était présidé par Donald Mavinic (Ph. D.) de l'Université de la Colombie-Britannique, un expert en traitement des eaux usées de renommée internationale.

La principale tâche du comité d'experts était de produire un rapport de synthèse offrant une mise en contexte crédible et utile de l'état actuel des choses, de ce que nous savons et nous ignorons, incluant un plan d'action pour obtenir des résultats positifs par le truchement du traitement plus efficace des eaux usées au Canada. Ce plan directeur a été élaboré au fil des recherches et des discussions qui se sont enrichies en y intégrant les perspectives d'un groupe plus vaste de spécialistes de partout au pays. Ces experts collaborateurs, ayant des connaissances des pratiques municipales de traitement des eaux usées, des évaluations et des répercussions environnementales associées aux eaux usées, et des aspects d'ordre juridique et communautaire, ont été invités à fournir leurs réflexions sur toute une gamme de sujets précis et de particularités géographiques. Ils y ont répondu par le biais d'un questionnaire national en ligne et en participant, sur invitation, à certaines rencontres de travail du comité.

Le présent document est complémentaire au rapport du comité d'experts. Il fournit un aperçu de haut niveau des technologies disponibles pour le traitement des eaux usées.

## Objet et contexte

Le présent document complémentaire fait un tour d’horizon des technologies de traitement des eaux usées, de leurs avantages concomitants et des compromis afférents. Il vise à fournir au processus d’examen du comité d’experts des renseignements complémentaires sur les technologies de traitement disponibles.

Ce survol a été préparé en effectuant une revue de la littérature et des principaux documents de référence. Les résultats sont présentés sous forme de tableau, indiquant les technologies disponibles de traitement des eaux usées selon le type d’effluents (liquides, solides, secondaires) et selon le procédé de traitement, du procédé classique aux procédés de pointe. Le tableau indique pour chaque procédé ou technologie, les substances préoccupantes ou contaminants visés par le traitement, ainsi qu’une liste des avantages concomitants et compromis connus.

Pour plus de renseignements, veuillez consulter la liste de références fournies par Metcalf et Eddy [1] comme source principale d’information sur les procédés de traitement des eaux usées et leurs capacités d’élimination. Pour une évaluation de haut niveau sur la « traitabilité » de diverses substances présentes dans les eaux usées par divers procédés de traitement, veuillez consulter l’Appendice C *Catégorisation des substances présentes dans les eaux usées par type de traitement* du document d’information générale du Conseil canadien des ministres de l’environnement (CCME) intitulé *Les effluents d’eaux usées municipales au Canada* [2].

## Sommaire du tableau

<b>Effluents</b>	<b>Catégorie de procédé</b>	<b>Technologie</b>	<b>Description</b>
Liquides	Physique	Traitement préliminaire (p. ex., dégrillage, dessablage, broyage)	
Liquides	Physique	Sédimentation	
Liquides	Physique	Filtration	
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Microfiltration (MF)
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Ultrafiltration (UF)
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Nanofiltration (NF)
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Osmose inverse (OI)
Liquides	Physique	Adsorption	Charbon activé granulé (CAG) et Charbon activé en poudre (CAP)
Liquides	Physique	Adsorption	Autres adsorbants
Liquides	Photochimique	Désinfection par rayonnement ultraviolet (UV)	
Liquides	Chimique	Coagulation	
Liquides	Chimique	Désinfection chimique/chlore et ses composés	
Liquides	Chimique	Désinfection chimique/ autres produits chimiques (p. ex., l'acide peracétique)	
Liquides	Chimique	Procédés d'oxydation avancée (POA)	
Liquides	Chimique	Procédés d'oxydation avancée	Ozonation
Liquides	Chimique	Échange ionique (IE)	
Liquides	Photo-biologique	Production d'algues	
Liquides	Biologique	Étangs aérés	
Liquides	Biologique	Procédé classique de boues activées (biomasse suspension)	
Liquides	Biologique	Biosorption	

<b>Effluents</b>	<b>Catégorie de procédé</b>	<b>Technologie</b>	<b>Description</b>
Liquides	Biologique	Biofiltration (lits bactériens percolateurs filtres aérés)	
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Nitrification/ dénitrification
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Élimination biologique améliorée du phosphore
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Boue granulaire aérobie
Liquides	Biophysique	Bioréacteurs à membrane (BRM)	
Liquides	Biophysique	Bioréacteurs à membrane (BRM)	Bioréacteurs à membrane aérée
Solides	Physique	Épaississement	Gravité
Solides	Physique	Épaississement	Mécanique
Solides	Physique	Épaississement	Flottation à l'air dissous (FAD)
Solides	Physique	Déshydratation	
Solides	Physique	Déshydratation	Mécanique
Solides	Biologique	Hydrolyse (Biologique)	
Solides	Biologique	Stabilisation	Digestion anaérobie des boues
Solides	Biologique	Stabilisation	Digestion aérobie des boues
Solides	Biologique	Stabilisation	Compostage
Solides	Thermique	Hydrolyse (Thermique)	
Solides	Thermique	Incinération	
Secondaires	Physico-chimique	Stripage de l'ammoniac et récupération	
Secondaires	Chimique	Formation de cristaux de struvite ou d'hydroxyapatite	
Secondaires (liquides)	Biologique	Oxydation anaérobie de l'ammonium (anammox)	

**Tableau 1.** Méthodes de traitement des eaux usées : substances préoccupantes éliminées, avantages concomitants et compromis

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Physique	Traitement préliminaire (p. ex., dégrillage, dessablage, broyage)		Gros débris solides	Réduction des matières en suspension avant la sédimentation; protection de l'équipement et des procédés d'exploitation en aval; potentiel de recyclage des débris dans les effluents résiduels après broyage	Nettoyage en continu requis	[1], [3]
Liquides	Physique	Sédimentation (incluant sédimentation primaire, clarification secondaire et sédimentation lestée)		Solides, métaux, particules, biomasse, produits chimiques en suspension (si utilisation de coagulants)	Réduction des besoins en aération; augmentation de la capacité de nitrification	Selon le procédé de sédimentation utilisé, cela peut nécessiter beaucoup d'espace. L'utilisation de clarificateurs empilés et à débit élevé peut réduire l'espace nécessaire.	[1]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Physique	Filtration		Matières solides en suspension, matières particulaires DBO, phosphore particulaire	Bon pour les petits systèmes, économique pour l'élimination du phosphore si la filtration est combinée à l'EBN; élimination de certains composés organiques traces, de certains PPSP et de certains pathogènes	Lavage à contre-courant nécessaire. Recherches additionnelles requises sur l'élimination des contaminants traces. L'efficacité de l'élimination est affectée par les conditions d'exploitation et les caractéristiques et concentrations des influents	[1], [4], [5]
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Microfiltration (MF)	Matières solides en suspension, colloïdes, bactéries et protozoaires	L'efficacité est rehaussée lorsque combinée à un traitement biologique; la technologie peut être utilisée comme prétraitement pour la NF et l'OI	Technologie peu efficace pour éliminer l'ammoniac et les phénols; affectée par les conditions d'exploitation (pH, concentration en sel, pression transmembranaire); produits chimiques nécessaires pour le nettoyage périodique; technologie inadéquate pour la réutilisation de l'eau; ne peut pas éliminer les contaminants traces	[1], [6], [7], [8], [9]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Ultrafiltration (UF)	Certains composés dissous avec un poids moléculaire élevé, matières solides en suspension, colloïdes, bactéries, protozoaires et virus	Peut être utilisée comme prétraitement pour la NF, l'OI et le POA; utilisation potentielle pour l'élimination de certains contaminants traces	Produits chimiques nécessaires pour le nettoyage périodique; technologie inadéquate comme unique procédé pour la réutilisation d'eau potable, mais peut être utilisée comme prétraitement avant l'OI et le POA à cette fin	[1], [6], [7]
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Nanofiltration (NF)	Micropolluants, vaste gamme de produits organiques et inorganiques, de PE, d'antibiotiques, de bactéries, de protozoaires et de virus	Moins énergivore que l'OI, utilisation potentielle pour la réutilisation de l'eau non potable ou la réutilisation indirecte de l'eau potable	Coûts et GES associés à l'utilisation d'énergie; rejets moindres qu'avec l'OI; encrassement; produits chimiques requis pour nettoyage périodique; prétraitement requis; gestion du concentré; technologie inadéquate comme unique procédé pour la réutilisation de l'eau potable	[1], [6], [7], [10], [11]
Liquides	Physique	Filtration sur membrane	Osmose inverse (OI)	Métaux lourds, vaste gamme de produits organiques et inorganiques, nutriments, virus, micropolluants, PE et antibiotiques	utilisation potentielle pour un large éventail d'applications de réutilisation de l'eau	Énergivore; prétraitement exhaustif requis; coûts connexes et émissions de GES; produits chimiques requis pour nettoyage; encrassement; gestion et élimination du concentré	[1], [6], [7], [10], [11]

Liquides	Physique	Adsorption	Charbon activé granulé (CAG) et charbon activé en poudre (CAP)	Solvants aromatiques, composés aromatiques chlorés et polycycliques, pesticides et herbicides, composés organiques à poids moléculaire élevé, composés organiques traces (y compris des PE et des produits pharmaceutiques), carbone organique dissous, chlore, cuivre	<p>Le CAP peut être ajouté directement au procédé de boues activées ou dans des réacteurs distincts</p> <p>Le CAP peut être ajouté pour : aider au contrôle des surcharges; améliorer la décantabilité des boues, éliminer les polluants réfractaires, améliorer l'élimination de couleur; et/ou améliorer l'élimination de l'ammoniac.</p> <p>Possibilité d'élimination biologique et d'adsorption combinée donnant lieu à des synergies potentielles entre les deux mécanismes d'élimination.</p>	<p>Pour le CAG et le CAP : rendement dépendant de plusieurs facteurs, notamment de la configuration du procédé, du type de charbon activé, des propriétés du composé à éliminer et d'autres composés présents dans l'eau. Des essais sur table ou à échelle pilote sont souvent nécessaires, et il existe des incertitudes au moment de passer à pleine échelle. Différents composés peuvent entrer en concurrence pour les sites d'adsorption et, par conséquent, l'élimination des composés ciblés peut être limitée par la présence d'autres composés. Selon les contaminants à éliminer, les concentrations désirées dans les effluents et la matrice d'eau, il peut être nécessaire d'ajouter du CA ou de le remplacer.</p> <p>Pour le CAG en général : il finit par se dissiper avec le temps et doit être remplacé ou régénéré; perte de la capacité d'adsorption pendant la régénération</p> <p>Pour le CAG dans un réacteur à lit fixe : développement d'une perte de charge, énergie requise pour le pompage et eau requise pour le lavage à contre-courant</p> <p>Pour le CAG dans un réacteur à lit élargi : énergie additionnelle requise pour pomper l'eau qui est traitée dans le réacteur</p> <p>Pour le CAP : le CAP doit être ajouté au procédé et retiré subséquemment. Selon la configuration du procédé, il peut être nécessaire d'ajouter un coagulant et de filtrer pour retirer le CAP.</p>	[1], [6], [10], [11], [12], [13]
----------	----------	------------	----------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Physique	Adsorption	Autres adsorbants (p. ex., hydroxyde ferrique granulaire, alumine activée, sables verts de manganèse, dioxyde de manganèse, particules d'oxyde de fer hydraté, sable enrobé d'oxyde de fer)	Métaux lourds, fluorure		Les adsorbants doivent être remplacés ou régénérés lorsqu'ils se sont dissipés. Certains adsorbants peuvent être coûteux. Les tests et essais pilotes requis pour évaluer l'applicabilité pour une application précise, le pH, la température et la présence ou l'absence de composés qui entrent en concurrence pour les sites d'adsorption peuvent affecter la performance.	[1]
Liquides	Photo-chimique	Désinfection par rayonnement ultraviolet (UV)		Pathogènes	Plus sécuritaire pour les travailleurs et les eaux réceptrices; aucune production de sous-produits; efficace; possibilité d'utilisation pour l'élimination de PE et des PPSP (en utilisation hybride avec le POA)	Coûts énergétiques; une maintenance ou un nettoyage périodique peut s'avérer nécessaire pour contrôler le biofilm; la filtration avant la désinfection par UV peut être nécessaire	[1], [6], [10], [14], [15]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Chimique	Coagulation (incluant un traitement primaire chimique avancé et une précipitation chimique pour l'élimination du P		Matières solides en suspension, DBO, phosphore, certains métaux lourds	Amélioration de la sédimentation et de la filtration	Utilisation de produits chimiques; production de solides qui doivent être retirés par sédimentation ou filtration; production de grandes quantités de boues; tests requis pour déterminer les doses optimales de coagulant; coûts d'exploitation plus élevés	[1], [16], [17]
Liquides	Chimique	Désinfection chimique/ chlore et ses composés		Pathogènes	Oxydation des composés organiques et de l'ammoniac, dégraissage (préaération), contrôle des odeurs, contrôle du gonflement des boues	Formation possible de sous-produits de désinfection potentiellement toxiques	[1]
Liquides	Chimique	Désinfection chimique/ autres produits chimiques (p. ex., l'acide peracétique)	Ajout combiné d'acide acétique et de peroxyde. Peut être combiné aux UV.	Bactéricide et virocyde	Aucun sous-produit de la désinfection, non affecté par le pH.		[1]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Chimique	Procédés d'oxydation avancée (POA)		Vaste gamme de composés organiques et inorganiques, pathogènes, micropolluants, CPA, PE	Élimination des PE, amélioration de la biodégradation en aval des composés organiques complexes, l'efficacité peut être rehaussée en utilisant des combinaisons d'oxydants (ou d'UV)	Utilisation d'énergie et coûts élevés connexes; formation de sous-produits dangereux; efficacité variant en fonction du pH	[6], [10], [14], [18], [19]
Liquides	Chimique	Procédé d'oxydation avancée	Ozonation	Pathogènes, micropolluants, CPA, PE	Élimination de contaminants traces et de composés organiques réfractaires, réduction de l'utilisation du chlore, contrôle des odeurs	Désinfectant instable qui doit être réappliqué; coûteux, formation de sous-produits dangereux, préoccupations liées à la sécurité	[6], [14], [18], [20], [21]
Liquides	Chimique	Échange ionique (EI)		Métaux lourds, ammoniac	Peut accueillir des fluctuations et des surcharges, peut fonctionner sous une vaste gamme de températures, l'élimination de l'ammoniac est accrue en présence de certains composés organiques (acide citrique et protéine de lactosérum), possibilité d'utilisation pour la récupération de métaux lourds	L'efficacité de l'élimination dépend du pH et des propriétés de la résine, d'autres recherches sont requises, procédé énergivore	[22], [23], [24]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Photo-biologique	Production d'algues	Production d'algues dans des étangs ou des photobioréacteurs	Absorption des nutriments des eaux usées (meilleure après digestion anaérobie)	Production de biocarburant	Empreinte étendue des étangs ou de l'énergie pour les photobioréacteurs	[25]
Liquides	Biologique	Lagunes et étangs aérés		Composés organiques solubles, effluents secondaires, nutriments	Facile à exploiter et maintenir, faibles coûts de construction et d'exploitation, possibilité d'utilisation pour réduire l'empreinte des champs d'épuration, pour optimiser la production de cellules algales et possibilité de récolte de protéines (étangs aérés à taux élevé)	Empreinte étendue, plus d'effets de la température que dans les boues activées classiques	[1]
Liquides	Biologique	Boues activées classiques (processus de croissance suspendu)		Paramètres organiques (DCO, DBO et COT)	Élimination de PE, des composés organiques traces, des produits pharmaceutiques, des PPSP et des micropolluants (surtout dans des systèmes hybrides de biofilm), économique	Possibilité de gonflement des boues dû à la croissance excessive de microorganismes filamenteux (réduit la décantabilité), procédé sensible aux fluctuations de pH, de température et d'OD, possibilité de dé-conjugaison ou formation à partir d'autres métabolites, l'élimination de certains micropolluants et composés organiques traces peut être affectée par la réduction-oxydation et les conditions d'exploitation	[15], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Biologique	Biosorption		Métaux lourds, teintures, phénols, fluorure	Élimination de produits pharmaceutiques et de soins personnels non biodégradables, économique et écologique	Tributaire du pH, besoin de biosorbants plus efficaces et sélectifs, besoin de nouvelles recherches	[15], [33], [34], [35], [36]
Liquides	Biologique	Biofiltration (lits bactériens percolateurs)		Composés organiques	Élimination des produits pharmaceutiques (p. ex., antidépresseurs, PPSP et COV)	Pas très efficace pour l'élimination des COV, des antidépresseurs et des PPSP; peut avoir une large empreinte comparativement à d'autres procédés qui obtiennent les mêmes résultats (comme l'EBN)	[30], [31], [37]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Nitrification/dénitrification	Conversion de l'ammoniac en nitrate (nitrification) et du nitrate en azote gazeux (dénitrification)	Élimination des composés organiques traces, des composés à action œstrogène et des antidépresseurs; élimination potentielle de certains micropolluants; peut être fait dans le même réacteur que la DBO; réduction de l'utilisation globale de produits chimiques, dénitrification	Procédé sensible à la température, au pH, aux concentrations d'OD et d'ammoniac (un meilleur contrôle du procédé est requis); dépenses en immobilisations; consommation énergétique élevée due à l'aération et au mélange; empreinte; coûts associés; émissions de GES (oxyde nitreux); élimination des composés organiques traces dépend des conditions redox et des propriétés physicochimiques des composés organiques; source externe de carbone requise pour la synthèse cellulaire de microorganismes (dénitrification), un réacteur de stripage de l'azote gazeux est nécessaire dans un premier temps (dénitrification), un lavage à contre-courant est requis si la dénitrification est faite dans des réacteurs en colonnes	[31], [32], [38], [39], [40], [41]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Élimination biologique accrue du phosphore	Phosphore	Récupération du P dans les biosolides; peut améliorer la décantabilité des boues; peut être combinée avec d'autres technologies d'élimination du P technologies comme la coagulation ou précipitation chimique pour obtenir de très faibles concentrations de P dans l'effluent	<p>Une zone anaérobie avec des concentrations minimales d'oxygène ou de nitrate est requise. Par conséquent, si l'ammoniac est éliminé par la nitrification, un processus de dénitrification peut aussi être requis.</p> <p>La conception et le contrôle du procédé sont cruciaux : des acides gras volatils (dans les eaux usées ou provenant d'autres procédés, comme un fermenteur) sont requis, et l'efficacité d'élimination du phosphore peut être affectée négativement si la liqueur mixte ou la boue est retenue pendant une longue période en conditions anaérobies.</p> <p>Possibilité de formation additionnelle de struvite dans les conduits des effluents secondaires pour les procédés qui utilisent des digesteurs anaérobies pour le traitement des boues</p>	[1], [4], [42]
Liquides	Biologique	Élimination biologique des nutriments (EBN)	Boues granulaires aérobies (BGA)	Élimination de matières organiques, de l'azote et du phosphore	Procédé à faible empreinte, bonne décantation et déshydratation des boues. Peut absorber les métaux lourds.	Peu de démonstration à pleine échelle en Amérique du Nord.	[43], [44]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Liquides	Biophysique	Bioréacteurs à membrane (BRM)		Matières organiques et nutriments (azote et phosphore)	Recyclage de l'eau non potable (toilettes, etc.), plus rentable à grande échelle; élimination des COV, PE, antibiotiques, micropolluants et microplastiques; possibilité de réduction des boues	Procédé très énergivore et associé aux émissions de GES, très coûteux, encrassement; pas très efficace pour l'élimination des COV, pas rentable pour l'élimination du phosphore et la réduction des boues	[4], [11], [29], [37], [45]
Liquides	Biophysique	Bioréacteurs à membrane (BRM)	Bioréacteurs à membrane aérée	Alimentation en air par les membranes. nitrification-dénitrification simultanées favorisées	Coûts énergétiques de l'aération réduits, procédé compact pour renouvellement du procédé. Élimination de contaminants traces	Encrassement des membranes, contrôle de la biomasse	[46]
Solides	Physique	Épaississement	Gravité (codécantation dans les principaux clarificateurs ou dans des clarificateurs dédiés distincts)	Élimination d'une certaine quantité d'eau des solides décantés, préparation en vue d'un traitement subséquent des solides	La codécantation réduit la nécessité de clarificateurs additionnels et peut économiser l'espace lorsque l'épaississement par gravité est utilisé	La codécantation peut nuire au rendement des principaux clarificateurs; l'épaississement par gravité des boues activées des clarificateurs secondaires peut à lui seul ne pas fournir à bien concentrer les solides	[1]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Solides	Physique	Épaississement	Mécanique (centrifuge, courroie de pressage, tambour de déshydratation, etc.)	Élimination d'une certaine quantité d'eau des solides décantés, préparation en vue d'un traitement subséquent des solides	Permettrait des concentrations plus élevées de solides (c.-à-d. qu'une plus grande quantité d'eau peut être retirée)	Maintenance de l'équipement mécanique; coûts énergétiques	[1]
Solides	Physique	Épaississement	Flottation à l'air dissous (FAD)	Élimination d'une certaine quantité d'eau des solides, préparation en vue d'un traitement subséquent des solides	Amélioration de l'élimination de particules petites et légères; empreinte relativement réduite	Comportement des réacteurs non optimal (court-circuit, etc.), énergivore comparé à l'épaississement par gravité	[1]
Solides	Physique	Déshydratation		Élimination d'une certaine quantité d'eau des boues, peut être nécessaire avant la réutilisation ou le rejet selon la méthode de réutilisation ou de rejet	Réduit le volume et la masse des boues qui doivent être transportées; les boues déshydratées peuvent être plus faciles à manipuler que les boues liquides ou épaissies	Besoins énergétiques pour le processus de déshydratation; conditionnement chimique requis pour de nombreux types de procédés, les essais pilotes et les comparaisons sont importants au moment de choisir le procédé	[1]
Solides	Physique	Déshydratation	Mécanique (centrifuge)	Élimination de l'eau de solides épaissis	Boues déshydratées	Entretien mécanique de l'équipement; coûts énergétiques, besoin de produits chimiques pour amélioration de la floculation	[1]
Solides	Biologique	Hydrolyse (biologique)	Hydrolyse biologique dans des conditions anaérobiques	Amélioration de la déshydratation et de la digestion des boues (pré-traitement de la digestion anaérobie des boues)	Récupération de biogaz et d'énergie, solubilisation accrue des matières organiques dans les boues	Efficiences affectées par le pH et le temps de séjour de la boue	[47]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Solides	Biologique	Stabilisation	Digestion anaérobie	Composés organiques, nutriments, matières volatiles en suspension (MVS), pathogènes	Production de méthane et de CO <sub>2</sub> , récupération d'énergie, réduction des GES, traitement secondaire biologique pour la DBO élevée (remplaçant les boues activées)	Temps de séjour relativement long; température élevée requise	[1], [48]
Solides	Biologique	Stabilisation	Digestion aérobie des boues. Peut-être auto-thermique	Composés organiques, nutriments, pathogènes	Amélioration de l'élimination de l'azote ammoniacal (avec de l'oxygène pur)	L'efficacité de l'élimination dépend de la température; procédé énergivore	[1], [48], [49]
Solides	Biologique	Stabilisation	Compostage	Matières volatiles en suspension (MVS), pathogènes	Solides propres à l'épandage	Odeurs à contrôler	[1]
Solides	Thermique	Hydrolyse (thermique)		Amélioration de la déshydratation et de la digestion des boues (prétraitement à la digestion anaérobie des boues)	Récupération des biogaz et de l'énergie, peut être accrue par l'ajout de polymères (hydrolyse thermo-chimique), améliore la réduction des pathogènes	Procédé énergivore et associé à des émissions de GES; coûteux; efficacité affectée par le pH et le temps de séjour de la boue, hydrolyse thermo-chimique affectée par le pH et l'hydrophobie des polymères	[50], [51]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Solides	Thermique	Incinération (oxydation thermique avancée)		Réduction du volume et de la masse des solides, élimination des contaminants organiques présents dans les solides (y compris des PE potentiels, des produits pharmaceutiques, des composés organiques toxiques, etc.), destruction de pathogènes	<p>Les procédés peuvent être conçus pour être autonomes (c.-à-d. qu'ils n'ont pas besoin d'une source externe de combustible en continu) et ils peuvent être utilisés pour générer de la chaleur et de l'énergie à partir des biosolides.</p> <p>Coûts réduits de transport et d'élimination des solides étant donné la réduction de la masse et du volume de ces solides</p> <p>Bien que les cendres sont habituellement envoyées au site d'enfouissement, elles pourraient être réutilisées à d'autres fins, comme matériau de remplissage dans la fabrication du ciment ou comme couverture quotidienne de site d'enfouissement.</p>	Mêmes les systèmes autonomes ont besoin d'une source de combustible externe au moment de démarrer le système et s'il y a des problèmes nécessitant un nouveau démarrage. Les gaz émis doivent être traités pour se conformer aux exigences en matière de qualité de l'air. Les systèmes peuvent être complexes et comporter d'importantes dépenses en immobilisations. Un niveau plus élevé de déshydratation des boues peut être requis pour préparer les boues à l'incinération. La faisabilité est affectée par les procédés pour les solides en amont et les constituants présents dans ces solides; il y a plus d'énergie disponible dans les solides non digérés.	[1], [52]

Effluents	Catégorie de procédé	Technologie	Description	Substances préoccupantes éliminées	Avantages concomitants	Compromis	Référence
Secondaires	Physico-chimique	Stripage de l'ammoniac et récupération	Stripage de l'ammoniac et récupération en pH élevé avec un acide	Azote	Produit final riche en azote. Aucun lavage à contre-courant nécessaire	Coûts énergétiques et de maintenance (pompes); ne peut se faire en conditions de gel; potentiel de détérioration de la qualité de l'air, des ajustements au pH avec de la chaux peuvent être nécessaires; encrassement de la colonne de stripage habituellement dû à la cristallisation	[53]
Secondaires	Chimique	Formation de struvite ou d'hydroxyapatite		Phosphore; minimise l'encrassement de l'équipement pour le procédé causé par la précipitation de la struvite	Le phosphore, et l'azote dans le cas de la struvite, sont récupérés sous forme solide qui peut servir d'engrais. Pourrait aider à améliorer l'élimination globale de phosphore dans les systèmes avancés d'élimination biologique du phosphore.	Énergie additionnelle requise pour faire fonctionner le procédé. Coûts additionnels associés aux procédés chimiques (p. ex., des sels de magnésium et des produits chimiques pour le contrôle du pH). Un matériau (comme du sable) peut devoir être ajouté en continu dans les systèmes qui éliminent le phosphore sous forme d'hydroxyapatite.	[1], [4]
Secondaires (Liquides)	Biologique	Oxydation anaérobie de l'ammonium (anammox)	Après nitritation partielle de l'ammoniac pour produire des nitrites, production de N <sub>2</sub> . Peut être utilisé dans la catégorie Liquides.	Azote	Élimination accrue de l'azote, demande en oxygène plus faible que pour la nitrification, nul besoin de matières organiques contrairement à la dénitrification	Émission d'oxyde nitreux (GES), efficacité affectée par les conditions redox	[54]

## Références

- [1] Metcalf and Eddy - AECOM, *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [2] CCME, *Municipal Wastewater Effluent in Canada*, no. December. 2006.
- [3] WEF, ASCE, and EWRI, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2009.
- [4] R. Bashar, K. Gungor, K. G. Karthikeyan, and P. Barak, « Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment », *Chemosphere*, 2018.
- [5] B. N. Perez, « Removal of Trace Organic Compounds in Domestic Wastewater using Recirculating Packed- Bed Media Filters - Master's Thesis », University of Tennessee, 2015.
- [6] O. M. Rodriguez-Narvaez, J. M. Peralta-Hernandez, A. Goonetilleke, and E. R. Bandala, « Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review », *Chem. Eng. J.*, vol. 323, pp. 361–380, 2017.
- [7] B. Van Der Bruggen, C. Vandecasteele, T. Van Gestel, W. Doyenb, and R. Leysenb, « Review of Pressure-Driven Membrane Processes », *Environ. Prog.*, vol. 22, no. 1, pp. 46–56, 2003.
- [8] J. C. Campos, R. M. H. Borges, A. M. Oliveira Filho, R. Nobrega, and G. L. Sant'Anna, « Oilfield wastewater treatment by combined microfiltration and biological processes », *Water Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 95–104, 2002.
- [9] F. L. Hua, Y. F. Tsang, Y. J. Wang, S. Y. Chan, H. Chua, and S. N. Sin, « Performance study of ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment », *Chem. Eng. J.*, vol. 128, no. 2–3, pp. 169–175, 2007.
- [10] Z. hua Liu, Y. Kanjo, and S. Mizutani, « Removal mechanisms for endocrine disrupting compounds (EDCs) in wastewater treatment - physical means, biodegradation, and chemical advanced oxidation: A review » *Sci. Total Environ.*, vol. 407, no. 2, pp. 731–748, 2009.
- [11] I. Michael *et al.*, « Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review », *Water Res.*, vol. 47, no. 3, pp. 957–995, 2013.
- [12] A. El-Sikaily, A. El Nemr, and A. Khaled, « Copper sorption onto dried red alga *Pterocladia capillacea* and its activated carbon », *Chem. Eng. J.*, vol. 168, no. 2, pp. 707–714, 2011.
- [13] F. Çeçen and Ö. Aktaş, « Integration of Activated Carbon Adsorption and Biological Processes in Wastewater Treatment », in *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011, pp. 43–93.
- [14] M. Pera-Titus, V. García-Molina, M. A. Baños, J. Giménez, and S. Esplugas, « Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: A general review », *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 47, no. 4, pp. 219–256, 2004.
- [15] J. Wang and S. Wang, « Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: A review », *J. Environ. Manage.*, vol. 182, pp. 620–640, 2016.

- [16] P. D. Johnson, P. Girinathannair, K. N. Ohlinger, S. Ritchie, L. Teuber, and J. Kirby, « Enhanced Removal of Heavy Metals in Primary Treatment Using Coagulation and Flocculation », *Water Environ. Res.*, vol. 80, no. 5, pp. 472–479, May 2008.
- [17] A. J. Hargreaves *et al.*, « Impacts of coagulation-flocculation treatment on the size distribution and bioavailability of trace metals (Cu, Pb, Ni, Zn) in municipal wastewater », *Water Res.*, vol. 128, pp. 120–128, Jan. 2018.
- [18] P. R. Gogate and A. B. Pandit, « A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions », *Adv. Environ. Res.*, vol. 8, no. 3–4, pp. 501–551, 2004.
- [19] P. R. Gogate and A. B. Pandit, « A review of imperative technologies for wastewater treatment II: Hybrid methods », *Adv. Environ. Res.*, vol. 8, no. 3–4, pp. 553–597, 2004.
- [20] T. A. Özbelge, Ö. H. Özbelge, and S. Z. Başkaya, « Removal of phenolic compounds from rubber-textile wastewaters by physico-chemical methods », *Chem. Eng. Process.*, vol. 41, no. 8, pp. 719–730, 2002.
- [21] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, and P. Nigam, « Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative,» *Bioresour. Technol.*, vol. 77, no. 3, pp. 247–255, 2001.
- [22] S. Rengaraj, K.-H. Yeon, and S.-H. Moon, « Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins », *J. Hazard. Mater.*, vol. 87, no. 1–3, pp. 273–287, 2001.
- [23] S. Rengaraj, C. K. Joo, Y. Kim, and J. Yi, « Kinetics of removal of chromium from water and electronic process wastewater by ion exchange resins: 1200H, 1500H and IRN97H,» *J. Hazard. Mater.*, vol. 102, no. 2–3, pp. 257–275, 2003.
- [24] T. C. Jorgensen and L. R. Weatherley, « Ammonia removal from wastewater by ion exchange in the presence of organic contaminants », *Water Res.*, vol. 37, no. 8, pp. 1723–1728, 2003.
- [25] J. B. K. Park, R. J. Craggs, and A. N. Shilton, « Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production », *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 35–42, 2011.
- [26] C. E. Gattullo, A. Traversa, N. Senesi, and E. Loffredo, « Phytodecontamination of the endocrine disruptor 4-nonylphenol in water also in the presence of two natural organic fractions », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 223, no. 9, pp. 6035–6044, 2012.
- [27] M. Escolà Casas *et al.*, « Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by a hybrid biofilm and activated sludge system (Hybas) », *Sci. Total Environ.*, vol. 530–531, pp. 383–392, 2015.
- [28] P. Falås, P. Longrée, J. La Cour Jansen, H. Siegrist, J. Hollender, and A. Joss, « Micropollutant removal by attached and suspended growth in a hybrid biofilm-activated sludge process », *Water Res.*, vol. 47, no. 13, pp. 4498–4506, 2013.
- [29] C. Grandclément *et al.*, « From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review », *Water Res.*, vol. 111, pp. 297–317, 2017.

- [30] B. Kasprzyk-Hordern, R. M. Dinsdale, and A. J. Guwy, « The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters », *Water Res.*, vol. 43, no. 2, pp. 363–380, 2009.
- [31] A. Lajeunesse, S. A. Smyth, K. Barclay, S. Sauvé, and C. Gagnon, « Distribution of antidepressant residues in wastewater and biosolids following different treatment processes by municipal wastewater treatment plants in Canada », *Water Res.*, vol. 46, no. 17, pp. 5600–5612, 2012.
- [32] W. J. Parker *et al.*, « Impact of activated sludge configuration and operating conditions on in vitro and in vivo responses and trace organic compound removal », *Sci. Total Environ.*, vol. 490, pp. 360–369, 2014.
- [33] J. He and J. P. Chen, « A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools », *Bioresour. Technol.*, vol. 160, pp. 67–78, 2014.
- [34] K. Vijayaraghavan, J. Jegan, K. Palanivelu, and M. Velan, « Biosorption of copper, cobalt and nickel by marine green alga *Ulva reticulata* in a packed column », *Chemosphere*, vol. 60, no. 3, pp. 419–426, 2005.
- [35] P. X. Sheng, Y. P. Ting, and J. P. Chen, « Biosorption of heavy metal ions (Pb, Cu, and Cd) from aqueous solutions by the Marine Alga *Sargassum* sp. in single- And multiple-metal systems », *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 2438–2444, 2007.
- [36] I. Michalak, K. Chojnacka, and A. Witek-Krowiak, « State of the art for the biosorption process - A review », *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 170, no. 6, pp. 1389–1416, 2013.
- [37] A. Berenjian, N. Chan, and H. J. Malmiri, « Volatile Organic Compounds removal methods: A review », *Am. J. Biochem. Biotechnol.*, vol. 8, no. 4, pp. 220–229, 2012.
- [38] J. Foley, D. de Haas, Z. Yuan, and P. Lant, « Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants », *Water Res.*, vol. 44, no. 3, pp. 831–844, 2010.
- [39] M. Inyang, R. Flowers, D. McAvoy, and E. Dickenson, « Biotransformation of trace organic compounds by activated sludge from a biological nutrient removal treatment system », *Bioresour. Technol.*, vol. 216, pp. 778–784, 2016.
- [40] Y. Men, S. Achermann, D. E. Helbling, D. R. Johnson, and K. Fenner, « Relative contribution of ammonia oxidizing bacteria and other members of nitrifying activated sludge communities to micropollutant biotransformation », *Water Res.*, vol. 109, pp. 217–226, 2017.
- [41] D. Obaja, S. Mace, J. Costa, C. Sans, and J. Mata-Alvarez, « Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor », *Bioresour. Technol.*, vol. 87, no. 1, pp. 103–111, 2003.
- [42] Y. Chen, A. A. Randall, and T. McCue, « The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid », *Water Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 27–36, 2004.
- [43] Water Environment and Reuse Foundation (WE&RF), « Aerobic granular sludge for biological nutrient removal - Project NUTR5R14h », Denver, CO, 2017.

- [44] S. S. Adav, D. J. Lee, K. Y. Show, and J. H. Tay, "Aerobic granular sludge: Recent advances," *Biotechnol. Adv.*, vol. 26, no. 5, pp. 411–423, 2008.
- [45] Y. Wei, R. T. Van Houten, A. R. Borger, D. H. Eikelboom, and Y. Fan, « Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment », *Water Res.*, vol. 37, no. 18, pp. 4453–4467, 2003.
- [46] E. Syron and E. Casey, « Membrane-aerated biofilms for high rate biotreatment : Performance appraisal , engineering principles , scale-up , and development requirements », *Environmantal Sci. Technol.*, vol. 42, no. 6, pp. 1833–1844, 2008.
- [47] L. Falk, « Evaluation of Biological Hydrolysis Pre-treatment and the Biogas Potential of Sludge from Compact Waste Water Treatment - Master's Thesis », Lund University, 2015.
- [48] G. D. Zupančič and M. Roš, « Aerobic and two-stage anaerobic-aerobic sludge digestion with pure oxygen and air aeration », *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 1, pp. 100–109, 2008.
- [49] B. Xiao, F. Yang, and J. Liu, « Enhancing simultaneous electricity production and reduction of sewage sludge in two-chamber MFC by aerobic sludge digestion and sludge pretreatments », *J. Hazard. Mater.*, vol. 189, no. 1–2, pp. 444–449, 2011.
- [50] E. Neyens and J. Baeyens, « A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability », *J. Hazard. Mater.*, vol. 98, no. 1–3, pp. 51–67, 2003.
- [51] P. Bishnoi, « Effect of thermal hydrolysis pre-treatment on anaerobic digestion of sludge - Master's Thesis », Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
- [52] USEPA, « Biosolids Technology Fact Sheet: Use of Incineration for Biosolids Management », 2003.
- [53] USEPA, « Wastewater Technology Fact Sheet - Ammonia Stripping », Washington, DC, 2000.
- [54] M. Hauck, F. A. Maalcke-Luesken, M. S. M. Jetten, and M. A. J. Huijbregts, « Removing nitrogen from wastewater with side stream anammox: What are the trade-offs between environmental impacts? », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 107, pp. 212–219, 2016.