



Table de consultation scientifique sur les contaminants nocifs non normés dans les eaux usées municipales du Québec

Rapport et recommandations

Mars 2026



Référence à citer :

Table de consultation scientifique sur les contaminants nocifs non normés dans les eaux usées municipales du Québec (TCS-CNNN). (2026). *Rapport et recommandations*, 46 p.

Avant-propos

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre d'un mandat confié aux membres externes de la Table de consultation scientifique sur les contaminants nocifs non normés (Table) (voir la liste des membres à la page ix) par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Créée en mai 2024 dans le cadre du Plan national de l'eau, la Table joue un rôle consultatif auprès du MELCCFP et, en particulier, auprès de la Direction des eaux usées.

Au cours de l'année 2024, la Table a tenu trois rencontres de travail dans le but de remplir son mandat : élaborer des recommandations au gouvernement du Québec visant à réduire efficacement la présence des contaminants nocifs non normés dans les eaux usées municipales. La Table a agi à titre consultatif auprès du Ministère. Elle a également bénéficié, pour la réalisation de son mandat, de l'appui logistique et rédactionnel de fonctionnaires du Ministère. Les membres, aux expertises variées (ingénierie, écotoxicologie et chimie analytique et santé publique), ont apporté des connaissances spécialisées et des expériences pertinentes aux travaux de la Table. Ce rapport témoigne de leur engagement à identifier des solutions pour relever ce défi environnemental et sociétal.

Il est important de souligner que les recommandations présentées dans ce rapport n'engagent que les membres de la Table en tant qu'experts et ne reflètent pas nécessairement la position des organisations qui les emploient, ni celle du MELCCFP. Elles ont été élaborées à la suite des échanges menés au sein de la Table et résultent d'un processus de concertation entre ses membres. Chaque membre du comité possédant une expertise particulière, les recommandations proposées découlent d'un processus collectif de délibération et de recherche de consensus sur des enjeux scientifiques et techniques.

Les membres de la Table et le MELCCFP remercient par ailleurs le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, représenté par M^{me} Marie-Josée Barrieault (directrice de la gestion stratégique de l'eau), pour le soutien apporté dans l'organisation des travaux.

Résumé

Les rejets des stations d'épuration municipales constituent l'une des principales voies d'entrée de plusieurs substances nocives dans les écosystèmes aquatiques. Les contaminants nocifs non normés (CNNN), présents dans les effluents des stations d'épuration, sont générés par des activités domestiques et industrielles et posent des défis majeurs. Leur réduction à la source ou lors du traitement des eaux usées municipales est nécessaire.

Les actions à la source, souvent plus viables économiquement, peuvent jouer un rôle clé dans la réduction des CNNN présents dans les eaux usées. Elles incluent le bannissement de certains CNNN ou la réduction de leur utilisation, le traitement à la source dans le milieu industriel, la mise en place d'une réglementation plus stricte concernant les rejets non domestiques à l'égout, la sensibilisation du public et l'amélioration de la communication concernant l'impact des CNNN sur les écosystèmes aquatiques. Les interventions bénéfiques en amont des stations incluent aussi des mesures dans les réseaux d'égout pour réduire les quantités d'eaux parasites qui diluent les CNNN et peuvent faire augmenter les coûts associés à leur traitement dans les stations, en plus de diminuer leur efficacité.

Dans un contexte de production et de rejet continus d'un large éventail de substances chimiques, il est pertinent d'envisager une transition à long terme vers une production et une utilisation plus durables des produits chimiques. En parallèle, l'adoption d'une stratégie proactive et évolutive concernant le traitement des CNNN dans les stations d'épuration des eaux usées s'avère nécessaire.

À court terme, plusieurs interventions d'optimisation pourraient être mises en œuvre, notamment la maximisation de l'enlèvement des matières en suspension (MES). Les traitements secondaires biologiques, surtout les systèmes à âges de boues élevés comme les systèmes nitrifiants, présentent aussi des cobénéfices importants : ils permettent de réduire la présence de plusieurs CNNN biodégradables et solubles. La mise aux normes réglementaires exigée pour 2030 dans plusieurs grandes stations d'épuration québécoises constitue une occasion d'envisager l'intégration de procédés nitrifiants, voire dénitrifiants, dans le but de réduire la présence de certains CNNN et de planifier la mise en place de traitements avancés pour obtenir des réductions additionnelles. Parmi les technologies de traitement avancé prometteuses, l'utilisation de charbon actif et l'ozonation se distinguent par leur maturité technologique. L'élaboration de la solution optimale en matière de traitement et des objectifs de performance devrait tenir compte des caractéristiques locales (débits, caractéristiques des affluents et contraintes techniques), environnementales et économiques.

Face à la complexité des enjeux, la mise en place d'une approche intégrée est recommandée pour réduire durablement l'impact des CNNN sur les écosystèmes et la santé humaine. Pour être efficace, l'approche devrait miser non seulement sur une réglementation axée sur la gestion du risque et sur les résultats, mais aussi sur une révision des modes de financement des infrastructures de gestion des eaux usées ainsi que sur la sensibilisation des parties prenantes.

Table des matières

Avant-propos	iii
Résumé	iv
Abréviations	vi
Glossaire	vii
Membres de la Table de consultation scientifique sur les contaminants nocifs non normés	ix
Soutien aux travaux de la Table	ix
Introduction	1
Partie 1. La problématique des CNNN dans les eaux usées municipales	3
1.1 Présence des CNNN dans les eaux usées municipales	3
1.2 Impacts sur les écosystèmes aquatiques	5
1.3 Impacts sur les sources d'eau potable	7
1.4 Impacts sur la santé humaine	8
Partie 2. Solutions pour s'attaquer à la problématique des CNNN dans les eaux usées municipales du Québec	10
2.1 Interventions en amont des stations d'épuration	10
2.2 Interventions à mettre en place aux stations d'épuration	20
2.3 Élaboration d'une grille d'analyse multicritères pour prioriser les CNNN, les stations d'épuration et les interventions	28
2.4 Innovation en matière de financement	30
Recommandations	33
Interventions en amont des stations d'épuration	33
Interventions aux stations	34
Recommandations générales	35
Références	36

Abréviations

6PPD	N-(1,3-diméthylbutyl)-N'-phényl-p-phénylènediamine
6PPD-q	N-(1,3-diméthylbutyl)-N'-phényl-p-phénylènediamine-quinone
BPC	Biphényles polychlorés
CAG	Charbon actif en grains
CAP	Charbon actif en poudre
CNNN	Contaminants nocifs non normés
CO ₂	Dioxyde de carbone
DBO ₅ C	Demande biochimique en oxygène après 5 jours, partie carbonée
GES	Gaz à effet de serre
GRA	Gène de résistance aux antimicrobiens
IAM	Ingrédient actif de médicament
ICI	Industries, commerces et institutions
LET	Lieu d'enfouissement technique
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MES	Matières en suspension
N ₂	Diazote
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NH ₄ ⁺	Azote ammoniacal
NO ₃ ⁻	Nitrate
PBDE	Polybromodiphényléthers
PFCA	Acide perfluorocarboxylique
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque
REACH	Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances
REP	Responsabilité élargie du producteur
ROMAEU	Règlement sur les ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées
SPFA	Substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées

Glossaire

Aérobic, conditions aérobies : Présence d'oxygène.

Anoxie, conditions anoxiques : Absence d'oxygène.

Âge de boues : Temps moyen pendant lequel les boues d'épuration sont maintenues dans le système avant leur extraction (quantité de boues dans le système / soutirage des boues).

Bioessai : Test en laboratoire exposant un modèle vivant (cellules ou organismes) à une substance ou à un échantillon environnemental, dans des conditions contrôlées, afin d'évaluer ses effets biologiques (ex. : mortalité, croissance, reproduction, perturbation endocrinienne)

Biosolide municipal : Résidu qui contient des matières organiques et des éléments nutritifs et qui résulte du traitement des eaux usées d'un ouvrage municipal d'assainissement des eaux usées.

Boues activées : Procédé de traitement biologique des eaux usées dont la base est l'accumulation sous forme de floc de bactéries et d'autres microorganismes.

Caractérisation initiale : Étude menée par le MELCCFP, en partenariat avec les municipalités exploitant les 42 plus grandes stations d'épuration au Québec, visant à identifier, quantifier et évaluer les contaminants présents dans les eaux usées municipales, avant et après traitement, afin de mesurer leur impact potentiel sur l'environnement et la performance des stations d'épuration.

Contaminants nocifs non normés (CNNN) : Composés pouvant provoquer des effets néfastes sur l'environnement et la santé qui sont présents dans les ressources en eau, mais non visés directement par la réglementation ni suivis actuellement dans les eaux usées.

Dénitrification : Transformation biologique des nitrates en azote gazeux (diazote).

Eaux parasites : Eaux retrouvées dans un système d'égout qui ne sont pas des eaux usées. Les eaux parasites regroupent les eaux d'infiltration et les eaux pluviales (eaux de captage).

Eaux usées municipales : Eaux qui proviennent des maisons, des industries, des commerces et des institutions qui, dans le cas des réseaux d'égout unitaires, sont combinées aux eaux pluviales.

Égout unitaire : Type d'égout qui collecte dans une même conduite à la fois les eaux usées (domestiques, industrielles, commerciales et institutionnelles) et les eaux pluviales.

Étang aéré : Bassin utilisé pour le traitement biologique des eaux usées dans lequel de l'air est injecté pour assurer la présence d'oxygène dissous.

Nitrification : Transformation biologique de l'azote ammoniacal en nitrates.

Perturbateur endocrinien : Substance ou mélange de substances capable d'interférer avec le fonctionnement du système endocrinien. Cette perturbation peut conduire à des effets délétères sur la santé d'un organisme ou sur sa descendance.

Traitement avancé : Traitement des eaux usées qui vise expressément l'élimination de CNNN.

Traitement primaire : Étape de traitement des eaux usées qui vise à en retirer des matières solides.

Traitement secondaire : Étape de traitement des eaux usées qui vise à éliminer, grâce à des procédés biologiques, la matière organique et, selon le cas, l'azote ammoniacal et les nitrates.

Traitement tertiaire : Étape de traitement des eaux usées qui vise à retirer les matières indésirables qui ont résisté au traitement primaire et au traitement secondaire, par un traitement plus poussé de séparation solide-liquide permettant un enlèvement accru des matières en suspension (p. ex. : filtration).

Membres de la Table de consultation scientifique sur les contaminants nocifs non normés

Chercheuses et chercheurs

Benoît Barbeau – Polytechnique Montréal
François-René Bourgeois – Centre des technologies de l'eau
Dominique Claveau-Mallet – Polytechnique Montréal
Yves Comeau – Polytechnique Montréal
Sarah Dorner – Polytechnique Montréal
Valérie Langlois – Institut national de la recherche scientifique
Mathieu Lapointe – École de technologie supérieure
Sébastien Sauvé – Université de Montréal
Pedro A. Segura – Université Sherbrooke
Céline Vaneeckhaute – Université Laval
Peter Vanrolleghem – Université Laval
Jonathan Verreault – Université du Québec à Montréal
Viviane Yargeau – Université McGill

Villes

Frédéric Cloutier – Ville de Québec
Denis Dufour – Ville de Québec
Pierre Juteau – Ville de Montréal
Caroline Ky – Ville de Longueuil
Isabelle Papineau – Ville de Laval

Réseau environnement

Marc-André Desjardins – Artelia Canada
Jean Paquin – Fondation 2025 et retraité de Sanexen

Soutien aux travaux de la Table

Coordination des travaux de la Table :

Justine Lacombe Bergeron, Bernard Patry, Benoît Rigaud de la Direction des eaux usées (MELCCFP), Nancy Bernier de la Direction principale des eaux usées et de la gouvernance de l'eau (MELCCFP) et Marie-Josée Barriault de la Direction de la gestion stratégique de l'eau (MAMH)

Rédaction du rapport :

Justine Lacombe Bergeron et Bernard Patry de la Direction des eaux usées (MELCCFP)

Soutien scientifique aux travaux de la Table :

MELCCFP

Direction des eaux usées : Milouda Achahboune-Steward, Martin Bouchard Valentine, Rino Dubé
Direction de l'eau potable et des eaux souterraines et de surface : Philippe Cantin, Daria Pereg
Direction de l'analyse des impacts des contaminants sur les milieux aquatiques : Imad Aharchaou, Abigaëlle Dalpé-Castilloux, Marianne Métivier
Direction de l'expertise en valorisation et élimination : Vanessa Mercure-Godin
Centre d'expertise en analyses environnementales du Québec : Mélanie Desrosiers, Gabriel Munoz

Université Laval

Coline Milhau

Institut national de la santé publique du Québec

Nicolas Parenteau

Introduction

Les contaminants nocifs non normés (CNNN) suscitent une attention croissante dans le domaine de la gestion des eaux usées municipales. Bien que leur présence dans les eaux usées et les eaux de surface soit bien connue, ils demeurent une préoccupation relativement récente. Définis au sens large comme des composés présents dans les ressources en eau, mais non réglementés ni suivis actuellement, les CNNN incluent un vaste éventail de substances. Parmi ces substances figurent des contaminants établis et d'intérêt émergent, tels que des substances chimiques industrielles utilisées pour produire des plastiques (p. ex. : phtalates, bisphénols), les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (SPFA) utilisées entre autres comme produits imperméabilisants, les retardateurs de flamme (p. ex. : polybromodiphényléthers [PBDE]), les produits pharmaceutiques et les hormones, le mercure et les biphenyles polychlorés (BPC). Par ailleurs, certaines substances actuellement non réglementées, comme l'azote total ou certains contaminants microbiologiques, peuvent également être considérées comme des CNNN. Toutefois, ces substances n'ont pas été incluses dans le cadre des travaux de la Table, car d'autres comités se consacrent à leur étude et à l'évaluation des actions requises pour réduire les risques qui y sont associés (MELCC, 2022).

Les CNNN ne sont généralement retirés que partiellement par les traitements conventionnels des eaux usées (Khasawneh et coll., 2021; Tabe et coll., 2016), ce qui peut représenter un risque pour les écosystèmes aquatiques et, dans certains cas, pour la santé humaine. Les stations d'épuration municipales sont avant tout conçues pour traiter la matière organique, les matières en suspension (MES), les nutriments et les microorganismes pathogènes. Elles ne sont pas adaptées à l'élimination efficace des CNNN. Contrairement aux polluants traditionnels, souvent présents en plus grande concentration, plusieurs CNNN suscitent des inquiétudes en raison de leur persistance, de leur potentiel de bioaccumulation, de leurs interactions synergiques possibles et/ou de leurs effets toxiques, même à de très faibles doses lors d'expositions chroniques. Face à ces défis, la population exprime une préoccupation croissante, s'inscrivant dans une prise de conscience de la diversité et de la sévérité des enjeux environnementaux (Wang et coll., 2024).

Pour répondre à cette problématique, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) a lancé plusieurs initiatives d'acquisition de connaissances sur les CNNN. Parmi celles-ci, un exercice de caractérisation initiale est en cours et vise à analyser la présence de plus de 400 CNNN dans les effluents des 42 plus grandes stations d'épuration du Québec. Cet exercice s'inscrit dans le cadre de la mesure 1.3 du Plan national de l'eau, qui vise à optimiser la gestion des eaux usées municipales et résidentielles. Il permettra de caractériser des effluents représentant 80 % des eaux usées municipales générées au Québec d'ici 2026.

En 2024, la Table de consultation scientifique sur les CNNN dans les eaux usées municipales a été créée par le MELCCFP pour renforcer les échanges entre experts, scientifiques et acteurs du milieu. Regroupant des chercheurs issus d'universités québécoises, ainsi que des représentants scientifiques des municipalités et d'organismes privés, la Table joue un rôle consultatif et a pour mandat :

- d'identifier les CNNN prioritaires en fonction des risques écologiques et de santé publique;
- de proposer des stratégies efficaces pour réduire leur présence dans les effluents municipaux.

Mieux comprendre les sources, le comportement et les impacts des CNNN est nécessaire afin de développer des solutions pour limiter leur présence et ainsi assurer la protection des ressources en eau et la santé des populations. Le présent rapport examine à cette fin la problématique des CNNN dans les eaux usées municipales, présente des solutions pour leur réduction et détaille les recommandations émises par

les membres de la Table. Les informations présentées dans ce rapport proviennent principalement des discussions menées lors des rencontres de la Table.

Partie 1. La problématique des CNNN dans les eaux usées municipales

Pour décrire la problématique des CNNN dans les eaux usées municipales, il convient d'abord de bien comprendre la composition de ces eaux et d'identifier les contaminants présents, ce qui requiert des campagnes de collecte de données. Les eaux usées municipales englobent à la fois les eaux domestiques et non domestiques, puisque des industries, commerces et institutions (ICI) déversent également leurs rejets dans le réseau d'égout municipal. Cette première partie du rapport explore la présence des CNNN dans ces eaux en examinant les principales sources de CNNN, les CNNN détectés le plus souvent après traitement et les défis techniques associés à l'élimination des CNNN. Elle examine également les effets potentiels de ces contaminants sur les écosystèmes aquatiques, sur la qualité des ressources en eau potable et sur la santé humaine.

1.1 Présence des CNNN dans les eaux usées municipales

1.1.1 Catégories de CNNN

Les CNNN présents dans les eaux usées municipales peuvent être regroupés en plusieurs catégories. Pour les besoins de ce rapport, ils ont été répartis en trois grandes catégories : les contaminants organiques, les contaminants inorganiques, et les micro- et nanoparticules (figure 1).

- **Les contaminants organiques** constituent le groupe le plus vaste. Ils incluent notamment :
 - **les composés pharmaceutiques** tels que les antidépresseurs, les antibiotiques, les anti-inflammatoires, les hormones synthétiques comme les contraceptifs oraux et d'autres médicaments couramment utilisés;
 - **les produits de soins personnels** comme certains shampoings, savons et crèmes solaires, qui peuvent contenir des CNNN, notamment des surfactants;
 - **les produits chimiques industriels**, parmi lesquels figurent les additifs plastiques, les SPFA, les détergents, les pesticides, les composés organométalliques, les retardateurs de flamme, les BPC, et les édulcorants artificiels.
- **Les contaminants inorganiques** regroupent les métaux en traces tels que le cadmium, le mercure, le plomb, l'aluminium et l'argent, souvent libérés par des activités industrielles ou par l'usure des infrastructures.
- **Les micro- et nanoparticules** comprennent notamment les micro- et nanoplastiques issus de la dégradation des produits plastiques, des fibres textiles synthétiques et des pneus. Les micro- et nanoplastiques sont aussi d'origine organique, mais ils sont dans une catégorie à part étant donné leurs caractéristiques distinctives (impacts, comportement, dégradation, etc.).

Il demeure toutefois difficile de broser un portrait exhaustif des contaminants présents dans les eaux usées municipales. Bien que les méthodes d'analyse en laboratoire permettent aujourd'hui de détecter un grand nombre de CNNN, la mise en marché continue de nouvelles substances chimiques rend leur caractérisation particulièrement complexe. À titre d'exemple, les SPFA forment une famille chimique qui compte, selon l'*Environmental Protection Agency* des États-Unis (USEPA), plusieurs milliers de composés distincts (USEPA, 2022).

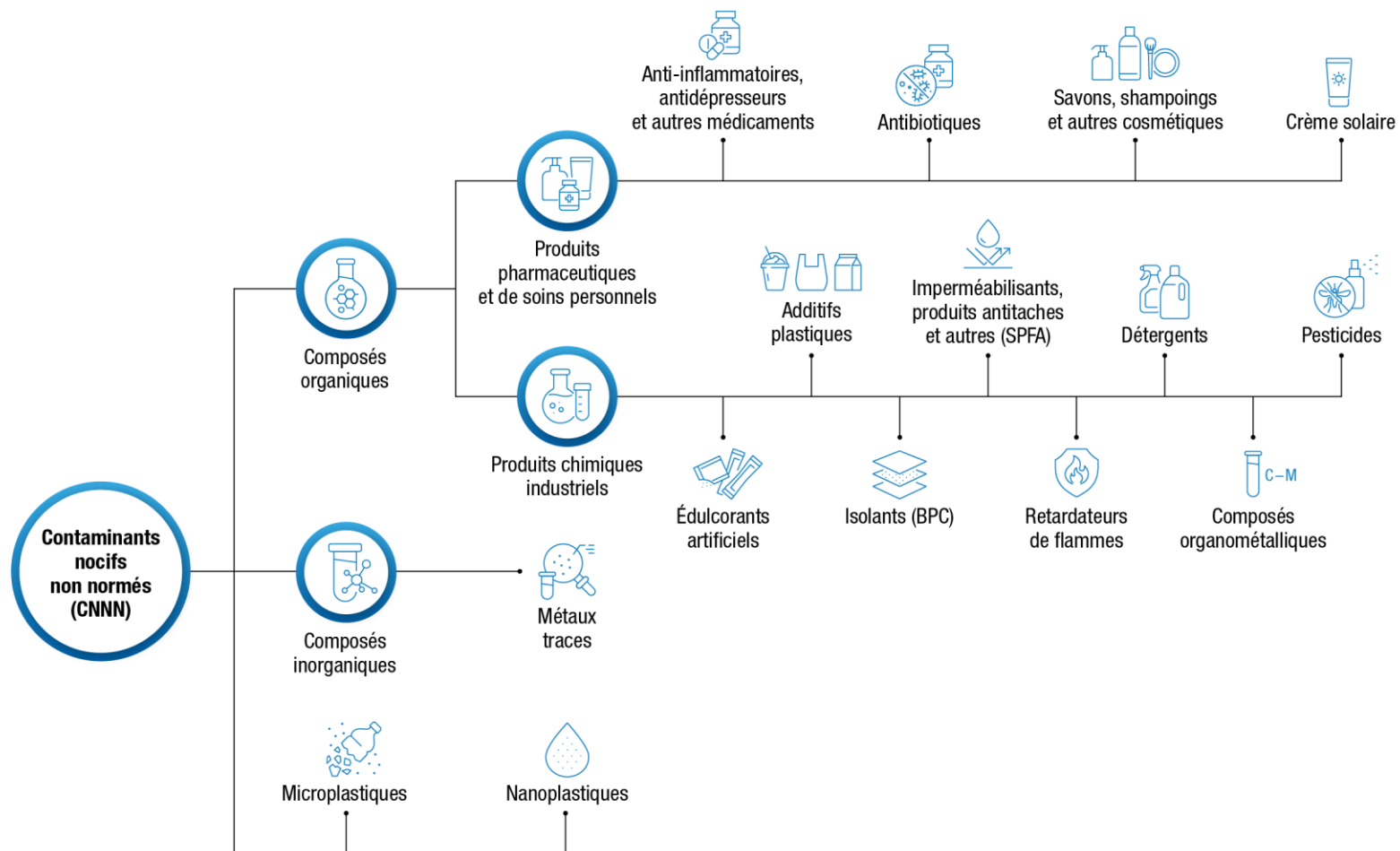


Figure 1 – Classification simplifiée des contaminants nocifs non normés (inspiré de Antunes et coll., 2021)

Par ailleurs, certains composés, tels que les hormones stéroïdiennes synthétiques, peuvent être présents à des concentrations faibles, tout en ayant des effets biologiques significatifs sur les organismes non ciblés. Leur détection par des analyses chimiques classiques peut s'avérer difficile. Des approches complémentaires, comme les bioessais évaluant les perturbations endocriniennes à l'aide de gènes rapporteurs, sont mieux adaptées pour obtenir une évaluation précise de leur présence et de leurs impacts potentiels. Ces méthodes permettent également de mieux appréhender les effets combinés de mélanges de contaminants (OCDE, 2023).

1.1.2 Sources de CNNN

Les sources de CNNN sont multiples et reflètent la diversité des activités humaines contribuant à leur rejet dans les eaux usées. Elles incluent :

- **les activités domestiques**, telles que l'utilisation de produits ménagers, de cosmétiques, et de médicaments ou le lavage de certains vêtements composés de tissus synthétiques contenant des retardateurs de flamme (Schreder et La Guardia, 2014) ou des SPFA (Saini et coll., 2017; Xia et coll., 2022);
- **les activités industrielles** qui libèrent une panoplie de composés chimiques et des métaux en traces, selon les activités de chacune des industries;
- **les eaux pluviales et les eaux issues de la fonte de la neige** qui transportent des microplastiques, des métaux en traces et des polluants d'origine urbaine accumulés sur les surfaces imperméables, par exemple le 6PPD-quinone provenant de l'usure des pneus (Saifur et Gardner, 2021);
- **les activités institutionnelles, commerciales et hospitalières** rejetant des produits pharmaceutiques et des désinfectants;
- **les activités d'enfouissement et de valorisation de matières résiduelles** : les effluents des lieux d'enfouissement technique (LET) sont parfois rejetés avec ou sans prétraitement dans les réseaux d'égout municipaux et peuvent contenir des CNNN tels que des SPFA et des retardateurs de flamme;
- **les eaux souterraines contaminées**, qui peuvent provenir de terrains contaminés, peuvent s'infiltrer dans les égouts.

La diversité des sources contribue à la complexité de la problématique, d'autant plus que la plupart des contaminants ne sont pas entièrement éliminés par les traitements conventionnels appliqués aux eaux usées. Néanmoins, le fait que les CNNN issus de ces différentes sources convergent vers une station d'épuration offre une occasion de traitement centralisé. Toutefois, la dilution des eaux usées, notamment par les eaux parasites, constitue un enjeu important, ce qui souligne la pertinence d'adopter des stratégies de contrôle à la source en complément des traitements en aval.

1.2 Impacts sur les écosystèmes aquatiques

Les écosystèmes aquatiques, essentiels à l'équilibre de la biodiversité et au fonctionnement des réseaux trophiques, subissent des pressions croissantes liées aux activités humaines. Parmi ces pressions, la pollution des eaux par des rejets d'eaux usées peut altérer non seulement la qualité de l'eau, mais également la santé des habitats et des organismes aquatiques (figure 2).

Apports chroniques de CNNN vers les écosystèmes aquatiques

Les eaux usées municipales représentent un mélange complexe de composés biologiques et chimiques autant organiques qu'inorganiques. Parmi eux, les métaux en traces tels que le plomb, le mercure et le cadmium, ainsi que des produits chimiques industriels comme les solvants et les pesticides, peuvent perturber les écosystèmes aquatiques. Ces substances toxiques peuvent nuire à la physiologie, à la reproduction (Vajda et coll., 2008), au système immunitaire (Houde et coll., 2014) et à la survie des organismes aquatiques, et ainsi engendrer un déséquilibre dans les chaînes trophiques. Certaines études réalisées au Québec démontrent par exemple que l'exposition chronique d'un poisson prédateur comme le grand brochet à des effluents municipaux peut avoir des effets sur le métabolisme des acides gras et la régulation des hormones thyroïdiennes (Reinling et coll., 2017).

Parallèlement, les résidus de médicaments, d'hormones synthétiques, de cosmétiques et de détergents rejetés dans les milieux aquatiques peuvent provoquer des dérèglements endocriniens chez les organismes, affectant notamment leur reproduction et leur développement (Kasprzyk-Hordern et coll., 2009; Kidd et coll., 2007; Vaudreuil et coll., 2024). Bien que souvent difficiles à détecter à court terme, ces effets peuvent engendrer des conséquences durables sur les populations animales. De nombreuses substances sont conçues afin d'être bioactives chez l'humain ou les animaux domestiques, et peuvent interagir de manière inattendue avec des organismes non ciblés dans l'environnement. De plus, les composés pharmaceutiques se retrouvent dans l'environnement sous forme de mélanges complexes susceptibles de produire des effets synergiques ou antagonistes difficiles à prévoir (Meador et coll., 2016; Samal et coll., 2022).

Perturbation des habitats aquatiques

Les habitats aquatiques subissent également des modifications importantes dues au rejet de contaminants et, dans certains cas, à leur sédimentation. Les contaminants adsorbés sur les matières en suspension peuvent se déposer dans les zones benthiques (les fonds marins ou lacustres), perturbant les organismes qui y vivent. Une sédimentation excessive peut étouffer les habitats, empêcher le développement de certaines espèces et altérer la dynamique écologique de ces zones vitales (Chapman et coll., 2013; Meador et coll., 2016; Reid et coll., 2019).

Impacts sur la faune et la flore aquatiques

Les CNNN rejetés dans l'environnement aquatique, tels que les métaux (Singh et Sharma, 2024), les produits pharmaceutiques (Gómez-Regalado et coll., 2023) ou les surfactants comme les nonylphénols polyéthoxylés – plus précisément leurs produits de dégradation, les nonylphénols (De la Parra-Guerra et Acevedo-Barrios, 2023) – et certains surfactants anioniques (Tolls et coll., 2000), s'accumulent dans les tissus des organismes aquatiques par un processus appelé bioaccumulation. Ceci peut également engendrer une toxicité affectant durablement la santé des espèces, fragilisant ainsi les populations animales et perturbant la chaîne alimentaire (Kolarova et coll., 2021; Nilsen et coll., 2018).

En outre, l'introduction de substances chimiques et l'excès de nutriments peuvent favoriser certaines espèces envahissantes au détriment d'espèces indigènes plus sensibles (Strayer, 2010; Fruh et coll., 2012). Cette modification de l'équilibre naturel entraîne une perte de biodiversité, affectant la résilience des écosystèmes aquatiques face aux changements environnementaux (Katsanevakis et coll., 2014; Havel et coll., 2015).

Le cas particulier des microplastiques et des nanoplastiques

Les microplastiques et les nanoplastiques ont des impacts croissants sur les écosystèmes aquatiques, principalement en raison de leur omniprésence et de leur persistance dans l'environnement (Boucher et coll., 2020). Ces particules peuvent être ingérées par les organismes aquatiques, notamment les mammifères marins, les poissons, les mollusques et les crustacés (Kahane-Rapport et coll., 2022), ce qui peut entraîner l'altération de leur système digestif. En outre, ces particules peuvent adsorber d'autres

contaminants présents dans le milieu tels que des pesticides, des métaux en traces et des additifs plastiques. Une fois ingérés, ces polluants peuvent être relargués dans l'organisme hôte et s'accumuler dans ses tissus. Par ailleurs, certains micro- et nanoplastiques peuvent servir de vecteurs à des microorganismes pathogènes ou à divers polluants, contribuant ainsi à leur dispersion dans les milieux aquatiques (Isobe et coll., 2021). Les microplastiques ont tendance à se fragmenter en particules encore plus petites : les nanoplastiques. Ces derniers, en raison de leur taille infime, posent des enjeux encore plus importants, tant sur le plan de leur transport dans l'environnement que de leur ingestion par une grande diversité d'organismes aquatiques (Dumoulin et St-Germain, 2023).

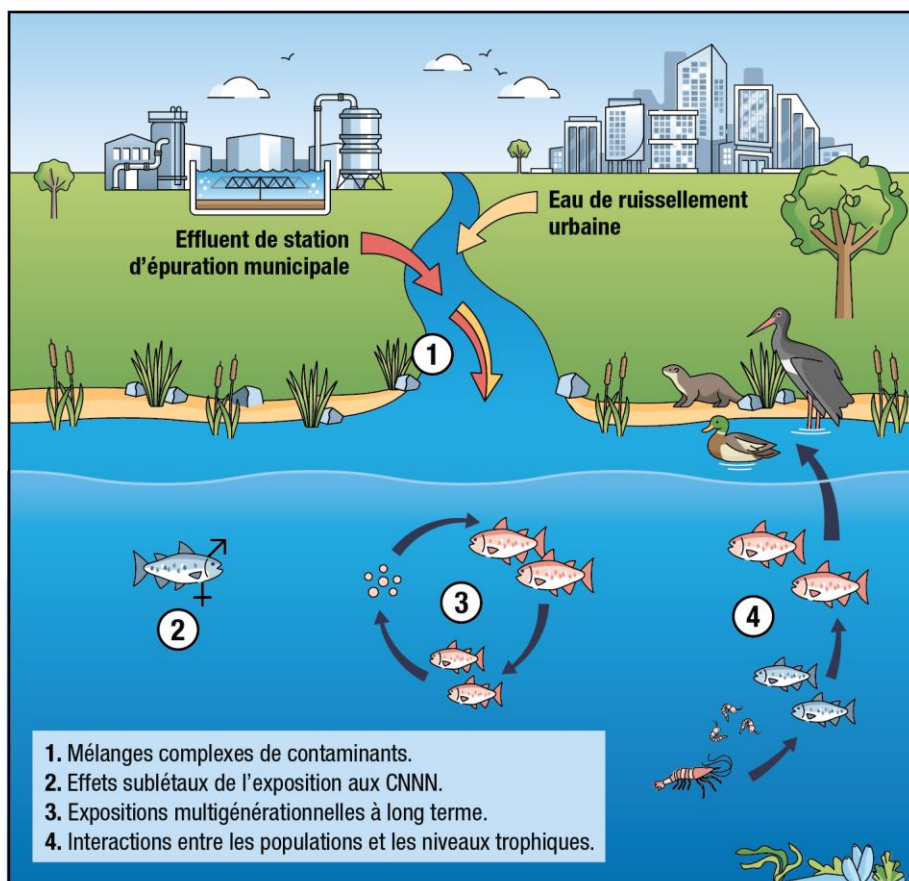


Figure 2 – Principaux impacts des CNNN sur les écosystèmes aquatiques (adapté de Nilsen et coll., 2018)

Remarque : les eaux souterraines, les biosolides et les dépôts atmosphériques peuvent aussi constituer des vecteurs de CNNN.

1.3 Impacts sur les sources d'eau potable

Les rejets d'eaux usées contenant des CNNN peuvent entraîner des conséquences sur les sources destinées à l'alimentation en eau potable, particulièrement les eaux de surface. Ces impacts se manifestent par une diminution de la qualité de l'eau brute, ce qui accroît la complexité et les coûts des traitements nécessaires pour produire une eau conforme aux normes de potabilité. Au Québec, plus de 50 % de la population est alimentée en eau potable à partir d'une source d'approvisionnement constituée d'eau de surface, dont la principale est le fleuve Saint-Laurent. Le Règlement sur la qualité de l'eau potable comprend plus de 80 normes bactériologiques, physicochimiques et relatives au traitement afin d'assurer

la qualité de l'eau distribuée à la population. Bien que ces normes fassent l'objet d'ajustements ponctuels pour tenir compte des risques pour la santé humaine et des contraintes d'application, la majorité des contaminants d'intérêt émergent ne sont ni systématiquement surveillés ni réglementés en raison de leur relative nouveauté et de la complexité de leur détection.

Les rejets d'eaux usées introduisent continuellement de nouveaux polluants dans les milieux récepteurs. Ces substances, souvent peu étudiées (voire pas du tout) et aux impacts encore mal compris, posent des problèmes en ce qui concerne non seulement leur élimination, mais également leur surveillance. Les usines de production d'eau potable ne sont pas conçues pour traiter systématiquement ces polluants, et les méthodes d'analyse permettant de les identifier sont souvent inexistantes ou en développement. Par ailleurs, les régimes d'exploitation dans ces installations alimentées en eau de surface ciblent principalement l'abattement des microorganismes pathogènes, de la couleur et de la turbidité avec des procédés qui ne sont pas nécessairement efficaces pour éliminer les contaminants d'intérêt émergent. Des technologies comme l'oxydation avancée et l'adsorption sur charbon actif peuvent contribuer à l'élimination des CNNN, mais elles peuvent entraîner des coûts élevés.

Une approche complémentaire au traitement de l'eau potable consisterait à intervenir en amont, notamment par le renforcement du traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel (voir la section 2.2). Cela permettrait de préserver la qualité des eaux de surface avant leur captage pour la production d'eau potable, ce qui réduirait les besoins en traitements complexes en aval. De plus, des mesures de prévention à la source (voir la section 2.1) – comme la sensibilisation du public, la réglementation plus stricte de certaines substances ou la limitation de leur usage – contribueraient à diminuer la présence des CNNN dès leur entrée dans le cycle de l'eau. Cette vision s'inscrit dans l'esprit de l'approche à barrières multiples qui repose sur un système intégré de procédures, de processus et d'outils visant à empêcher ou à réduire la contamination de l'eau potable, de la source au robinet, afin de minimiser les risques pour la santé publique (Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable, 2002).

1.4 Impacts sur la santé humaine

Les CNNN rejetés par les eaux usées municipales peuvent avoir des impacts sur la santé humaine. Ces impacts sont majoritairement indirects, car les eaux usées traitées sont rejetées dans l'environnement, où elles se mélangent aux eaux de surface. Ces eaux peuvent ensuite être reprises, traitées à nouveau et consommées sous la forme d'eau potable. La population est ainsi potentiellement exposée à des traces de contaminants. L'exposition humaine aux contaminants bioaccumulables ou bioamplifiables par la consommation d'organismes aquatiques (principalement le poisson) est aussi possible (Alves et coll., 2017; Dorea, 2008). Toutefois, il est difficile d'associer avec certitude la présence des CNNN dans l'eau potable ou dans les organismes aquatiques aux rejets d'eaux usées municipales, en raison de la diversité des sources potentielles de contamination. De plus, les doses de contaminants auxquelles les populations humaines sont exposées et la contribution des CNNN rejetés dans les eaux usées municipales à cette exposition demeurent incertaines compte tenu des autres sources d'exposition (alimentation, produits de consommation, etc.).

Certains CNNN présents dans les eaux usées municipales, s'ils persistent dans l'eau potable ou se retrouvent dans les aliments, pourraient avoir divers effets sur la santé humaine si les doses d'exposition sont suffisantes. Voici des exemples :

- **Perturbateurs endocriniens** (comme les œstrogènes synthétiques, le bisphénol A et les phtalates) : Ces composés sont susceptibles d'entraîner des troubles de la reproduction, des anomalies du développement et une augmentation du risque de cancers hormonodépendants (Amir et coll., 2021; Scsukova et coll., 2016).

- **SPFA** : Ces composés persistants et bioaccumulables sont liés à une diminution des anticorps, à une altération des fonctions de la thyroïde et du profil lipidique et à des risques accrus de certains cancers (Fenton et coll., 2021; Baldwin et coll., 2023).
- **Métaux** : Des métaux comme le mercure et le plomb peuvent causer plusieurs effets toxiques. Ils sont notamment neurotoxiques, en particulier chez les enfants, et peuvent affecter le développement cognitif et comportemental (Branco et coll., 2021). Ces métaux sont cependant normés et suivis dans l'eau potable.
- Les impacts des CNNN sur la santé humaine sont donc souvent **indirects**, car ils résultent d'interactions complexes avec l'environnement qu'il convient d'étudier et d'analyser davantage.

Résistance aux antimicrobiens

La résistance aux antimicrobiens, soit la capacité qu'ont certains microorganismes pathogènes à survivre aux médicaments conçus pour les éliminer, représente un enjeu pour la santé publique. Bien que les antimicrobiens soient des outils importants pour traiter les infections bactériennes, virales et fongiques, leur utilisation excessive en médecine humaine et vétérinaire ainsi qu'en agriculture entraîne des conséquences préoccupantes, tant sur la santé que sur l'environnement.

L'un des effets les plus notables est la présence d'antimicrobiens et de microorganismes résistants dans l'environnement, notamment dans les eaux usées, les milieux aquatiques et les réseaux de distribution d'eau potable (CDC, 2024). Plusieurs sources contribuent à cette contamination, dont les stations d'épuration des eaux usées, les établissements de santé et les industries pharmaceutiques, identifiés comme des « points chauds » qui contribuent à la résistance aux antimicrobiens (Berendonk et coll., 2015).

Les stations d'épuration, bien qu'efficaces pour réduire la charge bactérienne, peinent à éliminer complètement les gènes de résistance aux antimicrobiens (GRA). Plus de 90 % des GRA captés par une station d'épuration se retrouvent dans les biosolides, tandis qu'environ 10 % sont rejetés dans l'environnement avec l'effluent (Bürgmann et coll., 2018). Ces rejets favorisent la dissémination des GRA et leur transfert horizontal dans les écosystèmes aquatiques (Rizzo et coll., 2013; Czekalski et coll., 2012; Pazda et coll., 2019). La présence de microorganismes résistants et de GRA a aussi été détectée dans les réseaux de distribution d'eau potable (Sanganyado et Gwenzy, 2019; Rilstone et coll., 2021; Duarte et coll., 2022).

Malgré les traitements appliqués, les GRA persistent dans les cours d'eau, les sédiments et la faune aquatique, se propageant à travers les écosystèmes et augmentant les risques de contamination pour les humains et les animaux (Mao et coll., 2015; An et coll., 2018; Karkman et coll., 2018). Face à cette problématique, l'approche intégrée « une seule santé » s'impose (OMS, 2023). Cette approche reconnaît l'interconnexion entre la santé humaine, la santé animale et la santé environnementale, et constitue un cadre pour mieux comprendre, surveiller et atténuer l'évolution de la résistance aux antimicrobiens.

Partie 2. Solutions pour s'attaquer à la problématique des CNNN dans les eaux usées municipales du Québec

Face aux défis posés par la présence de CNNN dans les eaux usées municipales, une approche globale et structurée pour protéger les écosystèmes aquatiques et la santé publique devrait être adoptée. Cette seconde partie explore des solutions concrètes et différents types d'intervention. Elle examine d'abord l'importance de **la réduction à la source**, qui repose sur une responsabilisation accrue des différents acteurs en amont des stations d'épuration. Ensuite, elle met en lumière **les améliorations possibles dans les stations d'épuration**, notamment l'optimisation des traitements existants. Pour maximiser l'efficacité des interventions, **l'élaboration d'une grille d'analyse multicritères** est proposée. Cet outil permettrait de prioriser les actions en fonction de la sensibilité des milieux récepteurs et des spécificités locales. Enfin, cette section s'intéresse aux **solutions innovantes en matière de financement des infrastructures en eau** afin de soutenir durablement la transition vers une gestion optimisée et responsable des eaux usées municipales.

2.1 Interventions en amont des stations d'épuration

Le contrôle à la source ainsi que d'autres interventions pouvant être mises en place pour éviter que les contaminants soient rejetés au réseau d'égout sont à envisager pour certains CNNN difficilement traitables aux stations d'épuration. Il est en effet souvent plus rentable économiquement de traiter à la source de petits débits concentrés que des débits importants avec de faibles concentrations aux stations d'épuration. Il pourrait donc être judicieux d'installer des prétraitements dans certains établissements industriels ou de réduire autrement leurs rejets de CNNN. Ces actions pourraient entre autres être mises en œuvre par le biais de la réglementation municipale relative aux rejets dans les réseaux d'égout. Plusieurs autres interventions en amont des stations sont envisageables et seront abordées dans cette section.

2.1.1 Bannissement des contaminants ou réduction de leur présence dans les produits commerciaux et les usages industriels : l'exemple des SPFA

L'élimination des CNNN et la réduction de leur présence dans les produits de consommation et les usages industriels sont les premières mesures à envisager. Les industries, avec l'aide des gouvernements, ont la responsabilité d'adopter des pratiques durables et d'éliminer progressivement de leur chaîne de production des substances comme les SPFA, dont on sait déjà qu'elles représentent des risques pour la santé humaine et l'environnement (Baldwin et coll., 2023).

Au Canada, le gouvernement fédéral prévoit une interdiction progressive de certains usages des SPFA à partir de 2027. La première phase concerne l'interdiction de l'utilisation de SPFA dans les mousses extinctrices. La deuxième phase de restriction des usages concerne entre autres les cosmétiques, les emballages alimentaires, les textiles et les produits non industriels en contact avec les aliments tels que les assiettes, les bols et les tasses en carton (ECCC, 2025). À l'instar de plusieurs États américains, le gouvernement du Québec pourrait adopter sa propre réglementation pour interdire certains usages des SPFA sur son territoire.

Des précédents existent : les États de la Californie (California Assembly, 2022) et de New York (New York State Legislature, 2022) interdisent les SPFA dans les emballages alimentaires depuis 2023, et depuis le début de l'année 2025, ils sont également bannis des vêtements. Le Maine vise une interdiction quasi totale des SPFA dans les produits vendus d'ici 2030 (Maine State Legislature, 2021). Le bannissement de SPFA

pour des usages non essentiels (cosmétiques, gazon synthétique, articles de cuisine, textiles, etc.) sera en vigueur au Vermont dès 2026 (Vermont Legislature, 2024). Cet État est aussi le premier à bannir l'utilisation de phtalates, de formaldéhyde et de mercure, entre autres dans les produits de soins personnels. Le Maryland, le Colorado, le Minnesota, le Rhode Island et l'État de Washington ont également adopté ou proposé des bannissements similaires pour les SPFA. En Europe, une interdiction généralisée des SPFA est en cours d'élaboration et certains groupes de SPFA, notamment les PFCA, dont fait partie le PFHxA, sont déjà interdits dans les textiles (European Chemicals Agency, 2025). La France a aussi annoncé l'interdiction de plusieurs usages dès 2026 (République française, 2025).

Ces mesures ont déjà un impact tangible sur l'offre commerciale mondiale, du fait de la pression normative venant notamment de l'Union européenne ou encore de la Californie. Pour simplifier leur chaîne logistique et éviter de produire différentes versions d'un même produit, les entreprises choisissent souvent d'uniformiser leurs gammes en adoptant des normes plus strictes, même dans les régions où le respect de telles normes n'est pas encore obligatoire. Cette dynamique contribue à accélérer la transition vers des produits sans SPFA. Ainsi, plusieurs grandes marques internationales, notamment dans les secteurs des vêtements, du mobilier et des revêtements (tapis, textiles), ont déjà retiré les SPFA de leur chaîne de production.

Une tendance similaire est observée dans le secteur de l'alimentation. En 2024, la *Food and Drug Administration* (USFDA) des États-Unis a confirmé l'interdiction de l'utilisation des SPFA comme agents de résistance aux graisses dans les emballages alimentaires en papier à la suite d'un engagement volontaire coordonné par l'ensemble des fabricants concernés (USFDA, 2025). Ces matériaux constituent une source importante d'exposition aux SPFA dans les produits de consommation courante, notamment dans les emballages utilisés par l'industrie de la restauration rapide.

Le Québec pourrait donc agir dès maintenant. Contrairement à l'idée reçue selon laquelle seuls les grands États peuvent influencer le marché, des États de plus petite taille, comme le Vermont, ont démontré qu'il est tout à fait possible de mettre en place des mesures ambitieuses pour encadrer l'usage des SPFA et d'autres CNNN. Le Québec, avec sa capacité d'innovation et ses leviers réglementaires, pourrait s'inspirer de tels exemples.

Certaines actions pourraient être envisagées, telles que les suivantes :

- Élaborer un calendrier progressif d'interdiction, en s'inspirant de la Californie, du Vermont, du Maine ou de la France, et en travaillant en collaboration avec les secteurs industriels concernés pour assurer une transition réaliste;
- Mettre en place un étiquetage obligatoire pour les produits contenant des SPFA lorsque leur remplacement n'est pas encore techniquement réalisable, afin de permettre aux consommateurs de faire des choix éclairés et d'exercer une pression de marché favorable aux produits sans SPFA.

De telles mesures pourraient non seulement réduire l'exposition de la population québécoise aux SPFA, mais également diminuer les rejets de ces substances dans les eaux usées municipales, contribuant ainsi à protéger les écosystèmes aquatiques et à alléger le fardeau du traitement des eaux et des biosolides municipaux.

Au-delà des SPFA : s'inspirer du règlement REACH

Des mesures de bannissement ou de réduction de l'utilisation pourraient également être envisagées pour d'autres CNNN. L'expérience du règlement REACH de l'Union européenne offre un exemple pertinent à cet égard. Adopté pour mieux protéger la santé humaine et l'environnement face aux risques liés aux

substances chimiques, REACH vise aussi le transfert de la responsabilité vers les industries, qui doivent enregistrer les substances chimiques fabriquées ou importées et assurer la gestion des risques.

Lorsqu'un contaminant est inscrit sur la liste des substances soumises à une autorisation ou une restriction dans le cadre du règlement REACH, cela signifie souvent que d'autres solutions ont déjà été identifiées et adoptées par plusieurs entreprises européennes. Ainsi, le fait qu'un CNNN figure déjà dans le règlement REACH pourrait faciliter son interdiction au Québec, puisque des solutions de remplacement sont probablement disponibles sur le marché international et certaines filières industrielles se sont déjà adaptées (ECHA, 2025).

Innovation responsable

Au-delà de la réduction de l'exposition aux SPFA et autres CNNN et de leur rejet dans l'environnement, ces actions devraient s'inscrire dans une démarche plus large d'innovation responsable. Pour assurer une transition efficace et éviter les cas de substitution regrettables – comme celui du bisphénol A, remplacé par des substances tout aussi nocives (Hengstler et coll., 2011; Moon, 2019) –, le Québec devrait instaurer un mécanisme rigoureux d'évaluation des substances de remplacement. Il pourrait également mettre en place des incitatifs à la recherche et à l'adoption de procédés industriels exempts de contaminants persistants. Cela suppose de soutenir activement la recherche et le développement dans la conception moléculaire de composés capables de se dégrader rapidement dans l'environnement, en conformité avec le dixième principe de la chimie verte : « concevoir des produits chimiques pour qu'ils se dégradent » (Anastas et Warner, 2000).

2.1.2 Encadrement des rejets non domestiques à l'égout

L'uniformisation de la réglementation relative aux rejets d'eaux usées industrielles dans les réseaux d'égout au Québec apparaît nécessaire pour prévenir les disparités entre les municipalités et lutter contre le transfert des activités industrielles polluantes vers des régions où les normes sont moins strictes. Actuellement, cette compétence relève des municipalités, qui ont la possibilité de s'inspirer d'un modèle de règlement proposé par le MELCCFP¹.

Vers une réglementation québécoise

Un règlement du gouvernement du Québec sur les rejets d'eaux usées industrielles au réseau d'égout aurait les avantages suivants :

- **Une cohérence dans les normes appliquées** : Si des exigences de rejet minimales uniformes étaient établies, les industries n'auraient plus la possibilité d'exploiter les failles liées au manque d'uniformité dans la réglementation municipale.
- **Une meilleure gestion de l'information sur les ressources en eau potable** : Actuellement, les analyses de vulnérabilité des sources d'eau potable – essentielles pour évaluer les risques de contamination et protéger les ressources hydriques – sont limitées, en raison d'un manque de coordination entre les municipalités. Une réglementation uniforme à l'échelle du Québec permettrait d'harmoniser la collecte et le partage des données sur les rejets industriels. La centralisation de ces informations faciliterait l'identification des contaminants et des zones à risque, et renforcerait la capacité des autorités à évaluer les impacts cumulés.
- **Un appui à la valorisation des biosolides** : Une réglementation commune permettrait de mieux gérer les contaminants qui peuvent être présents dans les eaux usées industrielles, par exemple

¹ [Modèle de règlement relatif aux rejets dans les réseaux d'égout des municipalités du Québec](#) (en révision).

les SPFA. Ces contaminants peuvent se retrouver concentrés dans les boues issues des stations d'épuration. Cela complique leur gestion et limite leur potentiel de valorisation².

Rôle de l'écoconditionnalité

En l'absence d'une réglementation québécoise, l'intégration de principes d'écoconditionnalité pour l'accès à des subventions constituerait une avenue prometteuse. L'écoconditionnalité est un mécanisme qui lie le financement public des entreprises ou des organismes au respect de l'environnement. S'appuyant sur le principe du pollueur-payeur, elle permet de s'assurer de la performance environnementale des entreprises et de la cohérence des actions gouvernementales en matière de finances publiques (MDDELCC, 2015). Par exemple, les municipalités pourraient être tenues d'adopter le modèle de règlement du MELCCFP pour être admissibles à des aides financières destinées à la mise à niveau de leurs infrastructures d'assainissement.

Responsabiliser les industries

Le financement des mesures visant à gérer les CNNN dans les stations d'épuration soulève un enjeu d'action collective. Le cadre institutionnel actuel n'incite pas suffisamment les industries émettrices à prendre en charge le traitement de leurs rejets à la source. En l'absence d'investissements dans des systèmes de prétraitement adéquats, ces industries transfèrent une part importante de leur charge polluante aux infrastructures municipales, ce qui exerce des pressions accrues sur les systèmes d'épuration et peut engendrer des hausses de coûts pour les collectivités.

Il serait pertinent que les entreprises intègrent, dès leur implantation et lorsque la situation le justifie, les investissements requis pour le traitement de CNNN ciblés. Cela pourrait inclure l'installation de dispositifs de prétraitement adaptés. Une telle approche offre de nombreux avantages : elle permet la mise en place de solutions de traitement plus ciblées et plus efficaces, mieux adaptées aux contaminants présents à la source. Par ailleurs, certaines entreprises peuvent aussi adopter des changements afin de remplacer certaines substances nocives ou d'en éliminer l'usage.

Si une entreprise qui rejette certains CNNN jugés prioritaires n'a pas de prétraitement en place, une redevance environnementale basée sur le principe de pollueur-payeur devrait être instaurée. Les entreprises seraient tenues de contribuer proportionnellement aux coûts de modernisation et d'exploitation des infrastructures municipales utilisées pour gérer leurs rejets de CNNN.

Cette approche garantirait une responsabilisation accrue des industries tout en réduisant la pression financière sur les municipalités et en favorisant des pratiques industrielles plus durables. Par ailleurs, des programmes de soutien technique ou financier pourraient être développés pour aider les entreprises à investir dans l'économie verte et à se conformer à ces exigences, sans compromettre leur viabilité économique.

2.1.3 Diminution des rejets de composés pharmaceutiques dans les réseaux d'égout

Avec l'augmentation de la consommation de produits pharmaceutiques et de soins personnels, la contamination des ressources en eau par ces substances est devenue une préoccupation environnementale majeure (Samal et coll., 2022). L'omniprésence des ingrédients actifs de médicaments (IAM) ainsi que de leurs métabolites, d'additifs, d'adjuvants et de produits de transformation dans les eaux

² [Encadrement réglementaire des matières résiduelles fertilisantes.](#)

usées municipales et les eaux de surface constitue un enjeu écologique important (Sanderson, 2011; Bouzas-Monroy et coll., 2022), en plus de poser des risques de dissémination des bactéries résistantes aux antibiotiques et des gènes résistants aux antibiotiques (Pazda et coll., 2019).

Trois principales sources expliquent la présence d'IAM dans l'environnement : l'élimination dans l'urine et les fèces humaines et animales du médicament inchangé ou de ses métabolites, l'excrétion par la peau lors du lavage corporel et l'élimination inadéquate des médicaments périmés ou inutilisés dans les toilettes ou les éviers. Parmi ces facteurs, l'excrétion humaine et animale est la principale source de pollution (Daughton, 2010; Cook et coll., 2012).

Des substances telles que la carbamazépine, le diclofénac, le sulfaméthoxazole et le triméthoprim, issues des effluents domestiques et institutionnels (résidences privées, hôpitaux, centres de soins de longue durée), sont régulièrement détectées dans les réseaux d'égout (Santos et coll., 2013; Osuoha et coll., 2023; Gewurtz et coll., 2025). Leur présence dans les milieux récepteurs dépend de nombreux facteurs, notamment de leur demi-vie qui est liée à la stabilité des molécules et à leurs propriétés physicochimiques. La durée de la demi-vie peut varier, allant de plusieurs mois comme c'est le cas pour la carbamazépine à quelques heures ou quelques jours pour des substances comme le diclofénac, le sulfaméthoxazole ou l'ibuprofène. Toutefois, le rejet continu de médicaments et de métabolites de médicaments dans les milieux aquatiques confère à ces composés un caractère de pseudo-persistance (Tixier et coll., 2003; Batucan et coll., 2022).

Par ailleurs, la consommation et le rejet de médicaments et d'antibiotiques par les milieux vétérinaire, agricole, piscicole et zoologique contribuent également à l'augmentation de la charge en IAM dans les eaux usées et les eaux de surface.

Développement de médicaments plus écologiques

Une des solutions pour s'attaquer à la source du problème est la conception de médicaments capables de se dégrader rapidement une fois excrétés (Brodin et coll., 2024). Cette approche, connue sous le nom d'« inoffensive dès la conception » (*benign by design*), implique que les chercheurs adoptent une perspective environnementale dès les premières étapes de la conception, et tout au long du cycle de vie du médicament. Les propriétés chimiques et physiques des substances pharmaceutiques peuvent être modifiées afin que les ingrédients actifs se minéralisent complètement après leur excrétion par l'organisme, c'est-à-dire qu'ils se dégradent jusqu'à l'obtention de composés inorganiques comme le CO₂ et l'eau (Kümmerer, 2007; Puhlmann et coll., 2021). Cette stratégie s'inscrit pleinement dans les principes de la chimie verte (Anastas et Warner, 2000). Des progrès ont déjà été réalisés en ce sens, comme l'ajout de divers éléments moléculaires, tels que des esters, pour réduire la persistance environnementale des médicaments (Leder et coll., 2021, Vidaurre et coll., 2024).

Toutefois, l'innovation ne peut reposer uniquement sur la volonté des chercheurs et des entreprises. Une réglementation claire est également essentielle pour encadrer et accélérer le virage vers des médicaments plus écologiques. En ce sens, des initiatives internationales offrent des exemples inspirants. En 2023, la Fédération internationale pharmaceutique – qui représente plus de 4 millions de pharmaciens et de scientifiques à l'échelle mondiale – a publié une déclaration appelant à l'évaluation rigoureuse des risques environnementaux de tous les médicaments (FIP, 2023). L'Agence européenne des médicaments va encore plus loin en exigeant que ces risques soient évalués avant l'autorisation de mise sur le marché. Cette évaluation inclut l'analyse des propriétés chimiques du médicament et de sa toxicité potentielle pour les milieux naturels, ainsi que l'obligation, pour les entreprises pharmaceutiques, de mettre en œuvre des plans de gestion des déchets visant à réduire leur impact environnemental (EMA, 2024).

Dans cette perspective, les organismes de réglementation devraient également établir des valeurs limites normalisées pour la persistance environnementale des produits pharmaceutiques, afin de limiter leur impact sur les écosystèmes aquatiques.

Amélioration des pratiques dans les établissements de santé et sensibilisation du public

Une gestion plus efficace des effluents hospitaliers pourrait inclure plusieurs axes d'intervention :

- **Prétraitement des eaux des milieux hospitaliers et de soins** : Bien que la dilution importante des eaux des milieux hospitaliers complique leur traitement préalable, des solutions innovantes pourraient être envisagées pour concentrer et traiter les contaminants à la source, particulièrement dans le contexte de la rénovation d'hôpitaux ou de la construction de nouveaux centres hospitaliers. Par exemple, les eaux grises provenant des buanderies et des cuisines pourraient être directement dirigées vers les égouts, tandis que les eaux issues des chambres des patients et des blocs opératoires, plus concentrées en IAM (Santos et coll., 2013), pourraient faire l'objet d'un prétraitement avant leur rejet.
- **Formation des professionnels de la santé** : Une sensibilisation accrue des pharmaciens, médecins, du personnel infirmier, des vétérinaires et des autres professionnels de la santé à l'impact environnemental des médicaments serait nécessaire. Cette sensibilisation pourrait passer par des campagnes d'information ciblées, des formations ou l'intégration de contenus environnementaux dans les cursus universitaires. L'objectif est double : prévenir la mauvaise gestion des médicaments non utilisés et rappeler qu'une proportion importante des substances actives est excrétée après ingestion, se retrouvant ainsi dans les réseaux d'égout. Une meilleure compréhension de ces enjeux contribuerait à encourager des pratiques de prescription et d'administration plus durables.
- **Sensibilisation du public** : Des campagnes de sensibilisation du public seraient également essentielles compte tenu du manque de connaissances sur l'impact environnemental des médicaments. L'éducation du public quant aux bonnes pratiques de gestion des médicaments inutilisés ou périmés est une composante clé de cette stratégie.

Gestion et récupération des médicaments non utilisés

Le programme de récupération des produits pharmaceutiques du Québec, géré par l'Association pour la récupération de produits de santé, encourage l'élimination sécuritaire des médicaments non consommés. Ce programme repose sur la responsabilité élargie du producteur (REP), une politique environnementale qui oblige les fabricants à prendre en charge la gestion des déchets post-consommation.

Le *Règlement sur la récupération et la valorisation de produits par les entreprises* relève du MELCCFP. Le renforcement des systèmes de collecte, notamment par l'implantation de points de dépôt en pharmacie, offre une solution pratique et accessible pour limiter les rejets dans l'environnement.

Outre ces initiatives, plusieurs améliorations pourraient être mises en place pour optimiser la récupération et l'élimination des médicaments :

- **Accroître la visibilité des points de collecte** : De nombreuses personnes ignorent encore l'existence de ces programmes. Une campagne d'information et d'affichage en pharmacie pourrait augmenter les taux de récupération.
- **Faciliter le retour des médicaments** : Mettre en place des systèmes de collecte simplifiés, comme des enveloppes prépayées permettant aux citoyens d'envoyer leurs médicaments non utilisés directement aux centres de traitement.

- **Encourager la réduction des surplus** : Sensibiliser les prescripteurs et les patients à l'importance d'éviter l'accumulation de médicaments inutilisés en adaptant les quantités prescrites aux besoins réels.

La réduction de l'impact des IAM sur l'environnement aquatique exige une approche globale et collaborative. Citoyens, professionnels de la santé, chercheurs, fabricants pharmaceutiques et décideurs politiques doivent travailler de concert pour mettre en œuvre des solutions durables et efficaces.

2.1.4 Réduction des microplastiques dans les eaux usées municipales : un défi collectif

Les microplastiques dans les eaux usées municipales proviennent d'une diversité de sources et appellent, en conséquence, une pluralité de solutions. Parmi les principales sources identifiées figurent le lavage des textiles synthétiques, l'usure des pneus et l'utilisation de lingettes jetables.

Les microfibrilles issues des textiles représentent une part importante des microplastiques détectés dans les eaux usées municipales ainsi que dans les milieux aquatiques de surface (Lordachescu et coll., 2024; Langlois et coll., 2025; Talukdar et coll., 2024). Ces particules proviennent en grande partie des vêtements fabriqués à partir de fibres synthétiques, qui libèrent des microplastiques à chaque étape de leur cycle de vie, notamment lors du lavage. Une étude de l'Union internationale pour la conservation de la nature (2017) estime que les textiles sont responsables d'environ 35 % de la pollution plastique mondiale des océans. Lors d'une seule lessive, des vêtements en acrylique peuvent relâcher plus de 700 000 microfibrilles de plastique, tandis que ceux en polyester en libèrent environ 500 000, et les mélanges coton-polyester, en moyenne 135 000 (Napper et Thompson, 2016).

Mettre en place une approche multidimensionnelle

La problématique des microplastiques dans les eaux usées municipales ne peut être résolue par une seule solution. Il est nécessaire d'adopter une approche multidimensionnelle pour réduire leur présence dans les écosystèmes. Bien que l'amélioration des stations d'épuration demeure un levier essentiel (voir la section 2.2.4 sur la séparation solide-liquide), d'autres mesures méritent également une attention particulière, par exemple l'ajout de filtres pour capturer par tamisage certaines microfibrilles de plastique dans les machines à laver (Athey, 2022; Erdle et coll., 2021). Cependant, pour que cette solution ait un impact significatif, elle doit être déployée à grande échelle. À l'heure actuelle, aucun État n'a encore légiféré sur l'obligation d'intégrer des filtres dans les machines à laver domestiques, malgré le dépôt de plusieurs projets de loi. De plus, cette solution reste partielle, car ces filtres ne capturent que les plus gros microplastiques (45 µm et plus, en moyenne, pour les technologies déjà sur le marché), alors que les plus petits microplastiques et les nanoplastiques ne sont pas retenus efficacement.

La taille moyenne des fibres plastiques retrouvées dans les effluents varie entre 12 et 18 µm (Napper et Thompson, 2016). La réduction de la charge de microfibrilles avant l'arrivée de la station permettrait de prévenir la fragmentation en nanofibrilles, qui peut être causée par les forces de cisaillement pendant le traitement des eaux usées (Monira et coll., 2025). Même si l'acceptabilité sociale des filtres domestiques est actuellement faible (Abourich et coll., 2024), des efforts pour les rendre plus efficaces devraient être soutenus, sachant qu'ils peuvent contribuer à réduire les teneurs en microplastiques dans les eaux avant leur arrivée à la station, et ainsi réduire les teneurs en microplastiques dans les biosolides et les eaux traitées.

Sensibilisation à la composition des textiles synthétiques

Les consommateurs devraient être sensibilisés à la nature des textiles synthétiques comme le polyester (sa composition la plus courante est le polyéthylène téréphtalate), l'acrylique (polyacrylonitrile) et

l'élasthanne (polyuréthane), qui sont des dérivés du plastique. Avec la montée en popularité des fibres synthétiques, qui représentent désormais 60 % des textiles utilisés (Dumoulin et Saint-Germain, 2023) – au détriment de fibres naturelles comme le coton ou la laine –, un changement de comportement est souhaitable pour améliorer durablement la situation.

Outre ces mesures, d'autres avenues devraient être explorées :

- **Encourager l'innovation textile** : Développer des fibres synthétiques moins susceptibles de libérer des microplastiques, ou des technologies favorisant une meilleure rétention des fibres.
- **Améliorer les pratiques de lavage** : Promouvoir des températures plus basses et des cycles de lavage plus doux, qui réduisent l'abrasion des tissus et la libération de microfibrilles dans les eaux usées.
- **Sensibiliser** : Éduquer le public sur l'impact des microplastiques et encourager des comportements de consommation responsables.

Particules d'usure des pneus et CNNN associés

Les eaux usées municipales et les biosolides issus de leur traitement peuvent également contenir en grande quantité des particules d'usure de pneus. Ces particules sont de plus en plus étudiées en raison de leur omniprésence dans l'environnement, de leur petite taille, de leur mobilité et de leur toxicité.

Les particules d'usure des pneus résultent principalement de l'abrasion du caoutchouc lors du contact avec la chaussée, notamment durant l'accélération et le freinage (Kreider et coll., 2019). Elles sont associées à divers composés chimiques préoccupants, dont le sous-produit d'oxydation du 6PPD, appelé 6PPD-quinone (6PPD-q) (Johannessen et Metcalfe, 2022). Le 6PPD, utilisé dans la fabrication des pneus pour prévenir leur dégradation due à l'ozone, réagit avec ce dernier pour former la 6PPD-q, un composé hautement toxique pour plusieurs organismes aquatiques. Une étude publiée en 2021 a établi un lien direct entre la mortalité du saumon coho et la présence de 6PPD-q dans les eaux pluviales qui ruissellent vers les cours d'eau (Tian et coll., 2021). Des concentrations observées dans ces eaux se sont révélées létales pour le saumon coho après seulement quelques heures d'exposition. D'autres recherches ont depuis identifié des espèces de poissons également vulnérables à ce contaminant.

Ces contaminants associés aux microparticules de pneus pénètrent dans les stations d'épuration principalement par les eaux pluviales qui se déversent dans les réseaux d'égout unitaires, mais aussi par certaines sources commerciales, comme les stations de lavage de véhicules.

La modification des ingrédients de fabrication pour rendre les pneus plus résistants et réduire le rejet de microplastiques provenant de leur usure ainsi que l'élimination du 6PPD des pneus sont des solutions pour prévenir une partie de la pollution liée aux particules d'usure de pneus et aux CNNN qui leur sont associés. Des projets de recherche sont en cours au Canada (ECCC, 2023) et aux États-Unis (USEPA, 2024) pour explorer des avenues de modification des ingrédients des pneus. Les fabricants de pneus (USTMA, 2025), les producteurs de produits chimiques et les gouvernements collaborent pour identifier une solution plus sûre en remplacement du 6PPD, entre autres. Cependant, cette substitution doit répondre à plusieurs exigences essentielles : elle doit garantir la conformité aux normes de sécurité des véhicules, répondre aux attentes des consommateurs et des fabricants de pneus, et respecter les critères de dangerosité afin d'éviter une substitution chimique regrettable en adoptant un produit qui pourrait s'avérer tout aussi toxique.

La problématique des lingettes

Les lingettes jetables posent un problème dans les stations d'épuration, où elles causent fréquemment des bris d'équipement en obstruant les pompes et en formant des amas solides difficiles à traiter. Elles peuvent

aussi entraîner des débordements d'eaux usées brutes dans les rivières (Allison et coll., 2025). Contrairement au papier hygiénique, ces produits ne se désintègrent pas rapidement dans l'eau et s'accumulent dans les réseaux d'égouts, ce qui nécessite des interventions coûteuses. En plus d'endommager les infrastructures, les lingettes jetables contribuent à la pollution des eaux en libérant des fibres synthétiques, composées de plastiques, qui échappent aux systèmes de traitement et se retrouvent dans les cours d'eau. Cela les rend susceptibles d'être ingérées par la faune aquatique, de véhiculer des polluants ou encore de relâcher des additifs chimiques nocifs dans l'environnement (Hu et coll., 2021; Shruti et coll., 2021). Malgré les campagnes de sensibilisation et les avis réglementaires déconseillant leur élimination dans les toilettes, leur mauvais usage reste un problème persistant. Des solutions sont possibles pour atténuer ce problème :

- **Renforcer les campagnes de sensibilisation du public** : Poursuivre et amplifier les efforts de communication visant à informer les citoyens que les lingettes jetables, qu'elles soient biodégradables ou non, ne doivent pas être jetées dans les toilettes.
- **Favoriser le recours à des lingettes réutilisables** : Promouvoir activement l'utilisation de lingettes lavables. Cette mesure peut s'inscrire dans une stratégie plus large de réduction à la source et être appuyée par des campagnes éducatives ciblées ainsi que par des subventions à l'achat de produits durables.
- **Établir une norme nationale d'étiquetage pour les produits jetables dans les toilettes** : Mettre en place une norme officielle, apparentée à la norme australienne et néo-zélandaise AS/NZS 5328:2022 (AS/NZS, 2022), permettant d'identifier de manière claire et uniforme les produits qui peuvent être éliminés par voie sanitaire.
- **Interdire les lingettes contenant du plastique** : Conformément au principe de précaution et comme le font d'autres États, notamment le Royaume-Uni, le Québec pourrait interdire la fabrication, l'importation et la mise en marché de lingettes contenant des plastiques.

2.1.5 Interventions visant les réseaux d'égout

Réduction des eaux parasites

Limiter le mélange des eaux parasites avec les eaux usées municipales permet de diminuer les coûts de traitement aux stations d'épuration. Un objectif central de cette démarche est de réduire l'apport d'eaux provenant de la pluie et des nappes phréatiques, qui diluent les eaux usées et affectent la performance des procédés en abaissant les concentrations de CNNN et en réduisant le temps de résidence dans la station. De plus, cet apport d'eaux parasites peut refroidir les eaux usées, ce qui ralentit les processus impliqués dans les traitements biologiques, notamment ceux liés aux CNNN. L'augmentation des volumes d'eau peut aussi entraîner davantage de débordements d'eaux usées non traitées contenant des CNNN lorsque les réseaux et les stations d'épuration ne peuvent gérer de telles quantités d'eau. Des exemples de mesures visant à réduire l'infiltration et le captage sont présentés ci-après³.

³ Plus de détails sur la production d'un diagnostic de réseau d'égout et d'autres mesures pour minimiser les débordements que celles décrites dans le présent rapport sont donnés dans le *Guide de gestion des débordements et des dérivations d'eaux usées*, en particulier les tomes II – Établir un portrait des débordements et des dérivations (MELCCFP, 2023a) et III – Mesures de gestion des débordements et des dérivations (MELCCFP, 2023b).

Diagnostic, cartographie et surveillance des infrastructures

Les stratégies pour améliorer les réseaux d'égout devraient d'abord s'appuyer sur un diagnostic rigoureux de l'état des infrastructures. Des inspections régulières à l'aide de caméras, par exemple, permettent de détecter les fissures, les joints défectueux ou d'autres points d'entrée d'eaux parasites. Ces diagnostics peuvent être réalisés grâce à une cartographie des zones d'infiltration et de captage à l'aide de campagnes de mesure de débits et d'outils comme des capteurs d'humidité, des traceurs chimiques ou encore l'imagerie thermique. En outre, l'installation de capteurs en ligne et la mise en place de programmes d'entretiens planifiés peuvent permettre de réduire le recours à des interventions d'urgence coûteuses.

Les technologies numériques et l'intelligence artificielle pourraient offrir des outils complémentaires intéressants pour optimiser la gestion des infrastructures. Par exemple, des algorithmes d'apprentissage automatique pourraient être utilisés pour prédire les variations de débit et anticiper les surcharges liées aux événements pluvieux. Les systèmes intelligents ont également le potentiel de faciliter la localisation de fuites ou d'anomalies dans le réseau. Ces outils pourraient s'inscrire dans un modèle de gestion intégrée et proactive, en appui aux décisions des opérateurs, et ainsi contribuer à une utilisation plus efficiente des ressources, tant humaines que financières.

Pour soutenir l'innovation en gestion des infrastructures en eau, il serait pertinent de développer des formations pour les gestionnaires, les ingénieurs, les techniciens et les élus municipaux sur les pratiques de pointe en gestion des eaux usées. Cela permettrait de renforcer l'acceptabilité de ces pratiques et de soutenir leur mise en œuvre dans une perspective de transition technologique durable.

Réhabilitation de conduites et gestion des raccordements privés

La réhabilitation des canalisations où des réparations sont nécessaires constitue une mesure importante pour la réduction de l'infiltration. Lorsque la réhabilitation n'est pas possible, le remplacement des sections obsolètes devrait être envisagé. Une attention particulière devrait également être portée aux raccordements privés, souvent source d'infiltrations ou de connexions non conformes. Les inspections de ces branchements, combinées à une sensibilisation des usagers, peuvent permettre de réduire les apports d'eaux parasites dans les réseaux.

Optimisation des réseaux d'égout unitaires

Les réseaux unitaires transportent à la fois les eaux pluviales et les eaux usées vers les stations d'épuration. Leur séparation en réseaux pluvial et domestique (transportant les eaux usées industrielles, commerciales et institutionnelles) peut être d'intérêt pour réduire la présence des CNNN, notamment pour les raisons mentionnées plus haut (réduction des coûts de traitement, de la dilution, des variations de température et des risques de débordement), mais elle représente des coûts majeurs. De plus, les eaux issues du ruissellement urbain contiennent des CNNN qu'il peut être pertinent d'acheminer aux stations d'épuration, notamment les particules issues de l'usure des pneus et des pesticides. Ainsi, l'optimisation des réseaux d'égout unitaires pour maximiser les volumes d'eaux traitées est à envisager.

Cette optimisation peut par exemple inclure la construction de bassins de rétention et le contrôle dynamique des ouvrages de surverse³.

L'aménagement d'infrastructures vertes devrait aussi être envisagé pour agir directement sur les débits générés en amont des réseaux unitaires. Les infrastructures vertes permettent de réduire une partie des débits de ruissellement par infiltration ou évapotranspiration. L'efficacité des infrastructures vertes pour l'enlèvement des CNNN contenus dans les eaux de ruissellement urbain est un sujet d'intérêt qui mérite une attention plus approfondie.

2.2 Interventions à mettre en place aux stations d'épuration

2.2.1 Contexte réglementaire et technologique québécois

Au terme des périodes d'exemption prévues au *Règlement sur les ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées* (ROMAEU) (2030 ou 2040, selon le cas)⁴, toutes les stations d'épuration devront minimalement respecter des normes réglementaires concernant :

- la demande biochimique en oxygène après 5 jours, partie carbonée (DBO₅C);
- les matières en suspension;
- le pH.

La majorité des stations d'épuration devrait donc, à terme, être équipée d'un traitement biologique permettant l'enlèvement de la matière organique (qui génère de la DBO₅C). Plusieurs stations sont ou seront aussi munies d'équipements pour assurer l'enlèvement du phosphore et/ou la désinfection⁵.

Actuellement, les stations d'épuration québécoises incluent une variété de technologies de traitement présentant des niveaux de complexité variés. Des technologies plus passives comme les étangs non aérés sont utilisées pour traiter les eaux usées de petites communautés. Les étangs aérés sont les plus courants (voir l'encadré à la section 2.2.4). On retrouve aussi des stations mécanisées utilisant une variété de procédés et d'équipements. Cette hétérogénéité fait en sorte qu'il n'existe pas de solution universelle pouvant être appliquée à toutes les stations du Québec pour s'attaquer à la problématique des CNNN. Les interventions possibles aux stations sont multiples et devraient, dans une optique de viabilité, être planifiées en faisant appel à des outils d'aide à la décision comme une grille d'analyse multicritères (voir section 2.3).

Certaines interventions présentées ci-après mériteraient d'être planifiées à même les projets de mise aux normes prescrites par le ROMAEU pour assurer des coûts de mise en œuvre raisonnables. Pour les interventions pouvant être prévues à plus long terme, il serait judicieux de prévoir le plus tôt possible un espace réservé sur les sites des stations, ainsi qu'un approvisionnement en énergie en quantité suffisante afin d'éviter des coûts supplémentaires importants dans le futur.

2.2.2 Diversité des mécanismes d'enlèvement des CNNN

Les CNNN dont il est question à la section 1.1 ont des propriétés physicochimiques variées. Ils répondent ainsi différemment aux techniques de traitement des eaux usées. Il n'y a par conséquent pas de solution unique permettant de retirer tous les CNNN et leur prise en charge partielle peut être faite à différentes étapes des filières de traitement.

Les principaux mécanismes d'enlèvement des CNNN utilisés sont des mécanismes de transfert ou de dégradation. Le transfert de CNNN peut s'effectuer par :

⁴ Les normes de rejet en DBO₅C et en matières en suspension prévues aux paragraphes 1° et 2° du premier alinéa de l'article 6 du ROMAEU ne s'appliquent pas à l'exploitant d'une station d'épuration visée à l'annexe III jusqu'à la réalisation de travaux visant l'agrandissement, la modernisation ou le remplacement de sa station ou, au plus tard, jusqu'à la date mentionnée à l'annexe III, soit 2030 ou 2040.

⁵ À titre comparatif, ces niveaux de traitement correspondent à ceux qui étaient mis en place dans les années 1970-1980 en Suisse (Abegglen et Siegrist, 2012). Aujourd'hui, la Suisse implante des traitements avancés dans ses stations d'épuration pour s'attaquer à la problématique des CNNN (VSA, 2024). L'Union européenne va emboîter le pas d'ici 2045 (Parlement européen, 2024).

- adsorption sur les matières solides primaires présentes dans les eaux usées brutes ou la biomasse, ou encore sur certains matériaux comme le charbon actif, selon leur hydrophobicité, leur solubilité, leur charge, et l'utilisation de coagulants et de flocculants;
- volatilisation, selon leur volatilité.

Les mécanismes de transfert peuvent s'opérer dans des équipements spécialisés (p. ex. des filtres à charbon actif en grains) ou dans des équipements de traitement conventionnel où il y a contact entre les CNNN et les matières solides ou la biomasse (p. ex. dans les procédés par boues activées) ou encore un gaz (p. ex. dans des bassins aérés). Dans le cas d'un transfert vers des matières solides en suspension, une étape de séparation solide-liquide doit suivre.

Les mécanismes de dégradation peuvent être divisés en deux catégories :

- dégradation biologique, selon la biodégradabilité des substances;
- dégradation abiotique (p. ex. : photolyse, oxydation chimique, hydrolyse).

Ces procédés sont les seuls qui sont efficaces pour les CNNN très solubles. Ils permettent de transformer partiellement les CNNN en sous-produits – qui peuvent être aussi ou plus nocifs que les composés parents – ou, plus rarement, de les minéraliser complètement, c'est-à-dire les dégrader jusqu'à l'obtention de composés inorganiques comme le CO₂ et l'eau. Les mécanismes de dégradation peuvent s'opérer dans des équipements spécialisés (p. ex. un système d'ozonation) ou, dans une certaine mesure, dans des traitements biologiques conventionnels (p. ex. : biofiltres, boues activées ou étangs aérés). Toutefois, de manière générale, la dégradation biologique qui s'effectue dans les procédés conventionnels permet d'éliminer seulement partiellement les CNNN biodégradables. Le recours à des traitements avancés (section 2.3.4) est nécessaire pour atteindre des niveaux d'enlèvement élevés (p. ex. > 80 % comme on l'exige en Suisse) en permettant de dégrader des CNNN difficilement ou non biodégradables (Canton de Vaud, 2021).

Le cheminement de CNNN dans une station d'épuration utilisant un traitement avancé est illustré à la figure 3.

2.2.3 Approche à préconiser quant aux choix technologiques pour réduire la présence des CNNN

Décrire la situation existante

Dans le but d'optimiser les ressources financières allouées à la problématique des CNNN, il apparaît important de bien décrire les performances de réduction des CNNN des technologies de traitement actuellement en place au Québec. Une meilleure connaissance des performances et des paramètres qui les affectent est requise dans une perspective d'optimisation des procédés existants qui pourrait se traduire par des gains à faibles coûts.

Les données récoltées dans le cadre du projet de caractérisation initiale constitueront une base riche pour alimenter ce travail.

Profiter de l'expérience à l'échelle internationale

Dans une optique d'optimisation des investissements et compte tenu de l'avancement de certains pays comme la Suisse, il est d'intérêt de favoriser et de faciliter l'utilisation de technologies matures pour d'éventuels ajouts de traitements avancés dans les stations d'épuration québécoises. Il est toutefois

important de s'assurer que les technologies envisagées soient adaptées aux spécificités québécoises comme les températures froides et les eaux diluées, en particulier lors de la fonte des neiges.

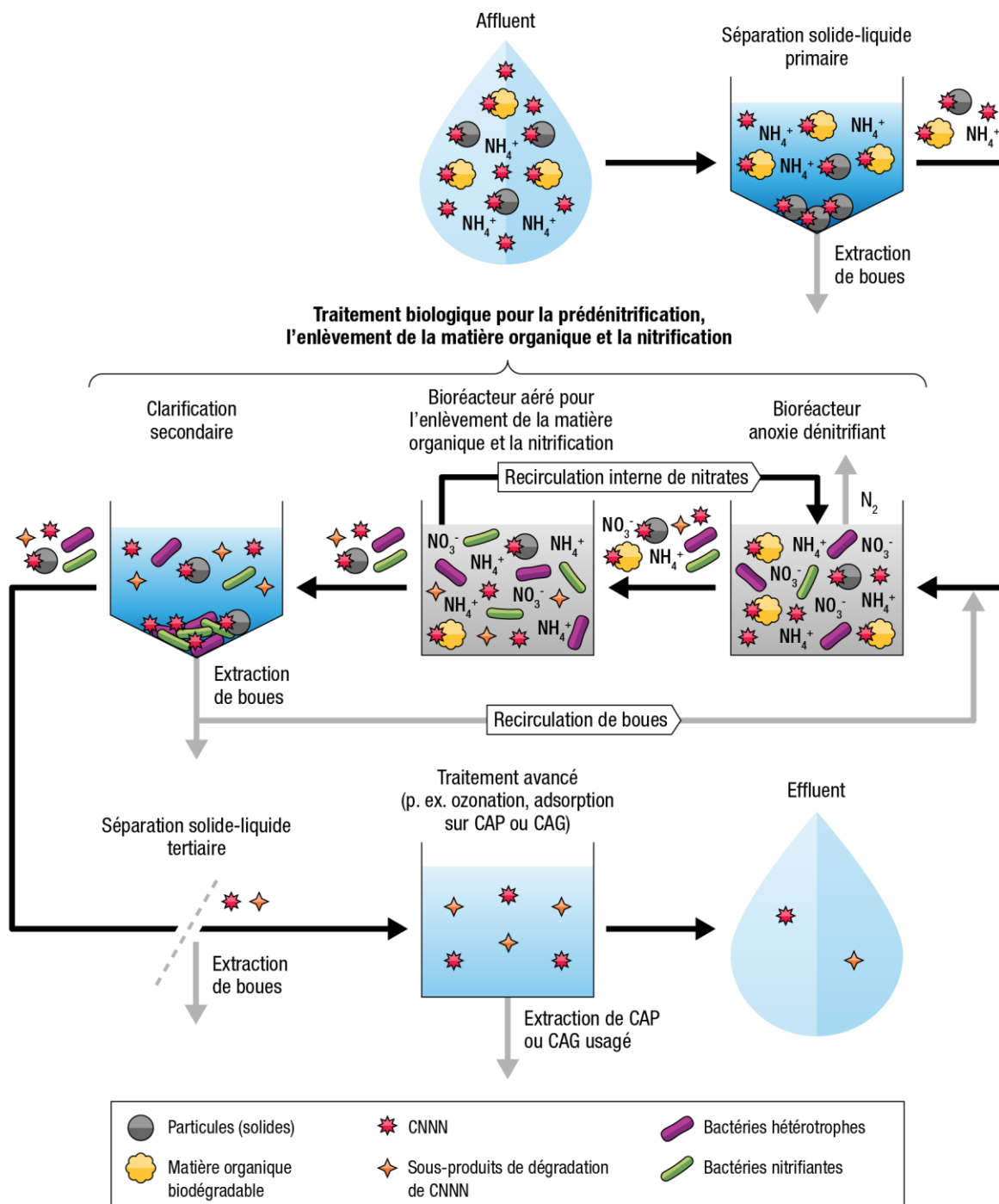


Figure 3 – Cheminement des CNNN dans une filière de traitement des eaux usées comprenant un traitement primaire, un traitement biologique (prédénitrification, enlèvement de la matière organique et nitrification), une séparation solide-liquide tertiaire, ainsi qu'un traitement avancé

Remarque : les CNNN associés aux boues extraites ou volatilisés ne sont pas illustrés. Les gaz produits dans la filière, autres que le diazote, ne sont pas représentés.

2.2.4 Interventions à envisager

Traitements conventionnels

Séparation solide-liquide

Les CNNN présentant une faible solubilité, une forte hydrophobicité ou une charge positive⁶ sont susceptibles d'être adsorbés sur les matières en suspension (MES) retrouvées dans l'affluent des stations d'épuration, ou encore sur la biomasse générée lors du traitement biologique (Margot et coll., 2015). Une fois adsorbés, les CNNN peuvent être retirés à l'aide de procédés de séparation solide-liquide. L'ajout de coagulants, par exemple lors du traitement primaire, peut améliorer l'enlèvement de certains CNNN comme les microplastiques (Carnevale Miino et coll., 2024). D'ailleurs, il a été démontré que l'enlèvement des microplastiques et des nanoplastiques est fortement corrélé avec l'enlèvement des MES dans des traitements conventionnels par boues activées et par coagulation-floculation (Abi Farraj et coll., 2024).

Les stations québécoises déjà soumises à des normes de rejet en MES ou encore en phosphore – dont l'enlèvement est effectué par coagulation et décantation – utilisent divers types d'équipements de séparation solide-liquide. Une optimisation des performances de ces procédés, qui pourrait être réalisée en ajoutant davantage de coagulants et de floculants, en utilisant des coagulants plus performants et plus polyvalents, ou en améliorant les séquences d'injection des produits et les conditions d'agrégation (pH, point d'injection, temps de mélange, etc.), a le potentiel de réduire les concentrations de CNNN retrouvées dans les effluents.

L'ajout ou la substitution d'équipements pourrait aussi être un moyen d'améliorer les performances d'enlèvement des MES et, de manière concomitante, de CNNN adsorbés.

La performance de la séparation solide-liquide pourrait être améliorée à différents endroits dans les stations :

- traitement primaire (p. ex. : décanteur primaire);
- traitement secondaire (p. ex. : décanteur secondaire d'un procédé par boues activées, réacteur biologique membranaire);
- traitement tertiaire (p. ex. : microfiltration ou décantation avec floculation lestée en aval d'un procédé biologique à culture fixée).

Un resserrement des normes de rejet en MES pourrait être envisagé pour assurer une maximisation des performances des procédés de séparation solide-liquide existants, ou encore l'amélioration ou la substitution de procédés dont les performances ne sont pas suffisantes. Des essais de traitabilité en laboratoire pourraient être effectués à faibles coûts afin d'évaluer le potentiel de telles améliorations et de déterminer quels CNNN pourraient être mieux captés grâce aux procédés existants. Un outil d'aide à la décision comme une grille d'analyse multicritères pourrait être utilisé pour baliser un tel resserrement. Ce genre de mesure pourrait être déployé de manière prioritaire dans le cadre d'un plan visant à s'attaquer à la problématique des CNNN dans les stations d'épuration (figure 4; interventions a et b).

⁶ Par exemple : certains produits pharmaceutiques, des surfactants, des fragrances, des antimicrobiens, des filtres UV cosmétiques, des retardateurs de flamme, des pesticides, des BPC et des HAP.

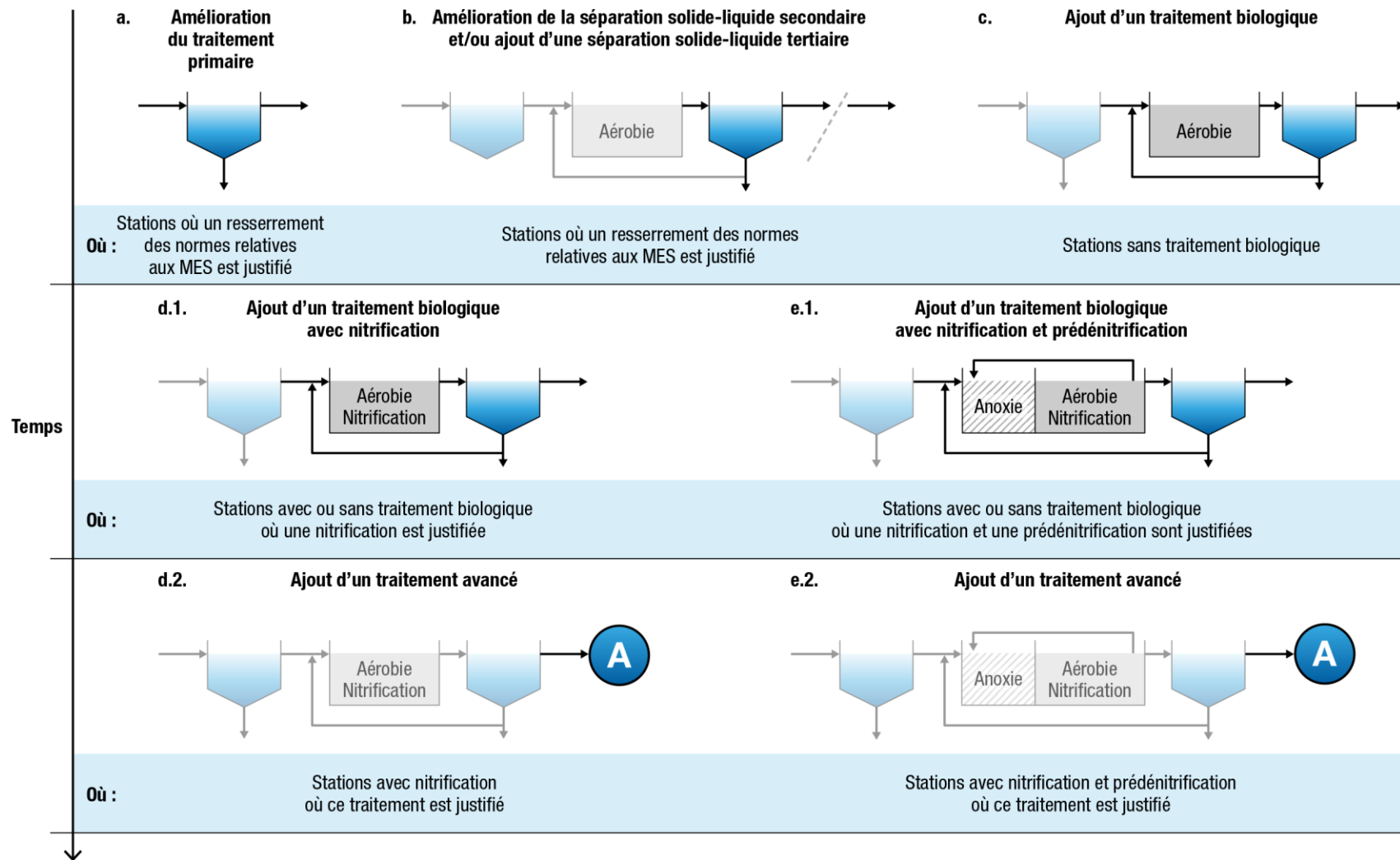


Figure 4. Interventions recommandées à différentes étapes du traitement dans les stations d'épuration des eaux usées québécoises en fonction du temps. La première ligne d'interventions concerne les recommandations de maximisation de l'enlèvement des MES (a et b) et de traitement biologique pour l'enlèvement de la matière organique (c). La deuxième ligne concerne les recommandations de traitement biologique avec nitrification (d.1) ou nitrification/dénitrification (e.1). La troisième ligne concerne l'ajout de traitements avancés (p. ex. utilisation de charbon actif ou ozonation) (d.2 et e.2). Les stations où les interventions devraient être envisagées sont indiquées sous les schémas de procédé.

Bien que des interventions pour maximiser l'enlèvement des MES soient prometteuses du point de vue de la qualité des effluents, elles auraient aussi un impact sur les quantités de boues produites et potentiellement sur leur qualité. Les interventions devraient donc être réfléchies en considérant le mode de gestion des boues visé (p. ex. : valorisation agricole, incinération), ainsi que la réglementation⁷ et les normes applicables⁸.

Traitement biologique

Enlèvement de la matière organique

Pour respecter la norme de rejet réglementaire en DBO₅C du ROMAEU, la plupart des stations appliqueront minimalement, à terme, un traitement biologique permettant un enlèvement de la matière organique biodégradable. Cette amélioration aura un impact positif sur l'enlèvement de certains CNNN, notamment ceux qui sont biodégradables et solubles (p. ex. des surfactants, quelques produits pharmaceutiques, des agents de conservation, des filtres ultraviolets cosmétiques, des phtalates, le bisphénol A, des composés organiques volatils) (Margot et coll., 2015).

Cependant, dans certaines stations de type physicochimique où les eaux à traiter sont fortement diluées par des eaux parasites, l'ajout d'un traitement biologique pourrait ne pas s'avérer nécessaire pour respecter la norme réglementaire en DBO₅C⁹. Dans de tels cas, les gains concomitants d'enlèvement des CNNN ne seront pas observés. Si on se dote d'une vision plus globale incluant la problématique des CNNN, il serait pertinent de réévaluer les besoins de mise aux normes de ces stations afin que des traitements biologiques visant minimalement l'enlèvement de la matière organique soient mis en place partout au Québec. Cette évaluation devrait être prioritaire dans un plan visant à s'attaquer à la problématique des CNNN (figure 4; intervention c).

Nitrification

Il est reconnu que les procédés de traitement biologique qui permettent la nitrification (transformation de l'azote ammoniacal en nitrates) favorisent l'enlèvement de CNNN, notamment des composés œstrogéniques, des produits pharmaceutiques et des insectifuges (Canton de Vaud, 2021; Margot et coll., 2013; RCE, 2018). Dans ces procédés, le long temps de résidence des solides nécessaires à la croissance des bactéries nitrifiantes est aussi associé à une plus grande diversité microbiologique. Cette dernière est probablement liée aux meilleures performances d'enlèvement de CNNN observées dans les stations d'épuration avec nitrification (Fernandez-Fontaina et coll., 2012).

Une nitrification constante est aussi un préalable recommandé pour la mise en place de traitements avancés comme l'ozonation. Ce niveau de traitement est requis afin de réduire la concentration de matière organique susceptible de réagir avec l'ozone, de manière à maintenir les besoins en ozone à des niveaux faibles (Abegglen et Siegrist, 2012), plus raisonnables économiquement. Il est aussi recommandé d'effectuer un traitement biologique poussé comme la nitrification avant l'utilisation de charbon actif en poudre (CAP) (Abegglen et Siegrist, 2012). Cela permet de réduire la consommation de CAP et les coûts qui y sont liés.

⁷ Par exemple, le *Code de gestion des matières résiduelles fertilisantes*, en vigueur depuis le 1^{er} novembre 2025, qui inclut notamment un paramètre investigateur préventif (PFOS, PFOA et 11 autres SPFA).

⁸ Par exemple, la norme BNQ/0413-400 *Amendements de sols : Biosolides* qui est en cours de révision (BNQ, 2025).

⁹ En considérant qu'il ne serait pas envisagé de mettre en place des mesures pour réduire à la source ces eaux parasites ou que les mesures prévues ne seraient pas suffisantes pour occasionner des dépassements de normes.

Dans le cadre de la mise aux normes des stations d'épuration québécoises et dans le but de s'attaquer graduellement à la problématique des CNNN, il est donc pertinent d'envisager la mise en place de procédés permettant la nitrification. Cette mesure devrait être évaluée pour les stations qui doivent mettre en place un traitement biologique dans le cadre de la mise aux normes prévue au ROMAEU (échéance : 2030), ainsi que pour celles déjà existantes utilisant un traitement biologique sans nitrification, où des gains en matière d'enlèvement des CNNN sont recherchés (figure 4; intervention d.1). L'évaluation devrait être réalisée au moyen d'un outil d'aide à la décision comme une grille d'analyse multicritères.

Dénitrification

La dénitrification consiste en la transformation biologique des nitrates en diazote. Elle est implantée dans les stations pour réduire les quantités d'azote total rejetées¹⁰. En l'absence de limites de rejet en azote total au Québec, les stations d'épuration ne sont actuellement pas conçues expressément pour dénitrifier, sauf si une dénitrification s'avère nécessaire pour préserver la qualité de l'effluent (p. ex. dans le cas de stations de type « boues activées » recevant des rejets industriels fortement chargés en azote total Kjeldahl, pour éviter une dénitrification dans les décanteurs secondaires où la production de diazote pourrait mener à la formation de bulles et à la remise en suspension de solides). Sans nécessairement mener à la conception d'une station avec dénitrification, la présence d'une source d'eau potable en aval d'un rejet peut aussi justifier un suivi des rejets d'azote sous forme de nitrites et de nitrates¹¹. C'est notamment le cas lorsque le rejet se fait par infiltration (MELCCFP, 2023c).

Bien que le rôle de la dénitrification ne soit pas aussi bien connu que celui de la nitrification pour l'enlèvement de CNNN, la dénitrification implique l'ajout d'autres conditions (zone anoxie) qui peuvent induire une augmentation de la diversité microbiologique et favoriser la dégradation de certains CNNN résistants aux conditions aérobies (Grandclément et coll., 2017). Il est aussi rapporté que la présence de conditions anoxies en combinaison avec des conditions aérobies, comme dans les systèmes dénitrifiants, permet d'améliorer l'enlèvement de certains CNNN (Phan et coll., 2016).

Outre cela, l'implantation d'une dénitrification dans une configuration de type prédénitrification comporte plusieurs avantages bien connus liés à l'exploitation des stations et à leurs émissions de GES¹². Pour les stations de type « boues activées », la zone anoxie peut jouer un rôle de sélecteur permettant d'assurer une bonne décantabilité des boues en contrôlant les bactéries filamenteuses (Metcalf & Eddy-AECOM, 2014). La prédénitrification permet aussi de produire de l'alcalinité, nécessaire à la nitrification, et d'économiser de l'énergie en raison de l'utilisation des nitrates au lieu de l'oxygène pour l'oxydation de la DBO₅C présente dans l'affluent (Metcalf & Eddy-AECOM, 2014). Les coûts associés à l'ajout de produits chimiques pour assurer l'apport en alcalinité et les coûts d'aération se voient donc diminués comparativement à ceux des stations avec nitrification seulement. Dans le cas d'un procédé par boues activées avec nitrification, ces avantages sont généralement suffisants, malgré les coûts d'électricité supplémentaires associés à la recirculation de l'effluent, pour qu'une zone anoxie soit envisagée même si l'enlèvement d'azote total n'est pas requis (Metcalf & Eddy-AECOM, 2014).

¹⁰ L'implantation de la dénitrification serait pertinente pour réduire les rejets d'azote qui contribuent à l'hypoxie dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

¹¹ Les nitrites et les nitrates sont normés dans le *Règlement sur la qualité de l'eau potable*.

¹² L'ajout d'une dénitrification a aussi le potentiel d'améliorer le bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'une station traitant l'azote. Avec un potentiel de réchauffement planétaire environ 265 fois supérieur à celui du CO₂, le N₂O généré lors du traitement de l'azote peut être un contributeur majeur aux émissions de GES d'une station. La capacité de réduction du N₂O des communautés microbiennes dénitrifiantes dépasse généralement leur capacité à produire du N₂O, faisant de la dénitrification un puits potentiel de N₂O dans les stations (Conthe et coll., 2019).

Pour ces raisons, dans un plan global visant à s'attaquer à la problématique des CNNN, la possibilité d'ajouter une prédénitrification devrait être étudiée lorsqu'une nitrification est envisagée dans le cadre d'un projet de mise aux normes. La prédénitrification étant une étape qui s'intercale entre le traitement primaire (le cas échéant) et le traitement biologique avec nitrification, son intégration devrait être prévue en même temps que l'ajout d'un traitement biologique pour éviter des coûts supplémentaires élevés dans le futur (figure 4; intervention e.1).

Enlèvement des CNNN dans les étangs aérés : un type d'ouvrage très répandu au Québec

Les étangs aérés sont largement utilisés au Québec (environ 630 étangs, ce qui représente près de 75 % des stations d'épuration) pour les petites à moyennes communautés, et dans certains cas pour les grandes (p. ex. : Trois-Rivières, Drummondville). Certaines de leurs caractéristiques comme les temps de rétention hydraulique élevés, et par le fait même, les temps de séjour de la biomasse élevés, ainsi que l'exposition importante à la lumière (potentiel de photolyse), représentent des conditions favorables pour la dégradation de CNNN. L'efficacité d'enlèvement de plusieurs CNNN dans les étangs peut se comparer à celle observée dans des stations mécanisées conventionnelles (Hoque et coll., 2014).

Dans le but de préserver le caractère extensif des étangs aérés, des interventions ou des ajouts simples devraient être envisagés dans un premier temps. Par exemple, le contrôle des relargages particuliers en sortie des étangs par décantation améliorée ou filtration pourrait s'avérer intéressant pour rabattre les composés adsorbés sur les matières en suspension. Aussi, selon les superficies disponibles, l'ajout d'autres technologies extensives en traitement tertiaire telles que des marais filtrants pourrait mettre à profit les mécanismes d'adsorption et de phytoremédiation pour la prise en charge des CNNN (Wagner et coll., 2023).

Traitements avancés

Il existe plusieurs technologies de traitement avancé qui ont une action à large spectre permettant de cibler un large éventail de CNNN. Par exemple :

- le charbon actif en poudre ou en grains;
- la filtration membranaire avec membranes denses (nanofiltration ou osmose inverse);
- l'oxydation avancée (p. ex. : ozonation, oxydation avec peroxyde d'oxygène et ultraviolets, électrochimie).

Il est cependant rapporté que, pour des raisons économiques, l'oxydation avancée et la filtration membranaire avec membranes denses sont généralement moins intéressantes pour une application en traitement des eaux usées municipales (Abegglen et Siegrist, 2012). L'ozonation et l'utilisation de charbon actif en poudre (CAP) sont des technologies prometteuses. Elles ont entre autres été sélectionnées comme technologies de référence en Suisse pour s'attaquer à la présence de CNNN dans les eaux usées municipales (Abegglen et Siegrist, 2012)¹³. Dans le cas de l'ozonation, il est nécessaire de prévoir une étape de filtration biologique en aval sur sable ou sur charbon actif en grains (CAG) pour la dégradation de sous-produits indésirables. Dans le cas du CAP, une étape de séparation solide-liquide doit être prévue en aval pour le retirer avant le rejet des eaux traitées. Des filtres à CAG sont aussi utilisés à pleine échelle comme dernière étape de traitement (Svahn et Borg, 2024; VSA, 2024). Il est possible de régénérer le CAG lorsque sa capacité d'adsorption est épuisée. À l'instar du CAP, l'exploitation de filtres à CAG génère des

¹³ L'ozonation, le CAP et le CAG sont maintenant utilisés à pleine échelle en Suisse. En avril 2024, il y avait plus de 20 stations suisses avec des étapes pour l'enlèvement des micropolluants en exploitation (VSA, 2024).

matières résiduelles. Le CAP et le CAG usés doivent être gérés adéquatement. Cet aspect, qui comporte des défis, devrait assurément être pris en compte dès l'étape du choix technologique.

Il a été démontré en Suisse que l'utilisation de traitements avancés en complément des traitements conventionnels est nécessaire pour atteindre des taux d'enlèvement importants des CNNN (p. ex. > 80 % sur une sélection de CNNN indicateurs comme on l'exige en Suisse) (Abegglen et Siegrist, 2012). Ainsi, si des objectifs similaires sont éventuellement visés au Québec, l'implantation de traitements avancés apparaît incontournable. Étant donné leur maturité technologique plus élevée, l'utilisation de CAP ou de CAG (filtration) et l'ozonation devraient être envisagées prioritairement. L'ajout d'une étape de traitement avancé pourrait être planifié comme une phase ultérieure aux projets de mise aux normes réglementaires des stations (figure 4; interventions d.2 et e.2).

Des analyses technico-économiques propres à chaque projet devraient être réalisées pour déterminer les technologies de traitement avancé les plus appropriées. Ces analyses devraient être réalisées en tenant compte des spécificités québécoises comme les températures froides ¹⁴ et les eaux diluées, particulièrement en période de fonte des neiges.

En fonction des technologies de référence choisies, des indicateurs de performance (p. ex. : taux d'enlèvement de composés répondant au traitement) ainsi que les niveaux visés pour ceux-ci devraient être déterminés par le MELCCFP. Dans les deux cas, un outil d'aide à la décision comme une grille d'analyse multicritères devrait être utilisé.

En ce qui concerne le choix des stations où des traitements avancés pourraient être envisagés, la présence d'un traitement poussé des matières en suspension, de la matière organique biodégradable et de l'azote ammoniacal devrait être une condition préalable afin d'assurer l'efficacité des traitements avancés à des coûts en capital et d'exploitation raisonnables. Le choix des stations où implanter prioritairement des traitements avancés devrait être fait en utilisant un outil d'aide à la décision comme une grille d'analyse multicritères.

Dans le cadre des projets de mise aux normes de stations où l'implantation éventuelle de traitements avancés s'avérerait justifiée¹⁵, l'espace requis pour ces traitements, le profil hydraulique ainsi que l'énergie nécessaire (entrée électrique) pour leur fonctionnement devraient être prévus dès la mise aux normes du ROMAUEU. Ces étapes préparatoires sont recommandées pour éviter des coûts supplémentaires importants dans le futur.

2.3 Élaboration d'une grille d'analyse multicritères pour prioriser les CNNN, les stations d'épuration et les interventions

Compte tenu des multiples solutions présentées dans les sections précédentes, le développement d'un outil d'aide à la décision serait souhaitable. L'élaboration d'une grille d'analyse multicritères permettrait de guider la priorisation et la planification des interventions à court, moyen et long terme pour les stations d'épuration des eaux usées municipales. Cette grille pourrait intégrer divers critères liés aux contaminants, aux caractéristiques des stations et aux spécificités des milieux récepteurs. La présente section propose une description générale de son contenu potentiel ainsi que quelques exemples d'application.

¹⁴ Pour cette spécificité, il serait pertinent de suivre ce qui sera implanté dans d'autres pays nordiques comme la Suède, la Finlande et les pays baltes pour l'application des nouvelles règles de l'Union européenne en matière de traitement des micropolluants (Stockholm University Baltic Sea Centre, 2023).

¹⁵ Selon les résultats d'une analyse multicritères.

La conception et le développement de ce type d'outil devraient mobiliser divers acteurs, notamment des chercheurs universitaires et des experts en gestion des eaux usées, en analyse de risque, en écotoxicologie, en santé humaine et en eau potable.

Exemples de critères pour l'analyse multicritères

1. Caractéristiques des contaminants

- **Impacts sur l'environnement et la santé humaine** : Prise en compte des effets sur les organismes aquatiques et la santé humaine. Par exemple, prendre en considération les dépassements des critères de qualité de l'eau de surface lors d'études comme la caractérisation initiale. L'analyse devrait également inclure les observations consignées sur les effets des mélanges de contaminants, qui peuvent avoir un impact plus important que les contaminants pris individuellement.
- **Fréquence de détection** : Prise en compte des contaminants détectés le plus fréquemment à des niveaux préoccupants dans les effluents des stations.
- **Connaissances scientifiques** : La grille d'analyse devrait être dynamique pour tenir compte de la production de nouveaux contaminants et pour les intégrer au fur et à mesure des avancées scientifiques.
- **Possibilité de contrôle à la source** : Certains contaminants sont principalement rejetés par un nombre limité d'émetteurs et pourraient être réduits directement à la source plutôt que d'être traités en station.

2. Profils des stations d'épuration

- **Taille des stations et charges de contaminants rejetées** : Classification des stations en fonction du débit d'effluent et des charges de contaminants qu'elles rejettent.
- **Technologies de traitement** : Influence des types de traitement existants (p. ex. : stations mécanisées ou étangs aérés) sur leur potentiel d'amélioration.
- **Industries présentes et contributions spécifiques** : Prise en compte des rejets industriels ou des lieux d'enfouissement technique connectés aux stations et de leur impact sur les charges de contaminants.
- **Contaminants retrouvés dans les biosolides** : Possibilité de valorisation des biosolides municipaux, en remplacement de leur élimination, comme critère de priorisation des interventions. La qualité des biosolides épandus influence à la fois les eaux de surface et les sols agricoles.

3. Milieux récepteurs et sensibilités locales

- **Proximité de sources d'eau potable** : Prise en compte de l'influence des stations sur des sources d'eau potable.
- **Sensibilité du milieu aquatique** : Prise en compte de la sensibilité, de la dégradation et des usages récréatifs (pêche, baignade) des milieux récepteurs.
- **Effets cumulatifs à l'échelle des bassins versants** : Prise en compte des rejets combinés de plusieurs stations et d'autres sources de pollution (p. ex. : rejets industriels ou de lieux d'enfouissement technique dans un même bassin versant).

4. Gestion des surverses

- **Prise en compte des débordements** : La priorisation des interventions devrait également tenir compte des débordements d'eaux usées, qui constituent un enjeu important dans certaines zones urbaines.

Approche méthodologique et applications

Une grille d'analyse multicritères serait un outil d'aide à la décision et non une solution en soi. Une méthode envisageable consisterait à établir d'abord une priorisation globale des stations d'épuration, puis à évaluer les contaminants à traiter en fonction des rejets de ces stations. L'outil pourrait intégrer les multiples dimensions de l'analyse des contaminants et de leurs impacts potentiels. Il serait utile pour faire face à la complexité de la problématique en considérant les charges rejetées de CNNN, les caractéristiques des milieux récepteurs et les possibilités d'amélioration.

Suivi futur des CNNN

À la suite du projet de caractérisation initiale des effluents des grandes stations d'épuration québécoises, les expériences et les connaissances acquises pourraient permettre d'orienter une approche plus ciblée, intégrée et efficace pour le suivi des CNNN présents dans les eaux usées municipales.

Cibler une liste restreinte de composés prioritaires

Sur la base des résultats obtenus lors de la caractérisation initiale et en s'appuyant sur des études faites hors Québec (Arlos et coll., 2023), la surveillance pourrait être recentrée sur une sélection restreinte de composés récurrents, représentatifs et qui ont des limites de détection appropriées, plutôt que de viser une longue liste de substances. Plusieurs CNNN initialement sélectionnés pourraient être retirés du programme de suivi s'ils ont été peu détectés, ou pas du tout, dans les eaux usées. À l'inverse, il serait intéressant de maintenir le suivi de composés fréquemment détectés, persistants dans le milieu aquatique et pouvant servir d'indicateurs de contamination d'origine municipale. Ces substances pourraient servir à établir des tendances spatio-temporelles et à alimenter la grille d'analyse multicritères ainsi que des modèles prédictifs à l'échelle des bassins versants.

Intégration d'approches biologiques en complément des analyses ciblées

Les méthodes analytiques ciblées seules apportent une information partielle, particulièrement pour les composés actifs à de très faibles concentrations, tels que les composés œstrogéniques. Afin de renforcer la pertinence des résultats, une approche combinée intégrant des bioessais in vitro (p. ex. des bioessais de transactivation des récepteurs des œstrogènes) aux analyses chimiques conventionnelles devrait être envisagée.

Ces méthodes complémentaires permettent une meilleure évaluation des effets biologiques des rejets, notamment en termes d'œstrogénicité totale. Elles présentent l'avantage d'intégrer l'effet cumulatif de l'ensemble des contaminants présents dans un mélange, y compris ceux qui ne sont pas nécessairement connus ou ciblés par les analyses chimiques. Ainsi, l'approche par bioessais permet de prioriser les contaminants en fonction de leur activité biologique réelle plutôt qu'en fonction de leur seule présence.

2.4 Innovation en matière de financement

Plusieurs recommandations ambitieuses sont proposées dans ce rapport pour réduire les CNNN dans les eaux usées municipales. Ces initiatives témoignent d'une volonté d'aller au-delà des exigences réglementaires actuelles afin de mieux protéger l'environnement et les ressources en eau. Toutefois, le modèle de financement des infrastructures en eau, principalement fondé sur des subventions du gouvernement du Québec aux municipalités, montre ses limites lorsqu'il s'agit d'implanter des solutions innovantes ou non imposées par la réglementation, faisant du financement un défi majeur.

Les limites du modèle actuel et les défis du financement

La question du financement des actions pour réduire la présence des CNNN dans les eaux usées municipales doit s'inscrire dans la perspective plus vaste du financement des infrastructures en eau et de leur gouvernance.

Plusieurs villes au Canada innovent par des approches autres que le subventionnement par les ordres de gouvernement. Par exemple, la Ville de Toronto ne dépend plus des subventions provinciales : elle finance

ses projets grâce à une tarification volumétrique de l'eau et à une augmentation progressive de la taxe foncière sur l'eau (IANAS, 2015).

Un autre exemple est celui de la Ville de Vancouver, qui a adopté un système de tarification basé sur la consommation et impose des redevances aux industries fortement polluantes. Ce modèle combine des incitatifs financiers pour réduire la consommation d'eau et une taxation environnementale qui encourage les entreprises à adopter des technologies plus propres. Les fonds générés permettent de financer des programmes de surveillance améliorés et des infrastructures novatrices comme des systèmes de traitement tertiaires des eaux usées (Metro Vancouver, 2019).

Propositions pour moderniser le financement au Québec

Le Québec accuse un retard dans le domaine de l'écofiscalité et du financement de ses infrastructures en eau. Le temps est venu de repenser son approche. Voici quelques pistes concrètes pour renforcer le financement des infrastructures en eau et réduire la présence des CNNN :

1. **Revoir les rôles du gouvernement du Québec et ceux des municipalités** : Les municipalités ont un rôle clé à jouer dans le maintien de leurs infrastructures. Les subventions gouvernementales devraient être accordées aux projets de mise aux normes et aux initiatives stratégiques seulement, tandis que le financement de l'entretien courant devrait reposer essentiellement sur des mécanismes municipaux. Cette approche favoriserait une gestion optimisée de l'exploitation des infrastructures. En revanche, actuellement, un important déficit d'entretien affecte les infrastructures d'assainissement et les municipalités ne pourront pas le résorber seules. Une intervention gouvernementale est nécessaire pour combler ce retard. Une fois cette mise à niveau effectuée, il serait pertinent d'instaurer un modèle de tarification reflétant le véritable coût de l'eau pour les citoyens et les industries. Cela permettrait aux municipalités d'assurer durablement l'entretien de leurs actifs.
2. **Implanter la tarification volumétrique résidentielle, commerciale et industrielle** : L'adoption de compteurs d'eau, d'abord sur une base volontaire, permettrait d'introduire une tarification volumétrique. Cette mesure d'écofiscalité incitative contribuerait à réduire la consommation d'eau, ce qui entraînerait une diminution du volume des eaux usées, et ferait donc augmenter leur concentration. Ce changement favoriserait un traitement plus efficace des eaux usées, amenant de nombreux bénéfices environnementaux et opérationnels.
3. **Augmenter les taxes sur l'eau et cibler les pollueurs** : Pour assurer un financement durable, il serait pertinent d'ajuster à la hausse les taxes liées à l'eau, généralement intégrées à la taxe foncière, en fonction des vrais coûts encourus par les municipalités. En parallèle, une tarification spécifique aux industries polluantes pourrait être instaurée, les incitant à investir dans des technologies plus propres, ce qui réduirait leur impact environnemental.
4. **Réduire les contaminants à la source** : La réduction de la présence des CNNN doit être abordée directement à la source, en collaborant avec les secteurs industriels et commerciaux. Cela pourrait inclure des incitatifs financiers pour l'utilisation de produits moins nocifs et des campagnes de sensibilisation pour les entreprises et les citoyens.
5. **Communiquer de manière transparente** : Sensibiliser la population au coût réel des infrastructures en eau, comme cela a été fait pour la gestion des matières résiduelles, serait pertinent. Une compréhension claire des enjeux financiers a le potentiel d'encourager une acceptabilité sociale des ajustements tarifaires.
6. **Créer des fonds de réserve municipaux** : Chaque municipalité ou regroupement de municipalités devrait constituer un fonds consacré à l'entretien et au renouvellement de ses infrastructures alimenté par les revenus générés par la tarification (Réseau Environnement, 2025).

Les avantages de ces initiatives

En adoptant ces mesures, le Québec pourrait :

- renforcer la capacité des municipalités à intégrer des technologies et pratiques innovantes;
- réduire efficacement les quantités de CNNN dans les eaux usées, même en l'absence d'une réglementation spécifique aux CNNN;
- optimiser l'utilisation des ressources financières publiques pour maximiser les retombées environnementales.

Recommandations

Les membres de la Table de consultation scientifique sur les CNNN dans les eaux usées municipales formulent les recommandations suivantes à l'intention du gouvernement. Il est important de souligner que les recommandations présentées dans ce rapport ne reflètent pas nécessairement la position officielle des organisations représentées, ni celle du MELCCFP. Elles ont été élaborées à la suite des échanges menés au sein de la Table et résultent d'un processus de concertation entre ses membres.

Interventions en amont des stations d'épuration

1. **Mettre en place un cadre réglementaire visant à interdire ou à restreindre l'usage de certains CNNN, en particulier les SPFA**, dans les produits commerciaux et les usages industriels, dans le but de favoriser l'innovation et l'adoption de solutions plus durables. Ce cadre pourrait s'inspirer des meilleures pratiques observées à l'échelle internationale, avec **un calendrier d'interdiction progressif ciblant prioritairement les usages non essentiels**. Afin d'assurer une meilleure transition, cette réglementation devrait être accompagnée de mesures financières incitatives permettant de soutenir les secteurs concernés.
2. **Établir une réglementation provinciale uniforme pour les rejets d'eaux usées non domestiques au réseau d'égout** afin de prévenir les iniquités entre municipalités, de réduire les risques de contamination des ressources hydriques et de favoriser une gestion cohérente des contaminants. Si une réglementation québécoise n'est pas mise en place, **des mesures d'écoconditionnalité pourraient l'être** en liant l'accès aux subventions gouvernementales à l'adoption de normes harmonisées sur la base d'un modèle de règlement proposé par le MELCCFP. **Cette recommandation implique d'encourager le prétraitement industriel** en imposant des exigences claires pour les industries, et en appliquant le principe du pollueur-payeur pour les entreprises sans prétraitement, notamment par des redevances environnementales.
3. **Renforcer la communication entre les secteurs de la santé et de l'environnement**, notamment en ce qui concerne l'impact des résidus de médicaments sur les écosystèmes aquatiques. Cette recommandation pourrait se traduire par des campagnes de sensibilisation et des formations ciblées destinées aux médecins, pharmaciens, vétérinaires et autres acteurs du secteur de la santé. Par ailleurs, **il est essentiel de sensibiliser le public à la gestion responsable des médicaments inutilisés ou périmés. Le renforcement des systèmes de collecte, en les rendant plus accessibles et visibles**, pourrait contribuer à limiter le rejet de médicaments dans l'environnement.
4. **Encourager les interventions visant les réseaux d'égout** pour réduire les volumes d'eaux parasites et, incidemment, les rejets d'eaux usées non traitées ainsi que les coûts de traitement, notamment les coûts de traitement des CNNN.
 - Installer des équipements de surveillance pour identifier les zones où les eaux parasites sont les plus problématiques afin de réduire les volumes d'eau à traiter.
 - Investir de manière soutenue dans la maintenance des réseaux et l'intégration de technologies de pointe pour améliorer leur performance et leur durabilité.
 - Développer des formations à l'intention des élus municipaux, des gestionnaires, des techniciens et des ingénieurs pour renforcer l'acceptabilité des pratiques de pointe en gestion des infrastructures et soutenir leur mise en œuvre.

- Dans le cas des réseaux unitaires, optimiser leur utilisation grâce, par exemple, à des bassins de rétention, à des infrastructures vertes et à un contrôle dynamique des ouvrages de surverse.

Interventions aux stations

5. **Évaluer les performances d'enlèvement des CNNN dans les stations d'épuration des eaux usées existantes**, et ce, dans les conditions du Québec (eaux froides et diluées), afin d'évaluer et d'exploiter leur potentiel d'optimisation.
6. **Planifier un resserrement des normes de rejet de matières en suspension (MES)** pour maximiser les performances des procédés de séparation solide-liquide existants ou pour stimuler l'amélioration ou la substitution de procédés dont les performances ne sont pas suffisantes. Un tel resserrement permettrait de profiter au maximum de l'enlèvement des CNNN adsorbés sur les MES.
7. **Réévaluer les besoins de mise aux normes des stations de type physicochimique** afin que des traitements biologiques visant minimalement l'enlèvement de la matière organique soient mis en place partout au Québec. La mise en place de tels traitements permettrait de profiter des avantages concomitants de l'enlèvement de la matière organique et de l'enlèvement des CNNN biodégradables et solubles.
8. **Envisager la mise en place de procédés permettant la nitrification** dans les stations qui doivent installer un traitement biologique dans le cadre de la mise aux normes du ROMAEU (échéance : 2030), ainsi que dans les stations biologiques existantes où une amélioration de l'enlèvement des CNNN est souhaitée. La mise en œuvre de cette recommandation est aussi préalable à l'ajout de traitements avancés (recommandation 9) pour assurer leur efficacité à des coûts en capital et d'exploitation raisonnables.
 - Bien qu'elle ne soit pas nécessairement un préalable à l'implantation de traitements avancés, **une étape de prédénitrification devrait aussi être envisagée lorsqu'une nitrification est envisagée dans le cadre d'un projet de mise aux normes**. Cette recommandation est basée sur les avantages notables que la prédénitrification présente en lien avec l'exploitation des stations (récupération d'alcalinité, diminution des besoins d'aération, meilleur contrôle de la décantabilité des boues). Étant une étape qui s'intercale entre le traitement primaire et le traitement biologique en conditions aérobies, l'étape de prédénitrification devrait être prévue en même temps que l'ajout d'un traitement biologique avec nitrification dans le cadre des projets de mise aux normes de stations actuellement sans traitement biologique.
9. **Inclure l'ajout de traitements avancés dans la planification à moyen et long terme de l'amélioration des stations où des gains en matière d'enlèvement des CNNN sont recherchés**.
 - Favoriser et faciliter l'utilisation de technologies matures comme l'ozonation et l'adsorption sur charbon actif en poudre (CAP) ou en grains (CAG).
 - S'assurer que les technologies envisagées sont adaptées aux spécificités québécoises comme les températures froides et les eaux diluées, particulièrement en période de fonte des neiges.

- Prévoir l'espace requis, le profil hydraulique et l'énergie nécessaire (entrée électrique) pour l'éventuelle implantation de traitements avancés, et ce, dès la mise aux normes du ROMAEU. Cette recommandation a pour but d'éviter des coûts supplémentaires importants dans le futur.
10. **Déterminer, à l'aide d'un outil comme une grille d'analyse multicritères, des indicateurs de performance pour l'enlèvement des CNNN** comme des taux d'enlèvement de composés répondant aux différents traitements, ainsi que les niveaux visés pour ceux-ci.

Recommandations générales

11. **Développer et implanter une grille d'analyse multicritères pour prioriser les CNNN et les stations d'épuration nécessitant une intervention.** L'outil devrait intégrer des critères tels que les impacts sur l'environnement et la santé humaine, les charges de contaminants, la capacité des stations, la sensibilité des milieux récepteurs (en tenant compte des effets cumulatifs à l'échelle des bassins versants) et la proximité des sources d'eau potable. L'approche devrait permettre d'orienter une planification ciblée des actions, en tenant compte des possibilités de réduction à la source et d'améliorations technologiques.
12. **Moderniser le financement des infrastructures en eau** en adoptant des approches novatrices de financement telles que la tarification volumétrique, l'ajustement des taxes foncières sur l'eau, et des redevances ciblées pour les industries polluantes de manière à assurer une meilleure cohérence entre l'utilisation des ressources hydriques et les investissements nécessaires à leur gestion durable. Les municipalités devraient être essentiellement responsables de l'entretien courant et du renouvellement de leurs actifs, notamment par la mise en place de fonds de réserve. Elles devraient aussi sensibiliser la population au coût réel des services d'eau. Toutefois, une participation soutenue du gouvernement reste nécessaire, notamment par l'octroi de subventions ciblées pour les projets de mise aux normes et les initiatives structurantes visant la réduction de la présence de contaminants dans les eaux usées. Cette responsabilité devrait être partagée entre les différents paliers gouvernementaux puisqu'une amélioration des stations d'épuration bénéficie à l'ensemble des citoyens qui vivent en aval des points de rejet.

Références

- Abegglen C. et Siegrist H. (2012). *Micropolluants dans les eaux usées urbaines. Etape de traitement supplémentaire dans les stations d'épuration*. Office fédéral de l'environnement, Confédération Suisse, Berne, Connaissance de l'environnement n° 1214, 87 p. Récupéré depuis : micropoll.ch/wp-content/uploads/2020/07/2012_BAFU_ZB_Micropolluants-dans-les-eaux-u_f.pdf
- Abi Farraj, S., Lapointe, M., Kurusu, R. S., Liu, Z., Barbeau, B., et Tufenkji, N. (2024). Targeting nanoplastic and microplastic removal in treated wastewater with a simple indicator. *Nature Water*, 2(1), 72-83. doi : <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00177-3>
- Abourich, M., Bellamy, A., Ajji, A., et Claveau-Mallet, D. (2024). Washing machine filters to mitigate microplastics release: citizen science study to estimate microfibers capture potential and assess their social acceptability. *Environmental Challenges*, 16, 100984. doi : <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100984>
- Allison T, Ward BD, Durance I, et Harbottle M. (2025). Predicting flushed wet wipe emissions into rivers. *Water research*, 1;268(Pt B):122733. doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122733>
- Alves, R.N., Maulvault, A.L., Barbosa, V.L., Cunha, S., Kwadijk, C.J., Álvarez-Muñoz, D., Rodríguez-Mozaz, S., Aznar-Alemany, O., Eljarrat, E., Barceló, D., Fernandez-Tejedor, D., Fernandez-Tejedor, M., Tediosi, A. et Marques, A. (2017). Preliminary assessment on the bioaccessibility of contaminants of emerging concern in raw and cooked seafood. *Food and Chemical Toxicology*, 104, pp. 69-78. doi : <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.01.029>
- Amir, S., Shah, S. T. A., Mamoulakis, C., Docea, A.O., Kalantzi, O.– I., Zachariou, A., Calina, D., Carvalho, F., Sofikitis, N., Makrigiannakis, A., et Tsatsakis, A. (2021). Endocrine disruptors acting on estrogen and androgen pathways cause reproductive disorders through multiple mechanisms: A review. *International Journal of. Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1464. doi : <https://doi.org/10.3390/ijerph18041464>
- An, X. L., Su, J. Q., Li, B., Ouyang, W. Y., Zhao, Y., Chen, Q. L., Cui, L., Chen, H., Gillings, M. R., Zhang, T., et Zhu, Y. G. (2018). Tracking antibiotic resistome during wastewater treatment using high throughput quantitative PCR. *Environ Int*, 117, 146-153. doi : <http://doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.011>
- Anastas, P. T. et Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press: Oxford, 152 p.
- Antunes, E., Vuppalladiyam, A.K., Sarmah, A.K., Varsha, S.S.V., Pant, K.K., Tiwari, B. et Pandey, A. (2021). Chapter Three - Application of biochar for emerging contaminant mitigation. *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*. Ajit K. Sarmah, 7, pp. 65-91. doi : <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2021.08.003>
- Arlos, M.J., Arnold, V.I., Bumagat, J.S., Zhou, J., Cereno, K.C., Deas, A., Dai, K., Ruecker, N.J. et Munkittrick, K. R. (2023). Combining chemical, bioanalytical and predictive tools to assess persistence, seasonality, and sporadic releases of organic micropollutants within the urban water cycle. *Water Research*, 244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120454>

- Athey, S. (2022). *Microplastics and Other Anthropogenic Contaminants: From Source to Sink in the Canadian Environment* [Thèse de doctorat, University of Toronto]. TSpace. Récupéré depuis : <https://utoronto.scholaris.ca/items/4fe41e02-41ab-4088-8767-0c399605cf30>
- Baldwin, W. S., Davis, T. T. et Eccles, et J. A. (2023). *Per- and Polyfluoroalkyl Substances (SPFA) and Their Toxicology as Evidenced Through Disease and Biomarkers*. Dans : Patel, V.B., Preedy, V.R., Rajendram, R. (eds) *Biomarkers in Toxicology. Biomarkers in Disease: Methods, Discoveries and Applications*. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07392-2_67
- Batucan, N. S. P., Tremblay, L. A., Northcott, G. L. et Matthaei, C. D. (2022). Medicating the environment? A critical review on the risks of carbamazepine, diclofenac and ibuprofen to aquatic organisms. *Environmental Advances*, 7, 100164. doi : <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100164>
- Berendonk, T. U., Manaia, C. M., Merlin, C., Fatta-Kassinos, D., Cytryn, E., Walsh, F., Bürgmann, H., Sørum, H., Norström, M., Pons, M.-N., Kreuzinger, N., Huovinen, P., Stefani, S., Schwartz, T., Kisand, V., Baquero, F., et Martinez, J. L. (2015). Tackling antibiotic resistance: the environmental framework. *Nature Reviews Microbiology*, 13(5), 310-317. doi : 10.1038/nrmicro3439
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2025). *Lancement de la consultation publique pour la révision de la norme BNQ/0413-400 Amendements de sols : Biosolides*. <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/lancement-de-la-consultation-publique-pour-la-revision-de-la-norme-bnq-0413-400-amendements-de-sols-biosolides-62251> (consulté le 6 avril 2025).
- Boucher, J. et Friot D. (2020). *Microplastiques primaires dans les océans : Évaluation mondiale des sources*. Gland, Suisse : UICN. 44 p. Récupéré depuis : <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2017-002-Fr.pdf>
- Branco, V., Aschner, M. et Carvalho, C. (2021). Neurotoxicity of mercury: An old issue with contemporary significance. *Advances in Neurotoxicology*, 5, 239-262. doi : <https://doi.org/10.1016/bs.ant.2021.01.001>
- Brodin, T., Bertram, M. G., Arnold, K. E., Boxall, A. B. A., Brooks, B. W., Cervený, D., Jörg, M., Kidd, K. A., Lertxundi, U., Martin, J. M., May, L. T., McCallum, E. S., Michelangeli, M., Tyler, C. R., Wong, B. B. M., Kümmerer, K., et Orive, G. (2024). The urgent need for designing greener drugs. *Nature Sustainability*, 7(8), 949-951. doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01374-y>
- Bürgmann, H., Frigon, D., H Gaze, W., M Manaia, C., Pruden, A., Singer, A. C., F Smets, B., et Zhang, T. (2018). Water and sanitation: an essential battlefield in the war on antimicrobial resistance. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(9). doi : <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy101>
- California Assembly. (2022). *AB-1817 Product safety: textile articles: perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. California Legislature. https://leginfo.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill_id=202120220AB1817 (consulté le 4 février 2026)
- Canton de Vaud. (2021). *Micropolluants dans les stations d'épuration vandoises*, 84 p. Récupéré depuis : vd.ch/fileadmin/user_upload/accueil/fichiers_pdf/2021_juillet_actus/Rapport-micropolluants-STEP-final-pages-individuelles.pdf
- Carnevale Miino, M., Galafassi, S., Zullo, R., Torretta, V. et Rada, E. C. (2024). Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the

- environment. *Science of The Total Environment*, 930, 172675.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172675>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2024). *Understanding water resistance in water*.
<https://www.cdc.gov/one-health/php/stories/understanding-antibiotic-resistance-in-water.html#:~:text=Antibiotic%2Dresistant%20pathogens%20and%20their,resistant%20pathogens%20and%20their%20genes> (consulté le 31 mars 2025).
- Chapman, P. M., Wang, F., et Caeiro, S. S. (2013). Assessing and managing sediment contamination in transitional waters. *Environment International*, 55, 71-91.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.02.009>
- Conthe, M., Lycus, P., Arntzen, M.Ø., Ramos da Silva, A., Frostegård, Å., Bakken, L.R., Kleerebezem, R. et van Loosdrecht, M.C.M. (2019). Denitrification as an N₂O sink. *Water Research*, 151, 381-387.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.087>
- Cook, S. M., VanDuinen, B. J., Love, N. G., et Skerlos, S. J. (2012). Life cycle comparison of environmental emissions from three disposal options for unused pharmaceuticals. *Environmental science & technology*, 46(10), 5535-5541. doi : <https://doi.org/10.1021/es203987b>
- Czekalski, N., Berthold, T., Caucci, S., Egli, A., et Bürgmann, H. (2012). Increased Levels of Multiresistant Bacteria and Resistance Genes after Wastewater Treatment and Their Dissemination into Lake Geneva, Switzerland. *Frontiers in Microbiology, Volume 3 - 2012*.
doi : <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00106>
- Daughton. C. G. (2010). *Drugs and the environment: stewardship & sustainability*. Environmental Sciences Division, US EPA, Las Vegas, Nevada, 201 p.
- De la Parra-Guerra, A. C., et Acevedo-Barrios, R. (2023). Studies of Endocrine Disruptors: Nonylphenol and Isomers in Biological Models. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(7), 1439-1450.
doi : 10.1002/etc.5633
- Dórea, J.G. (2008). Persistent, bioaccumulative and toxic substances in fish: Human health considerations. *Science of The Total Environment*, 400(1–3), 93-114.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.017>
- Duarte, A.C., Rodrigues, S., Afonso, A., Nogueira, A., et Coutinho, P. (2022). Antibiotic Resistance in the Drinking Water: Old and New Strategies to Remove Antibiotics, Resistant Bacteria, and Resistance Genes. *Pharmaceuticals (Basel)*, 15(4), 393. doi : <https://doi.org/10.3390/ph15040393>
- Dumoulin, V. et Saint-Germain, S. (2023). *La pollution par les micro-plastiques d'origine textile* (Rapport n° 014908-01). Inspection générale de l'environnement et du développement durable, 72 p. Récupéré depuis : <https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/la-pollution-par-les-micro-plastiques-d-origine-a3863.html>
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2023). *Grâce au soutien du gouvernement du Canada, des entreprises canadiennes innovent pour lutter contre les microplastiques provenant de l'usure des pneus*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2023/04/grace-au-soutien-du-gouvernement-du-canada-des-entreprises->

[canadiennes-innovent-pour-lutter-contre-les-microplastiques-provenant-de-lusure-des-pneus.html](#)
(consulté le 31 mars 2025).

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2025). *Approche de gestion des risques pour les substances perfluoroalkyliques et polyfluoroalkyliques (SPFA), excluant les fluoropolymères*. Récupéré depuis : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/evaluation-substances-existantes/approche-gestion-risques-substances-perfluoroalkyliques-polyfluoroalkyliques.html#toc9>

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). (2025). *Substances perfluoroalkyliques et polyfluoroalkyliques (SPFA) et votre santé*. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-et-substances-chimiques/substances-perfluoroalkyliques-polyfluoroalkyliques.html> (consulté le 3 avril 2025).

Erdle, L.M., Nouri, P.D., Sweetnam, D. et Rochman, C.M. (2021). Washing machine filters reduce microfiber emissions: Evidence from a community-scale pilot in Parry Sound, Ontario. *Frontiers in Marine Science*, 8, 777865. doi : <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.777865>

European Chemicals Agency (ECHA). (2025). *Comprendre REACH*. <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach> (consulté le 8 mai 2025).

European Medicines Agency (EMA). (2024). *Guideline on the environmental risk assessment of medicinal products for human use*, 64 p. Récupéré depuis : https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/guideline-environmental-risk-assessment-medicinal-products-human-use-revision-1_en.pdf

Fédération internationale pharmaceutique (FIP). (2023). *Déclaration de politique générale du FIP : Durabilité environnementale dans la pharmacie*, 12 p. Récupéré depuis : <https://www.fip.org/file/6151>

Fenton, S. E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J. C., Lau, C., Ng, C., Smith, J. S., et (2021). Per- and Polyfluoroalkyl Substance Toxicity and Human Health Review: Current State of Knowledge and Strategies for Informing Future Research. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 606-630. doi : <https://doi.org/10.1002/etc.4890>

Fernandez-Fontaina, E., Omil, F., Lema, J.M., et Carballa, M. (2012). Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants. *Water Research*, 46(16), 5434-5444. doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.037>

Fruh, D., S. Stoll, et Haase P. (2012). Physicochemical and morphological degradation of stream and river habitats increases invasion risk. *Biological Invasions* 14:2243–2253, doi : <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0226-9>

Gewurtz, S. B., Auyeung, A. S., Teslic, S., et Smyth, S. A. (2025). Pharmaceuticals and personal care products in Canadian municipal wastewater and biosolids: occurrence, fate, and time trends 2010-2013 to 2022. *Environmental Science and pollution research*, 32(9), 5022-5039. doi : <http://doi.org/10.1007/s11356-025-36007-0>

Gómez-Regalado, M. d. C., Martín, J., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E., et Zafra-Gómez, A. (2023). Bioaccumulation/bioconcentration of pharmaceutical active compounds in aquatic organisms:

- Assessment and factors database. *Science of The Total Environment*, 861, 160638.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160638>
- Grandclément, C., Seyssiecq, I., Piram, A., Wong-Wah-Chung, P., Vanot, G., Tiliacos, N., Roche, N. et Doumenq, P. (2017). From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review. *Water Research*, 111, 297-317.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.005>
- Havel, J.E., Kovalenko, K.E., Thomaz, S.M., Amalfitano, S., et Kats, L. B. (2015). Aquatic invasive species: challenges for the future. *Hydrobiologia*, 750(1), 147–170. doi : <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2166-0>
- Hengstler, J. G., Foth, H., Gebel, T., Kramer, P. J., Lilienblum, W., Schweinfurth, H., et Gundert-Remy, U. (2011). Critical evaluation of key evidence on the human health hazards of exposure to bisphenol A. *Critical Reviews in Toxicology*, 41(4), 263–291. doi : <https://doi.org/10.3109/10408444.2011.558487>
- Hu T, Shen M, et Tang W. (2022). Wet wipes and disposable surgical masks are becoming new sources of fiber microplastic pollution during global COVID-19. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 284-292. doi : <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17408-3>
- Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS). (2015). *Urban water challenges in the Americas – A perspectives from the academies of sciences*, 620 p. Récupéré depuis : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246414>
- Isobe, A., Azuma, T., Cordova, M. R., Cózar, A., Galgani, F., Hagita, R., Kanhai, L. D., Imai, K., Iwasaki, S., Kako, S. i., Kozlovskii, N., Lusher, A. L., Mason, S. A., Michida, Y., Mituhasi, T., Morii, Y., Mukai, T., Popova, A., Shimizu, K., Tokai, T., Uchida, K., Yagi, M., & Zhang, W. (2021). A multilevel dataset of microplastic abundance in the world's upper ocean and the Laurentian Great Lakes. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), 16. doi : <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00013-z>
- Johannessen, C., & Metcalfe, C. D. (2022). The occurrence of tire wear compounds and their transformation products in municipal wastewater and drinking water treatment plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(10), 731. Doi : <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10450-9>
- Kahane-Rapport, S. R., Czapanskiy, M. F., Fahlbusch, J. A., Friedlaender, A. S., Calambokidis, J., Hazen, E. L., Goldbogen, J. A., & Savoca, M. S. (2022). Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nature Communications*, 13(1), 6327. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>
- Karkman, A., Do, T. T., Walsh, F., & Virta, M. P. J. (2018). Antibiotic-Resistance Genes in Waste Water. *Trends Microbiol*, 26(3), 220-228. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2017.09.005>
- Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., et Guwy, A. J. (2009). 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 Research*, 43(2), 363-380. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.047>
- Katsanevakis S., Wallentinus I., Zenetos A., Leppäkoski E., Cinar M., Oztürk B, Grabowski M, Golani D, et Cardoso A. (2014). Impacts of invasive alien marine species on ecosystem services and biodiversity: a pan-European review. *Aquatic invasions*, 9(4), 391-423, doi: <https://doi.org/10.3391/ai.2014.9.4.01>

- Khasawneh, O. F. S., & Palaniandy, P. (2021). Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 532-556. doi : <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.045>
- Kidd, K. A., Blanchfield, P. J., Mills, K. H., Palace, V. P., Evans, R. E., Lazorchak, J. M. et Flick, R. W. (2007). Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(21), 8897-8901. doi : [10.1073/pnas.0609568104](https://doi.org/10.1073/pnas.0609568104)
- Kolarova, N., et Napiórkowski, P. (2021). Trace elements in aquatic environment. Origin, distribution, assessment and toxicity effect for the aquatic biota. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(4), 655-668, doi : <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.02.002>
- Kreider, M. L., Unice, K. M., et Panko, J. M. (2019). Human health risk assessment of Tire and Road Wear Particles (TRWP) in air. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(10), 2567–2585. doi : <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1674633>
- Kümmerer, K. (2007). Sustainable from the very beginning: rational design of molecules by life cycle engineering as an important approach for green pharmacy and green chemistry. *Green Chemistry*, 9(8), 899-907. doi : 10.1039/B618298B
- Langlois, V., To, T.A., Larocque, E., Gigault, J. et Lavoie, R. (2024). Surface Water Microplastics in the St. Lawrence River and Estuary in Canada. *PLoS One*, 20(4), e0315739. doi : <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4797246>
- Leder, C., Suk, M., Lorenz, S., Rastogi, T., Peifer, C., Kietzmann, M., Jonas, D., Buck, M., Pahl, A., et Kümmerer, K. (2021). Reducing Environmental Pollution by Antibiotics through Design for Environmental Degradation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(28), 9358-9368, doi : <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02243>
- Maine State Legislature. (2021). *An Act To Stop Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances Pollution*, H.P. 1113 – L.D. 1503, Public Law 2021, Chapter 477. Maine Legislature. https://www.mainelegislature.org/legis/bills/display_ps.asp?PID=1456&Id=1503&snum=130
- Mao, D., Yu, S., Rysz, M., Luo, Y., Yang, F., Li, F., Hou, J., Mu, Q., et Alvarez, P. J. (2015). Prevalence and proliferation of antibiotic resistance genes in two municipal wastewater treatment plants. *Water Research*, 85, 458-466. doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.010>
- Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., de Alencastro, L.F., Abegglen, C., Thonney, D., Chèvre, N., Schärer, M. et Barry, D. A. (2013). Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of The Total Environment*, 461-462, 480-498. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.034>
- Margot, J., Rossi, L., Barry, D.A. et Holliger, C. (2015). A review of the fate of micropollutants in wastewater treatment plants. *WIREs Water*, 2(5), 457-487. doi : <https://doi.org/10.1002/wat2.1090>
- Meador, J. P., Yeh, A., Young, G., Gallagher, E. P. (2016). Contaminants of emerging concern in a large temperate estuary. *Environmental Pollution*, 213, 254-267, doi : <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.088>

- Metcalf & Eddy-AECOM. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5^e éd.). McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2018 p.
- Metro Vancouver. (2019). *Residential Water Metering in Metro Vancouver : Best Practices Guide for Local Governments*, 52 p. Récupéré depuis : <https://metrovancover.org/services/water/Documents/residential-water-metering-in-metro-vancouver-best-practices-guide.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 2015. *Guide de référence – L'écoconditionnalité dans les programmes d'aide financière gouvernementaux*, 23 p. Récupéré depuis : https://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/ecoconditionnalite/guide-reference-prog-finance.pdf
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2022. *Première publication du forum d'action sur l'eau : Actions concertées sur l'eau 2022*, 48 p. Récupéré depuis : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/forum-action-eau/actions-concertees-eau-2022.pdf>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2023a). *Guide de gestion des débordements et des dérivations d'eaux usées*, Tome II – Établir un portrait des débordements et des dérivations, 164 p. Récupéré depuis : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/ouvrages-municipaux/debordements/guide/guide-gestion-debordements-tome2.pdf>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2023b). *Guide de gestion des débordements et des dérivations d'eaux usées*, Tome III – Mesures de gestion des débordements et des dérivations, 240 p. Récupéré depuis : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/ouvrages-municipaux/debordements/guide/guide-gestion-debordements-tome3.pdf>
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2023c). *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique – 6. Traitement par infiltration des eaux – Préliminaire*, 78 p. Récupéré depuis : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eaux-usees/domestique/6-infiltration.pdf>
- Monira, S., R. Roychand, F. I. Hai, M. Bhuiyan, et B. K. Pramanik. (2025). Microplastic fragmentation into nanoplastics by water shear forces during wastewater treatment: Mechanical insights and theoretical analysis. *Environmental Pollution*, 364, 125310. doi : <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125310>
- Moon, M. K. (2019). Concern about the Safety of Bisphenol A Substitutes. *Diabetes & Metabolism Journal*, 43(1), 46-48. doi : <https://doi.org/10.4093/dmj.2019.0027>
- New York State Legislature. (2022). *Environmental Conservation Law § 37-0121: Prohibition against the use of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in apparel and outdoor apparel for severe wet conditions*. New York State Senate. <https://www.nysenate.gov/legislation/laws/ENV/37-0121>
- Nilsen E, Smalling K. L., Ahrens L., Gros M., Miglioranza K. S. B., Picó Y., et Schoenfuss H. L. (2018). Critical review: Grand challenges in assessing the adverse effects of contaminants of emerging concern on aquatic food webs. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(1), 46-60. doi : <http://doi.org/10.1002/etc.4290>

- Okoffo, E. D., O'Brien, S., O'Brien, J. W., Tschärke, B. J., Rauert, C., Rødland, E. S., Ribeiro, F., Burrows, S. D., Toapanta, T., Mueller, J. F., & Thomas, K. V. (2022). Does size matter? Quantification of plastics associated with size fractionated biosolids. *Science of The Total Environment*, 811, 152382. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152382>
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2023). *Endocrine Disrupting Chemicals in Freshwater: Monitoring and Regulating Water Quality*, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, 147 p. Récupéré depuis : <https://doi.org/10.1787/5696d960-en>
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2023). *Une seule santé*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/one-health> (consulté le 4 février 2026).
- Osuoha, J. O. Anyanwu, B. O., et Ejileugha, C. (2023). Pharmaceuticals and personal care products as emerging contaminants: Need for combined treatment strategy. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100206. doi : <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100206>
- Parlement européen. (2024). *Nouvelles règles de l'UE pour améliorer le traitement et la réutilisation des eaux urbaines résiduaires*. <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20240408IPR20307/nouvelles-regles-de-l-ue-pour-ameliorer-le-traitement-des-eaux-urbaines-usees> (consulté le 13 janvier 2025).
- Pazda, M., Kumirska, J., Stepnowski, P., et Mulkiewicz, E. (2019). Antibiotic resistance genes identified in wastewater treatment plant systems – A review. *Science of The Total Environment*, 697, 134023. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134023>
- Phan, H. V., Hai, F. I., Zhang, R., Kang, J., Price, W. E., et Nghiem, L. D. (2016). Bacterial community dynamics in an anoxic-aerobic membrane bioreactor – Impact on nutrient and trace organic contaminant removal. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 109, 61-72. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.01.002>
- Puhlmann, N., Mols, R., Olsson, O., Slootweg, C., et Kümmerer, K. 2021. Towards the design of active pharmaceutical ingredients mineralizing readily in the environment. *Green chemistry*, 23, 5006-5023, doi : <https://doi.org/10.1039/D1GC01048D>
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T. J., Kidd, K. A., MacCormack, T. J., Olden, J. D., Ormerod, S. J., Smol, J. P., Taylor, W. W., Tockner, K., Vermaire, J. C., Dudgeon, D. and Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 94, 849-873. doi : <https://doi.org/10.1111/brv.12480>
- Reinling, J. Houde, M. et Verreault, J. (2017). Environmental exposure to a major urban wastewater effluent: Effects on the energy metabolism of northern pike. *Aquatic Toxicology*, 191, 131-140. doi : <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.08.003>
- République française. (2025). *Loi n° 2025-188 du 27 février 2025 visant à protéger la population des risques liés aux substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées*. Journal officiel de la République française. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000047123456>
- Réseau canadien de l'eau (RCE). (2018). *Défis et possibilités du Canada concernant la gestion des contaminants dans les eaux usées*. Rapport du Comité national d'experts, 84 p. Récupéré depuis :

<https://cwn-rce.ca/fr/report/defis-et-possibilites-du-canada-concernant-la-gestion-des-contaminants-dans-les-eaux-usees/>

Réseau Environnement. (2025). *Mémoire – Financement des services d’eau*, 27 p. Récupéré depuis : https://www.reseau-environnement.com/web/content/33361?unique=6dd08a5e1670b5132da60a72faf6190f4269754f&&access_token=54cbf0ad-ebd0-4727-bc87-398b2b40a89b

Rilstone, V., Vignale, L., Craddock, J., Cushing, A., Filion, Y., et Champagne, P. (2021). The role of antibiotics and heavy metals on the development, promotion, and dissemination of antimicrobial resistance in drinking water biofilms. *Chemosphere*, 282, 131048.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131048>

Rizzo, L., Manaia, C., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C., Ploy, M. C., Michael, I., et Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: A review. *Science of The Total Environment*, 447, 345-360.
doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.032>

Safer States. (2024). *Bill tracker for SPFA*. https://www.saferstates.org/bill-tracker/?status=Adopted&year=2020:2025&safer_solutions=All&states=All&toxic_chemicals=SPFA (consulté le 3 avril 2025).

Saifur S., et Gardner C. M. (2021). Loading, transport, and treatment of emerging chemical and biological contaminants of concern in stormwater. *Water Science and Technology*, 83(12): 2863–2885,
doi : <https://doi.org/10.2166/wst.2021.187>

Saini, A., Okeme, J., Mark Parnis, J., McQueen, R. H., et Diamond, M. L. (2017). From air to clothing: characterizing the accumulation of semi-volatile organic compounds to fabrics in indoor environments. *Indoor Air*, 27(3), 631-641. doi : <https://doi.org/10.1111/ina.12328>

Sanderson, H. (2011). Presence and risk assessment of pharmaceuticals in surface water and drinking water. *Water Science and Technology*, 63(10), 2143-2148. doi : <https://doi.org/10.2166/wst.2011.341>

Sanganyado, E., et Gwenzi, W. (2019). Antibiotic resistance in drinking water systems: Occurrence, removal, and human health risks. *Science of the Total Environment*, 669, 785-797,
doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.162>

Santos, L. H., Gros, M., Rodriguez-Mozaz, S., Delerue-Matos, C., Pena, A., Barceló, D., et Montenegro, M. C. (2013). Contribution of hospital effluents to the load of pharmaceuticals in urban wastewaters: identification of ecologically relevant pharmaceuticals. *Science of the Total Environment*, 461-462, 302-316. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.077>

Schreder, E. D., et La Guardia M. J. (2014). Flame retardant transfers from U.S. households (dust and laundry wastewater) to the aquatic environment. *Environmental Science And Technology*, 48(19), 11515-11583. doi : <https://doi.org/10.1021/es502227h>

Scherer, L. D., Maynard, A., Dolinoy, D. C., Fagerlin, A., et Zikmund-Fisher, B. J. (2014). The psychology of ‘regrettable substitutions’: examining consumer judgements of Bisphenol A and its alternatives. *Health, Risk & Society*, 16(7–8), 649–666.
doi : <https://doi.org/10.1080/13698575.2014.969687>

- Scsukova, S., Rollerova, E., et Mlynarcikova, A.B. (2023). Impact of endocrine disrupting chemicals on onset and development of female reproductive disorders and hormone-related cancer. *Reproductive Biology*, 16(4), 243-254. doi : <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2016.09.001>
- Shruti VC, Pérez-Guevara F, et Kutralam-Muniasamy G. (2021). Wet wipes contribution to microfiber contamination under COVID-19 era: An important but overlooked problem. *Environmental challenges*, 5, 100267. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100267>
- Singh, G., et Sharma, S. (2024). Heavy metal contamination in fish: sources, mechanisms and consequences. *Aquatic Sciences*, 86(4), 107. doi : 10.1007/s00027-024-01121-7
- Standards Australia & Standards New Zealand (AS/NZS). (2022). AS/NZS 5328:2022 – *Flushable products*. <https://www.standards.govt.nz/shop/ASNZS-53282022> (consulté le 4 février 2026)
- Stockholm University Baltic Sea Centre. (2023). *The proposed new Urban Wastewater Treatment Directive – what happens now?*. <https://www.su.se/stockholm-university-baltic-sea-centre/news/the-proposed-new-urban-wastewater-treatment-directive-what-happens-now-1.686682> (consulté le 28 mars 2025).
- Strayer, D. L. (2010). Alien species in fresh waters: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future. *Freshwater Biology*, 55, 152–174, doi : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02380.x>
- Svahn, O., et Borg, S. (2024). Assessment of full-scale 4th treatment step for micro pollutant removal in Sweden: Sand and GAC filter combo. *Science of The Total Environment*, 906, 167424. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167424>
- Tabe, S., Pileggi, V., Nowierski, M., Kleywegt, S., Yang, P. (2016). Occurrence, removal, and environmental impacts of emerging contaminants detected in water and wastewater in Southern Ontario—Part I: occurrence and removal. *Water Practice and Technology*, 11(2): 298–314, doi : <https://doi.org/10.2166/wpt.2016.035>
- Thoene, M., Dzika, E., Gonkowski, S., Wojtkiewicz, J. (2020). Bisphenol S in Food Causes Hormonal and Obesogenic Effects Comparable to or Worse than Bisphenol A: A Literature Review. *Nutrients*, 12(2), 532. doi : <http://doi.org/10.3390/nu12020532>
- Tian Z., Zhao H., Peter K. T., Gonzalez M., Wetzel J., Wu C., Hu X., Prat J., Mudrock E., Hettinger R., Cortina A. E., Biswas R. G., Kock F. V. C., Soong R., Jenne A., Du B., Hou F., He H., Lundeen R., Gilbreath A., Sutton R., Scholz N. L., Davis J. W., Dodd M. C., Simpson A., McIntyre J. K., et Kolodziej E. P. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371(6525), 185-189. doi : <https://doi.org/10.1126/science.abd6951>
- Tixier, C., Singer, H. P., Oellers, S., et Müller, S. R. (2003). Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters. *Environmental Science & Technology*, 37(6), 1061-1068. doi : <http://doi.org/10.1021/es025834r>
- Tolls, J., Lehmann, M. P., et Sijm, D. T. (2000). Quantification of in vivo biotransformation of the anionic surfactant C12 - 2 - linear alkylbenzene sulfonate in fathead minnows. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(10), 2394-2400. doi : 10.1002/etc.5620191002

- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2022). *CompTox Chemicals Dashboard v2.5.1*. <https://comptox.epa.gov/dashboard/chemical-lists/PFASSTRUCT> (consulté le 6 janvier 2025).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2024). *6PPD-quinone*. <https://www.epa.gov/chemical-research/6ppd-quinone> (consulté le 31 mars 2025).
- U.S. Food and Drug Administration (USFDA). (2025). *Market Phase-Out of Grease-Proofing Substances Containing PFAS*. <https://www.fda.gov/food/process-contaminants-food/market-phase-out-grease-proofing-substances-containing-pfas> (consulté le 8 mai 2025).
- U. S. Tire Manufacturers Association (USTMA). (2025). *6PPD in Tire Manufacturing*. <https://www.ustires.org/6ppd-tire-manufacturing> (consulté le 1er avril 2025).
- Vaudreuil, M.-A., Munoz, G., Duy, S.V., et Sauvé, S. (2024). Tracking down pharmaceutical pollution in surface waters of the St. Lawrence River and its major tributaries. *Science of The Total Environment*, 912. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168680>
- Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA). (2024). *Carte des STEP avec étapes MP*. <https://micropoll.ch/fr/M%C3%A9diath%C3%A8que/carte-des-step-avec-etapes-mp-2/> (consulté le 13 janvier 2025).
- Vermont Legislature. (2024). *Act No. 131 (S.25): An act relating to regulating consumer products containing perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances or other chemicals*. Vermont General Assembly. <https://legislature.vermont.gov/bill/status/2024/S.25> (consulté le 4 février 2026)
- Vidaurre, R., Bramke, I., Puhlmann, N., Owen, S. F., Angst, D., Moermond, C., Venhuis, B., Lombardo, A., Kümmerer, K., Sikanen, T., Ryan, J., Häner, A., Janer, G., Roggo, S., et Perkins, A. N. (2024). Design of greener drugs: aligning parameters in pharmaceutical R&D and drivers for environmental impact. *Drug Discovery Today*, 29(7), 104022. doi : <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2024.104022>
- Wagner, T.V., Rempe, F., Hoek, M., Schuman, E., et Langenhoff, A. (2023). Key constructed wetland design features for maximized micropollutant removal from treated municipal wastewater: A literature study based on 16 indicator micropollutants. *Water Research*, 244, 120534. doi : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120534>
- Wang, F., Xiang, L., Sze-Yin Leung, K., Tiedje, J.M. et coll. (2024). Emerging contaminants: A One Health perspective. *The Innovation*, 5(4), 100612 doi : <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612>
- Xia, C.,Diamond, M. L., Peaslee, G. F., Peng, H., Blum, A., Wang, Z., Shalin, A., Whitehead, H. D., Green, M., Schwartz-Narbonne, H., Yang, D., Venier, M. (2022). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in North American School Uniforms. *Environmental Science & Technology*, 56(19), 13845-13857, doi : <http://doi.org/10.1021/acs.est.2c02111>